

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

РУЖЕНЦЕВ МИКОЛА ВІКТОРОВИЧ

УДК: 621.396.96: 551.501

РОЗВИТОК ТЕОРІЇ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ РАДІОМЕТРИЧНИХ СИСТЕМ
ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА
МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ХВИЛЬ

05.12.17 - радіотехнічні та телевізійні системи

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харк 2012

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий консультант: – доктор ф.-м. наук, професор Чурилов В.П., головний науковий співробітник Радіоастрономічного інституту НАНУ.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор **Сухаревський Олег Ілліч**, Науковий центр повітряних сил Харківського університету Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Міністерство оборони України, провідний науковий співробітник;

доктор технічних наук, професор **Карташов Володимир Михайлович**, Харківській національний університет радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України, завідувач кафедри радіоелектронних систем;

доктор технічних наук, професор **Волосяк Валерій Костянтинович**, Національний аерокосмічний університет ім. М.Е. Жуковського «ХАІ», Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України, професор кафедри проектування радіоелектронних систем летальних апаратів.

Захист дисертації відбудеться « 26 » вересня 2012р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр.. Леніна, 14, ауд.13.

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

Автореферат розіслано « »

2012р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03
д-р техн. наук, професор

A handwritten signature in black ink, consisting of a stylized 'B' followed by a long horizontal stroke.

В.М. Безрук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дисертаційна робота присвячена актуальній проблемі дистанційного зондування навколишнього середовища. Це проблема удосконалення методу радіометрії міліметрового діапазону хвиль (ММ ДХ).

Дистанційні радіометричні методи дослідження навколишнього середовища зародилися на рубежі 70-х років минулого століття. Це роботи Шанди, Улаби, Башарінова, Шутка, Стогрина з радіотеплового зондування земної поверхні та роботи Розенкранця, Наумова, Жевакіна, Вестворте, Щукіна із зондування атмосфери.

Первісна відсутність надійних даних про радіофізичні властивості земної поверхні та атмосфери вимагала їх накопичення, узагальнення та створення моделей для інтерпретації та відновлення даних, що становлять інтерес для різноманітних сфер людської діяльності.

Незважаючи на низьку, за сучасними мірками, точність інтерпретації отриманих результатів (через недостатнє розуміння фізики низки геофізичних взаємодій і процесів, неадекватності моделей, недоліку експериментальних даних), методи дистанційного зондування (ДЗ) стали стрімко впроваджуватися та використовуватися в практиці кліматології, метеорології, телекомунікацій, в інших сферах. Це було пов'язано з тим, що після перших же спроб практичного використання зазначені методи наочно продемонстрували свою ефективність та перспективність подальшого розвитку. Основою різноманітних технологій радіометрії ММ ДХ служить апаратне забезпечення процедур ДЗ, а також відомості про радіофізичні властивості об'єктів навколишнього середовища (НС), про їх зв'язок з геофізичними та метеорологічними параметрами, математичні моделі, що описують ці властивості та лежать в основі методів і алгоритмів інтерпретації даних радіометрії ММ ДХ. Сучасний рівень розуміння та вирішення всіх цих питань, з одного боку, уже сьогодні дозволяє широко та практично використовувати радіометрію ММ ДХ у різноманітних народногосподарських та наукових цілях. Однак, з іншого боку, досягнутий рівень вирішення сукупності перерахованих вище питань дозволяє виділити суперечність, що лежить в основі проблеми удосконалення методу радіометрії ММ ДХ. Ця суперечність полягає в тому, що сучасний рівень розвитку методу радіометрії не задовольняє запитам, виконання яких необхідне для зростаючих потреб екології, метеорології, розвитку телекомунікацій тощо.

Для задоволення цих потреб, наприклад, необхідно забезпечити підвищення точності контролю та прогнозування тенденцій у радіаційному балансі земної поверхні й атмосфери та в їх вологообміні, що є важливим для завдань кліматології; підвищення точності визначення ступеня забруднення водної поверхні або визначення динаміки деградації озонового шару атмосфери, важливе для завдань екологічного моніторингу; підвищення точності методів радіометричного контролю параметрів атмосфери в завданнях метеорології; підвищення точності прогнозування атмосферного ослаблення в масштабах планети або окремих регіонів, важливе для проблем телекомунікаційного розвитку та ДЗ; удосконалення

елементної бази апаратурного забезпечення радіометрії ММ ДХ, необхідне для вирішення всіх перерахованих вище завдань.

Необхідному підвищенню ефективності та функціональних можливостей засобів і методів радіометрії значною мірою перешкоджає низка нез'ясованих і непояснених питань радіофізичного характеру, відсутність розрахункових даних на основі найбільш сучасних моделей, а також низка невирішених питань апаратурного та алгоритмічного характеру. Формулювання переліку цих питань, їх комплексне дослідження та пропозиція шляхів практичного використання нових результатів становить не тільки загальнофізичний інтерес, але і є актуальною проблемою радіометрії ММ ДХ як найважливішого напрямку технології ДЗ НС.

Для комплексного вирішення цих взаємозалежних питань необхідно, по-перше, провести додаткові дослідження, пов'язані з відсутністю надійних даних про взаємозв'язок радіаційних властивостей деяких розповсюджених типів земної поверхні та станів атмосфери з геофізичними та метеорологічними параметрами цих середовищ у діапазоні коротких міліметрових хвиль, а по-друге, дослідити питання, пов'язані з необхідністю вдосконалення апаратурного та алгоритмічного забезпечення експериментів і систем ДЗ. А саме: дослідити радіаційно-вологісні залежності ґрунтів та пояснити фізику їх особливостей у діапазоні малих вологостей; з'ясувати вплив ступеня та типу забруднення водної поверхні на її радіаційні властивості в ММ ДХ; дослідити і з'ясувати причини аномальної поведінки радіотеплового випромінювання безхмарної атмосфери та атмосфери за наявності хмарного покриву; продовжити пошук нових методів та алгоритмічних підходів, спрямованих на розв'язання завдання відновлення параметрів земної поверхні та атмосфери під час аерокосмічного зондування над поверхнею суші; розв'язати питання, пов'язані з недостатнім рівнем розвитку спрощених схем побудови вхідних ланцюгів приймачів міліметрового діапазону, необхідних для розробки польових і бортових радіометрів, а також питання, пов'язані із труднощами реалізації ефективних хвилеведучих і частотно-селектуючих вхідних пристроїв радіометричних систем.

Просування в комплексному вирішенні цих, пов'язаних єдиною проблемою, блоків питань (апаратурного, радіофізичного та алгоритмічного) повинно дозволити підвищити флуктуаційну чутливість та частотну селективність радіометричних систем, а також забезпечити широкомасштабність їх практичного використання за рахунок підвищення технологічності виготовлення та експлуатаційних властивостей, визначити та пояснити нові ефекти та відомості щодо взаємозв'язків радіофізичних і геофізичних властивостей природних об'єктів (що важливо для розвитку та поліпшення методів інтерпретації даних ДЗ, точності та функціональних можливостей методу радіометрії), розробити та апробувати нові алгоритми обробки та інтерпретації даних радіометрії ММ ДХ. У дисертації вивчення цих проблем деякою мірою спиралося на роботи Щукіна, Шутка, Лііба, Вестворте, Претта та на окремі розробки й експерименти Мартіна, Єстеса, Улабі, Троїцького та ін. Отримані під час роботи узагальнення та висновки дозволили піднятися на новий щабель у розумінні механізмів та особливостей радіотеплового випромінювання найбільш

розповсюдженими типами об'єктів навколишнього середовища, стали основою підвищення точності та ефективності апаратури і методів ДЗ.

У зв'язку із цим, є актуальною тема дисертаційних досліджень, що були спрямовані на удосконалення методу радіометрії ММ ДХ за рахунок спільного (комплексного) розвитку його алгоритмічної основи та алгоритмів, що використовують нову апіорну інформацію щодо особливостей радіофізичних властивостей об'єктів НС, а також за рахунок розвитку апаратурного і методичного забезпечення процедури ДЗ.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційні дослідження пов'язані з плановими держбюджетними НДР: «Теоретичні та експериментальні дослідження в галузі міліметрової радіоастрономії, створення і розвиток інструментальної бази» (Фіта, №0197U19096); «Теоретичні та експериментальні дослідження радіовипромінювання землі та планет сонячної системи. Розробка та створення унікальних радіовимірювальних комплексів» (Випромінювання, №0198U003858); «Теоретические и экспериментальные исследования радиофизического метода дистанционного контроля чистоты воздуха в миллиметровом диапазоне радиоволн» (Чаша, №0102U002483); «Создание и совершенствование инструментальной базы, теоретические и экспериментальные исследования в области миллиметровой радиоастрономии» (Сигма, № 01.9.100); «Дослідження радіофізичних властивостей об'єктів Сонячної системи та земного довкілля на міліметрових хвилях методами радіометрії та спектроскопії.» (Чардаш, № 0100U006423 и Чардаш-2, № 0103U007918); «Розвиток методів і алгоритмів дистанційного зондування атмосфери» (№ 0112U000207); «Теоретические и экспериментальные исследования, направленные на повышение чувствительности радиотелескопов миллиметрового диапазона» (Бета, № 81.067.994) у яких автор брав участь як відповідальний виконавець; «Разработка научной аппаратуры и развитие методов дистанционного мониторинга атмосферы и земной поверхности методами радиометрии миллиметрового диапазона с борта орбитальной космической станции» (Човен); Дослідження спектрів, структури та динаміки малих екзобіологічних молекул. Дослідження радіофізичних властивостей атмосфери Землі та Сонця на міліметрових хвилях (шифры «Чадра», № 0107U001024 и «Чадра-2», №0111U000065) у яких автор брав участь як керівник розділу; «Пошук та дослідження шляхів створення та застосування енергоефективних екологічних джерел енергії» (№ 0109U002572) у якій автор брав участь як виконавець. Деякі із цих НДР виконувалися відповідно до цільової програми ОФА НАНУ «Фізичні та астрономічні дослідження фундаментальних проблем і властивостей матерії на макроскопічному і мікроскопічному рівнях», а також відповідно до інших відомчих програм.

Мета і задачі досліджень. Метою дисертаційної роботи є комплексне удосконалення методу радіометрії ММ ДХ щодо завдань ДЗ НС.

Відповідно до сформульованої мети в роботі було необхідно комплексно розв'язати такі взаємозалежні задачі:

- 1) розвинути методи та алгоритми обробки та інтерпретації результатів ДЗ НС;

2) розробити та створити засновані на нових технічних рішеннях експериментальні зразки лабораторних, наземних, льотних і радіоастрономічних вимірювальних комплексів, систем і їх ключових вузлів;

3) вивчити не з'ясовані дотепер особливості радіотеплового випромінювання розповсюджених типів земного покриву та атмосфери в ММ ДХ;

4) запропонувати та обґрунтувати із залученням модельних уявлень гіпотези, що пояснюють взаємозв'язок геофізичних процесів та їх радіофізичних проявів;

5) забезпечити впровадження отриманих результатів апаратурного, алгоритмічного і загальнофізичного характеру в зацікавлених організаціях НАНУ, МОНМСУ, МНС і Гідромету.

Усі ці завдання були успішно вирішені, що робить вагомий внесок у подальший розвиток сучасної радіометричної апаратури ММ ДХ для досліджень природного середовища і методів пасивної радіолокації.

Об'єктом дослідження в роботі є процес пасивної радіометрії земних покривів та атмосфери землі в ММ ДХ.

Предметом досліджень є властивості та особливості радіотеплового випромінювання об'єктів навколишнього середовища в ММ ДХ, а також апаратура та методи функціонування систем, що використовуються для одержання та інтерпретації даних ДЗ.

Методи дослідження. Під час вирішення перерахованих вище завдань використовувалися методи математичної статистики, чисельне та математичне моделювання, методи нелінійної та адаптивної цифрової фільтрації, методи математичної морфології, методи лабораторного та натурного експерименту.

Вірогідність експериментально та теоретично отриманих результатів підтверджується ефективністю запропонованих алгоритмів і методів їх використання, перевіркою на тестових даних, а також позитивним досвідом обробки реальних супутникових даних і даних, отриманих за допомогою наземного радіометричного комплексу. Розроблені і програмно реалізовані методи та алгоритми обробки були використані і використовуються у вигляді спеціалізованих засобів у РІНАН, КНДГО, УкрНДГМІ. Отримані результати не суперечать основним положенням широко розповсюджених фізичних, геофізичних, метеорологічних і радіофізичних уявлень.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в наступному:

1. Розроблено нові концепції побудови частото-селективних та хвилеведучих пасивних вхідних пристроїв надмалешумливих радіометричних приймачів ММ та субММ ДХ, що відрізняються від своїх аналогів зниженим рівнем втрат, технологічністю та простотою налагодження. Використання пристроїв, заснованих на цих концепціях, дозволяє суттєво повисити флуктуаційну чутливість малешумливих радіометрів та їх експлуатаційні характеристики.

2. Розроблено нову ефективну схему побудови перспективних для ММ і субММ ДХ приймальних систем, що відрізняється від своїх аналогів пониженими на порядок вимогами до рівня вихідної потужності гетеродину та відсутністю пристрою диплексера. Використання пристроїв, заснованих на цьому підході, зокрема економічної вигоди та деяких експлуатаційних і технічних переваг у ММ ДХ (що

було продемонстровано на лабораторних, наземних і вертолітних вимірювальних комплексах), також дає можливість використання твердотільних гетеродинів в радіометрах субММ ДХ.

3. Запропоновано нові методи та алгоритми відновлення параметрів НС та Сонця, що відрізняються від своїх аналогів обраною та експериментально дослідженою апіорною інформацією щодо особливостей радіофізичних властивостей природних об'єктів і середовищ. Це дає можливість повисить функціональність та точність методів відновлення фізичних параметрів атмосфери, земної поверхні та сонячних плям, що продемонстровано в дисертації на прикладах первинних даних, отриманих експериментально або шляхом математичного моделювання.

4. Вперше в ММ ДХ на підставі оригінальних експериментальних даних виявлені аномальні ефекти та особливості радіотеплового випромінювання актуальних для технології ДЗ об'єктів НС (грунтів, водної поверхні, безхмарної атмосфери та хмарного покриву), а також запропоновані та обґрунтовані гіпотези, що пояснюють фізику цих явищ. Окрім загальнофізичного інтересу, ці результати можуть бути корисними щодо розвитку методів відновлення параметрів НС за даними ДЗ, що було продемонстровано у дисертації на прикладах розробки нових методів, алгоритмів або підходів щодо завдань ДЗ.

5. Запропонована і протестована нова базова комбінація моделей для розрахунків повного вертикального поглинення атмосфери за допомогою якої уперше досліджені особливості розподілу широтних і довготних залежностей атмосферного ослаблення в діапазоні 10-1000 ГГц у світовому масштабі та для всієї території України. Ця базова комбінація моделей заснована на використанні відомої радіофізичної моделі та новітнього метеорологічного стандарту і її відрізняє недоступні раніше можливості розрахунків для любого регіону міра з урахуванням сезонно-добового фактору. Це дає нові можливості для вирішення завдань телекомунікаційної, астрокліматичної направленості, ДЗ, тобто.

6. Уперше висунуте припущення щодо наявності стійких морфологічних відмінностей у властивостях радіотеплових полів хмарності та земних ландшафтів, що було підтверджено у результаті спеціальної обробки супутникових радіотеплових зображень 3-х ММ ДХ. Урахування цієї особливості у виді апіорній інформації є корисним щодо розробки нових підходів для розподілу взаємного впливу землі та атмосфери під час аналізу аерокосмічних радіометричних даних.

Практична цінність. Реалізація та впровадження. Практична цінність отриманих результатів полягає в одержанні нових даних щодо особливостей та властивостей радіотеплового випромінювання природних середовищ у ММ ДХ, урахування яких, крім фундаментального та загальнофізичного інтересу, дозволяє вдосконалити існуючі технології радіометрії ММ ДХ при ДЗ НС.

Зокрема, багато з отриманих у цьому напрямку оригінальних результатів були використані для розвитку існуючих і для створення нових підходів в обробці радіозображень об'єктів НС, а також для відновлення їх параметрів за даними ДЗ. Зазначені методи були апробовані під час обробки реальних результатів наземних та аерокосмічних спостережень Землі та атмосфери, а також результатів регулярних сонячних спостережень, проведених у ММ ДХ.

У дисертації досліджено та розроблено такі пристрої, алгоритми та властивості, що забезпечують фізичну основу їх розвитку, особливості та аномальні ефекти випромінювання об'єктів НС, як:

1) елементи та схеми побудови радіометричних систем ММ ДХ, а саме:

- а) пінодіелектрична лінзова лінії передач на основі розробленої концепції неперервного фокусування Гауссова пучка;
- б) диплексери та фільтри на основі сполучення дослідженої концепції багатопроменевої поляризаційної інтерферометрії та розробленої концепції неперервного фокусування Гауссова пучка;
- в) рупорна антена 3-х ММ ДХ з одним і двома переламками кутів розкриття;
- г) бездиплексерна схема побудови двосмугових радіометрів;
- д) трасові та скануючі радіометричні системи наземного та бортового вимірювальних комплексів;
- е) обладнання лазерного юстирування дзеркальних антенних систем.

2) нові підходи та алгоритми обробки даних радіометрії ММ ДХ і відновлення параметрів НС, а саме:

- а) алгоритм двочастотного відновлення параметрів хмарного покриття з фільтрацією зон з аномальними властивостями випромінювання;
- б) варіанти нових підходів та алгоритмів відновлення параметрів атмосфери за даними радіометрії над поверхнею суші;
- в) запропонована та протестована базова комбінація радіофізичної моделі Лііба та сучасного стандарту атмосфери, що дозволяє прогнозувати вертикальне атмосферне ослаблення в глобальному та регіональному масштабах;
- г) алгоритм відновлення обсягів розливу нафтопродуктів на водній поверхні за даними радіометрії ММ ДХ;
- д) метод відновлення параметрів активних сонячних утворень з кутовими розмірами, що є багаторазово меншими, ніж діаграми спрямованості радіотелескопа;
- ж) алгоритми бінаризації радіотеплових зображень із виділенням морфології утворень, що контрастують;
- з) основи нового підходу для розробки алгоритмів відновлення вагової вологості ґрунтів.

3) нові відомості щодо властивостей та особливостей радіотеплового випромінювання об'єктів НС у ММ ДХ та його просторово-часового розподілу, а саме:

- а) особливості сезонної та широтно-довготної мінливості атмосферного ослаблення в глобальному масштабі та на території України;
- б) особливості частотної та температурної залежностей ослаблення радіохвиль у краплинній фракції атмосфери, а також особливості випромінювання у її кристалічній фракції;
- в) аномальні особливості у радіотепловому випромінюванні ясної атмосфери;
- г) особливості утворень, що контрастують, поверхонь суші та полів хмарності морфологічного характеру;
- д) аномальні особливості у радіотепловому випромінюванні хмарного покриття;

ж) особливості радіотеплового випромінювання ґрунтів і забрудненої водної поверхні;

з) характеристика деградації озонowego шару атмосфери над півостровом Крим;

к) особливості астроклімату для найбільших діючих радіотелескопів субММ ДХ і для запропонованих місць розташування таких перспективних радіотелескопів.

Ефективність запропонованих методів та алгоритмів підтверджена позитивним досвідом їх використання під час обробки реальних супутникових радіотеплових зображень (NASA-NAZDA супутника TRMM), даних сонячних спостережень на радіотелескопі РТ-2, спільних радіометричних і метеорологічних спостережень у Харкові, на полігонах служби Гідромету та МНС України в Дніпропетровській області та в Автономній Республіці Крим, що підтверджено чотирма актами впровадження.

Запропоновані та досліджені в роботі нові апаратурно-методичні рішення пройшли практичну апробацію під час проведення наземних, морських і льотних експериментальних досліджень навколишнього середовища та при дослідженні Сонця в ММ ДХ і можуть претендувати на широке застосування, у тому числі й у більш високочастотних діапазонах хвиль.

Результати дисертаційної роботи також використані під час проведення НДР в ІРЕ НАН України та використовуються у навчальному процесі на кафедрі космічної радіофізики Харківського національного університету, що підтверджено двома актами впровадження.

Особистий внесок. Частина результатів дисертації опублікована в роботах [4, 7, 14, 16-18, 24], виконаних без співавторів.

Внесок дисертанта в роботах, виконаних у співавторстві, полягає в наступному: у роботах [19, 28-29] – розробка та налаштування радіометричних приймачів, налаштування та підготовка до астрономічних спостережень антенних систем радіотелескопів РТ-1 і РТ-2, активна та особиста участь у постановці завдання й розробці програми та методики радіоастрономічних досліджень; у роботах [2-3, 6, 9-11, 23, 25-27] – постановка завдання та загальне керівництво програмою досліджень, запропоновано та проведено опрацювання загального принципу побудови описуваного типу пристроїв, узято участь в аналізі результатів дослідження, а також у підготовці вимірювальних стендів і в проведенні програми експериментів; у роботах [12, 22] автором здійснена постановка завдання проведення дослідження, запропоновано підхід використання апріорної інформації для підвищення ефективності створюваних алгоритмів і програми модельного дослідження їх працездатності, узято участь у створенні тестових зображень та аналізі результатів; у роботі [21] автором поставлено завдання проведення дослідження оглядового характеру, для чого було організовано міжнародний колектив учених і здійснено координацію його дослідницьких робіт, проведено літературний пошук, обробку первинних даних, аналіз і узагальнення оригінальних матеріалів, представлених співавторами; у роботі [20] сформульовано проблему, розроблено програму досліджень і склад космічного вимірювального комплексу, а також зроблено попередні оцінки основних вимог до параметрів багаточастотної радіометричної апаратури; у роботі [13] автором запропоновано загальну ідею

лазерного юстирування, запропоновано та реалізовано попередню конструкцію пристрою калібрування та відпрацьовано процедуру калібрування на декількох конструкціях антенних систем; у роботах [1, 8, 15, 30] – запропоновано та розроблено програму досліджень, проведено зіставлення різних моделей, запропоновано їх базову комбінацію та проведено її тестування, а також обробка, аналіз і узагальнення отриманих за її допомогою даних.

Апробація результатів наукового дослідження. Основні результати дисертації були представлені та обговорені на таких міжнародних і вітчизняних конференціях і симпозіумах:

- IGARSS (Tokyo, Japan, 1993; Hamburg, Germany, 1999); «Space Sciences and Technologies» (MRC, Gebze, Turkey, 1993); «Microwave Remote Sensing of the Earth, Ocean, Ice and Atmosphere» (Lawrence, Kansas, USA, 1994); «Wave Propagation and Remote Sensing» {Ahmadabad, India, 1995; Aveiro, Portugal, 1998; Rio de Janeiro, Brazil, 2007}; «EMSL User Workshop» (JRS-Ispira, Italy, 1996); «Climatic Parameters on Radio Waves Propagation (CLIMPARA)», (Ottawa, Canada, 1998, Budapest, Hungary, 2001); «Ozone Depletion and Health Consequences» (Baku, Azerbaijan, Ekoi, 2000); «High Resolution Molecular Spectroscopy» (Nijmegen, Netherlands, 2001); «ClimDiff» (Fortaleza, Brazil, 2003; Cleveland, USA, 2005); «Infrared and Millimetre Waves and Terahertz Electronics» (Karlsruhe, Germany, 2004; Williamsburg, USA, 2005); «Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment» (Florence, Italy, 2008); «Physics and Engineering of Millimeter and Sub-Millimeter Waves» (Kharkov, Ukraine 2001; 2007; 2010); «Наука и Производство» (Харьков, ХТУРЭ, 2007); «Ecological and Health Threat Associated with Environmental Contamination» (Kyiv, 2002); «Signal / Image Processing and Pattern Recognition» (Kiev, 1992, Kiev, 2000, Kiev, 2002); «СВЧ техника и спутниковый прием» (Севастополь, 1992, 1993); «Радиолокационные системы дистанционного зондирования» (Каменск-Уральский, 1988); «Распространение ММ и субММ волн в атмосфере» (Ст. Салтов, 1989); «Радиоастрономическая аппаратура» (Ереван, 1989); «Распространение радиоволн» (Ст. Салтов, 1990); «Радиотелескопы и интерферометры» (Ереван, 1990); «Радиофизическая информатика» (Москва, РТИ, 1990); «Методы и средства представления и обработки случайных сигналов и полей» (Туапсе, 1991); «Применение дистанционных радиофизических методов в исследовании природной среды» (Муром, 1992); «Приборы, техника и РРВ ММ и субММ волн» (Харьков, 1992); «Космические исследования» (Кацивели, 2003); Харьковская конференция молодых ученых «Радиофизика, Электроника, Фотоника и Биофизика» (Харьков, 2009).

Результати наукових досліджень також неодноразово використовувалися для формування міжгалузевих і міжнародних проектів, актуальність яких підтверджена відомими вченими світу в численних листах підтримки. Частина отриманих і опублікованих нами оригінальних результатів використовується в базі даних про випромінювальні властивості земних покривів і атмосфери Бернського інституту прикладної фізики (Швейцарія), Лулеаського технологічного університету (Швеція), Центру дистанційного зондування Бристольського університету (Англія), ІРЕ НАН України. Матеріали дисертації доповідалися та обговорювалися на наукових семінарах ХНУРЕ, РІНАНУ, ІРЕ НАНУ, ІКД НКАУ.

Публікації. Матеріали дисертації відображено у 30 статтях фахових видань (в 15 статтях українських журналів – «Космическая наука и техника», «Космічна Наука і Технологія», «Радиофизика та Радиоастрономия», «Прикладная радиоэлектроника», «Вісник Харківського національного університету», та в 15 статтях закордонних журналів – «Radio Science», International Journal of Infrared and Millimeter Waves, Письма ЖТФ, «Natural Science», International Journal «Geospatial Today», Technical Physics Letters, Turkish Journal of Physics), а також в 24-х статтях і в 36-ти тезах збірників праць 38-х конференцій (24-х міжнародних і 14-х вітчизняних).

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, десяти додатків і списку використаної літератури, які займають у цілому 424 сторінки. У дисертації представлено 150 малюнків, 7 таблиць, 10 додатків на 88 сторінках і список використаної літератури з 434 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність вирішення проблеми вдосконалення методу радіометрії ММ ДХ у завданнях ДЗ НС, розглянуто загальний стан питання в галузі радіометрії ММ ДХ, внесок провідних вітчизняних і закордонних організацій та окремих учених у цій галузі знань. Показано взаємозв'язок досліджень із науковими програмами та темами, виділено об'єкт і предмет досліджень, сформульовано мету та завдання досліджень, наукову новизну та практичну значущість отриманих результатів, наведено дані щодо впровадження, публікацій, апробації та особистого внеску здобувача.

У першому розділі «Розвиток апаратурно-методичного забезпечення методу радіометрії ММ ДХ» розглянуті проблеми пошуку нових апаратурно-методичних рішень, необхідних для забезпечення широкомасштабного практичного використання методів радіометрії ММ ДХ у завданнях ДЗ НС. Тут розглянуто стан питання та сформульовані сучасні вимоги до радіометричних засобів ДЗ і питання апаратурного та методичного характеру, що потребують свого вирішення та подальшого розвитку. Зокрема, у зв'язку з істотно збільшеним в останні роки рівнем параметрів активних елементів НВЧ тракту, а також вимогами до масштабності та точності моніторингу, у розділі відзначено нагальну потребу поліпшення технологічності, частотної селективності та мінімізації втрат вхідних ланцюгів радіометричних систем, поряд із просуванням цих якостей у субММ ДХ. Для комплексного вирішення цих актуальних проблем апаратурного плану були запропоновані, досліджені та апробовані нові технічні рішення, підходи та концепції, пов'язані з розробкою схеми побудови приймальної системи і її частотно-селектуючих вузлів (фільтрів, диплексерів, ліній передач), з розробкою нових високотехнологічних антенних пристроїв та систем формування радіотеплових зображень (підрозділ 1), а також питання методичного характеру, пов'язані з необхідністю розвитку методів настроювання та виміру параметрів антен, вибором

методів калібрування та з необхідністю обліку паразитного фонового випромінювання (підрозділ 2).

Найважливішим вузлом вхідних ланцюгів радіометричних систем, що впливає на флуктуаційну чутливість радіометра є вузол диплексера. Основними вимогами, що висуваються до такого типу пристроїв, є малий рівень втрат корисного сигналу, прийнятні втрати сигналу гетеродину, а також ефективне пригнічення шумів гетеродину із забезпеченням односмугового режиму приймання.

У розділі показано, що найбільше ефективно ця проблема може бути вирішена на основі сполучення принципів поляризаційної багатопроменевої інтерферометрії та неперервного фокусування Гауссового пучка. На рис. 1 наведені залежності втрат сигнального та гетеродинного каналів розробленого та експериментально дослідженого багатопроменевого поляризаційного диплексера. Ці залежності отримані з урахуванням втрат шляхом модифікації виразів Л.Б. Князькова для коефіцієнтів передачі поляризаційних багатопромених інтерферометрів:

$$\frac{P_{Lo}}{P_o} = \left| \frac{E_{Lo}}{E_o} \right|^2 = \frac{(L \sin 2\beta \sin \alpha)^2}{(1 - L \cos^2 \alpha \cos 2\beta)^2 + 4L \cos^2 \alpha \cos 2\beta \sin^2(\gamma/2)},$$

$$\frac{P_s}{P_o} = \left| \frac{E_s}{E_o} \right|^2 = \frac{\cos^2 \alpha ((1 - L \cos 2\beta)^2 + 4L \cos 2\beta \sin^2(\gamma/2))}{(1 - L \cos^2 \alpha \cos 2\beta)^2 + 4L \cos^2 \alpha \cos 2\beta \sin^2(\gamma/2)},$$

де L - коефіцієнт загасання за потужністю за один прохід диплексера, $\gamma = 4\pi L/\lambda$ - електрична довжина диплексера, β - кут розвороту куткового відбивача до осі, α - кут розвороту дровових решіток.

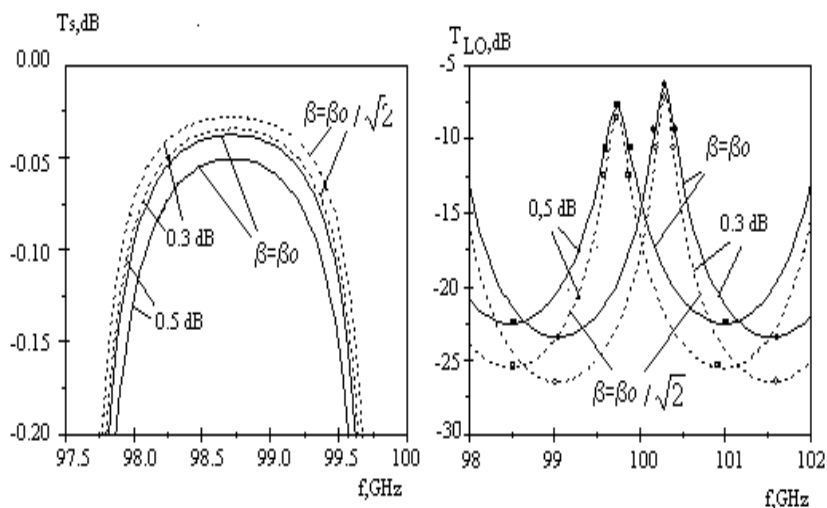


Рис. 1. Втрати сигнального (а) і гетеродинного (б) каналів багатопроменевого поляризаційного диплексера.

За сукупністю своїх технічних параметрів розроблені та експериментально досліджені два нові класи пристроїв частотної селекції продемонстрували переваги

їх практичного використання стосовно найпоширеніших і ефективних на сьогодні у світі аналогів на основі Фабрі-Перо і Мартин-Пуплет інтерферометрів, що використовуються в радіоастрономії та в системах ДЗ НС..

За допомогою чисельного аналізу записаного в роботі виразу для діелектричного середовища зі змінюваним у поперечному перерізі променеводу коефіцієнтом переломлення $n(x)$:

$$n(x) = 1 + \frac{r^2 \lambda^2}{2w_0^4 \pi^2} \left(1 - \left(\frac{x}{r} \right)^2 \right),$$

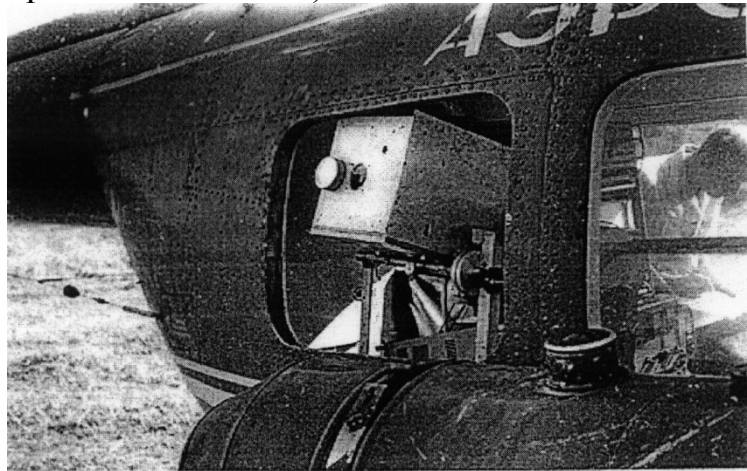
де w_0 – радіуси Гауссова пучка в перетяжці променя, r – радіус лінії передач, x – відстань від осі пучка, показана можливість створення високоефективної пінодіелектричної лінії передач із максимальною величиною $n(x) = 1,01 \dots 1,03$. Теоретичні та експериментальні (в 3-х ММ ДХ) дослідження цього підходу продемонстрували низький рівень загасання (менш 0.7 дБ\м вже при співвідношенні діаметра променеводу до довжини хвилі, що дорівнює 10), і одномодовий режим поширення при високій технологічності та експлуатаційних параметрах цього нового типу лінії передач для ММ і субММ ДХ. Елементи такої пінодіелектричної лінії передач були також успішно використані під час створення описаних вище квазіоптичних диплексерів і фільтрів, заснованих на принципі багатопроменевої поляризаційної інтерферометрії.

Отримані технічні параметри, а також простота виготовлення, налаштування та експлуатації дозволяють розглядати запропоновані принципи та розроблені на їх основі нові елементи як найбільш перспективні для створення частотно-селективних, хвилеведучих та антенних пристроїв радіометричних систем ММ і субММ діапазонів.

У розділі також показано, що у випадках широкосмугового DSB режиму вимірів, що часто використовуються у практиці радіометрії, є можливість побудови приймальної системи без вузла диплексера. Запропонована оригінальна бездиплексерна схема побудови радіометричного приймача 3-х ММ ДХ відрізняється відсутністю відносно складного вузла диплексера, що вносить додаткові втрати, а також можливістю застосування твердотілих гереодинів із зниженою більш ніж на порядок вихідною потужністю (менше 0,5 мВт). Перераховані достоїнства вказують на особливу перспективність застосування описаної схеми побудови не лише в діапазоні коротких ММ хвиль, але й аж до частот, що перевищують 600 ГГц, на яких отримання 0,3 мВт — 0,5 мВт потужності твердотілого генератора є цілком реальним завданням вже на даному етапі розвитку техніки.

Зазначена вище схема побудови приймачів була досліджена та успішно використана нами в 3-х ММ ДХ під час побудови наземних радіометрів і радіометрів – поляриметрів, бортових радіометрів – трасерів (рис. 2) і бортових скануючих радіометрів, систем радіобачення, а також радіометричних приймачів радіотелескопів 3-х ММ ДХ РТ-1 і РТ-2. Усі ці вимірювальні системи широко використовувалися для одержання описаних у наступних розділах дисертації результатів або використовуються в цей час для досліджень атмосфери, земної поверхні та Сонця.

Невід'ємним та важливим елементом вхідного пристрою будь-якої радіометричної системи ДЗ є також вузол антенної системи. У даному розділі роботи вперше запропоновано використання як антени ММ ДХ багатомодового пірамідального рупора, синтез діаграми спрямованості (ДС) якого здійснюється за допомогою вищих типів хвиль, що збуджуються на конструктивних неоднорідностях у вигляді переламів кута розкриття. При цьому, поряд з експериментальним дослідженням частотної залежності (у діапазоні 85-115 ГГц) параметрів ДС цього типу антени (з одним і двома зламами), значень її НВЧ втрат (0,25дБ), розсіювання поза основною пелюсткою ДС (3,5%) і крос-поляризаційних властивостей (-28дБ), також було проведено вимір та комплексне зіставлення аналогічних параметрів з декількома відомими та розповсюдженими типами рупорів (діагональних, лінзових, скалярних, відкритих кінців променеводів тощо).



Радіометрична система для досліджень поляризаційних властивостей випромінювання атмосфери в 3-х і 8-ми ММ ДХ (ліворуч) і бортова вимірювальна система 3-х ММ ДХ для досліджень випромінювальних властивостей земної поверхні та атмосфери (праворуч).

Рис. 2. Вимірювальні системи 3-х ММ ДХ із радіометрами бездиплексерного типу.

У розділі показано, що за сукупністю зазначених параметрів і з урахуванням високої технологічності виготовлення запропонований для використання в радіометрії ММ і субММ ДХ як основної антени (або як опромінювача дзеркальної антени) даний тип рупора є одним з найбільш перспективних і конкурентоспроможних. Тут також наведено опис результатів наземної та бортової апробації, схем побудови та основні параметри двох типів запропонованих електромеханічних сканерів, призначених для їх сполучення з одночастотними та багаточастотними радіометрами ММ ДХ.

Другий підрозділ першого розділу дисертації присвячено опису потребуючих особливо ретельного підходу питань методичного забезпечення високоточних радіометричних експериментів. У цій частині роботи досліджено проблеми мінімізації помилок визначення радіояскравості джерела радіотеплового випромінювання з урахуванням вибору сукупності методичних операцій калібрування, оцінок атмосферного поглинання та контролю прийнятого антеною фонових випромінювання. Тут, зокрема, також запропонована та експериментально

апробована методика виміру такого важливого для радіометрії ММ ДХ параметра, як коефіцієнт розсіювання поза основною пелюсткою ДС різних типів рупорних антен, а також дзеркальних антен Касегрена радіотелескопів РТ-2 і MRT-2.

У другому розділі *«Дослідження особливостей радіотеплового випромінювання безхмарної атмосфери та гідрометеорних утворень у міліметровому діапазоні хвиль»* досліджено питання взаємозв'язку радіофізичних властивостей атмосфери з її метеорологічними параметрами, а також властивості просторового, сезонного та висотного розподілу параметрів ослаблення в атмосфері ММ ДХ. Актуальність проведення цих досліджень обумовлена тим, що знання радіофізичних властивостей атмосфери Землі важливе для розвитку та практичного застосування методів радіометрії ММ ДХ як для дистанційного моніторингу параметрів самої атмосфери, так і для інтерпретації результатів аерокосмічного ДЗ земного покриття (в останньому випадку атмосфера є джерелом деструктивного фону та напівпрозорим екраном одночасно). В обох цих групах завдань ДЗ нез'ясовані дотепер питання та особливості радіофізичних властивостей атмосфери гальмують подальший їх розвиток і застосування в аспекті точності та функціональних можливостей методу радіометрії. У зв'язку з актуальністю вирішення цієї проблеми у другому розділі дисертації були проведені такі оригінальні роботи та дослідження:

- сезонно-добові наземні експерименти з вивчення аномалій випромінювання ясної атмосфери в ММ ДХ і вертолїтні сезонні дослідження висотних профілів атмосферного поглинання;
- зіставлення деяких найпоширеніших та найбільш сучасних моделей, що описують атмосферне ослаблення між собою та з оригінальними та літературними експериментальними даними в ММ ДХ;
- вибір і тестування базової комбінації моделей для прогнозування регіональної та глобальної сезонно-добової мінливості погонного та повного вертикального ослаблення радіохвиль в атмосфері, а також проведення на її основі розрахунків та аналізу отриманих даних у широкому частотному діапазоні для території України й у світовому масштабі;
- сезонні, цілодобові та річні цикли радіометричних досліджень атмосфери та розвиток методів моніторингу хмарного покриття на основі виявлених особливостей і аномалій радіотеплового випромінювання;
- аналіз отриманих розрахунковим шляхом температурної і частотної залежностей ослаблення радіохвиль у хмарному покритті в широкому діапазоні водності хмар;
- статистичний аналіз аномальних проявів радіотеплового випромінювання хмарності за даними оригінальних експериментів і розрахункових усереднених характеристик ослаблення в дощах і в ясній атмосфері для різних регіонів України та окремих, у тому числі високогірних, регіонів світу;
- розгляд проблеми моніторингу озонового шару у Чорноморському регіоні, включаючи традиційні та прогресивні методи його контролю, а також виявлення багаторічної динаміки його змін.

Отримані під час проведення зазначених досліджень наукові результати та дані дозволили просунутися в питаннях загальнофізичного розуміння радіофізики

атмосфери та практичного підвищення точності та функціональних можливостей методу радіометрії ММ ДХ, що є важливим для завдань кліматології, метеорології, прогнозу погоди, штучного впливу на хмари, радіоастрономії тощо.

На підставі зіставлення комбінації найбільш розповсюджених метеорологічних моделей та моделей метеорологічного поглинання між собою та даних оригінальних льотних експериментів запропонована базова комбінація моделей, що описує вертикальне та погонне атмосферне поглинання у частотному ДХ 10-1000 ГГц. При цьому продемонстрована важливість вибору адекватної метеорологічної моделі висотних профілів метеоданих, що впливає на точність таких розрахунків. Показано, що розрахунок повного вертикального поглинання з похибкою менш ніж 10% (10-30% для високогірних регіонів) може бути забезпечений сумісним використанням останнього метеорологічного стандарту атмосфери на основі бази даних ERA -15 та MPM моделі Лііба для контролю поглинання

$$\gamma(f) = \gamma_l + \gamma_d + \gamma_c,$$

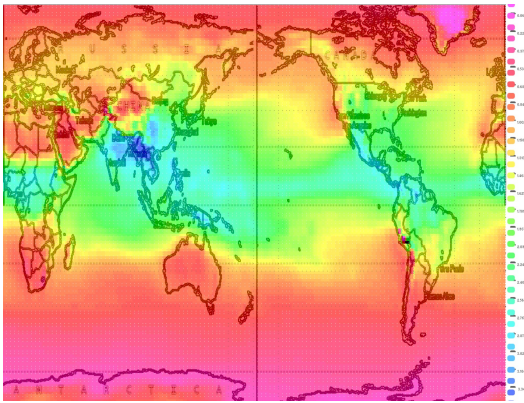
де γ_l – резонансна частка 44 спектральних ліній для молекули O_2 та 30 ліній для молекули H_2O , γ_d - частка сухого повітря, γ_c - частка континуума водяної пари.

У результаті аналізу отриманих таким чином даних уперше виявлені та кількісно оцінені відмінності в умовах проходження сигналів ММ ДХ для тих самих широт на різних континентах і над різними океанами (рис. 3), а також для регіонів України. Показано, наприклад, що такі відмінності у величині атмосферного ослаблення навіть однієї й тієї ж пори року можуть бути багаторазовими. Ця обставина, а також оцінений сезонний і широтний хід ослаблення (практично важливий для ДЗ НС), зокрема, свідчать про те, що для різних регіонів світу оптимальні частоти сигналів супутникового та тропосферного зв'язків можуть суттєво відрізнятися, як і сезонно-погодна стабільність параметрів поширення. Іншим важливим результатом цього напрямку роботи є те, що цей підхід забезпечує недоступну ще донедавна можливість проведення оперативної оцінки параметрів вертикального та погонного поглинання атмосфери для будь-якої точки світу у широкому спектрі частот, причому для будь-якого часу доби і місяця.

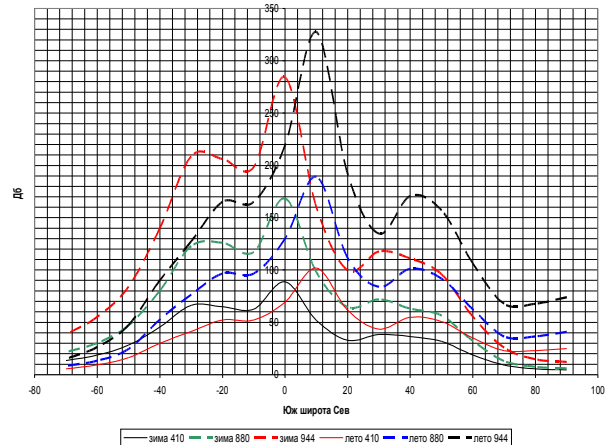
Крім сезонно-добових та регіональних особливостей вертикального та горизонтального поглинання ясної атмосфери в глобальному масштабі та для України, для її території були також досліджені щомісячно функції розподілу ослаблення та кумулятивні функції перевищення значень ослаблення у дощах. Використання функцій розподілу дощів у сукупності з моделлю Лііба, що описує ослаблення в шарі дощу, дозволило уперше на території України оцінити тимчасову статистику найбільш несприятливих подій в атмосферному ослабленні (для всіх вікон прозорості) і її регіональні особливості. Такі результати (рис. 4) становлять практичний інтерес для статистичної оцінки працездатності окремих методів ДЗ, а також актуальні для розвитку в Україні перспективних ліній зв'язку ММ ДХ.

Важливим результатом 2-го розділу також є вперше виявлені та досліджені аномальні (з точки зору найпоширеніших сучасних уявлень) явища в поведінці радіотеплових властивостей ясної атмосфери в періоди часу, близькі до сходу Сонця. Ці події виявлялися в плавному збільшенні радіояскравості ясного неба в 3-х ММ

ДХ із його одночасним зниженням в 8-ми ММ ДХ (або в досвітній час, навпаки, – зниження радіояскравості в 3-х ММ ДХ і її збільшення в 8-ми ММ ДХ).



а) липень



б)

Рис. 3. Приклади глобального розподілу значень вертикального поглинання атмосфери (94 ГГц - а) та його широтної залежності (б) для Атлантичного океану (410 ГГц, 880 ГГц і 944 ГГц).

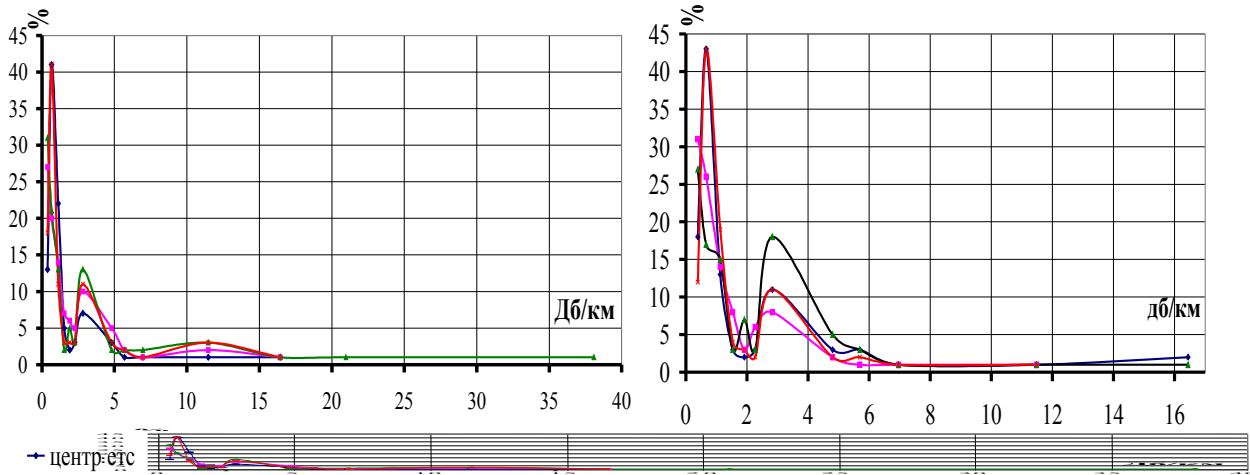


Рис. 4. Приклади розподілу ймовірності (% від загальної тривалості подій дощу) для значень погонного ослаблення в дощах на частоті 94 ГГц у червні (а) і липні (б) для різних регіонів України.

У результаті різнобічного розгляду прямих та опосередкованих ознак, що супроводжують це явище, у роботі висунуто та обґрунтовано гіпотезу щодо можливості існування в безхмарній атмосфері просторово розподіленої краплинної та кристалічної вологи, а також проведено розрахункові оцінки параметрів вологості атмосфери і їх динаміки протягом цих подій. Під час проведенні розрахункових оцінок динаміки вологозапасу Q та водозапасу W атмосфери ми використовували систему рівнянь для 3 мм і 8 мм діапазонів у вигляді:

$$\tau_{\lambda} = \tau_{\text{oxygen}\lambda} + \Psi(\lambda) Q + \kappa(\lambda, T_0) W,$$

де Ψ і κ - коефіцієнти погонного поглинання у парах води та у краплинній волозі відповідно, T_0 – температура завислих крапель води в атмосфері.

Запропонована точка зору дає також можливість пояснення численних випадків аномального перевищення експериментальних значень радіояскравості атмосфери над теоретичними, що спостерігаються різними авторами протягом десятків років у короткохвильовій частині ММ ДХ. У розділі було звернено увагу на важливість даного результату в контексті завдань кліматологічного прогнозування, а також завдань прогнозування параметрів поширення радіохвиль.

Для хмарного покриву у результаті цілорічного проведення цілодобових 2-х частотних і поляризаційних досліджень властивостей та особливостей радіотеплового випромінювання були виявлені, статистично оцінені та фізично інтерпретовані випадки аномального співвідношення величин атмосферного ослаблення для пари частот 94 ГГц і 39 ГГц. Показано зв'язок цих численних подій, що суттєво впливають на точність відновлення параметрів хмарності за даними ДЗ, з наявністю в хмарному покриві зон кристалічної води різної мікроструктури.

Експериментально продемонстрована ефективна можливість використання 2-х частотної радіометрії ММ ДХ не тільки для підвищеної точності відновлення параметрів водності хмарного покриву, але й для оцінок його ефективної температури (рис. 5) і мікроструктури гідрометеорів (за даними поляризаційних вимірів).

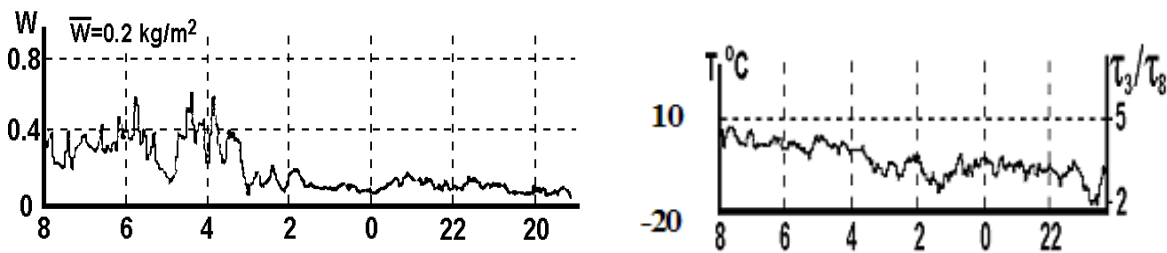


Рис. 5. Фрагмент запису (з 8 до 24 годин) відновлених за радіометричними даними значень водозапасу хмарності (W) і середньої (ефективної) температури хмарного шару (T) протягом проходження атмосферного фронту.

Проблема температурної та частотної залежності ослаблення (випромінювання) хмарним шаром була досліджена у дисертації розрахунковим шляхом з використанням моделей подвійного Дебая, Ван Дер Холста та Лііба для завислих водяних крапель. Тут вперше наочно показана практично важлива для радіометрії ММ ДХ частотна ділянка (поблизу оцінки 100 ГГц), на краях якої спостерігається зміна знака температурного градієнта ослаблення радіохвиль у краплях (і, відповідно, його мінімальна температурна залежність), а також виділені пари частот найбільш кращі для дистанційного моніторингу водозапасу або ефективної температури хмарного покриву.

Для розрахунків залежностей $\tau_{\lambda 1} / \tau_{\lambda 2}$ було використано вираз, що впливає з формул Дебая та Ван Дер Холста:

$$\frac{\tau_{\lambda_1}}{\tau_{\lambda_2}} = \frac{\lambda_2^2 (\varepsilon_s + 2)^2 + (\lambda_r / \lambda_2)^2 (\varepsilon_o + 2)^2}{\lambda_1^2 (\varepsilon_s + 2)^2 + (\lambda_r / \lambda_1)^2 (\varepsilon_o + 2)^2}$$

де ε_s і ε_o - статична та оптична діелектричні проникності водяних крапель відповідно, λ_r - довжина релаксаційної хвилі.

У роботі також наочно продемонстровано ефективність якісно вдосконаленого алгоритму відновлення параметрів хмарності з підвищеною точністю, який був розроблений на підставі виявлених експериментальним і розрахунковим шляхом вищезгаданих особливостей. В основі розробленого алгоритму лежить відомий метод відновлення водозапасу хмарного покриву за даними двочастотного радіометричного зондування атмосфери в ММ ДХ. Відмінною рисою запропонованого алгоритму підвищеної точності є попереднє використання двох додаткових кроків. Один з них спрямований на виділення зон хмарності з аномально низькими або аномально високими значеннями співвідношень ослаблення ММ хвиль за допомогою спеціально розробленого методу, контролюючого динаміку спадного випромінювання. Другий крок алгоритму спрямований на попередню оцінку ефективної температури хмарного шару за даними двочастотних радіометричних вимірів.

Даний метод було успішно використано у польових спостереженнях динаміки водозапасу та ефективної температури фронтальних зон хмарного покриву на полігонах Держкомгідромету України такими організаціями, як УкрНДГМІ (м. Київ), КНДГО (АР Крим) і РІНАНУ (м. Харків).

Важлива для сучасної кліматології та екології проблема виснаження озонового шару атмосфери розглянута в даному розділі стосовно Чорноморського регіону у співпраці з колегами із КНДГО (АР Крим), МРС (Туреччина) і АзГідромет (Азербайджан). Тут описано апаратурно-методичне забезпечення, що застосовується в регіоні для озонотрії, та приклади його використання, проведено узагальнення результатів тридцятирічних спостережень КНДГО для стратосферного озону над Кримом та виявлена 6-відсоткова деградація товщини озонового шару за двадцятирічний період кінця минулого століття.

Зазначені вище результати даного розділу роботи становлять науковий та практичний інтерес для вирішення багатогранної проблеми з удосконалення методів радіотрії ММ ДХ.

Третій розділ дисертаційної роботи *«Дослідження особливостей радіотеплового випромінювання земних покривів у ММ ДХ»* присвячено дослідженню таких невирішених і актуальних проблем ДЗ НС методами радіотрії ММ ДХ, як регіональні відмінності радіаційно-вологісних залежностей ґрунтів, що спостерігаються, а також проблеми кількісних оцінок ступенів забруднення водних поверхонь. Нерозв'язаність цих питань утруднює інтерпретацію даних аерокосмічного зондування та вимагає додаткового аналізу вже наявних (у тому числі й у суміжних галузях науки) даних, а також викликає необхідність постановки додаткових досліджень, спрямованих на вирішення цих актуальних у сфері ДЗ завдань.

До проблем, що вимагають додаткового або повторного, більш ретельного експериментального дослідження та теоретичного осмислення, у першу чергу, слід віднести наступну. Як вже зазначалося, проведені у сантиметровому ДХ численні експерименти продемонстрували стійку наявність радіаційних та радіолокаційних залежностей від вологості ґрунту. Однак, крутість цих залежностей

відмінна від поля до поля та різна для різних регіонів, що утруднює інтерпретацію даних ДЗ та знижує вірогідність моніторингу.

У зв'язку із цим нами була проведена програма експериментальних досліджень радіотеплових і радіолокаційних властивостей ґрунтів.

Виявлені в процесі цих досліджень злами в залежностях ПЕПР і нелінійності в залежностях Тя, які перебувають між 4% і 10% значеннями вологості ґрунту, є зовсім несподіваними, якщо їх розглядати з погляду загальноприйнятої теорії (яка припускає, що збільшення вологості ґрунту веде до збільшення значень його діелектричної проникності та, як наслідок, до збільшення значень ПЕПР). Причому, ці злами мали місце і в радіолокаційному режимі для всіх кутів візування, на всіх поляризаційних комбінаціях і на обох частотах 94 ГГц і 140 ГГц, і в радіометричному режимі на частоті 94 ГГц.

У даному розділі роботи сформульовано та аргументовано обґрунтована наступна гіпотеза, яка дозволяє пояснити механізм формування цього феномена, що становить практичну важливість і котрий вперше було виявлено у ММ ДХ у вологісних залежностях ПЕПР і Тя ґрунтів.

З підвищенням вологості ґрунту від мінімальних до середніх значень не відбувається будь-яких істотних змін величини діелектричної проникності ґрунту. Це пов'язано з тим, що на даному етапі підвищуються значення міцно та сипко зв'язаних форм води (які, як відомо з геофізики, мають аномально низькі значення діелектричної проникності). При цьому відбувається істотна зміна мікроструктури, що виявляється у комкуванні та збільшенні грудок, а також у зміні щільності ґрунту (що регулярно відзначалося під час проведення радіофізичних полігонних експериментів). Такі зміни можуть служити причиною зниження внеску об'ємного розсіювання на формування зворотно відбитого сигналу. Обидві ці причини в сукупності приводять до зниження значень ПЕПР і до деякого збільшення значень Тя ґрунту.

На наступному етапі підвищення вологості ґрунту, від середніх значень до високих, уже має місце підвищення вмісту вільних форм води. Це приводить до збільшення значень діелектричної проникності ґрунту та до стоншення товщини скін-шару. Як результат, ми спостерігаємо підвищення значень ПЕПР і зниження Тя вже відповідно до загальноприйнятих у цей час теоретичних підходів. Урахування цих ефектів у практиці ДЗ відкриває нову можливість для відновлення коливань вологостей ґрунту з підвищеною точністю під час використання спільного активно-пасивного режиму для контрольованих типів поверхонь.

Другий підрозділ даного розділу дисертації присвячений дослідженню методами радіометрії ММ ДХ актуальної для сучасної екології проблеми моніторингу забруднення поверхонь акваторій.

У результаті проведених у світі до цього часу досліджень радіофізичних властивостей забруднених нафтопродуктами морських акваторій були обґрунтовані теоретично та підтверджені експериментально принципові можливості методів активного та пасивного мікрохвильового ДЗ. Аналіз літературних джерел, присвячених радіометрії водної поверхні та зон її забруднення в ММ ДХ, показав їх відносно нечисленність, уривчастість результатів і, найчастіше, відсутність

комплексного підходу в апаратурному та методичному плані. Ці обставини утруднюють оцінку впливу апаратурних параметрів вимірювальних систем (частоти, поляризації, кута візування), впливу типу нафтопродукту та погодних умов на величину контрасту, що спостерігається, та на можливості і працездатність методів відновлення параметрів забруднення.

У роботі були проведені дослідження радіотеплових характеристик плівок різноманітних типів нафтопродуктів, що покривають рівну водну поверхню, отримані залежності радіояскравості морської поверхні в різних сезонних і погодних умовах, а також розглянута можливість відновлення їх параметрів за даними ДЗ у пасивному режимі у ММ ДХ.

Для теоретичних розрахунків радіотеплового випромінювання та для кількісних оцінок джерел помилок відновлення параметрів забруднення, використовувались експонентна модель випромінювання атмосфери, плоскошарувата модель випромінювання водної поверхні, покритої шаром плівки нафти, а також широко відомі формули Френеля, Дебая та формули переносу помилок. Розрахунки проводилися для випадків безхмарної атмосфери та гладкої поверхні розділу.

У результаті аналізу вперше отриманих у двох точках ММ ДХ залежностей радіояркісної температури $T_{\text{я}}$ від товщини шару нафтопродуктів виявлено інтерференційний характер випромінювання для слабо поглинаючого дизельного палива та швидке «замивання» цього характеру для іншого, більш важкого типу нафтопродукту – машинної олії.

З'ясовано, що для середніх кутів візування максимальне значення контрасту для діапазону 39 ГГц може досягати 100 К та 50 К для 94 ГГц при горизонтальній поляризації.

Виявлено, що для дуже тонких плівок чутливість до зміни їх товщини на 94 ГГц в 3-4 рази вище, ніж на 39 ГГц. Відзначена доцільність практичного використання обох частот, оскільки діапазон 94 ГГц більш чутливий до впливу тонких плівок і відрізняється більш високим просторовим дозволом, а діапазон 39 ГГц - переважніше для електрично товстих плівок і при роботі в умовах інтенсивної хмарності.

Показано, що надмірні вимоги до точності вимірів (кута візування, $T_{\text{явп}}$ і $T_{\text{ягп}}$) і до точності знання необхідних параметрів, що апріорно задаються (T_0 води та T_0 плівки нафти), у реальних умовах моніторингу не дають можливості відновити діелектричні параметри та товщину плівки шляхом розв'язання рівнянь, отриманих для двох частот і двох поляризацій у припущенні плоскошаруватого середовища.

З урахуванням цієї обставини, у розділі розглянута алгоритмічна послідовність процедур для визначення обсягів забруднення з використанням апріорних даних щодо параметрів об'єкта моніторингу. Розрахункові оцінки вказують на те, що за наявності апріорної інформації про діелектричні властивості забруднювача та про температуру води запропонована послідовність алгоритмічних кроків дозволяє відновити товщину забруднюючого шару за даними двочастотних радіометричних вимірів у ММ ДХ із точністю - 0,05 мм.

Четвертий розділ дисертаційної роботи *«Пошук і дослідження морфологічних відмінностей у радіотеплових зображеннях хмарного покриву та поверхні суші в ММ ДХ»* присвячено пошуку нових перспективних підходів для вирішення актуальної проблеми ДЗ НС з аерокосмічних платформ методами радіометрії ММ ДХ. Вона обумовлена необхідністю розподілу внесків у сумарне випромінювання, що виходять від поверхні суші та атмосфери, і пов'язана з низькою ефективністю сучасних методів відновлення параметрів атмосфери під час моніторингу над поверхнею суші, а також неефективністю методів відновлення параметрів земного покриву в умовах розвинутої хмарності.

У даному розділі запропонована та на прикладі обробки супутникових зображень та оригінальних вертолїтних радіометричних даних в 3-х ММ ДХ досліджена та підтверджена нова ідея щодо наявності стійких відмінностей морфологічних властивостей утворень, що контрастують, на поверхні суші та в атмосфері. Запропонована та продемонстрована принципова можливість використання цих морфологічних відмінностей (як апіорна інформація) для розробки нового перспективного підходу під час відновлення параметрів НС за даними аерокосмічного моніторингу над поверхнею суші. Для одержання цих результатів були проведені такі роботи та дослідження:

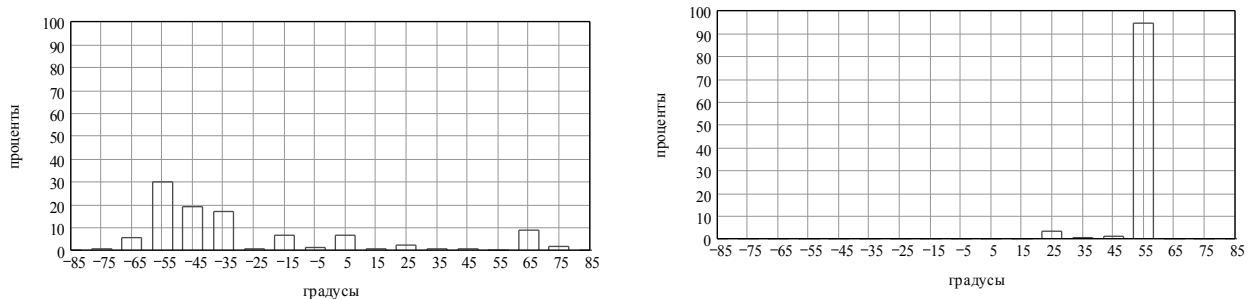
- цикли наземних і вертолїтних вимірів розрізів радіояскравості утворень, що контрастують, відповідно в полях хмарності та на поверхні суші в 3-х ММ ДХ;
- розробка спеціального комп'ютерного полігона, що імітує роботу аерокосмічної системи ДЗ із оперативно варійованими апаратурними параметрами, а також параметрами земного ландшафту та полів хмарності, необхідними для формування тестових радіозображень і для налагодження оригінального програмно-алгоритмічного забезпечення;
- пошук і вибір джерел супутникових радіотеплових зображень 3-х ММ ДХ для різних регіонів світу та погодних умов, а також їх оригінальна обробка за допомогою спеціально створеного програмно-алгоритмічного забезпечення;
- статистичний аналіз отриманих даних обробки стосовно проблеми поділу деструктивного впливу радіотеплового випромінювання утворень, що контрастують, полів хмарності та поверхонь суші.

Наведені в роботі вертолїтні трасові виміри просторових змін радіояскравісної температури сільськогосподарських ландшафтів в 3-х ММ ДХ показали, що розподілу розмірів таких утворень, що контрастують, властивий неперервний характер і відсутність статистично переважаючих напрямків їх азимутальної орієнтації (принаймні, у просторовому масштабі - від одиниць до ста кілометрів). У результаті річного циклу неперервних спостережень проходження фронтальних зон хмарності над нашим вимірювальним пунктом - у Харкові (49N, 37E), була відзначена певна періодичність у характері просторових неоднорідностей атмосферного загасання (радіояскравості) в 3-х і в 8-ми ММ ДХ.

Для кількісних оцінок і дослідження таких якісно виявлених відмінностей і закономірностей необхідно проведення аналізу результатів не трасових (одномірних) вимірів, а скануючих (двовимірних), у вигляді радіотеплових зображень великих районів, причому отриманих у різних регіонах світу. У зв'язку із цим наступний етап

досліджень і кількісних статистичних оцінок був проведений на основі супутникових радіометричних спостережень полів хмарності над океаном (для виділення хмарних утворень найкращим чином). Дослідження морфології поверхні суші було проведено в умовах ясного неба (для мінімізації деструктивного впливу неоднорідностей атмосфери). Як джерело таких експериментальних даних були використані радіотеплові зображення, отримані за допомогою апаратури спільного американо-японського NASA-NASDA супутника TRMM (що відрізняється найкращим просторовим дозволом антенних систем у ММ ДХ, а також наявністю інфрачервоного та оптичного каналів).

Аналіз оброблених радіотеплових зображень, отриманих у різних регіонах планети (над Тихим, Індійським та Атлантичним океанами, а також над окремими регіонами Африки, Австралії та Південної Америки), показав, що між полями хмарності та сушею такі відмінності в параметрі групової орієнтації присутні завжди та, як правило, вони яскраво виражені (рис. 6).



Австралія. Суша. Віток 10105

Хмарність над Тихим океаном.
(на захід Півд. Америки). Віток 24052 S28

Рис. 6. Приклади азимутального розподілу кутів орієнтації (у градусах) сегментів, що контрастують, на супутникових радіотеплових зображеннях (85 ГГц)

Легко помітити наявність деякого переважаючого напрямку в орієнтації елементів хмарних формацій (тут нулем є напрямок Північ-Південь). Для всіх цих випадково обраних у різних регіонах світу та оброблених нами радіозображень фронтальних зон хмарності характерно, що в середньому 88% площі зображення покривається утвореннями, що контрастують, зосередженими в одному 10-ти градусному секторі азимутальних кутів орієнтації. Для порівняння утворення поверхні суші, що контрастують, зосереджені в аналогічному по ширині секторі кутів, покривають лише менш 38% площі зображення. Відзначена для суші наявність слабко вираженої та у загальному випадку відмінної від хмарності орієнтації, очевидно, пов'язана з мезо-масштабними геологічними процесами історичного формування ландшафтів.

У додатку 5, як приклад, наведено результат усунення взаємного деструктивного впливу змодельованих утворень, що контрастують, суші та хмарності за допомогою розробленого алгоритму, що використовує апріорну інформацію про морфологічні відмінності.

П'ятий розділ дисертаційної роботи «*Розвиток методів обробки та інтерпретації радіометричних даних*» присвячено вирішенню актуальних проблем сучасного ДЗ, пов'язаних з підвищенням точності та функціональних можливостей методів відновлення параметрів ОС за даними радіометрії ММ ДХ. Незважаючи на різноманіття існуючих методів (уже використовуваних у практиці моніторингу параметрів практично всіх природних об'єктів), дотепер не було знайдено ефективних рішень для таких актуальних проблем ДЗ, як питання поділу та обліку деструктивного взаємного впливу радіотеплового випромінювання поверхні суші та полів хмарності під час аерокосмічного зондування ОС, а також питання кардинального підвищення просторового дозволу антен за рахунок використання спеціальних методів обробки прийнятих сигналів радіотеплових джерел.

Ці питання, як і питання оптимізації алгоритмів обробки радіозображень, носять принциповий характер. Це пов'язано з тим, що всі вони суттєво впливають на точність методів радіометрії ММ ДХ, а також обмежують функціональні можливості використаних методів під час вирішення завдань метеорології, кліматології, сільського господарства, екології та радіоастрономії.

Добре відомо (і це було в ряді випадків показано в попередніх розділах), наскільки методологічно ефективним інструментом для прискореного розвитку методів відновлення параметрів ОС є використання апріорної інформації про об'єкт дослідження. Така інформація, у сукупності із сучасними математичними моделями та оптимізованими підходами до обробки даних ДЗ, дозволяє проривним чином просунутися у вирішенні багатьох некоректних завдань, якими, як правило, і є багато завдань відновлення параметрів ОС.

У даному розділі роботи, з урахуванням зазначених міркувань, були проведені наступні роботи та дослідження, спрямовані на вирішення перерахованих вище проблем:

- експериментальним шляхом (за допомогою розробленого макета скануючої радіометричної системи), а також шляхом математичного моделювання (за допомогою спеціально створеного віртуального полігона системи ДЗ) були сформовані тестові радіотеплові зображення компактних і просторово розподілених об'єктів ОС із різним ступенем зашумленості;
- була проведена евристична оптимізація та оцінка працездатності алгоритмів обробки радіотеплових зображень з використанням отриманих тестових, а також супутникових радіозображень в 3-х ММ ДХ;
- запропонований підхід та досліджена його працездатність (що використовує експериментально отриману автором апріорну інформацію про відмінності градієнтів радіояскравості на межах утворень, що контрастують, земного покриття та хмарних утворень), що забезпечує відновлення параметрів поглинання в полях хмарності під час аерокосмічного зондування над поверхнею суші;
- досліджена можливість вирішення завдання відновлення оптичної товщини атмосфери за даними поляризаційних вимірів радіояскравості над поверхнею суші, використовуючи отриману автором апріорну інформацію щодо відносного внеску перевідбитого землею поверхнею радіотеплового випромінювання атмосфери;

- на прикладі змодельованого фрагмента радіотеплового зображення системи «поверхня суші - хмарний покрив» продемонстрована принципова можливість відновлення меж утворень, що контрастують, поверхні суші та хмарного покриву на аерокосмічних радіотеплових зображеннях, використовуючи апіорну інформацію щодо відмінностей морфологічних властивостей цих двох типів об'єктів ОС;
- проведена розробка, дослідження та практична апробація алгоритму відновлення параметрів радіотеплового випромінювання сонячних активних утворень з кутовими розмірами, багаторазово меншими кутових розмірів ДС радіотелескопа.

Під час розробки, дослідження та практичного застосування алгоритмів сегментації радіотеплових зображень у розділі було використано обидва з найпоширеніших підходів, заснованих як на контурному перетворенні зображення, так і на яскравісному підході обробки. У результаті апробації різних комбінацій методів обробки в першому підході було обрано як базовий алгоритм, заснований на наступній поетапній комбінації математичних операцій: медіанна фільтрація, фільтрація вкраплень, градієнтний метод зважених кінцевих різниць із адаптивним за фрагментом визначенням порога, стоншення меж. Даний підхід застосовувався як до модельних (штучно сформованих) радіотеплових зображень з різним ступенем зашумленості, так і до реальних первинних радіозображень (отриманим в експерименті).

У зв'язку з підвищеною чутливістю контурного підходу до величини співвідношення сигнал/шум, у роботі був реалізований і досліджений також яскравісний підхід, що потім використовувався для обробки супутникових радіозображень у вигляді наступного алгоритму:

- лінійна фільтрація, описана наступними виразами,

$$S_{i,j} = \sum_{m=-n}^n \sum_{k=-n}^n F_{i+m,j+k} W_{m,k}$$

де $W_{m,k}$ - елементи квадратного дискретного вікна, що згладжує, розмірами $(2n+1) \times (2n+1)$; $F_{i,j}$ - елементи вихідної матриці розміром $M \times K$, які відповідають точкам растра вихідного радіозображення; $S_{i,j}$ - елементи вихідної матриці розміром $M \times K$, що відповідають точкам растра зображення з відфільтрованими високими просторовими частотами;

- бінарне квантування з адаптивним порогом, виконане відповідно до виразу:

$$B_{i,j} = \begin{cases} 1, \text{если } F_{i,j} \geq P_{i,j} \\ 0, \text{если } F_{i,j} < P_{i,j} \end{cases}$$

де $B_{i,j}$ - бінарна матриця розміру $M \times K$, $P_{i,j}$ - адаптивний граничний рівень, $S_{i,j}$ - матриця просторово відфільтрованого радіозображення;

- фільтрація вкраплень на основі двоетапної ітераційної процедури.

За допомогою цього 3-компонентного алгоритму було оброблено великий масив супутникових радіотеплових зображень 3-х ММ ДХ (рис. 7) під час проведення досліджень морфологічних властивостей об'єктів НС (розділ 4).

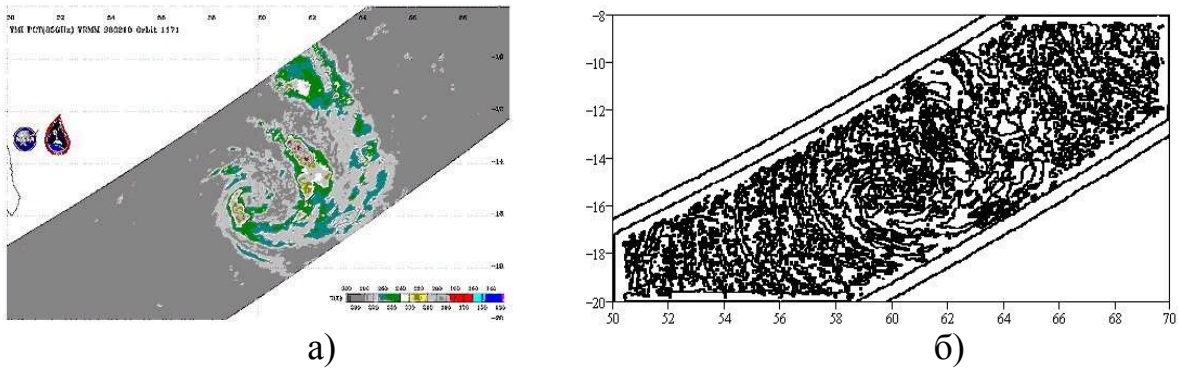


Рис. 7. Радіотеплове зображення урагану над Індійським океаном у діапазоні 85 ГГц (а) і приклад його бінарного уявлення за допомогою запропонованого алгоритму (б).

У даному розділі роботи було також проведено чисельне моделювання процесу відновлення параметрів хмарних утворень за радіометричними даними огляду з аерокосмічних носіїв над поверхнею суші за допомогою запропонованого методу. Інтегральний коефіцієнт поглинання γ хмарних утворень відновлювався в результаті виконання запропонованих процедур алгоритму, що використовують апріорну інформацію щодо особливостей градієнтів радіояскравості для утворень, що контрастують, на радіотеплових зображеннях. Ця апріорна інформація була виявлена в роботі на підставі наземних радіометричних спостережень фронтальних хмарних утворень, що контрастують, та вертолітних спостережень елементів різноманітних земних ландшафтів в 3-х ММ ДХ.

На її основі було розроблено алгоритм відновлення параметрів земної поверхні та атмосфери, що складається з такої послідовності операцій:

- інвертування фрагментів зображення за критерієм граничного рівня після попередніх процедур обробки;
- виділення меж градієнтним методом;
- приведення зображення до псевдооднорідного фону;
- виділення значень варіацій атмосферного поглинання:

$$\gamma = -\frac{1}{2} \ln \frac{\Delta T_a}{T_c} + \frac{1}{2} \ln(1 - \chi) + \frac{1}{2} \ln \left[1 - \frac{T_0 - T_c}{2T_c} \left(1 - \frac{\chi}{1 - \chi} \right) e^{\gamma} \right] \cong -\frac{1}{2} \ln \frac{\Delta T_a}{T_c} + \frac{1}{2} \ln(1 - \chi)$$

де T_c – усереднена температура атмосфери, ΔT_a – перевищення антенної температури над граничною, T_0 – термодинамічна температура поверхні;

- прив'язка до тестової ділянки зображення та відновлення параметрів поверхні та атмосфери.

На рис. 8 показано приклад відновлення за допомогою даного алгоритму параметрів поглинання хмарного шару з радіотеплового зображення, змодельованого в 3-х ММ ДХ.

У розділі також вказано на можливість визначення вертикального атмосферного поглинання за даними аерокосмічного зондування під фіксованим кутом 45 градусів у режимі поляризаційних вимірів за допомогою отриманих аналітичним шляхом системи рівнянь.

Іншим важливим прикладом успішного використання апіорної інформації щодо вирішення зворотних завдань радіометрії ММ ДХ є запропонований ітераційний алгоритм нелінійної інверсної фільтрації. Ефективність цього алгоритму було досліджено шляхом математичного моделювання процедур відновлення параметрів активних утворень (АУ) на поверхні Сонця, а також експериментально апробовано з використанням даних радіоастрономічних спостережень активних утворень на поверхні Сонця на радіотелескопі РТ-2.

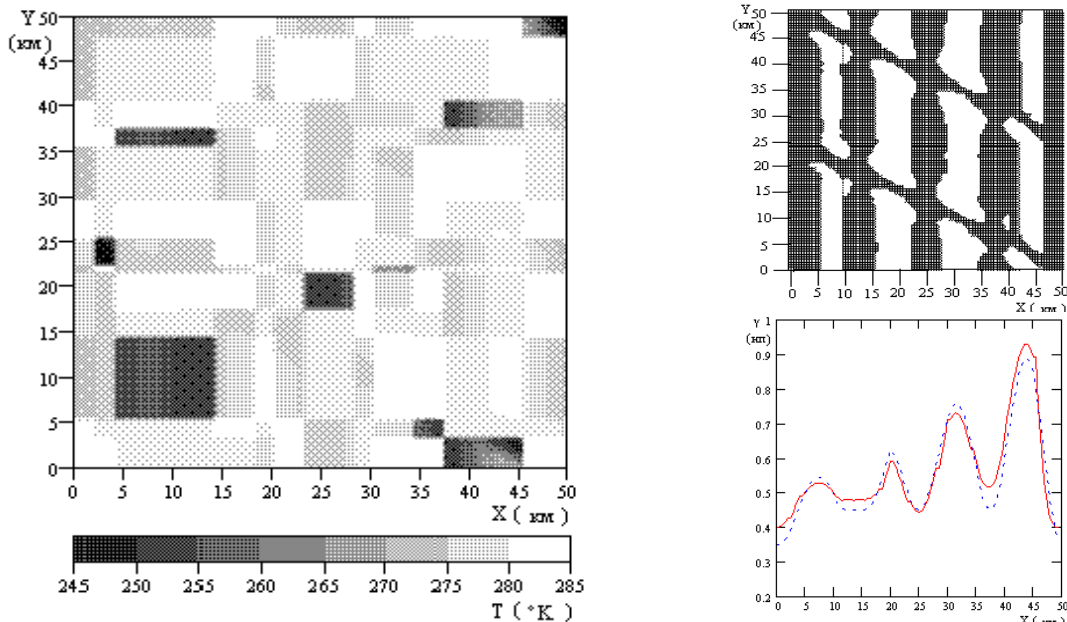


Рис. 8. Радіотеплове зображення сільськогосподарського ландшафту, що спостерігається крізь поле хмарності (а), відновлена за допомогою запропонованого алгоритму контурна структура хмарності (б), а також приклад скана (в) відновленого (неперервна лінія) і вихідного (пунктир) значень інтегрального поглинання хмарних утворень (нп).

Сутність запропонованого алгоритму полягає в проведенні послідовності таких основних операцій:

- вирахування змодельованої згортки спокійного Сонця з діаграмою спрямованості радіотелескопа з вихідного експериментального скана Сонця;
- відновлення АУ ітераційним методом з обмеженням на незаперечність рішень;

$$T\alpha^{k+1}(\vec{r}) = \left\{ T\alpha^k(\vec{r}) + \lambda \left[T\alpha(\vec{r}) - T\alpha^k(\vec{r}) * A(\vec{r}) \right] \right\} F$$

де F - гранична контролююча функція, λ - ваговий коефіцієнт, керуючий збіжністю процесу ітерацій, $A(r)$ - апаратна функція, $*$ - операція згортки;

- визначення координат і розмірів АУ за їх відновленими ортогональними перетинами.

Тут у комбінації із широко відомими методами інверсної фільтрації та методу ітерацій було запропоновано ввести апіорні обмеження на знак перевищення радіояскравості активного утворення та розмір сонячного диска. Такий підхід дозволив відновити положення, радіояскравість і розміри активних сонячних

утворень, що мають кутовий розмір багаторазово менший, ніж кутове вирішення антенної системи радіотелескопа.

У додатках А-К наведено математичний опис методів розрахунків і виміру розроблених рупорних антен, параметрів поглинання атмосфери, експериментальних помилок методичного походження, а також опис спрощених тестованих алгоритмів, додаткова графічна інформація до результатів модельних розрахунків, а також копії актів впровадження результатів.

Висновки по роботі

У дисертації вирішена актуальна науково-технічна проблема вдосконалення методу радіометрії міліметрового діапазону в завданнях дистанційного зондування земної поверхні та атмосфери. Ця проблема була вирішена в роботі комплексно шляхом формування нових підходів, заснованих на пошуку й використанні апріорної інформації про невивчені раніше радіофізичні властивості об'єктів дослідження, а також шляхом підвищення точності та функціональних можливостей методів і алгоритмів обробки первинних даних і методів відновлення параметрів НС. Для вирішення цієї проблеми у роботі були розвинені апаратурне та методичне забезпечення процедури ДЗ із застосуванням нових ефективних концепцій, підходів і технічних рішень.

Проведені експериментальні та теоретичні дослідження дозволили одержати низку фізично і практично важливих наукових результатів:

1. Продемонстровано високі технічні характеристики та перспективність використання нових типів вхідних пристроїв приймальних систем ММ і субММ ДХ, які побудовані на основі розроблених концепцій неперервного фокусування Гауссова пучка та поляризаційної багатопроменевої інтерферометрії. Експериментально та теоретично проведено аналіз передатних характеристик розробленого нового типу ліній передач на основі пінодіелектричних лінз із гранично малою діелектричною проникністю, а також фільтрів і диплексерів з режекцією шумів гетеродину та дзеркального каналу.
2. Запропонована, досліджена та широко використана в наземних, льотних і морських експериментах досить перспективна для діапазону ММ і субММ хвиль бездиплексерна схема побудови радіометра, що відрізняється більш ніж на порядок зниженою потужністю гетеродину, простотою реалізації вхідного пристрою та зниженням втрат у вхідних ланцюгах приймача, а також продемонстрована перспективність використання такого нового для цих ДХ елемента вхідних ланцюгів, як рупорна антена зі зламами кута розкриття.
3. Розрахунковим шляхом отримано практично важливі залежності погонного ослаблення у хмарних і дощових утвореннях атмосфери різної інтенсивності від їх

температури в діапазоні від 10 ГГц до 1000 ГГц і відзначена характерна частотна ділянка 100 ГГц, у межах якої змінюється знак температурного градієнта ослаблення в краплях з позитивною та негативною температурами, а також має місце мінімальна температурна залежність ослаблення у краплинній фракції хмар. Урахування цього результату дозволяє підвищити ефективність методу радіометрії ММ ДХ у завданнях відновлення параметрів водозапасу та ефективної температури хмар.

4. На основі оригінальних експериментальних даних відзначені численні випадки аномальної (у кілька разів) відмінності експериментальних і теоретичних значень співвідношень ослаблення в шарі хмарності та показано, що їх основною причиною є сніжні та крижані частки. Продемонстрована працездатність алгоритмів та апаратурно-методичного забезпечення розроблених для відновлення з підвищеною точністю значень повного вертикального ослаблення, вологозапасу атмосфери та водозапасу хмар, а також ефективної температури хмарності та мікроструктури гідрометеорів за даними радіометрії ММ ДХ.

5. Виявлено та описано випадки аномальної, з погляду найпоширеніших сучасних уявлень, зміни атмосферного радіотеплового випромінювання в ММ ДХ. Обґрунтована гіпотеза щодо існування в безхмарній атмосфері краплинної та кристалічної вологи. Відзначена необхідність додаткового урахування цієї вологи в контексті завдань кліматологічного прогнозування.

6. Отримано теоретичні залежності вертикального та погонного ослаблення в атмосфері від температури, тиску, вологості та вперше оцінено їх частотний, сезонний, широтний і довготний хід для різних океанів і материків. Показано особливості глобального розподілу параметрів атмосферного ослаблення, причому над територією України отримана статистика цих параметрів у ясну та дощову погоду, а також проведена кількісна оцінка негативних тенденцій у динаміці озонного шару атмосфери.

7. Розкрито особливості вологісної залежності ПЕПР і Тя поверхні ґрунту, у результаті чого сформульована та обґрунтована гіпотеза, що дозволяє пояснити механізм формування несподіваного з погляду сучасних підходів «зламу» у вологісних залежностях ПЕПР і Тя ґрунтів. На підставі оригінальних експериментальних даних про величину радіотеплових контрастів різних типів нафтопродуктів на водній поверхні у двох точках міліметрового діапазону хвиль проведена оцінка можливостей відновлення обсягів забруднення методами радіометрії ММ ДХ.

8. На підставі обробки численних супутникових радіозображень діапазону 85 ГГц підтверджено висунуте припущення щодо наявності стійких відмінностей у морфологічних властивостях полів хмарності - з одного боку, та земних ландшафтів - з іншого. Продемонстрована принципова можливість використання такої апріорної інформації під час побудови нових алгоритмів обробки та відновлення параметрів

хмарного покриву, що спостерігається на фоні поверхні суші або при відновленні параметрів земної поверхні, що зондується крізь хмарний покрив методами радіометрії ММ ДХ.

9. На прикладі експериментально отриманих і змодельованих тестових радіотеплових зображень 3-х ММ ДХ проведена практична апробація працездатності та ефективності оптимізованої послідовності процедур у реалізованих алгоритмах обробки для виділення меж малорозмірних і просторово розподілених елементів, що контрастують, на радіотеплових зображеннях земної поверхні.

10. Запропоновано нові підходи та алгоритми вирішення таких актуальних проблем обробки даних радіометрії ММ ДХ, як урахування деструктивного впливу радіотеплового випромінювання неоднорідностей атмосфери над територією суші (і навпаки), а також підвищення просторового вирішення антен вимірювальних систем, з використанням апіорної інформації про досліджувані природні об'єкти. На підставі оригінальних експериментальних даних проведено евристичне виділення радіофізичних властивостей та особливостей об'єктів НС, придатних для їх використання як апіорної інформації в алгоритмах інтерпретації результатів ДЗ методами радіометрії ММ ДХ.

11. Багато з запропонованих та досліджених в роботі нових апаратурних і методично-алгоритмічних рішень та нових даних про особливості властивостей НС було впроваджено під час проведення наземних і льотних експериментальних досліджень навколишнього середовища у Харкові, на полігонах служби Гідромету та МНС України в Дніпропетровській області та в Автономній Республіці Крим, при дослідженні Сонця на радіотелескопі РТ-2 в РІНАН України, під час проведення НДР в ІРЕ НАН України та у навчальному процесі у Харківському національному університеті ім. Каразіна, що підтверджено шістьма актами впровадження.

Список наукових праць за темою дисертації

1. Nikolay V. Ruzhentsev The capabilities of the calculated approach for the astroclimatic assessment in radioastronomy / Nikolay V. Ruzhentsev, Alexander S. Mihailov // "Natural Science". – 2010, – Vol.2. – No.5 – p. 427-431.
2. L. B. Knyaz'kov Foamy-Dielectric Lens Transmission Lines for Millimeter and Submillimeter Wavelength Range / L. B. Knyaz'kov and N. V. Ruzhentsev // ISSN 1063-7850, «Technical Physics Letters». – 2008, – Vol.34. – No.10. – pp. 888-890. © Pleiades Publishing, Ltd.
3. L. B. Knyaz'kov. Quasi-Optical Diplexer and Filter Based on a Polarization Ring Interferometer / L. B. Knyaz'kov and N. V. Ruzhentsev // ISSN 1063-7850 «Technical Physics Letters». – 2007, – Vol.33. – No.9. – pp. 761–763. © Pleiades Publishing, Ltd.
4. Н.В. Руженцев. О возможности выделения морских районов, загрязненных

- нефтепродуктами, с помощью радиометрии миллиметрового диапазона волн / Н.В. Руженцев // «Вестник Харьковского Национального Университета». – 2002, – вып. 2. – №570. – с. 252-255.
5. N.V. Ruzhentsev. Flare angle changes antenna of the millimeter wave band / N. V. Ruzhentsev and Yu.A.Kuzmenko // «International Journal of Infrared and Millimeter Waves». – 1996, – Vol.17. – No.4. – pp. 779-784.
6. Руженцев Н.В. Результаты радиолокационных и радиометрических исследований земных покровов в диапазоне коротких ММ волн / Н.В. Руженцев, Чурилов В.П. // «Космическая наука и техника». – 1992. – №7. – с. 99-114.
7. N.V. Ruzhentsev, Two-frequencies polarisation measurements of cloud canopy parameters at mm wave band / N.V. Ruzhentsev // «Int. Journal Geospatial Today». – 2002, – Vol.1. – No.2. – 16 p.
8. А.С. Михайлов. Об особенностях пространственного распределения атмосферного ослабления для территории Украины в миллиметровом диапазоне волн / А.С. Михайлов, Н.В. Руженцев // «Прикладная радиоэлектроника». – 2009. – №2. – с. 149-155.
9. Л.Б. Князьков. Периодическая линзовая линия передач миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн / Л.Б. Князьков, Н.В. Руженцев // «Письма ЖТФ». – 2008, – т.34. – №20. – с. 59-64.
10. Л.Б. Князьков. Квазиоптический диплексер и фильтр на основе поляризационного кольцевого интерферометра / Л.Б. Князьков, Н.В. Руженцев // «Письма ЖТФ». – 2007, – т.33. – №18. – с. 1-7.
11. L.B. Knyaz'kov. Quasioptical polarization multipath diplexer / L. B. Knyaz'kov and N. V. Ruzhentsev // «International Journal of Infrared and Millimeter Waves». – 2006, – Vol.27. – No.2. – p. 211-217.
12. Ю.М. Герасимов. Морфологические отличия радиоизображений облачного покрова и поверхности суши в миллиметровом диапазоне волн / Ю.М. Герасимов, Н.В. Руженцев // «Радиофизика и Радиоастрономия». – 2004, – №4. – с. 448-457.
13. Антонов А.В. Юстировка Радиотелескопов Миллиметрового Диапазона Лазерным Излучателем / Антонов А.В., Карелин Ю.В., Руженцев Н.В. // «Космическая наука и технология». – 2003, – т.9. – №2 (приложение). – с. 110-112.
14. N. V. Ruzhentsev. Peculiarities of vertical atmosphere absorption in the millimeter wave band / N. V. Ruzhentsev // «Radio Science». – 2003, – Vol.38. – No.3. – p. Mar 8-1 – 8-7.
15. А.С. Михайлов. Особенности глобального распределения атмосферного поглощения в диапазоне 10-1000 ГГц / А.С. Михайлов, Н.В. Руженцев // «Радиофизика и Радиоастрономия». – 2007, – т.12. – №1. – с. 76 – 83.
16. Н.В. Руженцев. Об особенностях радиофизических свойств увлажненных почвогрунтов / Н.В. Руженцев // «Вестник Харьковского Национального Университета». – 2002, – вып. 2. – №570. – с. 246-247.
17. Н.В. Руженцев. Особенности излучения облачного покрова в миллиметровом диапазоне волн / Н.В. Руженцев // «Радиофизика и Радиоастрономия». – 2003, – т.8. – №1. – с. 38-44.
18. Н.В. Руженцев. Аномальные явления в атмосферном излучении миллиметровых

волн / Н.В. Руженцев // «Радиофизика и Радиоастрономия». – 2002, – т.7. – №.2. – с. 208-213.

19. А.В. Антонов. Применение итерационного метода к восстановлению параметров активных Солнечных образований по наблюдениям в 3 мм диапазоне / А.В. Антонов, Ю.М. Герасимов, Н.В. Руженцев // «Радиофизика и Радиоастрономия» – 2002, – т.7. – №.3. – с.246-253.

20. N.V. Ruzhentsev «Choven» Experiment – Scientific Hardware and Methods for the Remote Monitoring the Earth's Atmosphere and Surface by millimeter wavelength Radiometry / N.V. Ruzhentsev, V.P. Churilov // «Космічна Наука і Технологія». – 2000, – т.6. – №.4. – с. 67-68.

21. И. Юсифов. Исследования озонового слоя атмосферы в Черноморско-Каспийском регионе / И.Юсифов, М.Озел, Х.Ялдерим, Н.Руженцев, В.Чурилов, Г.Гущин, Л.Гущина, З.Мусаев, Р.Азимзаде // «Радиофизика и Радиоастрономия». – 1999. – т.4. – №.3. – с. 201-208.

22. А.В.Антонов. О возможности выделения параметров фронтальных облачных образований / А.В.Антонов, Ю.М.Герасимов, Н.В.Руженцев, В.П.Чурилов // «Радиофизика и Радиоастрономия». – 2000. – т.5. – №.2. – с. 131–136.

23. Ruzhentsev N.V. Earth cover back scattering characteristics at the frequencies 94 GHz and 136 GHz. / Ruzhentsev N.V. and Churilov V.P. // «International Journal of Infrared and Millimeter Waves». – 1996, – Vol.17. – No.4. – pp. 785-796.

24. N.V. Ruzhentsev Compact 3mm wave band transceivers for technological radars and radiotelephone communication systems / Ruzhentsev N.V. // «Turkish Journal of Physics». – 1996, – Vol.20. – No.4. –pp.356-358.

25. Ruzhentsev N.V. Terrain radiation - measurement investigation at 3-mm wave band / Ruzhentsev N.V. and Churilov V.P. // «International Journal of Infrared and Millimeter Waves». – 1996, – Vol.17. – No.2. – p. 433-449.

26. Churilov V.P. Vertical profiles of cloudless atmospheric absorption in the frequency range of 94 GHz / Churilov V.P. and Ruzhentsev N.V. // «Turkish Journal of Physics» . – 1995. – Vol.19. – №10. – pp. 1282-1285.

27. V.P. Churilov. Investigation of locating polluted water surface areas possibilities by the radiometer method at the millimeter wave range / Churilov V.P., N.V. Ruzhentsev and Yu.A. Kuzmenko // «Turkish Journal of Physics». – 1995, – Vol.19. – No.8. – pp.1069-1072.

28. Карелин Ю.В. Мобильный радиотелескоп диапазона коротких миллиметровых волн / Карелин Ю.В., Мороз Е.Е., Руженцев Н.В., Сорока А.С., Чурилов В.П. // «Космическая наука и техника». – 1992. – №7. – с.92-98.

29. Karelin Yu.V. Radiotelescope RT-2 for 3-MM bande / Karelin Yu.V., Litvinenko L.N., Ruzhentsev N.V., Sulima V.S., Churilov V.P. // «Turkish Journal of Physics». – 1994, – Vol.18. – No.9. – pp. 1038-1040.

30. Н.В. Руженцев. О необходимости учета микроклиматических особенностей при прогнозировании вертикального атмосферного ослабления в миллиметровом диапазоне волн / Н.В. Руженцев, А.С. Михайлов, // «Прикладна радіоелектроніка». – 2012. – т.11, – №1. – с. 66-69.

31. A.S. Mihailov. Computed method for astroclimatic estimations of atmosphere opacity

for the radio astronomy / A.S. Mihailov, N.V. Ruzhentsev // *MSMW-2010. Int. Kharkov Symp. On Physics and Engineering of Microwaves, MM and sub-MM Waves and Workshop on Terahertz Technologies*. Kharkov, June, 2010. - CD Conf. Proceedings.– V. 1.– 3P.

32. L. B. Kniazkov. Frequency-selective devices based on a polarization multibeam interferometer for radiometers in the millimeter and submillimeter wavelength ranges / L.B. Kniazkov, N.V. Ruzhentsev // the 10th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of Environment, Florence, Italy, March 2008. - Conference Abstracts - p. 74.

33. N.V. Ruzhentsev. Investigations of Season-Diurnal Dependencies of Atmospheric Absorption with Usage of Model ERA-15 and its Additional Testing / N.V. Ruzhentsev, A.S. Mihailov, A.M. Shirin // the eleventh URSI commission F open symposium on radio wave propagation and remote sensing, Rio de Janeiro, Brazil, 30 Oct /02 Nov 2007, - Conference Proceedings. - p. RS3.3-1 – RS3.3-5

34. L.B. Kniazkov. The quasi-optical waveguide on the base of dielectric-foam lens / L.B. Kniazkov, N.V. Ruzhentsev // The 7-th Int. Kharkov Symp. On Physics and Engineering of Microwaves, MM and sub-MM Waves and Workshop on Terahertz Technologies. Kharkov, June, 2007. - Conference Proceedings.– V. 1, p. 258-259.

35. N.V. Ruzhentsev. Peculiarities of global distribution of atmosphere absorption at 10-1000 GHz range / N.V. Ruzhentsev, A.S. Mikhailov // International Conf. ClimDiff '2005, Cleveland, USA. Sept. 2005, - Conference Proceedings. - p.clim11.1-11.5.

36. N.V. Ruzhentsev. Global features of the total vertical absorption of atmosphere at 10-1000 GHz range / N.V. Ruzhentsev, A.S. Mikhailov // International Conf. IRMMW-TGz 2005, Williamsburg, USA, Sept. 2005, - Conference Proceedings. - p. 99-100.

37. Nikolay Ruzhentsev. Particularities of temperature dependencies of hydro-meteoric absorption at 1-1000GHz range / N.V. Ruzhentsev // the 2004 Joint29th Int. Conf. On Infrared and Millimetre Waves and 12th Int. Conf. on Terahertz Electronics, Sept. 27 – Oct. 1, 2004, Karlsruhe, Cermany, - Conference Digest, - p. 449-450.

38. Nikolay Ruzhentsev. Particularities of Temperature and Frequency Dependencies of Hydrometeoric Absorption at Millimetre Wave Band / Nikolay Ruzhentsev and Olga Dorovskaya // International Workshop – ClimDiff'2003, November 2003, Fortaleza, Brazil, - Conference Abstracts. - p. clim34.

39. N.V. Ruzhentsev. Monitoring of atmospheric ozone layer over black sea region / N.V. Ruzhentsev, V.P. Churilov, G.K. Gushin, L.G. Gushina, I.M. Yusifov, M.E.Özel, H. Yıldırım // Int. Specialist Meeting on Microwave Remote Sensing, November 2001,, Boulder, Colorado, USA, NOAA, Conference Abstracts, pp 64-65.

40. N.V. Ruzhentsev. Methods of investigation and condition of atmospheric ozone layer over black sea region / N.V. Ruzhentsev, V.P. Churilov, G.K. Gushin, L.G. Gushina, I.M. Yusifov, M.E.Özel, H. Yıldırım// The 17th Colloquium on High Resolution Molecular Spectroscopy, September 2001, Nijmegen, The Netherlands), - Conference Abstracts. - p 200

41. N.V. Ruzhentsev. The paculiarities of clear atmosphere absorption at millimeter waves band / N.V. Ruzhentsev, V.V. Budnikov // CLIMPARA' 2001, the Int. URSI Comm.-F Meeteng on Climatic Parameters in Radiowave Propagation Prediction, May 2001,

Budapest, Hungary, - Conference Proceedings. - pp. 99-102

42. N.V. Ruzhentsev. Morphological differences of radio images of cloudiness fields and land at millimeter waves band /N.V. Ruzhentsev, Yu. M. Gerasimov, A.V. Antonov // Int.Specialist Meeting on Microwave Remote Sensing. Nov. 2001, Boulder, Colorado, USA, NOAA, - Abstracts. – p. 47-48

43. N.V. Ruzhentsev. Some results of atmosphere water motion observation from annual radiometer data / N.V. Ruzhentsev and Yu.A. Kuzmenko // URSI Commition F Int. Triennial Open Symposium on " Wave Propagation and Remote Sensing, September-1998, Aveiro, Portugal, - Conference Proceedings. - pp. 247-250.

44. N.V. Ruzhentsev. A method of atmosphere absorption determination from airspace sounding data at millimeter waves / N.V. Ruzhentsev // URSI Commition F Int. Symp. On Climatic Parameters on Radio Waves Propagation, April 1998, Ottawa, Canada, - Conference Proceedings. - pp.220-222.

45. N.V. Ruzhentsev. Proposal an experimental investigations of peculiarity at dependencies of soil radar cross sections on moisture content / N.V. Ruzhentsev // Conference Proceedings of the First EMSL User Workshop of the Space Applications Institute. - Ispra, Italy. - April 1996. - 1997. - p.145-154.

46. Ruzhentsev N.V. About possibility oil products discovering on the water surface by two-frequency method at the MM-wave band / Ruzhentsev N.V., Churilov V.P.and Kuz'menko Yu.A. // URSI Commissions-F Microwave Specialist Symp. on Microwave Remote Sensing of the Earth, Ocean and Atmosphere, May 1994, Lawrence, Kansas, USA,- Conf. Abstracts.- p.18.

47. Ruzhentsev N.V. Seasonal weather investigations Earth cover radiation in 3-mm wave band / Ruzhentsev N.V., Churilov V.P. // URSI Commissions-F Microwave Specialist Symposium on Microwave Remote Sensing of the Earth, Ocean, Ice and Atmosphere, May 1994, Lawrence, Kansas, USA, - Conference Abstracts. - p.64.

48. Ruzhentsev N.V. Comparison of experemental measured and size calculated to vertical profiles atmosphere absorption in 3-mm wave band / Ruzhentsev N.V., Churilov V.P. // URSI Commissions-F Microwave Specialist Symposium on Microwave Remote Sensing of the Earth, Ocean, Ice and Atmosphere, May 1994, Lawrence, Kansas, USA, - Conference Abstracts. - p.59.

Анотація

М.В. Руженцев. Розвиток теорії та удосконалення радіометричних систем дистанційного зондування навколишнього середовища міліметрового діапазону хвиль. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю «радіотехнічні та телевізійні системи» (05.12.17), Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2012.

Дисертація спрямована на рішення актуальної наукової проблеми вдосконалення методу радіометрії міліметрового діапазону хвиль за рахунок спільного (комплексного) розвитку апаратурного й методичного забезпечення процедури

дистанційного зондування, а також за рахунок розвитку його інформаційної основи й алгоритмів, що використовують нову апіорну інформацію про особливості радіофізичних властивостей об'єктів навколишнього середовища.

Розроблено й досліджено засновані на нових концепціях та технічних розв'язках експериментальні зразки лабораторних, наземних, літних і радіоастрономічних вимірювальних систем та їх ключових вузлів. З'ясовані нові особливості та ефекти радіотеплового випромінювання розповсюджених типів земного покриву й атмосфери у міліметровому діапазоні хвиль. Запропоновані й обґрунтовані із залученням модельних вистав гіпотези, що пояснюють взаємозв'язок геофізичних процесів і їх радіофізичних проявів. Розвито методи й алгоритми обробки й інтерпретації результатів дистанційного зондування навколишнього середовища. Забезпечено впровадження отриманих результатів апаратурного, алгоритмічного й загальнофізичного характеру в зацікавлених організаціях НАНУ, МОНмсУ і МНСУ.

Ключові слова: радіометрія, міліметровий діапазон, дистанційне зондування, аерокосмічні платформи, об'єкти навколишнього середовища, атмосферне ослаблення, радіотеплове випромінювання, вхідні ланцюги радіометрів.

Аннотация

Н.В. Руженцев. Развитие теории и усовершенствование радиометрических систем дистанционного зондирования окружающей среды миллиметрового диапазона волн.— Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности «радиотехнические и телевизионные системы» (05.12.17), Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2012.

Диссертация направлена на решение актуальной научной проблемы усовершенствования метода радиометрии миллиметрового диапазона волн за счет совместного (комплексного) развития апаратурного и методического обеспечения процедуры дистанционного зондирования, а также за счет развития его информационной основы и алгоритмов, использующих новую априорную информацию об особенностях радиофизических свойств объектов окружающей среды.

Расчетным путем получены зависимости погонного ослабления в облачных и дождевых образованиях различной интенсивности от их температуры в диапазоне от 10 ГГц до 1000 ГГц и впервые отмечена характерная частотная область 100 ГГц, в окрестности которой имеет место изменение знака температурного градиента ослабления в каплях с положительной и отрицательной температурами, а также наблюдается минимальная температурная зависимость ослабления в капельной фракции облаков. Показано, что учет этого обстоятельства позволяет повысить

эффективность метода радиометрии ММ ДВ.

На основе оригинальных экспериментальных данных отмечены многочисленные случаи аномального (в несколько раз) отличия экспериментальных и теоретических значений соотношений ослабления в слое облачности и показано, что их основной причиной являются взвешенные в атмосфере снежные и ледяные частицы. Продемонстрирована работоспособность разработанного программно-алгоритмического обеспечения, учитывающего это обстоятельство, для восстановления с повышенной точностью значений полного вертикального ослабления, влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков, а также эффективной температуры облачности и микроструктуры гидрометеоров.

Впервые выявлены и описаны случаи аномального, с точки зрения наиболее распространенных современных представлений, изменения атмосферного излучения в ММ ДВ. Обоснована гипотеза относительно существования в безоблачной атмосфере пространственно распределенной капельной и кристаллической влаги. Отмечена необходимость дополнительного учета этой влаги в контексте задач климатологического прогнозирования.

Получены теоретические зависимости вертикального и погонного атмосферного ослабления от температуры, давления, влажности и впервые оценен их частотный, сезонный, широтный и долготный ход для разных океанов и материков. Показаны особенности глобального распределения параметров атмосферного ослабления, причем, над территорией Украины получена статистика этих параметров в ясную и дождливую погоду, а также количественная оценка негативных тенденций в динамике озонового слоя атмосферы.

Впервые вскрыты особенности влажностной зависимости УЭПР и Тя поверхности грунта в ММ ДВ, в результате чего сформулирована и обоснована гипотеза, позволяющая объяснить механизм формирования неожиданного с точки зрения современных подходов «излома» во влажностных зависимостях УЭПР и радиояркости грунтов. На основании экспериментальных данных о радиотепловых контрастах различных типов нефтепродуктов на водной поверхности, впервые полученных в двух точках ММ ДВ, проведена оценка возможностей восстановления объемов загрязнения методами радиометрии ММ ДВ.

На основе обработки многочисленных спутниковых радиоизображений диапазона 90 ГГц, подтверждено выдвинутое автором предположение о наличии устойчивых различий в морфологических свойствах полей облачности с одной стороны и земных ландшафтов с другой. Продемонстрирована принципиальная возможность использования такой априорной информации при построении новых алгоритмов обработки и восстановления параметров облачного покрова, наблюдаемого на фоне поверхности суши либо при восстановлении параметров земной поверхности, зондируемой сквозь облачный покров.

На примере экспериментально полученных и смоделированных тестовых радиотепловых изображений 3-х ММ ДВ проведена практическая апробация работоспособности и эффективности оптимизированной последовательности

процедур в реализованных алгоритмах обработки для выделения границ малоразмерных и пространственно распределенных контрастирующих элементов на земной поверхности;

Предложены новые подходы и алгоритмы решения таких актуальных проблем обработки данных радиометрии ММ ДВ, как учет деструктивного влияния радиотеплового излучения неоднородностей атмосферы над территорией суши (и наоборот), а также повышение пространственного разрешения антенн измерительных систем, с использованием априорной информации об исследуемых природных объектах. На основании оригинальных экспериментальных данных проведено эвристическое выделение радиофизических свойств и особенностей объектов ОС, пригодных для их использования в качестве такой априорной информации в методах интерпретации результатов ДЗ;

Экспериментально и теоретически проведен анализ передаточных характеристик разработанных диплексеров с режекцией шумов гетеродина и зеркального канала, а также нового типа линии передач на основе пенициллиновых линз с предельно малой диэлектрической проницаемостью. Продемонстрированы высокие технические характеристики и перспективность использования этих новых типов входных устройств приемной системы ММ и субММ ДВ, которые построены на принципе поляризационной многолучевой интерферометрии и новых способах канализации гауссова пучка.

Предложена, исследована и широко использована весьма перспективная для диапазона ММ и субММ волн бездиплексерная схема построения радиометра, отличающаяся более чем на порядок пониженными требованиями к мощности гетеродина, простотой реализации входного устройства и снижением потерь во входных цепях приемника, а также впервые продемонстрирована перспективность использования такого нового для этих ДВ элемента входных цепей, как рупорная антенна с изломами угла раскрытия.

Перечисленные результаты диссертации отличаются научной новизной и в своей совокупности позволяют существенно продвинуться в решении актуальной для развития технологии ДЗ ОС проблемы повышения эффективности метода радиометрии ММ ДВ. Достоверность полученных результатов подтверждена экспериментально и путем математического моделирования с контролируемыми параметрами.

Ключевые слова: радиометрия, миллиметровый диапазон, дистанционное зондирование, аэрокосмические платформы, объекты окружающей среды, атмосферное ослабление, радиотепловое излучение, входные цепи радиометров.

Abstracts

N. V. Ruzhentsev Development of theory and improvement of radiometer systems of environment remote sensing at millimeter waves band. - The manuscript.

Thesis for degree of Doctor of Technical Science in the specialty 05.12.17 - Radio Engineering and Television Systems» - Kharkov National University of Radioelectronics, 61166, Lenina av., Kharkov, Ukraine.

The thesis is directed on the decision of an actual scientific problem of improvement of radiometric method at millimeter wave band at the expense of joint (complex) development of hardware and methodical maintenance of remote sensing procedures, as well as at the expense of development its information basis and algorithms using new aprioristic information on radio physical properties of environment objects.

Experimental samples of laboratory, land, onboard and radio-astronomical measuring systems and their key elements based on new concepts and technical decisions are developed and investigated. New features and effects of radio thermal radiation of widespread types of earth surface and atmosphere at millimeter wave band are revealed. The hypothesis explaining interrelation of the considered geophysical processes and their radio physical features are offered and proved with attraction of modeling representations. Methods and algorithms of processing and interpretation of results of environment remote sensing are developed. Introduction of the received results of hardware, algorithmic and main physical characters are provided in organizations of NANU, MESysU and MESU.

Keywords: radiometry, a millimeter range, remote sensing, space platforms, environmental objects, atmospheric opacity, radio-thermal radiation, entrance elements of radiometers.

Підп. до друку 19.07.12	Формат 60*84 1/16	Спосіб друку – цифровий.
Умов. друк. арк. 2,4.	Тираж 100 прим.	
Зам. № 2-476	Ціна договірна.	

ХНУРЕ, 61166, Харків, просп. Леніна, 14

Віддруковано в цифровій друкарні «Цифра-принт»
Харків, вул. Культури, 22-Б

