

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Харківський національний університет радіоелектроніки

ЛІНКОВА АННА МИХАЙЛІВНА

УДК 319.61.126

**КОМБІНОВАНИЙ МЕТОД ДВОЧАСТОТНОГО ЗОНДУВАННЯ
ДИСПЕРСНИХ СЕРЕДОВИЩ В АТМОСФЕРІ**

01.04.03 – радіофізика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2012

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова Національної академії наук України.

Науковий керівник доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Хлопов Григорій Іванович,
Інститут радіофізики та електроніки
ім. О.Я. Усикова НАН України, завідувач відділу
фізичних основ радіолокації

Офіційні опоненти доктор фізико-математичних наук, професор
Ніколаєнко Олександр Павлович,
Інститут радіофізики та електроніки
ім. О.Я. Усикова НАН України, старший науковий
співробітник відділу дистанційного зондування
Землі

доктор фізико-математичних наук, професор
Дробахін Олег Олегович,
Дніпропетровський національний університет імені
Олеса Гончара Міністерства освіти і науки, молоді
та спорту України, завідувач кафедри «Прикладної
і комп'ютерної радіофізики»

Захист відбудеться "10" жовтня 2012 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03 у Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України (61166, м. Харків, пр. Леніна, 14).

Автореферат розісланий "23" серпня 2012 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03



В.М. Безрук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дисертацію присвячено розв'язку задачі моніторингу дисперсних середовищ з рідкою (хмари, дощі) або твердою фазою (промислові викиди та ін.) в кліматології і метеорології, а також для вирішення практичних задач народного господарства.

З розвитком промисловості збільшується забрудненість атмосфери хімічними сполуками і важкими металами. Крім цього, багато країн, у тому числі й Україна, регулярно потерпають від сильних паводків, повеней і зсувів, які призводять до значних руйнувань і збитків, у зв'язку з чим у світі приділяється велика увага проблемі дистанційного зондування опадів. При цьому значний інтерес складає розробка радіофізичних методів дистанційного зондування дисперсних середовищ, що ґрунтуються на розсіянні електромагнітних хвиль діапазону НВЧ. Зокрема, методи зондування дощів з борту штучного супутника Землі активно розвивалися в рамках програми Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), що стартувала в 1997 р. як спільна місія NASA (National Aeronautics and Space Administration of USA) і JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency). Подальше продовження вказаної програми TRMM заплановано на 2013 р. в рамках Global Precipitation Measurement. Не менш важливим є дистанційне зондування атмосфери за допомогою радіофізичних засобів наземного базування, особливо в разі твердих аерозолів антропогенного походження.

До теперішнього часу широко використовуються одночастотні методи дистанційного зондування, проте потужність відбитих сигналів неоднозначно пов'язана з інтенсивністю опадів, якій можуть відповідати різні розподіли частинок за розмірами. Тому значний інтерес становить використання двочастотних методів зондування, які дозволяють визначати параметри розподілу частинок дисперсних середовищ за розмірами (мікроструктурні параметри) і, як наслідок, обчислювати їх інтегральні характеристики (концентрацію, інтенсивність, водність та ін.). Однак при використанні трипараметричних моделей розподілу частинок за розмірами, які найбільш адекватно описують властивості дисперсних середовищ, система рівнянь для відновлення мікроструктурних параметрів є не повністю визначеною. На сьогодні ця проблема вирішується через пошук додаткової інформації у вигляді кореляційних зв'язків між різними параметрами розподілу або фіксації одного з параметрів на підставі апріорних даних. Зокрема, становить інтерес комбінування даних дистанційних вимірювань з контактними даними, що є найбільш надійними. Однак розв'язок інверсної задачі залежить від типу використовуваних даних, що вимагає відповідного дослідження отриманих рішень і меж їх застосовності. Крім того, при відновленні характеристик дисперсних середовищ при малому ослабленні сигналів є область неоднозначності, що також обмежує можливості двочастотних методів зондування.

Тому актуальною є тема дисертаційних досліджень, які спрямовані на розв'язок задачі однозначного відновлення просторового профілю мікроструктурних параметрів дисперсних середовищ (профілювання) при

трипараметричній моделі розподілу частинок за розмірами та з урахуванням ослаблення сигналів різних частотних діапазонів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційні дослідження пов'язані з держбюджетною НДР «Дослідження та розробка активно-пасивних методів моніторингу навколишнього середовища» (2007-2011 рр.), Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України, № ДР 0107U001080 (виконавець), а також держбюджетною НДР «Синтез радіотехнічних та оптичних систем забезпечення безпеки польотів і руху судопотоків в повітряному просторі і акваторіях України» (2007-2011 рр.), Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», № ДР 0111U000015 (виконавець).

Мета і задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає в науковому обґрунтуванні й подальшому розвитку комбінованого методу двочастотного профілювання дисперсних середовищ для однозначного визначення їх мікроструктурних та інтегральних параметрів з урахуванням ослаблення сигналів.

Для досягнення зазначеної мети в роботі необхідно було розв'язати наступні задачі:

- розробити та дослідити комбінований двочастотний метод однозначного профілювання мікроструктурних параметрів дисперсних середовищ при трипараметричному законі розподілу частинок за розмірами з урахуванням ослаблення сигналів;

- дослідити можливості використання запропонованого комбінованого методу двочастотного зондування дисперсних середовищ з рідкою або твердою фазою, а також визначити рамки його застосовності;

- провести експериментальні дослідження запропонованого комбінованого двочастотного методу зондування дисперсних середовищ із твердою або рідкою фазою, виконати аналіз і зіставлення отриманих результатів з даними контактних вимірювань.

Об'єкт дослідження – процес розсіяння електромагнітної хвилі дисперсними середовищами.

Предмет дослідження – метод дистанційного зондування мікроструктурних параметрів дисперсних середовищ.

Методи дослідження. У роботі використані такі методи досліджень:

- теорія розсіяння електромагнітних хвиль дисперсними середовищами для розв'язку інверсних задач дистанційного зондування;

- статистична теорія розподілу випадкових величин для побудови алгоритмів двочастотного зондування дисперсних середовищ;

- методи цифрової обробки сигналів, розсіяних дисперсними середовищами та отриманих в процесі експериментального дослідження.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- дістало подальший розвиток двочастотне зондування рідких опадів шляхом розробки комбінованого методу, який відрізняється від існуючих використанням апріорі даних контактних вимірювань параметрів гамма-розподілу крапель дощу за розмірами від його інтенсивності, що вперше дозволило отримати замкнену

систему рівнянь для визначення мікроструктурних та інтегральних характеристик дощу;

- вперше запропоновано ітераційну схему розв'язку системи рівнянь двочастотного зондування рідких опадів на основі дослідженого комбінованого методу, яка, на відміну від існуючих, дозволяє здійснити однозначне профілювання мікроструктурних параметрів рідких опадів при трипараметричній моделі розподілу крапель за розмірами, а також із урахуванням ослаблення сигналів в опадах;

- вперше запропоновано та досліджено метод відновлення параметрів дисперсних середовищ з твердою фазою (ефективного радіусу частинок, їх концентрації та питомої маси), відмінною особливістю якого є те, що він базується на розв'язанні інверсної задачі двочастотного дистанційного зондування дисперсних середовищ у разі трипараметричної моделі розподілу частинок за розмірами.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що розроблений комбінований метод двочастотного зондування дисперсних середовищ дозволяє:

- визначати інтенсивність і кількість рідких опадів за допомогою існуючих радіолокаційних станцій (РЛС) гідрометеорологічних служб;
- підвищити безпеку руху авіаційного транспорту в складних метеоумовах;
- здійснити дистанційний моніторинг промислових викидів.

Результати дисертаційної роботи використані при виконанні НДР ДР № 0111U000015 (Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ»), про що свідчить відповідний акт впровадження.

Особистий внесок здобувача визначається наступним. У роботі [1] автор виконала числове моделювання характеристик розсіювання монодисперсних середовищ з твердою фазою і взяла участь в інтерпретації отриманих результатів. В роботах [2, 9] автор виконала числове моделювання двочастотного методу зондування параметрів полідисперсних середовищ з твердою фазою, розробила програмне забезпечення (ПЗ) для обробки результатів дистанційного зондування, взяла участь у проведенні експериментальних досліджень і провела обробку даних вимірювання параметрів полідисперсних середовищ з твердою фазою. В роботі [3] автор виконала числове моделювання двочастотного методу зондування параметрів полідисперсних середовищ з твердою фазою для широкого і вузького розподілу частинок за розмірами, розробила ПЗ для обробки результатів дистанційного зондування. В роботах [4, 10] автор виконала числове моделювання характеристик розсіювання монодисперсного середовища з рідкою фазою, розробила ПЗ для обробки результатів дистанційного зондування, взяла участь у проведенні експериментальних досліджень і провела обробку експериментальних даних вимірювання розмірів крапель води. В роботі [5] автором запропоновано метод виключення неоднозначності при відновленні параметрів рідких опадів в області малих інтенсивностей, а також метод профілювання мікроструктурних параметрів рідких опадів з урахуванням ослаблення сигналів у дощах, розроблено ПЗ та проведено числове моделювання. В роботах [7, 8] автор взяла участь у проведенні експериментальних досліджень і

виконала обробку експериментальних даних вимірювання параметрів рідких опадів, а також взяла участь в інтерпретації отриманих результатів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися на семінарах Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України «Поширення радіохвиль та дистанційне зондування» та 15 науково-технічних конференціях і симпозіумах, у тому числі: International Radar Symposium IRS 2009 р., Гамбург, Німеччина; Signal Processing Symposium SPS 2009, 2011 рр., Яхранка, Польща; Харківській конференції молодих вчених 2009 р.; International Radar Symposium IRS 2010, Вільнюс, Литва; European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology ERAD 2010 р., Сібіу, Румунія; науково-технічній конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії» TCSET 2010, 2012 р., Славське, Україна; Міжнародній Кримській конференції «НВЧ-техніка і телекомунікаційні технології» 2010, 2011 рр., Севастополь, Україна; Radar methods and systems workshop RMSW 2010 р., Київ, Україна; The 7th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves MSMW 2010 р.; International Radar Symposium 2011 р., Лейпциг, Німеччина; Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium MRRS 2011 р., Київ, Україна; European Microwave Week (Radar Conference) 2011 р., Манчестер, Великобританія.

Публікації. Основні результати наукових досліджень, отриманих в рамках дисертаційної роботи, опубліковано в 7 статтях у закордонних та вітчизняних фахових виданнях [1-7], а також у 17 матеріалах і тезах доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях і симпозіумах, серед яких [8-11].

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається із переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел. Її повний обсяг складає 168 сторінок. Дисертація містить 68 рисунків і 12 таблиць. Список використаних джерел на 16 сторінках нараховує 164 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наведено результати аналізу сучасних методів зондування дисперсних середовищ, вказано існуючі проблеми, обґрунтовано актуальність обраної теми, сформульовано основну мету, завдання дослідження, наукову новизну, а також практичне значення основних результатів роботи.

У першому розділі наведено огляд існуючих методів дослідження дисперсних середовищ, у тому числі контактні й дистанційні методи, а також обґрунтовано вибір напрямку дослідження та його актуальність.

У другому розділі наведено характеристики дисперсних середовищ із рідкою і твердою фазами у вигляді дощів і промислових викидів. Основними характеристиками розсіяння дисперсних середовищ є питомі поперечні перерізи розсіяння, ослаблення та поглинання, а також питомий поперечний переріз зворотного розсіяння. Зазначені характеристики залежать як від властивостей досліджуваного середовища (розподілу частинок за розмірами, діелектричної

проникності частинок), так і від параметрів електромагнітного випромінювання (довжини хвилі, поляризації).

На сьогоднішній день відомо багато видів розподілів частинок дисперсних середовищ за розмірами, наприклад, розподіл Маршала-Пальмера, Беста, К.С. Шифріна та ін. Однак на основі статистичних даних доведено, що для дисперсних середовищ з твердою фазою функція розподілу частинок за розмірами задовільно апроксимується логнормальним розподілом, а для дисперсних середовищ з рідкою фазою – гамма-розподілом. У припущенні сферичної форми частинок досліджуваних середовищ використано точну теорію дифракції електромагнітних хвиль на діелектричній сфері (теорія Мі) для розрахунку характеристик зворотного розсіювання дисперсними середовищами.

У третьому розділі розглянуто особливості двочастотного зондування дисперсних середовищ, проведено теоретичне дослідження комбінованого двочастотного методу дистанційного зондування дисперсних середовищ у вигляді рідких опадів і промислових викидів.

Розв'язок інверсної задачі при двочастотному зондуванні дисперсних середовищ ґрунтується на використанні залежності диференціального поперечного перерізу зворотного розсіювання від мікроструктурних параметрів досліджуваного середовища у вигляді

$$\sigma_D(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{\sigma_0(\lambda_1)}{\sigma_0(\lambda_2)} = \frac{\int_0^\infty \sigma_p(D, \lambda_1) F(D) dD}{\int_0^\infty \sigma_p(D, \lambda_2) F(D) dD}, \quad (1)$$

де $\sigma_0(\lambda_{1,2})$ – питоме значення поперечного перерізу зворотного розсіювання (для визначеності $\lambda_1 < \lambda_2$); $\sigma_p(D)$ – залежність поперечного перерізу зворотного

розсіювання частинки від її діаметру; $F(D) = \frac{N(D)}{N_T}$ – функція щільності розподілу

частинок за розмірами; D – діаметр частинок; N_T – концентрація частинок.

Видно, що диференціальний переріз зворотного розсіювання визначається поперечним перерізом зворотного розсіювання одиночної частинки і функцією щільності розподілу частинок за розмірами, параметри якої характеризують мікроструктуру дисперсних середовищ (мікроструктурні параметри). Конкретна залежність диференціального перерізу зворотного розсіювання від мікроструктурних параметрів визначається видом функції щільності розподілу частинок за розмірами. Як зазначено вище, для опису дисперсних середовищ на сьогодні широко використовуються трипараметричні функції розподілу частинок за розмірами. Таким чином, диференціальний переріз зворотного розсіювання (1) є функцією двох мікроструктурних параметрів дисперсного середовища, тобто в загальному випадку розв'язок інверсної задачі з використанням диференціального перерізу зворотного розсіювання при трипараметричному розподілі частинок за розмірами є неможливим.

Обчислення диференціального значення поперечного перерізу зворотного розсіювання при двочастотному зондуванні дисперсних середовищ здійснюється

через вимірювання диференціального значення прийнятої потужності

$$P_D(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{P_R(\lambda_1)}{P_R(\lambda_2)};$$

$$\sigma_D(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{\sigma_0(\lambda_1)}{\sigma_0(\lambda_2)} = \frac{P_D(\lambda_1, \lambda_2)}{C_r(\lambda_1, \lambda_2) K_D(\lambda_1, \lambda_2, R)}, \quad (2)$$

де C_r – постійна радара, яка описує його параметри; $K_D(\lambda_1, \lambda_2, R)$ – диференціальний коефіцієнт ослаблення, який дорівнює відношенню коефіцієнтів ослаблення на двох робочих частотах.

Як видно, для визначення диференціального перерізу зворотного розсіяння необхідно враховувати ослаблення зондувальних сигналів на двох робочих довжинах хвиль, що є однією з основних труднощів двочастотного зондування дисперсних середовищ з застосуванням диференціального перерізу зворотного розсіяння. В роботі запропоновано шляхи вирішення зазначених проблем за допомогою запропонованого комбінованого методу двочастотного зондування дисперсних середовищ.

Як було зазначено, результатів вимірювання розсіювальних властивостей опадів на двох частотах недостатньо для обчислення всіх трьох параметрів розподілу частинок за розмірами. Тому в роботі запропоновано комбінування даних дистанційного зондування з даними контактних вимірювань параметрів N_0 , α , β гамма-розподілу $N(D) = N_0 D^\alpha \exp(-D/\beta)$ в залежності від інтенсивності дощу I в такому вигляді: $\alpha = aI^{-b}$, $\beta = cI^d$ (мм), де $a = 3,8$; $b = 0,42$; $c = 0,148$; $d = 0,38$. В основу цих даних покладено результати численних контактних вимірювань на Європейській території колишнього Радянського Союзу, які характеризуються високою надійністю. З цих рівнянь неважко отримати зв'язок

між двома параметрами розподілу у вигляді $\beta = c \left(\frac{a}{\alpha} \right)^{\frac{d}{b}}$. Таким чином, вираз для

диференціального перерізу зворотного розсіяння в разі комбінованого двочастотного зондування є повністю визначеним і може бути записаний як система рівнянь

$$\begin{cases} \sigma_D(\alpha, \beta) = \int_0^\infty \sigma_p(D, \lambda_1) F(D, \alpha, \beta) dD \left(\int_0^\infty \sigma_p(D, \lambda_2) F(D, \alpha, \beta) dD \right)^{-1} \\ \beta = c \left(\frac{a}{\alpha} \right)^{\frac{d}{b}} \end{cases} \quad (3)$$

Вираз (3) дає змогу обчислити мікроструктурні параметри гамма-розподілу, що є перевагою досліджуваного методу, тому що дає можливість визначати практично всі інтегральні параметри рідких опадів, у тому числі їх інтенсивність, водність і концентрацію частинок.

Для оцінки можливостей запропонованого підходу проведено числове моделювання вимірювання інтенсивності дощу для довжин хвиль, які традиційно використовуються в метеорологічних радарх. Доведено, що комбінація хвиль

8,2 мм і 3,2 см забезпечує максимальний діапазон зміни диференціального перерізу зворотного розсіяння, а близькі результати мають місце при хвилях 8,2 мм і 10 см ($\Delta \sigma_D^{\max} \leq 10$ дБ і $\Delta \sigma_D^{\max} \leq 7$ дБ відповідно). У той же час для хвиль 3,2 см і 10 см спостерігається істотне зменшення діапазону зміни диференціального перерізу зворотного розсіяння ($\Delta \sigma_D^{\max} \leq 4$ дБ), тому що при $\lambda = 10$ см значна частина крапель відповідає релеївській області розсіяння ($\pi D/\lambda \ll 1$) в гамма-розподілі, у якій використання двочастотного методу зондування неефективне.

На рис. 1, 2 наведено залежності інтенсивності дощу та параметру розподілу α від диференціального перерізу зворотного розсіяння для довжин хвиль $\lambda_1 = 8,2$ мм і $\lambda_2 = 3,2$ см.

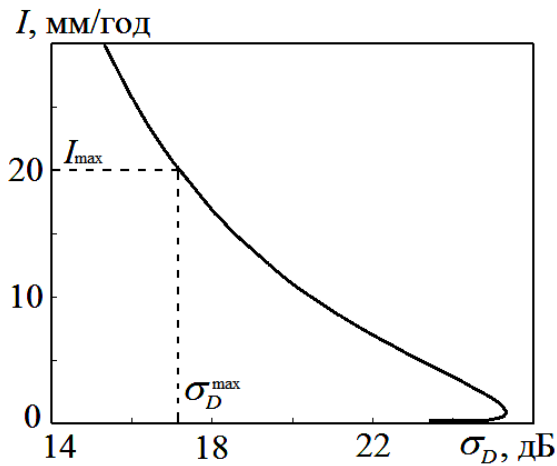


Рис. 1. Залежність інтенсивності дощу від диференціального перерізу зворотного розсіяння

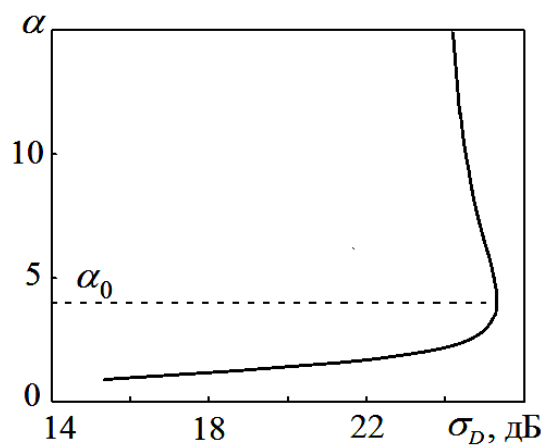


Рис. 2. Залежність параметра α від диференціального перерізу зворотного розсіяння

З наведених рисунків видно, що верхня межа зондування інтенсивності дощу обмежена досяжною точністю вимірювання диференціального перерізу зворотного розсіяння і складає приблизно $I_{\max} \leq 20$ мм/год. Також в області малих інтенсивностей ($I < 5$ мм/год, $\alpha > 3$) диференціальний переріз зворотного розсіяння має область неоднозначності, коли різниця питомих поперечних перерізів зворотного розсіяння на довжинах хвиль 8,2 мм і 3,2 см немонотонно залежить від інтенсивності дощу. Для усунення зазначеної неоднозначності пропонується використовувати залежність мікроструктурних параметрів від питомого значення поперечного перерізу зворотного розсіяння, яка має монотонний характер. Зокрема, на рис. 3 показано таку залежність для параметра α при $\lambda_1 = 8$ мм (крива 1) і $\lambda_2 = 3,2$ см (крива 2). Це дозволяє сформулювати наступну умову для виключення неоднозначності:

$$\begin{cases} \alpha \leq \alpha_0 & \text{при } \sigma_0(\lambda_1) \leq \sigma_{01}, \quad \sigma_0(\lambda_2) \leq \sigma_{02}, \\ \alpha > \alpha_0 & \text{при } \sigma_0(\lambda_1) > \sigma_{01}, \quad \sigma_0(\lambda_2) > \sigma_{02} \end{cases}, \quad (4)$$

де значення констант дорівнюють $\alpha_0 = 4,05$; $\sigma_{01} = 11,94$ мм²/м³; $\sigma_{02} = 0,035$ мм²/м³.

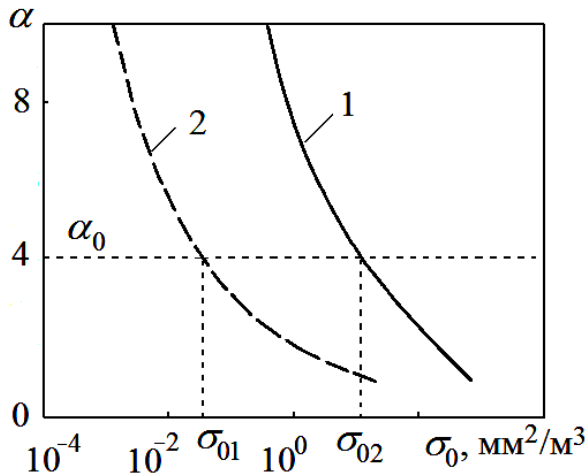


Рис. 3. Залежність параметра α від питомого поперечного перерізу зворотного розсіяння

малих значеннях робочих довжин хвиль. Тому в роботі запропоновано ітераційну схему розв'язання рівнянь (1), (2) для обчислення ослаблення сигналів в рідких опадах. В основі ітераційної процедури лежать початкові умови для зони дощу. Зокрема, можливі два типи початкових умов: радар розташований на відстані R_0 від передньої межі опадів; радар знаходиться безпосередньо в зоні дощу. У першому випадку ліворуч від межі дощу значення інтенсивності дорівнює нулю і ослаблення сигналів відсутнє $K_D(R_0) = 1$. Якщо область випадіння дощу включає місце розташування радара, то як початкову умову можна вибрати значення інтенсивності, вимірюваної за допомогою контактних методів. У подальших обчисленнях використовується перший тип початкових умов, тобто $K_D(R_0) = 1$.

Для порядку ітерацій $p \geq 1$ ітераційну процедуру можна записати у вигляді такої системи рівнянь

$$\begin{cases} \sigma_D(\alpha^{(p)}, \beta^{(p)}) K_D(\alpha^{(p-1)}, \beta^{(p-1)}, N^{(p-1)}) = P_D(\lambda_1, \lambda_2) C_r^{-1}(\lambda_1, \lambda_2) \\ \beta^{(p)} = c \left(\frac{a}{\alpha^{(p)}} \right)^{\frac{d}{b}} \end{cases}, \quad (5)$$

де початкові значення параметрів $\alpha^{(0)}$, $\beta^{(0)}$, $N_0^{(0)}$ знаходять як розв'язок рівнянь (2)-(4) для середовища без ослаблення, в якому $K_D(R_0, \lambda_1, \lambda_2) = 1$ згідно з початковими умовами. При цьому вираз для диференціального коефіцієнта ослаблення обчислюється у спрощеному вигляді для випадку однорідно поглинаючого середовища

$$K_D(\lambda_1, \lambda_2, R) = \exp \left\{ - 2 \cdot 10^{-3} L \int_0^\infty dD N(D, \alpha, \beta, N_0) [\sigma_{AT}(D, \lambda_1) - \sigma_{AT}(D, \lambda_2)] \right\}, \quad (6)$$

де L – ширина зони опадів, на якій сигнал зазнає ослаблення; σ_{AT} – поперечний переріз ослаблення окремої краплі, яка розраховується за допомогою теорії Мі.

А параметр гамма-розподілу N_0 визначається як

Таким чином, комбінований двочастотний метод дозволяє визначити на основі виразів (3) і (4) значення мікроструктурних характеристик (параметрів розподілу) α , β , N_0 та інтегральних характеристик рідких опадів (інтенсивність, водність, концентрацію) в діапазоні інтенсивності $0 \leq I \leq 20$ мм/год. Як зазначено вище, обчислення диференціального перерізу зворотного розсіяння вимагає врахування коефіцієнтів ослаблення зондувальних сигналів на двох робочих довжинах хвиль. Особливо це актуально для опадів з інтенсивністю $I \geq 1$ мм/год, а також при

$$N_0 = \frac{\sigma_0(R_0, \lambda_2) \beta^{-(\alpha+1)}}{\Gamma(\alpha+1) \int_0^{\infty} dD \sigma_p(D, \lambda_2) F(D, \alpha, \beta)} \quad (7)$$

Збіжність запропонованої ітераційної схеми досліджено на прикладі моделі однорідного елементу дощу з рівномірним профілем інтенсивності $I(R) = I_0$. Числове моделювання проведено для чотирьох значень інтенсивності: 3, 7, 11, 15 мм/год, а в якості параметрів радару використовувалися характеристики метеорадара МРЛ-1 ($C_r = 0,0908$ (2)). Показано, що помилка вимірювань зростає зі збільшенням ослаблення радіолокаційного сигналу в елементі дощу пропорційно його розмірам L . Тому при зменшенні зони дощу ($L \leq 500$ м) точність вимірювань залишається в прийнятних межах навіть для дощів значної інтенсивності (15 мм/год), що свідчить на користь застосування радару з високою роздільною здатністю з дальності ΔR .

Описана вище ітераційна процедура може бути використана для побудови полігональної апроксимації параметрів дощу з довільним профілем. Розглянемо зону опадів протяжністю L у вигляді сукупності елементів розділення за дальністю $R_m = R_0 + (m-1)\Delta R$ (R_0 – відстань від радару до передньої межі дощу). На відстані, яка менше R_0 , дощу не має і ослаблення сигналів відсутнє $K_D(R_0) = 1$. При цьому диференціальний коефіцієнт ослаблення в m -му елементі розділення може бути представлений як добуток коефіцієнтів ослаблення в окремих елементах

$$K_D(R_m) = \prod_{q=1}^m \exp \left\{ -2 \cdot 10^{-3} \Delta R N_{Tq} \int_0^{\infty} dD F(D, \alpha_q, \beta_q) [\sigma_{AT}(D, \lambda_1) - \sigma_{AT}(D, \lambda_2)] \right\}, \quad (8)$$

де $\alpha_q = \alpha(R_q)$; $\beta_q = \beta(R_q)$; $N_{Tq} = N_T(R_q)$; $q \in [1...m]$.

Тоді, застосовуючи описану вище ітераційну схему (5)-(7) послідовно до кожного окремого елементу розділення і розглядаючи результати обчислень в $(m-1)$ -елементі розділення як початкові умови для m -го елементу, можна отримати полігональну апроксимацію профілю дощу.

Щоб оцінити можливості запропонованого алгоритму, було проведено числове моделювання (рис. 4) для зони дощу з неоднорідним профілем інтенсивності і чотирьох її значень $I_{\max} = 3, 7, 11, 15$ мм/год, а в якості радіолокаційних характеристик використовувалися параметри метеорадара МРЛ-1. Видно, що незважаючи на значну крутизну зміни інтенсивності дощу з відстанню, особливо для дощів значної інтенсивності ($I_{\max} = 15$ мм/год), використання двочастотного метеорадара з високою роздільною здатністю по дальності ($\Delta R = 150$ м) і описаного алгоритму обробки сигналів дозволяє відновлювати профіль інтенсивності дощу з графічною точністю.

Також розглянуто можливість застосування комбінованого двочастотного методу дистанційного зондування для дисперсних середовищ з твердою фазою. При цьому у якості розподілу частинок за розмірами використовується логнорамальний розподіл. У зв'язку з тим, що двочастотне зондування не дозволяє визначати всі три параметри розподілу, в роботі розглядаються дві моделі дисперсного середовища, які відповідають граничним випадкам.

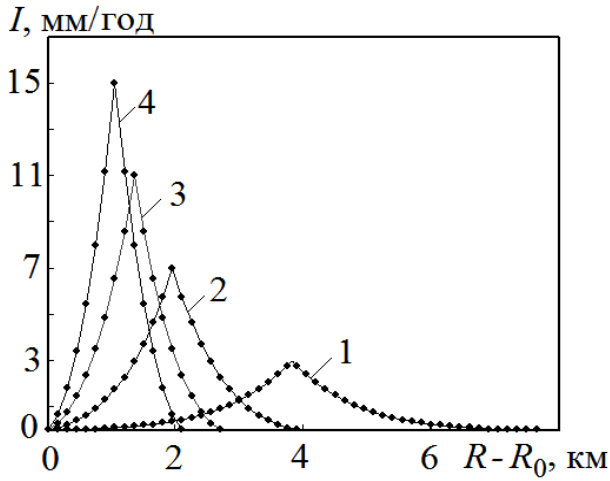


Рис. 4. Порівняння модельного профілю інтенсивності дощу (гладкі криві) з відновленим профілем (крапки)

середовище може бути апроксимоване еквівалентним монодисперсним середовищем ($\Delta \bar{r} = 0$: розміри всіх частинок однакові $r = r_{ef}$). У цьому випадку обчислення ефективного розміру частинок виконується через числовий розв'язок трансцендентного рівняння

$$\begin{cases} \sigma_D^m(\rho_{mod}^{ef}) = \sigma_D^0; \\ r_{mod}^{ef} = \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{|\epsilon|}} \rho_{mod}^{ef}, \end{cases} \quad (9)$$

де σ_D^0 – виміряне значення диференціального перерізу зворотного розсіяння; ρ_{mod}^{ef} , r_{mod}^{ef} – «ефективні» значення модального параметра дифракції та моди розподілу; σ_D^m – диференціальний переріз зворотного розсіяння для монодисперсного середовища

$$\sigma_D^m = \frac{\sigma_0(\lambda_1, r_{ef})}{\sigma_0(\lambda_2, r_{ef})} = \frac{\sigma_p(\lambda_1, r_{ef})}{\sigma_p(\lambda_2, r_{ef})}. \quad (10)$$

Для наочності на рис. 5а наведено результати графічного розв'язку рівняння (9), коли за виміряними значеннями диференціального перерізу зворотного розсіяння σ_D^0 знаходимо значення ефективного модального параметра ρ_{mod}^{ef} (справжнє значення параметра є ρ_{mod}^0). При цьому числове моделювання проводилося для частинок з діелектричною проникністю $\epsilon = 10 - j0,4$, що, як показано у дисертації, є властивою для багатьох речовин промислових викидів, та при співвідношенні робочих довжин хвиль $\alpha_\lambda = \lambda_1 / \lambda_2 = 0,2$, а також для різних значень нормованої ширини розподілу $\Delta \bar{r}$: 1 – $\Delta \bar{r} = 0$; 2 – $\Delta \bar{r} = 0,3$; 3 – $\Delta \bar{r} = 0,2$; 4 – $\Delta \bar{r} = 0,1$. Вимірювання величини ефективної моди розподілу частинок дозволяє оцінити важливі для практики ефективні параметри аерозолі, у тому числі концентрацію N_T^{ef} (м^{-3}) і питому масу M_L^{ef} ($\text{г}/\text{м}^3$):

Це модель з квазімонодисперсним («вузьким») і модель з «широким» законами розподілу частинок за розмірами. Дослідження проводилися в припущенні відсутності ослаблення сигналів $K(\lambda_{1,2}) \approx 1$, що практично завжди має місце в таких середовищах при використанні зонduючого сигналу в діапазоні НВЧ ($\lambda \geq 1$ мм).

У разі квазімонодисперсного розподілу (нормована ширина закону розподілу $\Delta \bar{r} = \Delta r / r_{mod} < 1$, де Δr – ширина розподілу на рівні $1/e$; r_{mod} – мода розподілу) полідисперсне

$$\begin{cases} N_T^{ef} = \frac{\sigma_0}{\sigma_p(\rho_{mod}^{ef})} \\ M_L^{ef} = \frac{4}{3} N_T^{ef} \pi (r_{mod}^{ef})^3 \rho_V \end{cases}, \quad (11)$$

де σ_0 – значення питомого поперечного перерізу зворотного розсіяння, виміряне на λ_1 ; $\sigma_p(r_{mod}^{ef})$ – поперечний переріз зворотного розсіяння частинки радіусом r_{mod}^{ef} ; ρ_V – об’ємна щільність частинок (г/м^3).

В результаті, як свідчать результати аналізу, відхилення значення ефективної моди полідисперсного середовища r_{mod}^{ef} від її справжнього значення r_{mod}^0 не перевищує 15 % при відносній ширині розподілу $\Delta \bar{r} \leq 0,3$.

У даному розділі також розглядається можливість оцінки ефективних розмірів частинок у разі «широкого» розподілу $\Delta \bar{r} > 1$. На рис. 5б наведено результати розрахунку диференціального перерізу зворотного розсіяння, де $1 - \Delta \bar{r} = 1$; $2 - \Delta \bar{r} = 4$; $3 - \Delta \bar{r} = 6$; $4 - \Delta \bar{r} = 8$.

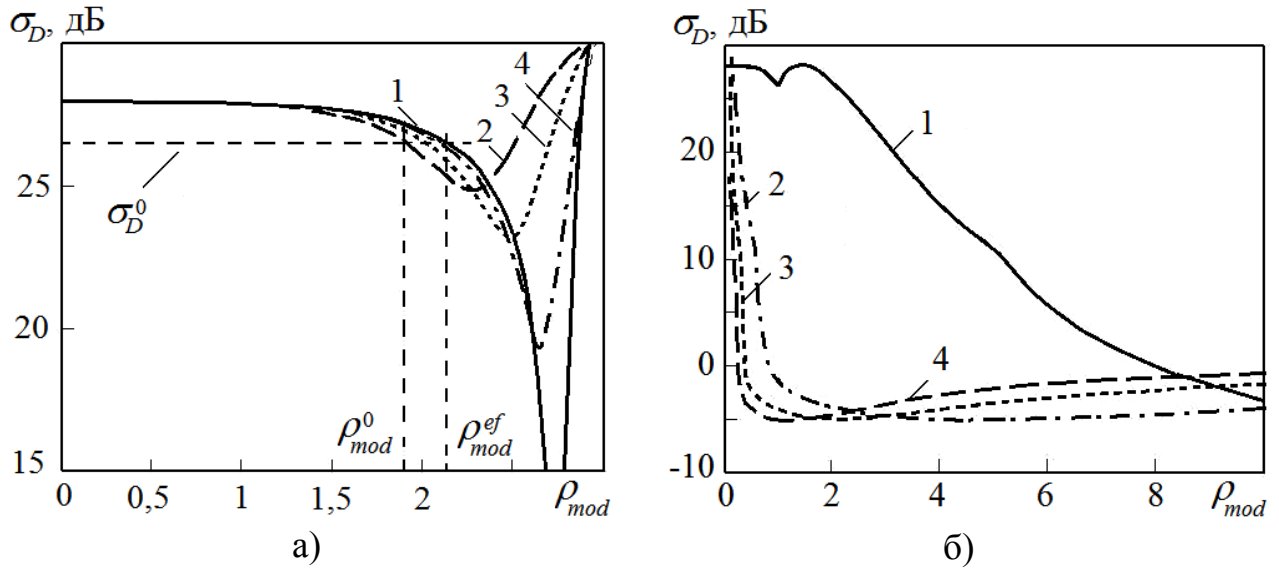


Рис. 5. Залежність диференціального перерізу зворотного розсіяння від ρ_{mod} для твердих аерозолів з «вузьким» (а) та «широким» (б) розподілом частинок за розмірами

Видно, що в області значень $\Delta \bar{r} \geq 4$ від диференціального перерізу зворотного розсіяння змінюється мало. Це дозволяє зафіксувати нормовану ширину розподілу і вибрати залежність диференціального перерізу зворотного розсіяння для широкого розподілу $\sigma_D^p(\rho_{mod}^{ef})$ як «еталонну» залежність замість моделі монодисперсного середовища $\sigma_D^m(\rho_{mod}^{ef})$ в системі рівнянь (9). Встановлено, що нормоване відхилення ефективної моди розподілу полідисперсного середовища r_{mod}^{ef} від її справжнього значення r_{mod}^0 не перевищує 50 % в досить великих межах зміни ширини розподілу $\Delta \bar{r} \in (4, 8)$. При цьому в якості «еталонної» залежності використовується залежність диференціального

перерізу зворотного розсіяння, яка розрахована при значенні відносної ширини логнормального закону розподілу $\Delta \bar{r} = 6$.

У четвертому розділі наведено методику, опис обладнання для експериментальних досліджень комбінованого двочастотного методу зондування дисперсних середовищ із рідкою або твердою фазою, а також основні отримані результати. Зокрема, наведено опис методик експериментального вимірювання розмірів окремих крапель за допомогою двочастотного доплерівського радару ($\lambda_1 = 8$ мм і $\lambda_2 = 3,2$ см) і контактних способів (фотовимірювання, вимірювання маси). Метою даного експерименту було дослідження обґрунтованості використання теорії Мі, розробленої для частинок сферичної форми, для розрахунку характеристик розсіяння несферичних частинок дисперсних середовищ. В результаті встановлено, що відмінність форми крапель від сферичної не впливає на результати вимірювання розмірів: розбіжність радіолокаційних вимірювань від даних контактних вимірювань не перевищує 3,5 %.

Також наведені результати експериментального дослідження комбінованого двочастотного методу зондування рідких опадів та проведено порівняння даних, отриманих за допомогою радару і наземного дощоміра. У загальному випадку зіставлення результатів наземних і дистанційних вимірювань – це важка задача, оскільки необхідно забезпечити проведення вимірювань для однієї і тієї ж просторової області дощу. Для цього здійснювалося вертикальне зондування за допомогою метеорадару МРЛ-1, а дощомір розташовувався поруч з радаром (рис. 6а). На рис. 6б показано приклад запису інтенсивності дощу, отриманої шляхом дистанційного зондування (гладка крива) і контактних вимірювань (штрихова крива), які наведені в масштабі абсолютного часу (записи сигналів проводилися синхронно). При цьому спостерігалася практично повна відсутність вітру (середня швидкість $\bar{V}_v < 0,5$ м/с), що забезпечує вертикальне падіння крапель при відносно рівномірному просторовому розподілі інтенсивності дощу.

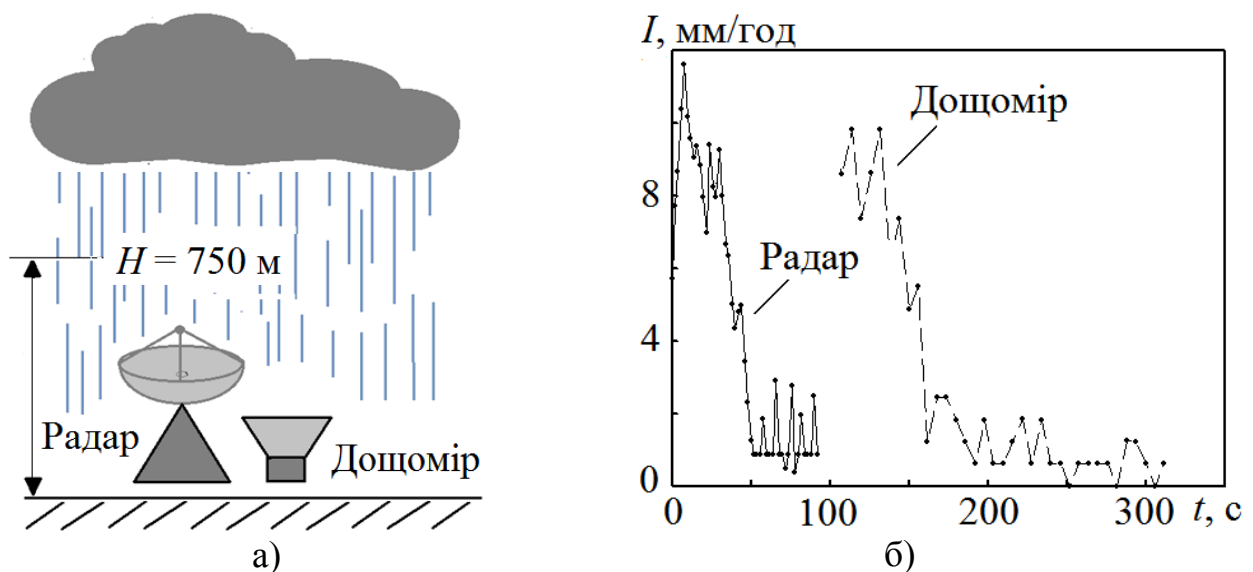


Рис. 6. Схема проведення вимірювань (а) і порівняння дистанційних та контактних вимірювань (б)

Використане програмне забезпечення дозволяло обробляти дані тільки з одного елемента розділення, у зв'язку з чим оброблялися сигнали радара з висоти $H = 750$ м, яка відповідала першому елементу розділення після «мертвої зони» радара, обумовленої перехідними процесами в антенному перемикачі. При цьому спостерігається деяка затримка даних дощоміра щодо радіолокаційних даних за рахунок часу падіння крапель з висоти 750 м. У зв'язку з тим, що комбінований двочастотний метод зондування рідких опадів побудовано на основі усереднених даних контактних вимірювань, то неможливо очікувати збігу дистанційних і наземних даних в кожен момент часу, незважаючи на якісно схожу поведінку залежностей. Однак радіолокаційні та наземні дані, усереднені за час 20...30 с, відрізняються не більше ніж на 15 % для різних реалізацій (табл. 1).

Таблиця 1

Порівняння усереднених параметрів дощу

I (радар), мм/год	I (дощомір), мм/год	Похибка, %
8,76	8,34	4,9
4,11	4,73	14,1
1,39	1,37	1,5
3,94	3,79	3,9

Описаний метод двочастотного зондування сформульовано щодо мікроструктурних характеристик опадів, що дозволяє визначити не тільки інтенсивність дощу, але також і інші інтегральні параметри, у тому числі концентрацію N_t , вид закону розподілу $F(D)$, а також водність опадів W .

Треба врахувати, що аналогічні вимірювання, проведені в умовах дії бокового вітру, показали практично повну відсутність кореляції між дистанційними та контактними даними. У зв'язку з цим необхідною умовою проведення описаних порівняльних вимірювань є відсутність бокового зносу дощових мас.

Крім того, проведено експериментальне дослідження комбінованого двочастотного методу зондування твердих аерозолів, що ґрунтується на порівнянні дистанційних та контактних даних вимірювання ефективних параметрів дисперсного утворення (середніх розмірів частинок, їх концентрації та маси). При цьому дослідження проводилося для моделі монодисперсного середовища у вигляді каліброваних частинок морського піску за допомогою двочастотного бістатичного когерентного радара міліметрового діапазону, що працює в режимі безперервного випромінювання на довжинах хвиль 3 і 8 мм. На рис. 7 представлено схему вимірювального стенду. Досліджувані частинки вводяться в повітряний потік, що формується потужним вентилятором, за допомогою дозатора, який рівномірно розподіляє їх по поперечному перерізу повітроводу. Рухаючись повітроводом, вони спочатку потрапляють в область дії радара, а потім в навколишній простір. Результати проведених експериментів наведені у табл. 2 для трьох режимів дозатора, які відрізняються інтенсивністю потоку частинок. В дужках вказано результати даних контактних вимірювань. Як видно, незважаючи на істотні різниці в інтенсивностях потоку, експериментальні дані характеризуються доброю повторюваністю і забезпечують порівняно з

контактними даними завищену оцінку параметрів: для діаметра частинок і середньої питомої маси – на 10 %, а для концентрації частинок – на 25 %.

При цьому важливо відзначити, що, незважаючи на досить різноманітну форму частинок морського піску, результати розрахунку, отримані в припущенні сферичної форми, задовільно узгоджуються з даними експерименту, проведеного з використанням частинок складної форми, що підтверджує можливість використання теорії Мі для розрахунку характеристик розсіяння дисперсних середовищ за рахунок хаотичної зміни орієнтації частинок у турбулентному потоці.

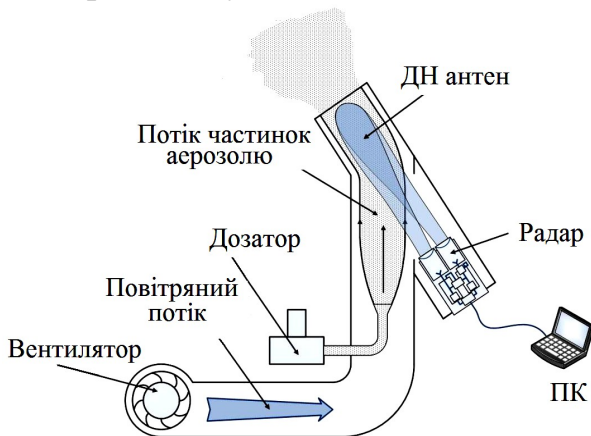


Рис. 7. Схема вимірювального стенду

Таблиця 2

Результати вимірювань

Параметр	Режим 1	Режим 2	Режим 3
Інтенсивність потоку, г/хв	12,7	23,0	35,5
Питома маса частинок, г/м ³	0,344 (0,3)	0,562 (0,54)	0,875 (0,84)
Диференціальний переріз зворотного розсіяння, дБ	13,4 (14,976)	13,48 (14,976)	13,48 (14,976)
Ефективна мода r_{mod}^{ef} , мм	0,55 (0,48)	0,547 (0,48)	0,547 (0,48)
Концентрація частинок, м ⁻³	186 (245)	309 (440)	482 (685)

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено результати досліджень, що спрямовані на розв'язок актуальної наукової задачі двочастотного дистанційного зондування дисперсних середовищ з метою визначення їх мікроструктурних та інтегральних параметрів. Для цього в роботі дістало подальший розвиток двочастотне дистанційне зондування дисперсних середовищ шляхом розробки комбінованого методу, у якому запропоновано використання усереднених апріорних даних про властивості середовища, зокрема, параметрів розподілу частинок за розмірами. Це дозволило отримати повну систему рівнянь інверсної задачі дистанційного зондування дисперсних середовищ. При цьому отримані наступні наукові та практичні результати:

1. Виконано огляд літературних джерел із існуючих методів зондування дисперсних середовищ і обґрунтовано вибір напрямку досліджень.

2. Запропоновано та досліджено комбінований метод двочастотного зондування дисперсних середовищ з рідкою фазою, який вперше забезпечує однозначне відновлення профілю мікроструктурних параметрів рідких опадів з урахуванням ослаблення сигналів при трипараметричному законі розподілу частинок за розмірами.

3. На основі чисельного моделювання двочастотного зондування дисперсних середовищ з рідкою фазою встановлено рамки застосовності запропонованого комбінованого методу, зокрема показано що:

- використання радіохвиль 8 мм та 3 см забезпечує найбільшу точність вимірювання;

- запропонований комбінований метод двочастотного зондування дисперсних середовищ з рідкою фазою дозволяє відновлювати профіль інтенсивності, водності, концентрації частинок і мікроструктурних параметрів рідких опадів в діапазоні інтенсивностей $0 < I < 20$ мм/год при роздільній здатності радара з дальності $\Delta R \leq 500$ м.

4. У рамках експериментальних досліджень запропонованого комбінованого методу двочастотного зондування дисперсних середовищ з рідкою фазою показано, що:

- запропонована і досліджена методика порівняння даних двочастотного дистанційного зондування та наземного дощоміру для оцінки точності дослідженого методу забезпечує адекватне порівняння даних при відсутності вітрового зносу частинок дощу;

- проведені натурні експерименти підтвердили ефективність запропонованого комбінованого методу двочастотного зондування рідких опадів. Встановлено, що відмінність контактних і дистанційних даних зондування інтенсивності дощів не перевищує 15 %.

5. Вперше досліджено відновлення ефективного розміру частинок дисперсних середовищ з твердою фазою, а також їх концентрації та питомої маси на основі запропонованого комбінованого методу.

6. На основі чисельного моделювання двочастотного зондування дисперсних середовищ з твердою фазою встановлено рамки застосовності запропонованого комбінованого методу, зокрема показано що:

- відносна помилка вимірювань параметрів дисперсних середовищ з «вузьким» законом розподілу частинок за розмірами (нормована ширина розподілу частинок за розмірами $\Delta \bar{r} \leq 0,3$) не перевищує 15 %, а в разі досить «широкого» ($\Delta \bar{r} \geq 4$) закону розподілу частинок за розмірами (коефіцієнт варіації 60 %) відносна помилка не перевищує 50 %;

- для квазімонодисперсного середовища ($\Delta \bar{r} \leq 0,3$) з твердою фазою критерієм верхньої межі однозначного відновлення ефективного розміру частинок є можливість однозначного вимірювання диференціального перерізу зворотного розсіяння, а нижньої – досяжна точність його вимірювання. При цьому високі значення модуля діелектричної проникності ($\text{Re} \epsilon \geq 4$, $\text{Im} \epsilon \geq 1$) призводять до зменшення значення верхньої межі діапазону однозначного вимірювання розмірів. Для полідисперсного середовища з «широким» законом розподілу частинок за розмірами ($\Delta \bar{r} \geq 4$) діапазон однозначного визначення модального параметра складає $0,15 \leq \rho_{mod} = \frac{2\pi}{\lambda} r \sqrt{\epsilon} \leq 0,32$ для значення параметра

$$\alpha_{\lambda} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 0,2;$$

– збільшення нормованої ширини закону розподілу призводить до звуження робочого діапазону встановлення модального радіусу частинок;

– в разі монодисперсного середовища параметр α_λ , який характеризує рознесення робочих частот, не впливає на діапазон однозначного оцінювання розмірів. Тоді як, для полідисперсних середовищ диференціальний переріз зворотного розсіяння в значній мірі залежить від вибору робочих частот, а оптимальне значення дорівнює $\alpha_\lambda \approx 0,2$.

7. Проведено експериментальне дослідження комбінованого методу двочастотного зондування дисперсних середовищ з твердою фазою, що підтвердило ефективність запропонованого методу. При цьому розбіжність контактних і дистанційних даних для досліджуваної моделі середовища не перевищує 25 %.

Основні наукові положення та результати дисертаційних досліджень впроваджені в НДР ДР № 0111U000015 ««Синтез радіотехнічних та оптичних систем забезпечення безпеки польотів і руху судопотоків в повітряному просторі і акваторіях України» (2007-2011 рр.), Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», про що свідчить відповідний акт впровадження.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Войтович О.А. Исследование двухчастотного метода дистанционного зондирования твёрдых аэрозолей / О.А. Войтович, А.М. Линкова, Г.И. Хлопов // Радиофизика и электроника: сб. научн. тр. НАНУ ИРЭ им. А.Я. Усикова. – Харьков, 2009. – Т. 14, № 2. – С. 169-176. (Англомовна версія: Khlopov G.I. Investigation of the Dual-Frequency Method for Remote Sensing of Solid Aerosols / G.I. Khlopov, A.M. Linkova, O.A. Voitovych // Telecommunication and Radio Engineering. – 2010. – V. 69, No. 13. – P. 1205-1219).
2. Двухчастотное зондирование полидисперсных твёрдых аэрозолей / Р. Кнехель, А. Линкова, А. Теплюк, Г.И. Хлопов, К. Шенеманн // Радиофизика и электроника – 2010. – Т. 1 (15), № 1. – С. 51-61.
3. Peculiarities of Double Frequency Radar for Polydisperse Aerosols Sounding / R. Knoechel, G. Khlopov, A. Linkova, A. Tepljuk, K. Schuenemann, O. Voitovych // Telecommunications and Radio Engineering. – 2011. – V. 70, No. 2. – P. 95-114.
4. Дистанционное измерение размеров капель воды с помощью двухчастотного зондирования / О.А. Войтович, А. М. Линкова, Г.И. Хлопов, С.И. Хоменко // Радиофизика и электроника. – 2010. – Т. 1 (15), №4. – С. 78-84. (Англомовна версія: Remote Measurement of Water Drop Sizes by Means of Double Frequency Sensing / G.I. Khlopov, S.I. Khomenko, A.M. Linkova, O.A. Voitovych // Telecommunication and Radio Engineering. – 2012. – V. 71, No. 4. – P. 337-348).
5. Войтович О.А. Двухчастотное профилирование параметров дождя / О.А. Войтович, А.М. Линкова, Г.И. Хлопов // Радиофизика и электроника. – 2011. – Т. 2 (16), № 3. – С. 51-60.

6. Линкова А.М. Использование микроструктурных параметров для обработки данных двухчастотного измерения интенсивности дождя / А.М. Линкова // Радиопизика и електроника. – 2011. – Т. 2 (16), №1. – С. 33-38. (Англомовна версія: Linkova A.M. Use of Microstructure Parameters for Data Processing of Double Frequency Measurement of Rain Intensity / A.M. Linkova // Telecommunication and Radio Engineering. – 2012. – V. 71, No. 5. – P. 423-433).
7. Двухчастотное зондирование жидких осадков с помощью метеорадаара МРЛ-1 / Е.Н. Белов, О.А. Войтович, А.М. Линкова, Г.А. Руднев, Г.И. Хлопов, С.И. Хоменко // Радиопизика и електроника. – 2012. – Т. 3 (17), № 1. – С. 49-59.
8. Experimental study of double frequency method for measurement of rain parameters / Ye. Belov, S. Khomenko, G. Khlopov, A. Linkova, G. Rudnev, O. Voitovych // International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science, 21-24 Febr. 2012: conf. proc. – Lviv, 2012. – P. 118.
9. Application of double frequency radar for measurement of parameters of solid polydisperse aerosols [Електронний ресурс] / G. Khlopov, R. Knoechel, A. Linkova, A. Tepljuk, K. Schuenemann // The 7th International Kharkov symposium on physics and engineering of microwaves, millimeter and submillimeter waves MSMW'10, 21-26 Jun. 2010: conf. proc. – Kharkov, 2010. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM).
10. Application of double frequency radar for measurement of monodisperse rain parameters / G. Khlopov, S. Khomenko, A. Linkova, O. Voitovych // The 6th European Conf. on Radar in Meteorology and Hydrology ERAD'2010, 6-10 Sept. 2010: conf. proc. – Sibiu, 2010. – P. 283-288.
11. Linkova A. Double frequency method for measurement of rain intensity based on contact measurements of microphysics rain parameters [Електронний ресурс] / A. Linkova // Signal Processing Symposium SPS-2011, 8-10 Jun. 2011. – Jachranka, 2011. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM).

АНОТАЦІЯ

Лінкова А.М. Комбінований метод двочастотного зондування дисперсних середовищ в атмосфері. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. – Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України, Харків, 2012.

Дисертаційна робота спрямована на розв'язок актуальної задачі двочастотного дистанційного зондування дисперсних середовищ з метою визначення їх мікроструктурних та інтегральних параметрів. У роботі запропоновано, а також теоретично і експериментально досліджено комбінований метод двочастотного зондування дисперсних середовищ у вигляді промислових викидів та рідких опадів, який засновано на використанні апіорі усереднених даних про властивості середовища. Метод дозволяє однозначно відновлювати профіль параметрів дисперсних середовищ при трипараметричній моделі

розподілу частинок за розмірами та з урахуванням ослаблення сигналів. У рамках теоретичного дослідження проведено розрахунки характеристик розсіяння дисперсних середовищ з твердою або рідкою фазою залежно від діелектричних властивостей частинок, температури і довжини хвилі для логнормального розподілу (промислові викиди) і гамма-розподілу (рідкі опади). При цьому розрахунок характеристик розсіяння частинок проводився на основі точної теорії дифракції електромагнітних хвиль на діелектричній сфері (теорія Мі). Числове моделювання дистанційного зондування дисперсних середовищ з рідкою фазою показало, що запропонований комбінований двочастотний метод дозволяє вимірювати мікроструктурні та інтегральні параметри рідких опадів, у тому числі інтенсивність, водність і концентрацію частинок, в діапазоні інтенсивності $0 < I < 20$ мм/год. При цьому експериментальне дослідження підтвердило обґрунтованість зроблених припущень і показало, що відмінність контактних і дистанційних даних зондування інтенсивності рідких опадів не перевищує 15 %.

У свою чергу, запропонований метод дистанційного зондування дисперсних середовищ з твердою фазою дозволяє досліджувати ефективний розмір частинок, а також їх концентрацію і питому масу з похибкою менше 50 %. Проведене експериментальне дослідження підтвердило ефективність запропонованого комбінованого методу двочастотного зондування дисперсних середовищ з твердою фазою і показало, що відмінність контактних і дистанційних даних для монодисперсного середовища не перевищує 25 %.

Ключові слова: двочастотне зондування, дисперсне середовище, профілювання, мікроструктурні параметри, ослаблення сигналів.

АННОТАЦИЯ

Линкова А.М. Комбинированный метод двухчастотного зондирования дисперсных сред в атмосфере. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика. – Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков, 2012.

Диссертационная работа направлена на решение актуальной задачи двухчастотного дистанционного зондирования дисперсных сред с целью определения их микроструктурных и интегральных параметров. В работе предложен, а также теоретически и экспериментально исследован комбинированный метод двухчастотного зондирования дисперсных сред в виде промышленных выбросов и жидких осадков, основанный на использовании априори усредненных данных о свойствах среды. Метод позволяет однозначно восстанавливать профиль параметров дисперсных сред при трехпараметрической модели распределения частиц по размерам и с учетом ослабления сигналов. В ходе теоретического исследования проведены расчеты характеристик рассеяния дисперсных сред с твердой или жидкой фазой в зависимости от диэлектрических свойств частиц, температуры и длины волны для логнормального распределения (промышленные выбросы) и гамма-распределения (жидкие осадки).

В работе рассмотрены основные трудности разработки двухчастотного метода зондирования дисперсных сред и предложены пути их преодоления. В частности, для решения неполной определенности обратной задачи зондирования жидких осадков предложено комбинирование дистанционных данных с данными контактных измерений зависимости параметров гамма-распределения от интенсивности дождя. Также предложен способ исключения неоднозначности восстановления параметров дождя в области малых интенсивностей, основанный на использовании зависимостей параметров гамма-распределения от удельного сечения обратного рассеяния на двух длинах волн. Кроме того, предложена и описана итерационная схема, позволяющая восстанавливать профиль параметров дождя с учетом ослабления сигналов, которая обеспечивает высокую точность измерения параметров дождя в случае высокой разрешающей способности системы дистанционного зондирования по дальности. Численное моделирование дистанционного зондирования жидких осадков показало, что выбор длин волн 8,2 мм и 3,2 см обеспечивает максимальный диапазон изменения дифференциального сечения обратного рассеяния $\Delta \sigma_D^{\max} \leq 10$ дБ по сравнению с использованием длин волн 8,2 мм и 10 см, а также 3,2 см и 10 см. Сходимость предложенной итерационной схемы исследована на примере модели однородной ячейки дождя с равномерным профилем интенсивности: 3, 7, 11, 15 мм/ч и характеристик метеорадаара типа МРЛ-1 ($\lambda_1 = 8,2$ мм, $\lambda_2 = 3,2$ см). Показано, что ошибка измерений обратно пропорциональна величине ослабления сигналов в дожде и размерам ячейки разрешения метеорадаара по дальности. В частности, предложенный комбинированный двухчастотный метод позволяет восстанавливать неоднородный профиль микроструктурных и интегральных параметров жидких осадков, включая интенсивность, водность и концентрацию частиц, с погрешностью менее 1 % в диапазоне интенсивности $0 < I < 20$ мм/ч с учетом ослабления сигналов при разрешающей способности радара порядка $\Delta R \leq 150$ м. Кроме того, проведено экспериментальное исследование предложенного двухчастотного метода зондирования жидких осадков на основе метеорадаара МРЛ-1 ($\lambda_1 = 8,2$ мм, $\lambda_2 = 3,2$ см) и быстродействующего дождемера, которое подтвердило обоснованность сделанных предположений и показало, что отличие контактных и дистанционных данных зондирования интенсивности жидких осадков не превышает 15 %.

В свою очередь, исследование двухчастотного метода дистанционного зондирования дисперсных сред с твердой фазой проведено для «узкого» закона распределения ($\Delta \bar{r} \leq 0,3$ где $\Delta \bar{r} = \Delta r / r_{mod}$, Δr – ширина распределения на уровне $1/e$, r_{mod} – мода распределения) и «широкого» закона распределения частиц по размерам ($\Delta \bar{r} \geq 4$), в качестве которого использовалось логнормальный закон. В результате показано, что предложенный метод дистанционного зондирования дисперсных сред с твердой фазой позволяет исследовать эффективный размер частиц, а также их концентрацию и удельную массу с погрешностью менее 15 % для дисперсных сред с «узким» законом распределения и не более 50 % в случае «широкого» закона распределения частиц по размерам.

Экспериментальное исследование проводилось для среды с «узким» распределением частиц по размерам с помощью двухчастотного доплеровского радиолокатора, работающего в непрерывном режиме на длинах волн 3 и 8 мм. Выполненные эксперименты подтвердили эффективность предложенного комбинированного двухчастотного метода зондирования дисперсных сред с твердой фазой и показали, что отличие контактных и дистанционных данных для монодисперсной среды не превышает 25 %.

Ключевые слова: двухчастотное зондирование, дисперсная среда, профилирование, микроструктурные параметры, ослабление сигналов.

ABSTRACT

A.M. Linkova. Combined method for double frequency sensing of disperse mediums in the atmosphere. – The manuscript.

The thesis for PhD degree in physical and mathematical sciences by the specialty 01.04.03 – radiophysics. – O.Ya. Usikov Institute of Radiophysics and Electronics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, 2012.

The main task of the thesis is a scientific justification and further development of double frequency remote sensing of disperse mediums with a liquid or solid phase in the form of liquid precipitation and industrial emissions to define their parameters. Combined method for double frequency sensing of disperse mediums is proposed and theoretically and experimentally studied in the work, which allows to unambiguously restore profile of their parameters in the case of three-parameter model of particle size distribution, and take into account the signal attenuation. Calculation of scattering characteristics of disperse mediums with solid or liquid phase subject to dielectric properties of particles, temperature and wavelength is performed in the theoretical study for lognormal distribution (industrial emissions) and gamma distribution (rainfall). The calculation of the scattering characteristics of particles was based on a rigorous theory of diffraction of electromagnetic waves by a dielectric sphere (Mie theory). Numerical simulation of the remote sensing of disperse mediums with a liquid phase showed that the proposed double frequency combined method allows to measure the microstructure and integral parameters of liquid precipitation, including intensity, water content and particle concentration in the range of rain intensity $0 < I < 20$ mm/h. At that, experimental study confirmed the validity of made assumptions and showed that difference between contact and remote sensing data for rain intensity does not exceed 15 %.

In its turn, the proposed method for remote sensing of disperse mediums with a solid phase allows to study the effective size of particles, their concentration and mass-loading to an inaccuracy of less than 50 %. The experimental study confirmed the efficiency of the proposed combined method for double frequency sensing of dispersion mediums with a solid phase and showed that the difference between contact and distance data for monodisperse medium does not exceed 25 %.

Keywords: two-frequency sensing, dispersion medium, profiling, microstructure parameters, signal attenuation.