

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

**ВЕСЕЛОВСЬКА ГАННА БОГДАНІВНА**

УДК 319.61.126

**ЗВОРОТНЄ РОЗСПЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ  
ПОЛІДИСПЕРСНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ НЕСФЕРИЧНИХ КРАПЕЛЬ  
У ЗАДАЧАХ ДВОЧАСТОТНОГО ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ**

01.04.03 – Радіофізика

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2014

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  
**Горобець Микола Миколайович**  
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна  
Міністерства освіти і науки України,  
завідувач кафедри прикладної електродинаміки

кандидат фізико-математичних наук, доцент  
**Андрєєв Михайло Вікторович**  
Дніпропетровський національний університет  
імені О. Гончара  
Міністерства освіти і науки України,  
доцент кафедри прикладної і комп'ютерної радіофізики

Захист відбудеться " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2014 р. о \_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03 у Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України за адресою: 61166, м. Харків, просп. Леніна, 14.

Автореферат розісланий " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2014 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



В.М. Безрук

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Атмосферні опади можуть призводити до катастрофічних наслідків для народного господарства, викликаючи, в тому числі, паводки та повені. Тому, в роботі гідрологічних служб широко використовуються дистанційні методи зондування за допомогою метеорологічних РЛС, які забезпечують огляд великого об'єму даних у реальному масштабі часу. При цьому діагностика і прогноз розвитку метеорологічних явищ засновані на математичних моделях, які зв'язують характеристики розсіяних сигналів з параметрами метеоутворень.

Зокрема, для відновлення мікроструктурних параметрів опадів широко застосовується модель сферичних крапель, яка дозволяє використовувати строге розв'язання теорії дифракції при обчисленні характеристик зворотнього розсіювання сферичних часток дощу. Однак, при вільному падінні на краплю діють сили тяжіння, аеродинамічного опору і поверхневого натягу, які призводять до деформації форми крапель. Наприклад, якщо середньокубічний радіус (СКР) краплі (радіус краплі еквівалентного об'єму) не перевищує  $r_3 = 140$  мкм, то її форму з достатнім ступенем точності можна вважати сферичною. При збільшенні СКР до 500 мкм, форма краплі наближується до еліпсоїдальної, а при подальшому зростанні розмірів дно краплі сплющується, тому для опису її форми запропонована модель Пруппахера-Піттера.

Крім того, реальний дощ являє собою полідисперсне середовище, яке складається із крапель різних розмірів, у зв'язку з чим, використання строгих методів розрахунку зворотнього розсіювання на окремій краплі пов'язано зі значними обчислювальними труднощами при розрахунку перетину зворотнього розсіювання ансамблю часток. Тому широко використовуються різноманітні наближені методи обчислень, зокрема, наближення крапель сферичної форми, коли несферична крапля замінюється сферичною краплею еквівалентного об'єму, також наближення дипольного розсіювання.

Щоб оцінити похибки зазначених наближень, необхідно використовувати строгі методи вирішення задачі дифракції електромагнітного поля на частках води несферичної форми. При цьому, незважаючи на труднощі, за останні роки, значний прогрес досягнуто з використанням методу моментів, методу допоміжних джерел і розкладання по векторним власним сферичним функціям.

Однак у літературі відсутні результати дослідження характеристик зворотнього розсіювання для полідисперсного середовища несферичних крапель, що не дозволяє зробити остаточні висновки відносно застосування зазначених наближених методів. Тому значний інтерес представляє розробка методів аналізу зворотнього розсіювання подібного середовища, включаючи аналіз меж застосування наближених методів, також дослідження характеристик розсіювання при багаточастотному дистанційному зондуванні.

Крім того, в даний час широко використовуються одночастотні методи дистанційного зондування, які, однак, не забезпечують однозначного відновлення параметрів опадів (інтенсивність, концентрація, вміст вологи та ін.) використовуючи характеристики відбитих сигналів. У зв'язку з цим,

великий інтерес становить подальший розвиток методу двочастотного зондування з метою визначення мікроструктурних характеристик рідких опадів для вирішення зворотної задачі з відновлення їх інтегральних параметрів з урахуванням несферичності форми часток.

При дистанційному зондуванні полідисперсних середовищ доводиться використовувати функцію розподілу часток за розмірами, яка повинна достатньо точно описувати дрібнокрапельну частину спектра часток і, в той же час, достовірно відображати її крупнокрапельну область. Тому, в даний час, широке поширення отримало трьохпараметричний гамма-розподіл, який добре апроксимує властивості полідисперсних середовищ в області малих і великих крапель.

Однак двочастотне зондування дозволяє визначити тільки два параметра, тому в літературі описані спроби до визначити систему рівнянь шляхом додаткового використання кореляційних зв'язків між параметрами гамма-розподілу. Дійсно, дані двочастотного зондування не дозволяють однозначно визначити всі три параметри розподілу і пошук шляхів забезпечення повноти системи рівнянь для вимірювання мікроструктурних характеристик становить значний інтерес.

В зв'язку з цим є актуальною тема дисертації, направленої на вирішення зворотної задачі з відновлення мікроструктурних характеристик полідисперсних середовищ рідких опадів з урахуванням несферичності часток при двочастотному дистанційному зондуванні.

#### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційні дослідження тісно пов'язані з проведенням планових наукових робіт в Інституті радіофізики та електроніки (ІРЕ) ім. О.Я. Усикова Національної академії наук України в рамках держбюджетної НДР «Дослідження і розробка активно-пасивних методів моніторингу навколишнього середовища», 2007-2011 рр., державний реєстраційний номер 0107U001080 (виконавець); НДР «Розробка дистанційних методів зондування мікроструктурних характеристик дисперсних середовищ», 2012-2016 рр., державний реєстраційний номер 0112U000212 (виконавець).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є подальший розвиток методу двочастотного зондування полідисперсних середовищ у вигляді рідких опадів з краплями несферичної форми для вирішення зворотної задачі по відновленню їх інтегральних параметрів.

Для досягнення поставлених цілей були сформульовані і вирішені наступні задачі дослідження:

1. Визначення меж застосування наближених методів обчислення перетину зворотнього розсіювання одиночних часток дощу несферичної форми з використанням еквівалентних сферичних і еліпсоїдальних крапель шляхом порівняння зі строгим методом моментів;
2. Визначення меж застосування наближень еквівалентних крапель сферичної та еліпсоїдальної форми для обчислення перетину зворотнього розсіювання електромагнітних хвиль полідисперсним

середовищем несферичних часток з урахуванням ймовірнісних характеристик випадання рідких опадів;

3. Усунення неоднозначності вирішення зворотньої задачі з відновлення інтенсивності рідких опадів.

**Об'єкт дослідження** – зворотне розсіювання електромагнітної хвилі полідисперсним середовищем рідких опадів.

**Предмет дослідження** – вплив несферичності часток рідких опадів на вирішення зворотньої задачі з відновлення інтенсивності дощів за допомогою двочастотного дистанційного зондування.

**Методи дослідження.** В роботі використані наступні методи дослідження:

- теорія розсіювання електромагнітних хвиль діелектричними частками;
- статистична теорія розподілу випадкових величин;
- методи цифрової обробки сигналів і чисельного розсіювання електромагнітних хвиль.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в наступному:

- отримав подальший розвиток метод двочастотного зондування рідких опадів, що дозволило, на відміну від раніше проведених досліджень вперше урахувати вплив несферичності крапель на характеристики зворотнього розсіювання полідисперсним середовищем з краплями Пруппахера-Піттера шляхом використання строгого методу моментів при вирішенні зворотньої задачі з відновлення інтенсивності опадів;

- у результаті аналізу диференціального перетину зворотнього розсіювання при двочастотному зондуванні полідисперсного середовища з несферичних крапель вперше показано, що на відміну від раніше отриманих результатів досліджень, похибка наближення еквівалентних крапель сферичної і еліпсоїдальної форм мінімальна при співпадаючих вертикальних поляризаціях обох частотних каналів;

- проведений аналіз точності вирішення зворотньої задачі з відновлення інтенсивності дощів з використанням наближення еквівалентних крапель і з урахуванням ймовірнісної моделі випадання опадів вперше показав, що найбільша ймовірність похибки наближених методів не перевищує  $\approx 0,5\%$  при значенні похибки не більше 0,1 дБ. Це дозволяє обґрунтувати застосування розглянутих наближених методів при обробці результатів двочастотного дистанційного зондування.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень та висновків, сформульованих у дисертаційній роботі.**

Достовірність теоретичних досліджень обумовлена широким використанням строгого методу моментів для обчислення зворотнього перетину розсіювання і порівнянням з раніше опублікованими даними досліджень.

**Практична значимість результатів** наукових досліджень полягає в тому, що:

– показано, що використання наближень еквівалентних крапель сферичної і еліпсоїдальної форми при обчисленні диференціального перетину зворотнього розсіювання несферичних часток, дозволяє отримати чисельні оцінки з задовільною для практики точністю, що суттєво спрощує вирішення зворотньої задачі з відновлення інтенсивності опадів;

– в результаті аналізу точності наближених методів обчислення диференціального перетину зворотнього розсіювання несферичних крапель показано, що найбільша точність відновлення інтенсивності рідких опадів при двочастотному дистанційному зондуванні відповідає співпадаючим вертикальним поляризаціям обох частотних каналів метеорологічної РЛС, що важливо при їх практичній реалізації.

**Особистий внесок здобувача** визначається наступним:

- в роботах [1, 2, 3] автор отримала основні рівняння, виконала чисельне моделювання і провела аналіз отриманих результатів;

- в роботах [4, 5] автор розробила оригінальне програмне забезпечення, що дозволило провести чисельний аналіз точності наближених методів при обчисленні зворотнього розсіювання несферичних часток еліпсоїдальної форми і у вигляді крапель Пруппахера-Піттера;

- роботи [6, 7, 8] виконані автором особисто, включаючи отримання рівнянь, проведення чисельного моделювання і аналіз отриманих результатів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи докладались на семінарах і 15 науково-технічних міжнародних конференціях і симпозіумах, в тому числі: семінарах ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України «Поширення радіохвиль і дистанційне зондування» і «Теорія дифракції та дифракційна електроніка»; Міжнародній конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії» TCSET 2012 р., Славське, Україна; Міжнародній молодіжній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій 2012 р., 2013 р., Севастополь, Україна; Міжнародній Кримській конференції «НВЧ-техніка та телекомунікаційні технології» 2012 р., Севастополь, Україна; The 5<sup>th</sup> World congress «Aviation the 21<sup>st</sup> century» 2012 р., Київ, Україна; Харківській конференції молодих вчених 2012 р., 2013 р.; Signal Processing Symposium SPS 2013 г., Яхранка, Польща; International Symposium «Atmospheric radiation and dynamics» ISARD 2013 р., Санкт-Петербург, Росія; International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves MSMW 2013 р., Харків, Україна; International Radar Symposium IRS 2014 р., Гданськ, Польща; 15<sup>th</sup> International conference on Mathematical methods in electromagnetic theory, 2014 р., Дніпропетровськ, Україна; Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium, 2014 р., Київ, Україна.

**Публікації.** Основні результати наукових досліджень, отриманих в межах дисертаційної роботи, опубліковані в 7 статтях в науково-технічних журналах, які входять до переліку ДАК України, також в 14 матеріалах і тезисах доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях і симпозіумах.

**Структура і об'єм дисертаційної роботи.** Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків і списку використаної літератури. Повний об'єм роботи складає 147 сторінки. Дисертація містить 70 рисунків і 15 таблиць. Список використаних джерел на 7 сторінках нараховує 109 найменування.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** наведено аналіз сучасних методів зондування полідисперсних середовищ, визначені існуючі проблеми дистанційного зондування, обґрунтовано актуальність вибраної теми, відображено зв'язок з науковими програмами відділу, сформульовані мета дисертаційної роботи, задачі дослідження, наукова новизна і практична значимість основних результатів роботи, також приведено інформацію щодо апробації і публікаціях результатів роботи.

**У першому розділі** проведено огляд існуючих методів дослідження полідисперсних середовищ, включаючи контактні і дистанційні методи, також розглянуто класифікації метеоутворень, діелектричні властивості часток, особливості розподілу часток опадів за розмірами, включаючи трансформацію форми і орієнтацію часток при падінні.

Також розглянуто основні методи розрахунку характеристик розсіювання рідких опадів, включаючи строгі і наближені підходи для часток сферичної і несферичної форм.

**У другому розділі** розглянуто результати досліджень розсіюючих властивостей одиночних несферичних часток рідких опадів на основі моделі Пруппахера-Піттера (рис. 1) при одночастотному зондуванні і в наближенні еквівалентних крапель сферичної і еліпсоїдальної форми в діапазонах, які широко використовуються в сучасних метеорологічних РЛС.

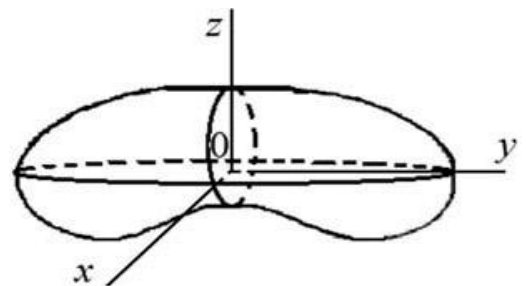


Рис.1. Форма краплі Пруппахера-Піттера

В результаті проведених теоретичних досліджень перетину зворотнього розсіювання одиночних крапель Пруппахера-Піттера (рис. 2) в наближенні еквівалентних сферичних і еліпсоїдальних крапель показано, що наближені обчислення (пунктир) в діапазонах  $\lambda=0,8; 3,2; 5,5$  і  $10$  см (криві 1-4 відповідно) правильно відображають хід залежності, а найбільші відмінності виникають в короткохвильовій частині НВЧ-діапазону ( $\lambda=0,8$  см) для крапель резонансного діаметра  $D = 4 \approx \lambda/2$  мм, досягаючи 7-8 дБ.

Показано, що при збільшенні середньокубічного діаметра крапель Пруппахера-Піттера необхідно використовувати строгі методи розрахунку, що ускладнює обчислення зворотнього розсіювання полідисперсних середовищ, так як вирішення рівняння балансу сил для вільно падаючої краплі води відомо

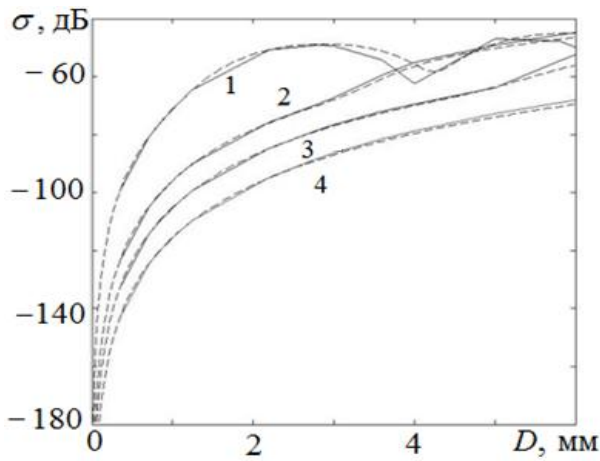


Рис. 2. Перетин зворотнього розсіювання краплі Пруппахера-Піттера в наближенні сферичних крапель для VV поляризації

тільки для кінцевого набору її середньокубічних розмірів. Тому в роботі запропоновано поліноміальну апроксимацію для обчислення перетину зворотнього розсіювання одиночних крапель Пруппахера-Піттера і знайдено відповідні коефіцієнти розкладання.

Крім того для горизонтальної поляризації (HH) падаючого поля величина енергії, яка розсіяна несферичною краплею практично не залежить від кута місця, а для вертикальної поляризації (VV) перетин зворотнього розсіювання не набагато змінюється в широкому діапазоні зміни розмірів крапель, причому залежність

від кута місця спостерігається тільки для крапель великих розмірів  $D \approx 6$  мм.

У третьому розділі розглянуто особливості одночастотного зондування полідисперсних середовищ несферичних опадів, так як в реальній ситуації дощ являє собою полідисперсне середовище, яке складається з крапель різних розмірів. В цьому випадку перетин зворотнього розсіювання часток записується у вигляді

$$\sigma_0(\lambda) = N_T \int_0^{\infty} \sigma_p(D, \lambda) F(D) dD, \quad (1)$$

де  $N_T = \int_0^{\infty} N(D) dD$ , ( $\text{м}^{-3}$ ) – концентрація крапель,  $\sigma_p$  – перетин зворотнього розсіювання окремої краплі ( $\text{мм}^2$ ),  $F(D)$  – закон розподілу часток за розмірами ( $\text{мм}^{-1}$ ),  $N(D) = N_T F(D)$  – кількість крапель в одиничному об'ємі.

В даний час, для опису розподілу часток дощу за розмірами і концентрації часток широко використовується трьохпараметричний гамма-розподіл у вигляді

$$F(D) = \frac{N_0 D^\alpha}{\Gamma(\alpha+1) \beta^{\alpha+1}} \exp\left(-\frac{D}{\beta}\right), \quad D > 0, \quad (2)$$

де  $\alpha$ ,  $\beta$  – параметри розподілу (мікроструктурні характеристики), які визначають середньокубічний розмір крапель, а третій параметр  $N_0$  визначається концентрацією крапель  $N_T$  наступним чином

$$N_T = N_0 \Gamma(\alpha+1) \beta^{\alpha+1}, \quad (3)$$



Як було зазначено вище, використання строгих методів розрахунку зворотнього розсіювання у випадку полідисперсного середовища вимагає величезних обчислювальних ресурсів и витрат часу, у зв'язку з чим, використання наближених методів становить значний інтерес.

Щоб оцінити різницю між наближеними і строгими розрахунками для дощів великої інтенсивності ( $I=50$  мм/ч), де внесок великих крапель максимальний, в табл. 1 наведено похибку обчислення перетину зворотнього розсіювання в наближенні сферичних крапель відносно строгих обчислень за допомогою методу моментів  $\Delta\sigma = \sigma_{\text{ММ}} - \sigma_{\text{сф}}$ .

Таблиця 1

Максимальна похибка обчислення перетину зворотнього розсіювання  $\Delta\sigma_{\text{max}}$ , дБ полідисперсного середовища еліпсоїдальних крапель в наближенні крапель сферичної форми

$\lambda=0,8$ см		$\lambda=3,2$ см		$\lambda=5,5$ см		$\lambda=10$ см	
НН	VV	НН	VV	НН	VV	НН	VV
-0,03	-0,95	1,2	-1,75	1,6	-2,1	1	-1,6

В розділі також показано, що завдяки усереднюючій дії полідисперсного середовища, різниця між строгими і наближеними обчисленнями незначна навіть для дощів великої інтенсивності.

Наведені дані відповідають дощам великої інтенсивності ( $\approx 50$  мм/ч) і мають обмежене застосування, так як дощі подібної інтенсивності достатньо рідко зустрічаються в середній смузі території Європи (ймовірність випадання  $\leq 0,01\%$ ). Тому представляє інтерес порівняння даних наближених і строгих обчислень при обмеженні максимальної похибки, коли, наприклад, похибка наближених обчислень не перевищує 0,5 дБ ( $\leq 10\%$ ).

На рис. 3а показано інтенсивність дощу для зазначеної похибки від довжини хвилі для полідисперсного середовища еліпсоїдальних крапель і НН поляризації падаючого поля (крива 1 – наближення сферичних крапель, крива 2 – наближення дипольного розсіювання).

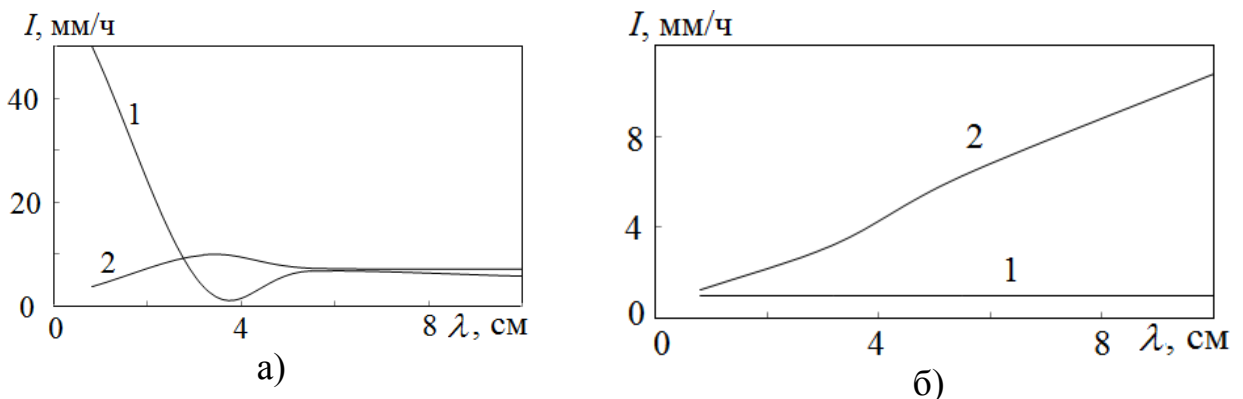


Рис. 3. Залежність інтенсивності рідких опадів у вигляді еліпсоїдальних крапель від довжини хвилі для НН (а) і VV (б) поляризацій

Як видно, наближення сферичних крапель для НН поляризації в діапазоні  $\lambda \leq 1$  см забезпечує зазначену точність у всьому діапазоні інтенсивності дощу, що відмічено як несподіваний результат, обумовлений, очевидно, наближеним характером обчислень.

Однак для VV поляризації (рис. 3б, крива 1 – наближення сферичних крапель, крива 2 – наближення дипольного розсіювання) можливості наближення крапель сферичної форми обмежені дощами малої інтенсивності  $\leq 1$  мм/ч, що говорить про непридатність даного наближення для точних розрахунків. Водночас, наближення дипольного розсіювання (криві 2) забезпечує необхідну точність в діапазоні довжин хвиль  $\lambda \geq 5$  см для дощів помірної інтенсивності ( $I \leq 6$  мм/ч), що говорить на користь використання наближення дипольного розсіювання.

Також важливо зазначити, що характеристики розсіювання еліпсоїдальних часток для VV поляризації падаючого поля залежать від кута місця, на відміну від часток сферичної форми. При дистанційному зондуванні це призводить до появи ще одного невідомого параметра, який вносить невизначеність у результати вимірювань.

У випадку полідисперсного середовища, яке містить великі частки – рис. 4 залежність перетину зворотнього розсіювання від кута місця (VV поляризація, інтенсивність опадів  $I=1$  мм/ч- крива 1,  $I=10$  мм/ч- крива 2,  $I=20$  мм/ч- крива 3) підтверджує факт переважного впливу великих крапель на характеристики розсіювання. Дійсно, для дощів малої інтенсивності, що складаються, в основному, з крапель малих розмірів, залежність від кута місця практично не виражена. Водночас, при збільшенні інтенсивності дощу, кількість великих крапель істотно зростає, що призводить до помітної залежності характеристик розсіювання від кута місця.

Як несподіваний факт слід зазначити, що використання наближення дипольного розсіювання для полідисперсного середовища з крапель Пруппахера-Піттера забезпечує точність  $|\Delta\sigma| < 1$  дБ навіть для дощів значної інтенсивності (до 20 мм/ч), що помітно краще, ніж для часток еліпсоїдальної форми ( $|\Delta\sigma| < 1,5$  дБ).

У четвертому розділі наведено особливості двочастотного зондування одиночних несферичних крапель дощу на основі моделі Пруппахера-Піттера. Незважаючи на широке поширення методів одночастотного радіолокаційного зондування дощів, їх використання пов'язано з неоднозначністю одержуваних даних, у зв'язку з чим, в останні роки широку увагу привертають методи

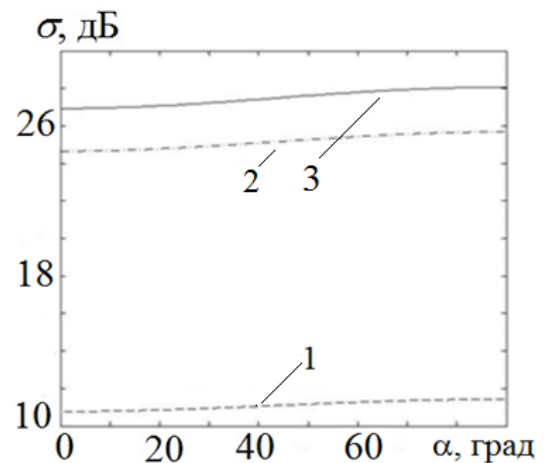


Рис. 4. Перетин зворотнього розсіювання полідисперсного середовища еліпсоїдальних крапель від кута місця (VV)

двочастотного зондування опадів  $\sigma_d = \frac{\sigma(\lambda_1)}{\sigma(\lambda_2)}$ . У даному випадку, фізичним обґрунтуванням методу є різний характер частотної залежності перетину зворотнього розсіювання крапель від їх розміру.

Як показав аналіз, перетин зворотнього розсіювання одиночних сферичних крапель в короткохвильовому НВЧ-діапазоні ( $\lambda=8$  мм) немонотонно залежить від діаметра крапель, що вирішальним чином позначається на поведінці диференціального перетину зворотнього розсіювання як показано на рис. 5, де крива 1 відповідає довжинам хвиль  $\lambda_1=8$  мм і  $\lambda_2=3,2$  см; крива 2 -  $\lambda_1=8$  мм і  $\lambda_2=5,5$  см; крива 3 -  $\lambda_1=3,2$  см і  $\lambda_2=10$  см; а крива 4 -  $\lambda_1=5,5$  см і  $\lambda_2=10$  см.

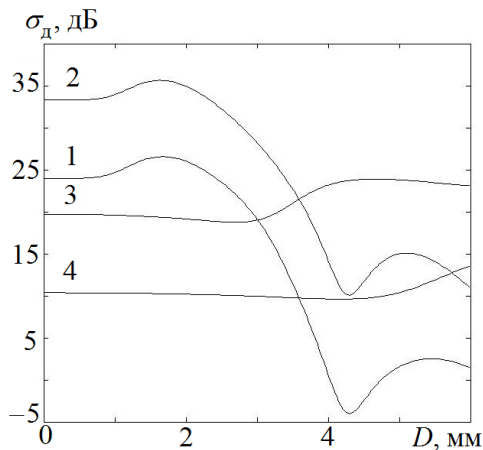


Рис.5. Диференціальний перетин розсіювання сферичної краплі

Як видно, в області малих розмірів часток  $D \leq 1$  мм, диференціальний перетин зворотнього розсіювання неоднозначно залежить від розміру часток (одному й тому самому значенню диференціального перетину зворотнього розсіювання відповідає два значення діаметра часток). Водночас, в довгохвильовій ділянці діапазону  $\lambda_{1,2} \geq 3$  см криві мало залежать від розмірів часток, що не дозволяє використовувати двочастотний метод для відновлення параметрів опадів.

З іншого боку, для отримання однозначної залежності, перетин зворотнього розсіювання часток опадів на найбільш короткій довжині хвилі не повинно потрапляти в область резонансного розсіювання  $D < \lambda \sqrt{\text{Re} \epsilon} / 2$ . Як показує чисельне моделювання, вибір довжини хвилі  $\lambda_1=7$  см забезпечує відсутність резонансного розсіювання для крапель максимального розміру  $D=6,5$  мм. У зв'язку з цим, на рис. 6 наведені результати обчислення диференціального перетину зворотнього розсіювання для довжин хвиль  $\lambda_1=7$  см і  $\lambda_2=15$  см (крива 1);  $\lambda_1=7$  см і  $\lambda_2=21$  см (крива 2); також для  $\lambda_1=7$  см і  $\lambda_2=35$  см (крива 3). Як видно, вибір довжин хвиль  $\lambda_1=7$  см і  $\lambda_2=35$  см є найкращим варіантом, коли, з одного боку, диференціальний перетин зворотнього розсіювання монотонно залежить від діаметра крапель, а з другого боку – чутливість методу до зміни диференціального перетину максимально і досягає  $\Delta\sigma_d \geq 3$  дБ в діапазоні розмірів крапель  $0,1 < D \leq 6,5$  мм. Таким чином, незважаючи на зменшення відносного розміру часток  $\lambda/D \leq 0,1$ ;

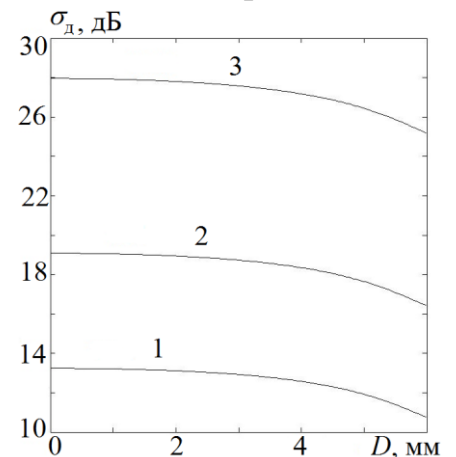


Рис. 6. Диференціальний перетин зворотнього розсіювання одиночної сферичної краплі для  $\lambda_1=7$  см, також для  $\lambda_2=15; 21$  і  $35$  см

$\lambda/D \leq 0,1$ ;

використання довгохвильових НВЧ-діапазонів ( $\lambda_1=7$  см і  $\lambda_2=35$  см) відкриває нові можливості при двочастотному зондуванні опадів, на відміну від традиційно використовуваних довжин хвиль  $\lambda=0,8\div 10$  см. Однак слід зазначити, що практична реалізація описаного підходу пов'язана з необхідністю забезпечення дуже високої точності проведення вимірювань відбивання опадів  $\leq 0,1$  дБ, що пов'язано зі значними технічними труднощами.

У розділі також розглянуто результати диференціального перетину розсіювання від діаметра для краплі Пруппахера-Піттера. На рис. 7 представлена залежність диференціального перетину зворотнього розсіювання в наближенні еквівалентних сферичних (пунктир) і еліпсоїдальних часток (суцільна крива).

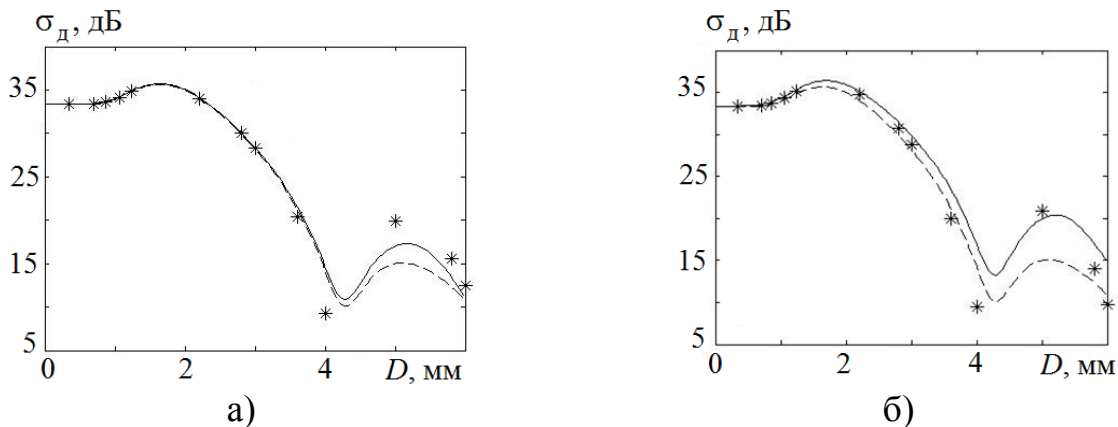


Рис. 7. Диференціальний перетин зворотнього розсіювання одиночної краплі Пруппахера-Піттера в наближенні сферичних (пунктир) і еліпсоїдальних крапель (суцільна крива) для робочих довжин хвиль  $\lambda_1=8$  мм і  $\lambda_2=5,5$  см для співпадаючих вертикальних поляризацій (а) і ортогональних поляризацій (б)

Як і раніше, отримані залежності порівнюються з даними строгого розрахунку на основі методу моментів (маркери) для довжин хвиль  $\lambda_1=8$  мм і  $\lambda_2=5,5$  см для випадку співпадаючих (рис. 7а) і ортогональних поляризацій (рис. 7б) частотних каналів. Важливий висновок, який виходить з представлених залежностей полягає в тому, що точність наближених методів для частотних каналів при співпадаючих VV поляризаціях обох частотних каналів вище, ніж для ортогональних.

**У п'ятому розділі** розглянуті особливості полідисперсних середовищ з несферичних крапель дощу за допомогою методу двочастотного зондування.

Проведено чисельне моделювання перетину зворотнього розсіювання полідисперсного середовища несферичних крапель дощу, враховуючи емпіричну залежність мікроструктурних характеристик гамма-розподілу (параметрів розподілу) від інтенсивності дощу, отриману в результаті статистичної обробки великої кількості експериментальних даних контактних вимірювань. На рис. 8 приведені результати вирішення зворотної задачі у вигляді відновлених залежностей інтенсивності дощу  $I$  (мм/ч) від диференціального значення питомого перетину зворотнього розсіювання, де

крива 1 відповідає довжинам хвиль  $\lambda_1=8$  мм і  $\lambda_2=3,2$  см; крива 2 -  $\lambda_1=8$  мм і  $\lambda_2=5,5$  см; крива 3 -  $\lambda_1=3,2$  см і  $\lambda_2=10$  см; а крива 4 -  $\lambda_1=5,5$  см і  $\lambda_2=10$  см.

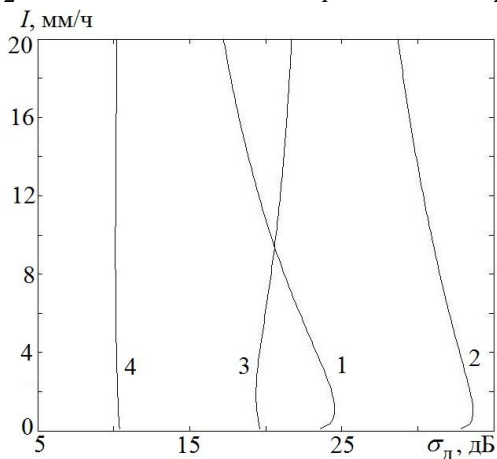


Рис. 8. Відновлення інтенсивності дощу по диференціальному перетину зворотнього розсіювання полідисперсного середовища

зворотнього розсіювання одиночних крапель від їх розмірів. Водночас, проблема неоднозначності при двочастотному зондуванні інтенсивності опадів в діапазонах довжин хвиль, які широко використовуються в дистанційному зондуванні, може бути вирішена за допомогою спеціальної обробки відбитих сигналів. Дійсно, використовуючи монотонний характер залежності інтенсивності дощу від питомого перетину зворотнього розсіювання часток у відповідних діапазонах довжин хвиль, можна запропонувати наступну систему нерівностей для виділення необхідної гілки однозначної залежності

$$\begin{cases} I \leq I_0 \text{ мм/ч, якщо } \sigma_0(\lambda_1) \leq \sigma_{01}; \sigma_0(\lambda_2) \leq \sigma_{02}, \\ I > I_0 \text{ мм/ч, якщо } \sigma_0(\lambda_1) > \sigma_{01}; \sigma_0(\lambda_2) > \sigma_{02}, \end{cases} \quad (7)$$

де константи  $I_0$ ,  $\sigma_{01}$  і  $\sigma_{02}$  визначаються вибраним діапазоном довжин хвиль.

Зокрема, на рис. 9а як приклад приведена залежність інтенсивності дощу від диференціального перетину зворотнього розсіювання для довжин хвиль  $\lambda_1=8$  мм і  $\lambda_2=3,2$  см, де характерні точки  $A$ ,  $B$  і  $C$  відповідають мінімальній інтенсивності дощу – точці  $A$  ( $I=0,1$  мм/ч,  $\sigma_d=23,3$  дБ), точці перегіну  $B$  ( $I=1,1$  мм/ч,  $\sigma_d=24,55$  дБ) і точці неоднозначності  $C$  ( $I=4,2$  мм/ч,  $\sigma_d=23,3$  дБ).

Крім того, більш складна форма крапель Пруппахера-Піттера при використанні наближених методів призводить до збільшення похибки обчислень перетину зворотнього розсіювання полідисперсним середовищем, особливо для дощів великої інтенсивності.

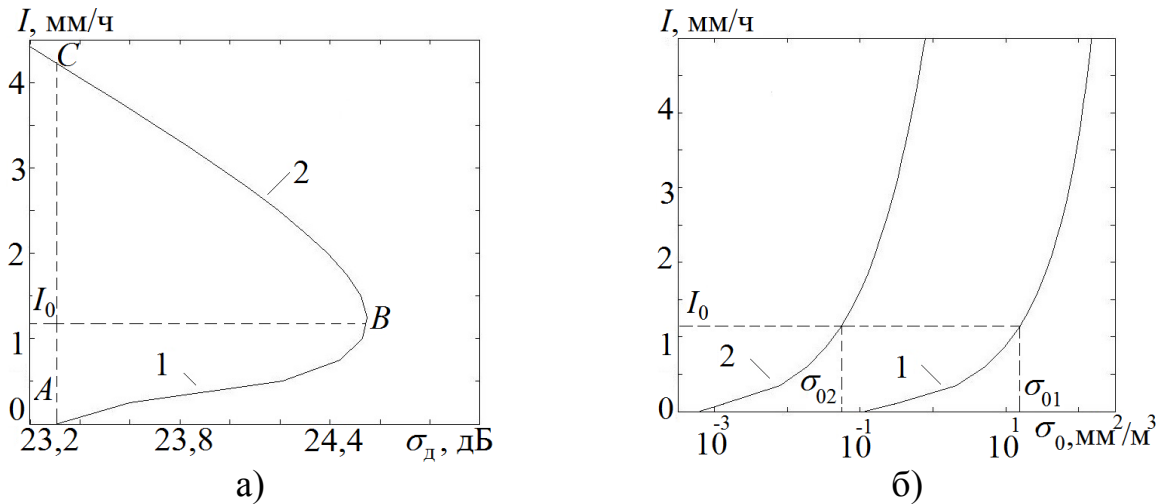


Рис. 9. Диференціальний перетин зворотнього розсіювання від інтенсивності дощу в діапазонах  $\lambda_1=8$  мм і  $\lambda_2=3,2$  см – а), інтенсивність дощу від питомого перетину розсіювання на довжинах хвиль  $\lambda_1=8$  мм (крива 1) і  $\lambda_2=3,2$  см (крива 2)– б)

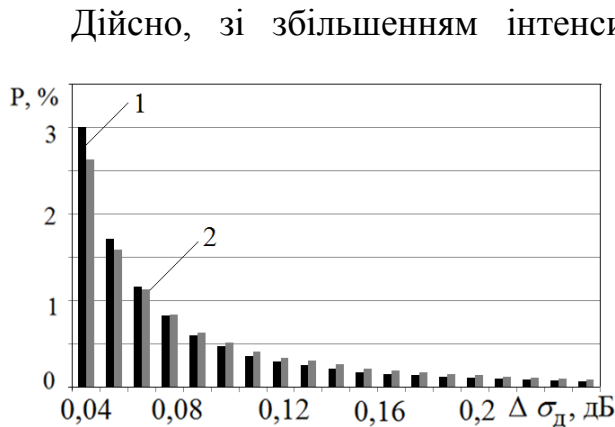


Рис. 10. Ймовірність похибки наближених методів для полідисперсного середовища крапель Пруппахера-Піттера для довжин хвиль  $\lambda_1=8$  мм,  $\lambda_2=3,2$  см

еквівалентних крапель сферичної форми і дипольного розсіювання (рис. 10,  $\lambda_1=8$  мм,  $\lambda_2=3,2$  см, співпадаючі НН поляризації частотних каналів).

В результаті, проведений аналіз показав, що похибки обох розглянутих наближених методів співставні за величиною, а ймовірність похибки 0,1 дБ не перевищує 0,5%.

У **висновках** сформульовано основні результати дисертаційної роботи і зроблені висновки відносно їх практичного використання.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У даній дисертаційній роботі наведені результати досліджень, направлених на вирішення наукової задачі відновлення інтегральних характеристик рідких

опадів. Для вирішення цієї задачі використано двочастотний метод дистанційного зондування, результати якого є важливими для попередження небезпечних атмосферних явищ (паводки, повені та ін.).

Для вирішення зворотної задачі, традиційно використовується наближення крапель сферичної форми, в той час як в реальних опадах форма крапель значно відрізняється від сферичної, що, безумовно, впливає на розсіюючі властивості крапель і, як наслідок, на точність вирішення зворотної задачі. Тому в дисертації отримав подальший розвиток метод двочастотного дистанційного зондування полідисперсного середовища із урахуванням впливу несферичної форми крапель на результати дистанційного зондування. При цьому проведено дослідження меж застосування наближень сферичних крапель еквівалентного об'єму, а також дипольного розсіювання шляхом порівняння зі строгим методом моментів для обчислення перетину зворотнього розсіювання полідисперсних середовищ еліпсоїдальних крапель і крапель Пруппахера-Піттера.

Для досягнення поставленої мети в роботі проведено теоретичні дослідження, розроблено відповідне програмне забезпечення і виконано чисельне моделювання в широкому діапазоні змін частотного і геометричного параметрів.

Основні результати дисертаційної роботи полягають в наступному:

1. Показано, що для забезпечення повноти системи рівнянь при двочастотному зондуванні з використанням сучасних явлень про закон розподілу крапель за розмірами у вигляді трьохпараметричної гамма-функції, доцільно використовувати емпіричну модель, яка пов'язує значення мікроструктурних характеристик і інтенсивність рідких опадів, заснованої на обширних експериментальних дослідженнях (І. В. Литвинов, 1974 р.);
2. Показано, що при використанні традиційних наближень у вигляді сферичних і еліпсоїдальних крапель еквівалентного об'єму при розрахунку перетину зворотнього розсіювання, максимальна похибка досягає  $\approx 7$  дБ на довжині хвилі  $\lambda=0,8$  см і відповідає краплям резонансного діаметра  $D=4$  мм, а в діапазоні  $\lambda \geq 3$  см похибка не перевищує 4 дБ. Тому при збільшенні середньокубічного діаметра крапель Пруппахера-Піттера понад  $D=3$  мм необхідно використовувати строгі методи розрахунку;
3. Для обчислення перетину зворотнього розсіювання полідисперсним середовищем крапель Пруппахера-Піттера запропонована апроксимація даних розсіювання одиночних крапель Пруппахера-Піттера у вигляді полінома 11 порядку за ступенями середньокубічного діаметра і знайдено відповідні коефіцієнти;
4. Показано, що для горизонтальної поляризації падаючого поля величина енергії, що розсіяна одиночною еліпсоїдальною краплею не залежить від кута місця падаючої хвилі (сканування в вертикальній площині). Для вертикальної поляризації перетин зворотнього розсіювання мало змінюється в широкому діапазоні зміни розмірів крапель і суттєва залежність від кута місця спостерігається тільки для крапель великих розмірів  $D \geq 6$  мм;

5. Зворотнє розсіювання електромагнітних хвиль полідисперсним середовищем монотонно залежить від інтенсивності опадів в короткохвильовій часті НВЧ-діапазону ( $\lambda=0,8$  см), що пояснюється усереднюючою дією середовища, яка складається з крапель різних розмірів, в той час як внесок крапель резонансного розміру ( $D \approx 4$  мм), з урахуванням розподілу крапель за розмірами, достатньо малий;
6. У результаті обчислення перетину зворотнього розсіювання полідисперсним середовищем, що складається з крапель еліпсоїдальної форми, в наближенні дипольного розсіювання і за допомогою строгого методу моментів, показано, що похибка наближених методів не перевищує  $\leq 2$  дБ навіть для дощів великої інтенсивності ( $I=50$  мм/ч);
7. Для полідисперсного середовища з еліпсоїдальних крапель різниця між обчисленнями в наближенні еквівалентних крапель сферичної форми і з використанням методу моментів носить знакозмінний характер, в той час як дані, отримані в наближенні дипольного розсіювання, завжди перевищують значення строгих розрахунків. Зазначені відмінності пояснюються наближеним характером обчислень, хоча, навіть в разі зливових дощів ( $I \approx 50$  мм/ч), відмінність даних не перевищує 1,5 дБ, що важливо при проведенні обчислень для практичного застосування;
8. Відмінність перетину зворотнього розсіювання еліпсоїдальних крапель в наближенні дипольного розсіювання від значень, розрахованих за допомогою методу моментів, монотонно росте з інтенсивністю дощу за рахунок внеску великих крапель, які характерні для дощів великої інтенсивності. Однак ймовірність випадання опадів швидко падає із зростанням їх інтенсивності, тому навіть у випадку інтенсивних дощів ( $I \leq 20$  мм/ч), ймовірність появи похибки наближених обчислень не перевищує 1 % для горизонтальної поляризації;
9. У випадку полідисперсного середовища еліпсоїдальних крапель залежність перетину зворотнього розсіювання від кута місця в значній мірі повторює хід залежностей для одиночної краплі, що підтверджує переважний внесок великих крапель у характеристики зворотнього розсіювання;
10. В області малих середньокубічних діаметрів часток ( $D \leq 1$  мм) і при двочастотному зондуванні з використанням діапазонів хвиль  $\lambda_1=0,8$  см і  $\lambda_2=3,2$  см ( $\lambda_1=0,8$  см і  $\lambda_2=5,5$  см) диференціальний перетин зворотнього розсіювання крапель рідких опадів неоднозначно залежить від їх діаметра, а в довгохвильовій ділянці НВЧ-діапазону  $\lambda_1=3,2$  см і  $\lambda_2=10$  см ( $\lambda_1=5,5$  см і  $\lambda_2=10$  см) диференціальний перетин практично не залежить від розмірів часток, що не дозволяє використовувати двочастотний метод зондування в зазначених діапазонах довжин хвиль для відновлення параметрів опадів;
11. Найбільш коротка довжина хвилі, при якій перетин зворотнього розсіювання для крапель води з максимальним середньокубічним діаметром ( $D=6,5$  мм) не потрапляє в область резонансного розсіювання відповідає  $\lambda_1=7$  см, а використання комбінації довжин хвиль  $\lambda_1=7$  см і  $\lambda_2=35$  см при двочастотному зондуванні забезпечує відсутність неоднозначної залежності перетину зворотнього розсіювання від розмірів крапель;



12. Диференціальний перетин зворотнього розсіювання одиночних крапель еліпсоїдальної форми слабо залежить від кута місця падаючої хвилі  $\leq 0,6$  дБ, в той час як для одночастотного зондування перетин зворотнього розсіювання одиночних крапель змінюється на 1,5 дБ в діапазоні зміни кута місця  $0^\circ - 90^\circ$ ;
13. Обчислення диференціального перетину зворотнього розсіювання одиночних крапель Пруппахера-Піттера з використанням наближень еквівалентних крапель сферичної і еліпсоїдальної форми забезпечує кращу точність при співпадаючих вертикальних поляризаціях обох частотних каналів двочастотної метеорологічної РЛС. При цьому наближення еквівалентних крапель еліпсоїдальної форми забезпечує кращу точність ( $\Delta\sigma \leq 6$  дБ), ніж дані, отримані в наближенні еквівалентних сферичних крапель ( $\Delta\sigma \leq 8$  дБ);
14. Залежність інтенсивності дощу від диференціального перетину зворотнього розсіювання для полідисперсного середовища несферичних крапель містить ділянки неоднозначності в області малих значень інтенсивностей опадів. В роботі запропонована і досліджена система нерівностей для однозначного виділення відповідної гілки залежності, що дозволяє усунути зазначену неоднозначність;
15. Запропоновано використовувати робочі довжини хвиль в довгохвильовій частині сантиметрового і дециметрового діапазонів  $\lambda_1 \geq 7$  см і  $\lambda_2 \geq 35$  см при двочастотному зондуванні рідких опадів, щоб забезпечити монотонну і однозначну залежність інтенсивності дощу від диференціального перетину зворотнього розсіювання полідисперсного середовища;
16. Похибка обчислення диференціального перетину зворотнього розсіювання полідисперсного середовища з еліпсоїдальних крапель в наближенні дипольного розсіювання відрізняється не більш ніж на 1 дБ від даних строгого методу моментів;
17. Показано, що похибка наближених обчислень диференціального перетину зворотнього розсіювання полідисперсного середовища з несферичних часток помітно менше при співпадаючих поляризаціях частотних каналів, що важливо при побудові практичних систем дистанційного зондування в двочастотному режимі;
18. Доказано, що похибка обчислень диференціального перетину зворотнього розсіювання полідисперсного середовища з крапель Пруппахера-Піттера в наближенні сферичних крапель еквівалентного об'єму і дипольного розсіювання зростає зі збільшенням інтенсивності дощу, що пов'язано із зростанням внеску великих крапель. Однак похибки обох наближених методів співставні за величиною, а ймовірність похибки обчислення диференціального перетину зворотнього розсіювання порядку 0,1 дБ не перевищує 0,5%.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Веселовская А. Б. Двухчастотное зондирование водяных капель эллипсоидальной формы / А. Б. Веселовская, О. А. Войтович, А. М. Линкова, Г. И. Хлопов // Радиопизика и электроника. – 2012. – Т. 3(17), №4. – С. 37-43.

2. Дифференциальная эквивалентная площадь рассеяния сфероидальных капель воды / А. Веселовская, О. Войтович, А. Линкова, Г. Хлопов // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: матер. 22-й междунар. научно-техн. конф. КрыМиКО-2012, Севастополь, 10-14 сентября 2012. – Т.2. – С. 1051-1052.
3. Веселовская А. О точности расчета эффективной площади рассеяния несферических частиц жидких осадков в приближении дипольного рассеяния / А. Веселовская, Г. Хлопов // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. – 2014. – Т. 57, №5. – С. 3-12.
4. Khlopov G. Use of dipole scattering approximation for radar cross section calculation of non-spherical liquid particles / G. Khlopov, G. Veselovska // International Journal of Remote Sensing. – 2014. – Vol. 35, №15. – P. 5766–5774.
5. Веселовская А. Обратное рассеяние электромагнитных волн полидисперсной средой несферических капель дождя / А. Веселовская, О. Войтович, Г. Хлопов // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.- техн. сб. – 2014. – Вып. 177. – С. 114-123.
6. Веселовская А. Б. Вычисление сечения обратного рассеяния для несферических капель дождя / А. Б. Веселовская // Труды ГГО им. А. И. Воейкова. 2014. – Вып. 570. – С. 237-253.
7. Веселовская А. Двухчастотное зондирование полидисперсной среды в виде капель эллипсоидальной формы / А. Веселовская // Радиотехника. – 2013. – Вып. 172. – С. 51-60.
8. Veselovska G. Radar properties of polydisperse ensemble of ellipsoidal drops / G. Veselovska // Telecommunications and Engineering. – 2014. – Vol. 73, № 4. – P. 297-309.
9. Veselovska G. B. Comparison of rigorous and approximate calculations of electromagnetic scattering by nonspherical particles [Электронный ресурс] / G. B. Veselovska // 13th Kharkiv Young Scientists Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics. – Kharkiv, 2013.
10. Scattering of electromagnetic waves on aspheric dielectric particles / G. Khlopov, G. Veselovska // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії: матер. 11-ї міжнар. конф. TCSET-2012, Славське, 21-24 лютого 2012. – С. 178.
11. Исследование несферичности капель воды с помощью двухчастотного зондирования / А. Веселовская, А. Линкова, Г. Хлопов // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций: матер. 8-й междунар. молодежной научно-техн. конф. РТ-2012, Севастополь, 23-27 апреля 2012. – С. 332.

12. Double-frequency sounding of ellipsoidal water drops / G. Khlopov, A. Linkova, G. Veselovska // The 5<sup>th</sup> World congress “Aviation in the 21<sup>st</sup> Century», Kiev, 25-27 september 2012. – Vol. 2. – P. 3.7.131-3.7.133.
13. Veselovska G. B. Influence of water drops ellipticity on double-frequency sounding [Электронный ресурс] / G. B. Veselovska // 12th Kharkiv Young Scientists Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics. – Kharkiv, 2012.
14. Khlopov G. I., Veselovska G. B. Double-frequency sounding of rain with ellipsoidal water drops [Электронный ресурс] / G. I. Khlopov, G. B. Veselovska // Signal Processing Symposium. – Jachranka, 2013.
15. Features of double-frequency sounding of polydisperse medium with ellipsoidal drops / G. Khlopov, G. Veselovska // Proceedings International symposium «Atmospheric radiation and dynamics» ISARD-2013, Saint-Peterburg, June 24-27 2013. – P. 39.
16. Veselovska G. B. Research of polydisperse medium by double-frequency radar [Электронный ресурс] / G. B. Veselovska // 8th international Kharkiv symposium on physics and engineering of microwaves, millimeter and submillimeter waves MSMW-2013, Kharkiv, June 23-28 2013. – P. 303-305.
17. Использование метода дипольного рассеяния для расчета рассеяния электромагнитных волн на несферических частицах дождя / А. Веселовская, Г. Хлопов // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: матер. 23-й междунар. научно-техн. конф. КрыМиКО-2013, Севастополь, 9-13 сентября 2013. – Т.2. – С. 1220-1221.
18. Electromagnetic scattering by nonspherical particles of rain / G. Khlopov, G. Veselovska, O. Voitovych // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп’ютерної інженерії: матер. 12-ї міжнар. конф. TCSET-2014, Львів-Славське, 25 лютого-1 березня 2014.– С. 776.
19. Backscattering of electromagnetic waves of polydisperse medium with nonspherical raindrops / G. Khlopov, G. Veselovska // Proceedings 15<sup>th</sup> International radar symposium IRS-2014, Gdansk, June 16-18 2014. – P. 459-464.
20. Polydisperse medium of raindrops / G. Khlopov, G. Veselovska // Proceedings 15<sup>th</sup> International conference on mathematical methods in electromagnetic theory, Dnipropetrovsk, August 26-28 2014. – P. 262-265.
21. Comparison of approximation and rigorous solution of electromagnetic scattering from nonspherical drops / G. Khlopov, G. Veselovska // Proceedings of microwaves, radar and remote sensing symposium, Kiev, September 23-25 2014. – P. 75-79.

## АНОТАЦІЯ

**Веселовська Г.Б. Зворотнє розсіювання електромагнітних хвиль полідисперсним середовищем несферичних крапель у задачах двочастотного дистанційного зондування.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук по спеціальності 01.04.03 – Радіофізика. – Харківський національний університет радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України, Харків – 2014.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної наукової задачі відновлення мікроструктурних характеристик рідких опадів за допомогою дистанційного двочастотного зондування і з урахуванням несферичності крапель дощу. При цьому в роботі використовувались наближені методи у вигляді еквівалентних крапель сферичної форми і дипольного розсіювання, результати яких порівнювались зі строгим методом моментів. Показано, що похибка наближених обчислень зворотнього розсіювання полідисперсним середовищем з несферичних часток суттєво менша для співпадаючих вертикальних поляризацій частотних каналів двочастотної РЛС.

Крім того, похибка обчислення диференціального перетину зворотнього розсіювання з використанням наближених методів росте зі збільшенням інтенсивності дощу за рахунок внеску великих крапель. Однак похибки наближених методів співставні за величиною, а імовірність похибки обчислення перетину зворотнього розсіювання не перевищує 0,5% для похибки розрахунків в 0,1 дБ.

**Ключові слова:** модель крапель Пруппахера-Піттера, двочастотне зондування, зворотнє розсіювання, мікроструктурні характеристики.

## АННОТАЦИЯ

**Веселовская А.Б. Обратное рассеяние электромагнитных волн полидисперсной средой несферических капель в задачах двухчастотного дистанционного зондирования.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика. Харьковский национальный университет радиоэлектроники Министерства образования и науки Украины, Харьков – 2014.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научной задачи восстановления микроструктурных характеристик жидких осадков с помощью дистанционного двухчастотного зондирования и с учетом несферичности капель дождя. В работе исследованы характеристики рассеяния полидисперсных сред из несферических частиц с использованием модели капель Пруппахера-Питтера и современной модели трехпараметрического гамма-распределения частиц по размерам.

При этом в работе использовались приближенные методы в виде эквивалентных капель сферической формы и дипольного рассеяния, результаты которых сравнивались со строгим методом моментов.

В результате получены следующие основные результаты:

- для доопределения системы уравнений при решении обратной задачи предложено использовать априорные данные контактного зондирования для зависимости параметров гамма-распределения от интенсивности дождя, а также сформулирована система неравенств, решение которой обеспечивает однозначность решения обратной задачи;

- показано, что погрешность приближенных вычислений дифференциального сечения обратного рассеяния полидисперсной среды из несферических частиц заметно меньше при совпадающих вертикальных поляризациях частотных каналов, что важно при построении практических систем дистанционного зондирования в двухчастотном режиме;

- предложено использовать рабочие длины волн в длинноволновой части сантиметрового и дециметрового диапазонов  $\lambda_1 \geq 7$  см и  $\lambda_2 \geq 35$  см при двухчастотном зондировании жидких осадков, чтобы обеспечить монотонную и однозначную зависимость интенсивности дождя от дифференциального сечения обратного рассеяния полидисперсной среды;

- доказано, что погрешность вычисления дифференциального сечения обратного рассеяния полидисперсной среды из капель Пруппахера-Питтера в приближении сферических капель эквивалентного объема и дипольного рассеяния растет с увеличением интенсивности дождя, что связано с возрастанием вклада крупных капель. Однако погрешности обоих приближенных методов сопоставимы по величине, а вероятность ошибки вычисления дифференциального сечения обратного рассеяния порядка 0,1 дБ не превышает 0,5%.

**Ключевые слова:** модель капель Пруппахера-Питтера, двухчастотное зондирование, обратное рассеяние, микроструктурные характеристики.

## ABSTRACT

**Veselovska G. B. Backscattering of electromagnetic waves from polydisperse medium of nonspherical drops for double-frequency remote sensing.** – Manuscript.

The candidate's thesis of physical and mathematical sciences degree by speciality 01.04.03 – Radiophysics. – Kharkiv National University of Radioelectronics The Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv – 2014.

The thesis is devoted to solving of the actual scientific task of restoration of precipitation microstructural characteristics by double-frequency remote sensing with a glance of rain particles nonsphericity. At that the approximated methods were used on the basis of spherical drops of equivalent volume and dipole scattering which were compared with rigorous method of moments. It was shown that errors of approximate calculations of backscattering characteristics are essentially smaller for the same vertical polarization of frequency channels of double-frequency radar. Besides of this

the calculation errors of differential backscattering cross-section by using of approximate methods increase with rising of rain intensity because of large drops contribution.

But the errors of the both approximate methods are comparable and the likelihood of calculation error for differential cross-section of inverse scattering is not more than 0,5 % for error value about 0,1 dB.

**Keywords:** model of Pruppacher-Pitter drop, double-frequency remote sensing, inverse scattering, microstructural characteristics.