

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ім. В. Н. Каразіна

**Логвінов Юрій Федорович**

УДК 538.36:621.371

**ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ НАД ЗБУРЕНОЮ ВОДНОЮ ПОВЕРХНЕЮ  
ПРИ МАЛИХ КУТАХ КОВЗАННЯ**

**01.04.03 - радіофізика**

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора фізико-математичних наук

ХАРКІВ - 2016

Дисертація є рукопис.

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

Науковий консультант доктор технічних наук, професор, Разказовський Вадим Борисович.

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор Горобець Микола Миколайович, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, завідувач кафедри прикладної електродинаміки;

доктор технічних наук, професор, Сухаревський Олег Ілліч, Науковий центр Повітряних Сил Харківського університету Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, провідний науковий співробітник;

доктор фізико-математичних наук, член-кореспондент НАН України Ямпольський Юрій Моїсійович, головний науковий співробітник відділу радіофізики геокосмосу Радіоастрономічного інституту НАН України, м. Харків.

Захист відбудеться “ 13 ” жовтня 2016 р. о 13-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.051.02 Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: площа Свободи 4, 61022, Харків.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: площа Свободи 4, 61022, Харків.

Автореферат розісланий “ 12 ” вересня 2016 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Аркуша Ю. В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

### Актуальність теми

Дисертація присвячена розв'язанню проблеми створення методу опису поширення радіохвиль в умовах, коли джерело сигналу і його приймач (кореспондуючі пункти) розташовуються над поверхнею на висотах, що порівнянні з висотами нерівностей самої поверхні. Дальності трас обмежуються одиницями кілометрів. Це обумовлено, в основному, широким практичним застосуванням в цих умовах сантиметрових і міліметрових радіохвиль, поширення яких використовується переважно в зонах прямої видимості. Саме в таких умовах функціонують багато радіолокаційних комплексів міліметрового і сантиметрового діапазонів довжин хвиль, що працюють як на суші, так і на морі. Вони виконують завдання радіолокаційного контролю зон обслуговування морських і повітряних портів, виявлення небезпечних плаваючих об'єктів і буїв, забруднень водної поверхні нафтопродуктами, виявлення і супроводу різних цілей: кораблів і катерів, крилатих, протикорабельних, протитанкових ракет, танків, бронемашин, автомобілей тощо. Типові висоти антенних систем у разі розміщення радіотехнічних комплексів на мобільних об'єктах становлять 3...5 м. Крім того, вимоги до підвищення скритності транспортних засобів змушують розробників знижувати висоти підняття антенних систем.

Іншою причиною обмеження дальності до одиниць кілометрів є той факт, що на таких відстанях збурення електромагнітної хвилі на неоднорідностях тропосфери, як правило, значно поступаються збуренням, що зумовлені впливом нерівної поверхні розділу, і тому тропосферними ефектами можна знехтувати.

У дисертаційній роботі в якості поверхні розділу розглядається, в основному, поверхня води. Це обумовлено тим, що:

- а) водна поверхня покриває більшу частину поверхні Землі;
- б) водна поверхня є електрично однорідною і її діелектричні характеристики для солоної і прісної вод при різних довжинах хвиль електромагнітного випромінювання досить добре досліджені;
- в) існує велика база даних експериментальних досліджень щодо поширення радіохвиль над морською поверхнею, що значно полегшує верифікацію методу опису поширення радіохвиль, який розроблено в дисертації;
- г) розроблена методика опису цифрового профілю морського хвилювання, що дозволяє здійснювати статистичний аналіз як параметрів самої морської поверхні, так і розсіяних на ній радіохвиль.

На відміну від поверхні води, поверхня суходолу дуже різноманітна за профілем (рівнини, гори), за складом (пісок, глина, чорнозем, тверді породи), за рослинним покривом (пустелі, степи, ліси). Крім того, існує також сезонна мінливість діелектричних характеристик поверхні як за рахунок зміни вмісту вологи рослинного покриву, так і за рахунок сезонних змін агрегатного стану опадів (сніг, дощ). Характеристики нерівностей поверхні ґрунту також сильно впливають на характеристики поширення радіохвиль. Все це робить поверхню суходолу досить складним для моделювання об'єктом, в якому існує безліч конкуруючих факторів, які можуть замаскувати основні механізми розсіяння радіохвиль. Тому водна поверхня,

а точніше вітрове хвилювання, в дисертації обрано пріоритетним. Хоча принципів обмежень для використання розроблюваного методу опису поширення радіохвиль для поверхні суходолу немає.

Орієнтація розробленого методу опису поширення радіохвиль на міліметровий і сантиметровий діапазони обумовлена не тільки широким застосуванням їх в радіолокаційних системах. Використовувані в дисертації числові методи моделювання взаємодії радіохвиль з поверхнею розділу потребують малої величини проникнення радіохвилі в середовище (малої величини скін-шару), що становить поверхню розділу. Для водної поверхні й обраних діапазонів міліметрових та сантиметрових радіохвиль величина скін-шару становить, як правило, близько довжини радіохвилі.

Однією з особливостей розробленого в дисертації способу опису поширення радіохвиль, на відміну від інших відомих моделей, в яких кут ковзання падаючої радіохвилі приймався незмінним, є істотна мінливість умов опромінення підстильної поверхні залежно від дальності. Іншою особливістю розроблюваного методу опису поширення радіохвиль є використання, як невід'ємної його частини, форми морської поверхні.

Численні спроби створення моделей поширення радіохвиль у розглянутих умовах носили, як правило, обмежений характер, оскільки базувалися на двох широко застосовуваних на цей час теоретичних методах: методі малих збурень і методі дотичної площини. Метод малих збурень непридатний через можливість його застосування тільки при малих висотах нерівностей поверхні щодо довжини використовуваної радіохвилі. У методі дотичної площини таких обмежень немає, проте він є прийнятним за умов, коли поверхня, над якою поширюється хвиля, повністю освітлена. За розглянутих умов поширення радіохвиль освітленість поверхні джерелом радіохвилі істотно змінюється залежно від дальності. В умовах малих кутів ковзання на поверхні моря тільки вершини найвищих хвиль залишаються освітленими і беруть участь у формуванні розсіяного поверхнею поля. В умовах малих кутів ковзання отримані експериментальні дані показали, що деякі особливості середніх та флуктуаційних полів не можуть бути пояснені в рамках теорії, що базується на методі дотичної площини. Згідно з даними експериментів, коефіцієнт відбиття, який виражає дзеркальну складову відбитого поверхнею поля, при зменшенні кута ковзання зростає до значень, близьких до одиниці, в той час як згідно з висновками методу дотичної площини, починаючи з кутів ковзання порядку значень ефективних нахилів нерівностей, має відбуватися його монотонне зменшення через затінення поверхні. З іншого боку, при малих, порядку висоти хвиль, висотах над поверхнею моря значення поля істотно перевищують розраховані теоретичними методами, і для узгодження теорії з експериментом доводиться вводити до розрахунку характеристики нерівностей, які не відповідають реально існуючим під час проведення дослідів.

Таким чином, обмеженість застосовності відомих теоретичних методів розрахунку електромагнітних полів над збуреною поверхнею розділу і невідповідність їх прогнозів експериментально отриманим даним, з одного боку, і значна вартість експериментів щодо верифікації нових методів виявлення та супроводу цілей, з іншого боку, зробили завдання побудови нових методів опису

поширення радіохвиль над збуреною межею розділу в умовах порівнянності висот кореспондуючих пунктів з висотами нерівностей поверхні фундаментально-актуальною та практично-значимою проблемою.

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

Дослідження, які покладені в основу дисертаційної роботи, виконувалися в Інституті радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України за пріоритетними напрямками науки і техніки в Україні, що визначені постановою Верховної Ради України від 16.10.1992 р. №2705-12, постановою Кабінету Міністрів України від 20.12.1997 р. №1441 та Законом України від 11.07.2001 р. №2623-11, у рамках держбюджетних робіт: «Дослідження і розробка моделей впливу поширення ММ і СМ радіохвиль над поверхнею Землі і їх розсіяння об'єктами на інформаційні властивості сигналів» (шифр «Веселка») (виконавець); звіт про НДР / ІРЕ НАН України; 01.93U042280; інв. № 02.97U001232. – Харків, 1996. – 159 с., «Дослідження просторово-часових, частотних і поляризаційних збурень, в тому числі розсіяння електромагнітного поля неоднорідним середовищем з поверхнею розділу складної форми» (виконавець); звіт про НДР (шифр «Ранчо»); інв. № 0197U006563, ІРЕ НАН України, Харків, 2001. – 257 с., «Дослідження взаємодії радіохвиль з природними об'єктами і розробка методів дистанційної діагностики навколишнього середовища» (виконавець); звіт про НДР (шифр «Равелін»); інв. № ГР01.00U006443, ІРЕ НАН України, Харків, 2003. – 272 с., «Дослідження і розробка моделей впливу природного середовища на випромінювання, поширення і розсіяння електромагнітних хвиль з метою розвитку методів дистанційного зондування» (виконавець); звіт про НДР (шифр «Радикал»); інв. № 0103U002264, ІРЕ НАН України, Харків, 2006. – 244 с., «Вивчення особливостей та розробка методів опису електромагнітних полів у природних неоднорідних середовищах з межами розподілу стосовно задач дистанційного зондування та радіолокації» (виконавець); звіт про НДР (шифр «Сакура»), інв. № 01060011977, ІРЕ НАН України, Харків, 2011. – 179 с., «Розробка нових методів вивчення тонкої структури електромагнітних полів у діапазонах частот від одиниць мегагерц до десятків гігагерц у природних неоднорідних анізотропних середовища та біля поверхонь їх розподілу» (виконавець); звіт про НДР (шифр «Терразонд»), інв. № 0111U010476, ІРЕ НАН України, Харків, 2014. – 212 с., «Розробка нових моделей і методів вивчення тонкої структури електромагнітних полів у діапазонах частот від одиниць мегагерц до десятків гігагерц у природних неоднорідних, анізотропних середовищах та поблизу поверхонь їх розподілу для задач дистанційного зондування і радіолокації» (виконавець).

### **Мета і задачі дослідження**

Метою роботи є виявлення особливостей поширення радіохвиль в умовах порівнянності висот кореспондуючих пунктів з висотами нерівностей морської поверхні, а також обґрунтування і розробка методу опису поширення радіохвиль за таких умов, що дозволить визначати амплітудно-фазові характеристики сигналу в будь-якій точці простору на трасі поширення. Це дозволить ще на етапі проектування визначати характеристики розроблюваних радіотехнічних систем,

отримувати оцінки ефективності їх роботи, а також проводити тестування різних методів виявлення і супроводу цілей.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно було розв'язати такі задачі:

а) виявити фізичні процеси, що відбуваються при взаємодії електромагнітного поля з нерівною поверхнею розділу в умовах малих кутів ковзання;

б) обґрунтувати підходи до створення методу опису поширення радіохвиль в умовах порівнянності висот кореспондуючих пунктів з висотами нерівностей поверхні розподілу;

в) розробити алгоритми розрахунку енергетичних характеристик при поширенні радіохвилі та кутових помилок вимірюваних координат джерел випромінювань (помилки кутів місця й азимутальних помилок), у тому числі з урахуванням застосування реальних антенних систем;

г) дослідити й оцінити вплив багаторазового розсіяння електромагнітної хвилі поверхнею розділу на характеристики радіосигналу.

**Об'єкт дослідження** – радіофізичні явища при поширенні радіохвиль, що впливають на амплітудно-фазові характеристики поля в апертурі приймальної антенної системи, які можуть бути використані для визначення енергетичних параметрів сигналу в точці приймання та просторових координат джерел випромінювання.

**Предмет дослідження** – поширення радіохвиль над збуреною поверхнею моря на дальностях до 5...7 км при малих кутах ковзання і при висотах кореспондуючих пунктів, що зрівнянні з висотами морських хвиль.

**Методи дослідження.** У процесі розробки методу опису поширення радіохвиль над нерівною поверхнею розділу середовищ були використані відомі розрахунково-теоретичні та числові методи досліджень, творчо допрацьовані й адаптовані для розв'язання поставлених у дисертаційній роботі задач.

Отримання форми вітрового хвилювання, дослідження затінь, знаходження характеристик освітлених елементів морського хвилювання проводилося методами числового моделювання. Розрахунково-теоретичними та за допомогою методу Кірхгофа, а також тісно пов'язаного з ним методу вторинних джерел Гюйгенса були проведені дослідження множника впливу поверхні при поширенні електромагнітного поля, помилок кутів місця та азимуту координат джерел радіохвиль, а також дослідження дворазової взаємодії електромагнітної хвилі з морською поверхнею.

Застосування в дисертаційних дослідженнях відомих і багаторазово перевірених методів теоретичної та статистичної радіофізики забезпечило достовірність отриманих результатів. Отримані в дисертації результати добре узгоджуються з теоретичними й експериментальними даними, які були отримані автором та іншими дослідниками.

### **Наукова новизна одержаних результатів**

– Вперше визначено основні фізичні механізми взаємодії радіохвиль зі збуреною морською поверхнею в умовах малих висот кореспондуючих пунктів та

малих кутів ковзання. Показано, що за розглянутих умов на характеристики прийнятого сигналу впливають два основні механізми: відбиття радіохвилі від освітленого гребеня морської хвилі та дифракція електромагнітного поля на цьому ж гребені, причому домінантним є дифракційний механізм розсіяння радіохвилі, роль якого зростає зі зменшенням кутів ковзання.

– Вперше розроблено метод опису поширення радіохвиль над збуреними поверхнями за умов порівнянності висот кореспондуючих пунктів з висотами нерівностей поверхні, який доцільно впровадити для розрахунку характеристик електромагнітного поля в умовах сильних затінь.

– Вперше визначено розрахункові значення множника впливу поверхні при багаторазовій дифракції електромагнітного поля на гребнях вітрових хвиль, які, на відміну від прогнозу за методом дотичної площини, узгоджуються з експериментом, у тому числі і в зоні тіні.

– Вперше за умов багаторазової дифракції електромагнітного поля на гребнях вітрових хвиль визначені ділянки поверхні, які мають домінантний вплив на когерентну та дифракційну складові поля, а також на закон зміни поля в точці приймання.

– Вперше оцінено кутові помилки визначення координат цілей при розрахунку багаторазової дифракції радіохвилі над морською поверхнею з урахуванням реальних характеристик антенних систем.

– Вперше проведено оцінку внеску дворазової взаємодії радіохвилі зі збуреною морською поверхнею на множник впливу поверхні. Встановлено, що поляризаційні властивості електромагнітного поля та характеристики дрібномасштабної складової морського хвилювання мають домінуючий вплив на характеристики електромагнітної хвилі за дворазової взаємодії її зі збуреною морською поверхнею.

### **Практичне значення одержаних результатів**

– Розроблено методи розрахунку характеристик електромагнітних полів при сильних затіненнях і малих кутах ковзання. Ці методи можуть бути використані для розробки та створення нових радіотехнічних і радіолокаційних систем, що працюють в умовах порівнянності висот кореспондуючих пунктів з висотами нерівностей поверхні розділу.

– Розроблено методику розрахунку множника впливу поверхні при поширенні радіохвиль над нерівними поверхнями розділу, які дозволяє визначати енергетичні характеристики перспективних радіотехнічних і радіолокаційних систем.

– Розроблено методики визначення лінійних і кутових координат цілей, що використовуються для покращення параметрів радіолокаційних систем і проведення тестування різноманітних методів визначення координат цілей.

– Вперше розроблено методику оцінювання просторово-часових характеристик радіохвилі за дворазової взаємодії з морською поверхнею. Визначено фактори, що посилюють і зменшують дворазову взаємодію радіохвилі зі збуреною морською поверхнею.

### **Особистий внесок здобувача**

У дисертаційній роботі представлені узагальнені результати теоретичних і експериментальних досліджень з розробки методу опису поширення радіохвиль над збуреною поверхнею моря в умовах порівнянності висот кореспондуючих пунктів з висотами нерівностей поверхні моря та дистанціями в 5...7 км. Дослідження проводилося в Інституті радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України протягом багатьох років особисто автором і в співавторстві з колегами. Особистий внесок дисертанта полягає в такому.

У роботі [1] автор брав участь у визначенні та розробці критеріїв побудови способів опису поширення радіохвиль з урахуванням дифракції на збуреній поверхні моря. Було підтверджено придатність застосування дифракційного опису поля при взаємодії останнього зі збуреною водною поверхнею. У роботах [2–8] автор розробив методику моделювання вітрового морського хвилювання відповідно до радіофізичного завдання опису поширення електромагнітних хвиль над морською поверхнею при малих кутах ковзання. Були отримані статистичні характеристики освітлених елементів поверхні. У роботах [9–10] автором оброблені експериментальні дані й узагальнені отримані результати. Зокрема, отримані закони розподілення флуктуацій множника впливу поверхні на реальних морських трасах і пояснені особливості впливу затінь на спектр флуктуацій радіосигналу при його поширенні над морем. У роботах [11, 12] автором були розроблені апаратура та методика експериментальних досліджень, оброблені й узагальнені отримані результати, одержані характеристики радіосигналів, розсіяних поверхнею води, що збурена дощем. У роботах [13–15] автором була розроблена методика експериментальних вимірювань. Він брав безпосередню участь в експериментальних дослідженнях, обробленні й узагальненні отриманих результатів. Ним отримані статистичні характеристики сільськогосподарських поверхонь ґрунтів. У роботі [16] автор брав участь в обробленні даних і узагальненні отриманих результатів. Були одержані аналітичні співвідношення щодо впливу на розсіяний радіосигнал вологої та шаруватої поверхні ґрунту. У роботі [17] автор брав участь в експериментальних дослідженнях, обробленні й узагальненні отриманих результатів. Отримані характеристики радіосигналів, розсіяних штучно обробленими поверхнями ґрунтів. У роботах [18–33] автор брав участь у постановці завдань, дослідженні та узагальненні отриманих результатів. У цих роботах на основі проведених у попередніх роботах досліджень отримані основні результати, які використовуються в даній дисертації в якості положень, що виносяться на захист. У монографіях [34, 35] ці результати представлені у вигляді цілісної концепції методу опису розсіяння радіохвиль при малих висотах кореспондуючих пунктів.

### **Апробація результатів дисертації**

Апробація результатів дисертації проводилася на національних та міжнародних семінарах, конференціях і симпозіумах, у тому числі на 7-й Міжнародній Кримській конференції «НВЧ-техніка і телекомунікаційні технології» (Севастополь, 1997 р.), The 3rd International Kharkov Symposium "Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves" (Харків, 1998 р.), 2-й Всеросійській науковій конференції «Дистанційне зондування земних покривів і



атмосфери аерокосмічними засобами» (Санкт-Петербург, 2004 р.), 2-му Міжнародному радіоелектронному форумі «Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку» (Харків, 2005 р.), The 4th International Kharkov Symposium "Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves" (Харків, 2007 р.), 3-му Міжнародному радіоелектронному форумі «Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку» (Харків, 2008 р.), The 7th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (Харків, 2010 р.), 4-му Міжнародному радіоелектронному форумі «Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку» (Харків, 2011 р.), на першій українській конференції «Електромагнітні методи дослідження навколишнього простору» (Харків, 2012 р.), 5-му Міжнародному радіоелектронному форумі «Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку» (Харків, 2014 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковані в 2 монографіях і 23 оригінальних статтях (у тому числі 4 статті – у виданнях іноземних держав, 1 стаття – в українському виданні, що включено до міжнародних наукометричних баз), у наукових зарубіжних і вітчизняних спеціалізованих виданнях, у 13 тезах міжнародних наукових конференцій.

**Обсяг і структура дисертації.** Дисертація складається із вступу, переліку умовних скорочень і позначень, шести розділів, висновків і списку використаних джерел. Її повний обсяг складає 299 сторінок. Дисертація містить 90 рисунків і 25 таблиць. Список використаних джерел нараховує 155 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано проблему, мету і завдання досліджень, відображено їх зв'язок із науковими програмами, планами і темами, наукову новизну отриманих результатів і їх практичне значення, показано особистий внесок дисертанта, а також наведено дані про апробацію результатів роботи та публікації за темою дисертації.

**Розділ 1** дисертації присвячено аналізу існуючих експериментальних даних щодо багатопроменевого поширення сантиметрових і міліметрових радіохвиль над поверхнею Землі. Наведено огляд основних існуючих методів розрахунку електромагнітного поля. Показано неспроможність застосування в умовах малих кутів ковзання методу дотичної площини – чи не єдиного дотепер методу з розрахунку характеристик вторинного поля. Показано перспективність для розрахунку характеристик вторинного поля в умовах малих кутів ковзання методу багаторазової дифракції на вершинах освітлених нерівностей поверхні.

У **підрозділі 1.1** наведено основні характеристики електромагнітного поля, відомі з результатів теоретичних і експериментальних робіт. Показано, що поле прийнято поділяти на дві одночасно існуючі компоненти: дзеркальну (когерентну) і дифузну (некогерентну). Звернуто увагу на те, що при близьких до нуля кутах ковзання спостерігається невідповідність передбачень теорії в рамках методу дотичної площини та експериментальних даних.

У **підрозділі 1.2** проведено аналіз експериментальних даних на відповідність

прогнозам існуючої теорії для найважливіших характеристик, що використовуються для опису поширення електромагнітних полів над нерівними поверхнями, таких як коефіцієнт дзеркального відображення, коефіцієнт дифузного розсіяння, множник впливу поверхні. Проаналізовано особливості поведінки спектра флуктуацій амплітуди радіосигналу при його розсіянні морською поверхнею, особливості багатопроменевого поширення поля над суходолом і кутові помилки визначення координат цілей.

Відзначено, що важливим з погляду уявлень про механізм формування вторинного поля над морською поверхнею є висновок про те, що у випадку зменшення кута ковзання відбувається зростання коефіцієнта відбиття до значень, близьких до одиниці, причому вплив затінення частини поверхні практично не проявляється навіть при дуже малих висотах кореспондуючих пунктів. Показано, що на сантиметрових і міліметрових хвилях аж до дальностей, які відповідають відстані радіогоризонту, на висотах у десятки сантиметрів над морською поверхнею електромагнітне поле має досить високі рівні, які, зокрема, істотно перевищують розрахункові значення для стандартної рефракції і реально існуючих висот морських хвиль. За таких умов при використанні існуючих методів розрахунку поля для відповідності експерименту при обчисленні множника впливу поверхні доводиться вводити неіснуючі метеорологічні умови або неіснуючі параметри хвилювання морської поверхні.

Показано, що коефіцієнт дифузного розсіяння у випадку зменшення кута ковзання не зменшується до нуля, як це передбачає існуюча теорія, а має кінцеве ненульове значення навіть при нульових кутах ковзання.

Відзначено, що спектр флуктуацій амплітуд розсіяних морською поверхнею сигналів практично не залежить від частоти, що прямо суперечить існуючим теоріям. Передбачувана існуючими теоріями залежність кутових помилок від ступеня хвилювання моря підтверджується експериментом, однак експериментальні величини кутових помилок істотно відрізняються від теоретичних. У висновках до підрозділу відзначені такі невідповідності експериментальних даних і прогнозів існуючих теорій, які необхідно вирішити шляхом розробки нового методу опису поля над нерівною поверхнею при малих кутах ковзання:

- наявність дзеркальної (когерентної) компоненти поля, що не спадає у разі зменшення кута ковзання аж до нульових значень незалежно від наявності взаємних затінь нерівностей поверхні;
- спадання рівня дифузійної (некогерентного) компоненти у разі зменшення кута ковзання лише до деякого кінцевого значення;
- слабка залежність від довжини хвилі форми спектрів флуктуацій амплітуди і кутів приходу сигналів при поширенні поля над морською поверхнею при малих кутах ковзання;
- залежність кутових помилок визначення координат цілі від ступеня морського хвилювання. Зниження кутових помилок шляхом використання позаосьового методу визначення кутових координат цілей.

У **підрозділі 1.3** проаналізовані межі застосування існуючих методів опису розсіяного поверхнями електромагнітного поля: методу малих збурень і методу дотичної площини. В умовах, які розглянуті в дисертації, метод малих збурень

неприйнятний через вимоги малості висот поверхні в порівнянні з довжиною використовуваної радіохвилі. У методі дотичної площини таких обмежень немає, але характеристики кривизни реальної морської поверхні і використовувані в розглянутих умовах кути ковзання роблять його практично непридатним для розрахунків характеристик поширення електромагнітного поля. Проведене моделювання затінь морської поверхні показало різке зниження зі зменшенням кута ковзання як кількості, так і розмірів освітлених елементів поверхні. Це повинно приводити до зниження зі зменшенням кута ковзання рівня розсіяного поверхнею поля, чого не спостерігається на практиці.

У **підрозділі 1.4** проведено аналітичне дослідження можливості заміни відбивного механізму розсіяння радіохвиль поверхнею, що описується методом дотичної площини, на дифракційний. На рис. 1 наведено кутові залежності множника впливу поверхні для відбиття поля від циліндрів та при дифракції на напівплощинах.

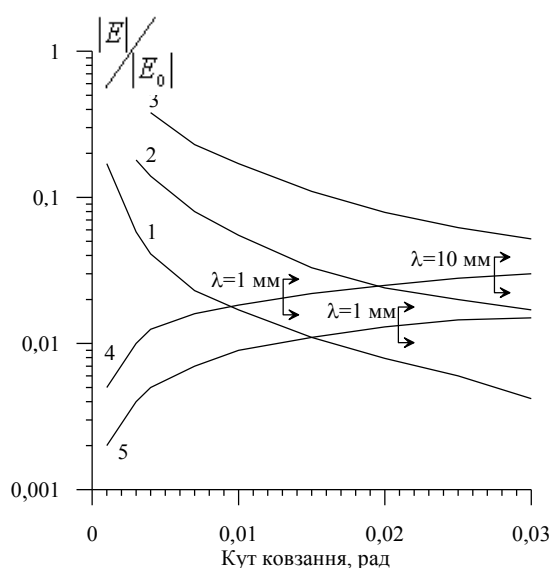


Рисунок 1 – Множники впливу поверхні при дифракції й відбитті від циліндра:

1 - дифракція на напівплощині,  $\lambda = 1$  мм; 2 - дифракція на напівплощині,  $\lambda = 10$  мм; 3 - дифракція на напівплощині,  $\lambda = 10$  см; 4 - перевипромінювання від циліндра,  $K_u = 0,015 \text{ м}^{-1}$ ; 5 - перевипромінювання від циліндра,  $K_u = 0,06 \text{ м}^{-1}$ .

На кривих для методу дотичної площини (перевипромінювання від циліндрів) вертикальними відрізками позначені умовні межі застосування методу. З графіків видно, що в області кутів ковзання менше  $10^{-2}$  рад, по-перше, метод дотичної площини, строго кажучи, не можна застосувати, по-друге, прогнозовані ним вторинні поля виявляються істотно нижчими, ніж при дифракції на напівплощині.

Аналітично визначено, що коефіцієнт відбиття не залежить від кількості освітлених елементів поверхні на трасі, на яких відбувається дифракція електромагнітної хвилі. Також визначено, що коефіцієнт дифузного розсіяння при дифракції на освітлених елементах поверхні має кінцеве ненульове значення при нульових кутах ковзання. Показано, що при дифракційному механізмі розсіяння радіохвиль нерівною поверхнею зберігаються всі особливості поширення електромагнітного поля при малих кутах ковзання. Дифракційний механізм опису розсіяного поля дозволяє усунути протиріччя між експериментальними даними та прогнозами методу дотичної площини.

У **підрозділі 1.5** наведено висновки з досліджень, що проведені в розділі 1, серед яких, наприклад, висновок, що при дифракційній моделі формування вторинного поля зберігається правомірність представлення його у вигляді двох компонент – дзеркальної (когерентної) і дифузійної (випадкової), як це має місце і в рамках методу дотичної площини. У той же час дифракційна модель усуває один з головних недоліків методу дотичної площини – суперечність експериментальним даним щодо спадання інтенсивності вторинного поля при зменшенні кутів ковзання в області їх малих значень, викликану швидким зменшенням під впливом взаємних затінь числа елементів поверхні, що відбивають електромагнітне поле. При дифракційній моделі формування поля відбувається або зростання його інтенсивності, що виражається, зокрема, в зростанні коефіцієнта відбиття дзеркальної компоненти, або спадання інтенсивності поля до деякого кінцевого рівня в разі дифузійної компоненти.

У **розділі 2** наведено обґрунтування застосування в дисертації відомих методів розрахунку розсіяного нерівною поверхнею поля.

У **підрозділі 2.1**, який є вступом до розділу 2, представлені два відомих методи розрахунку характеристик електромагнітного поля за умов його поширення в реальних середовищах: аналітичного методу, що представляє вторинне поле як суму полів відбиття та дифракції, причому рівень поля дифракції зростає при зменшенні кутів ковзання, та числового методу Кірхгофа–Гюйгенса. Обидва ці методи розрахунку в дисертації були модифіковані для умов поширення радіохвиль при малих кутах ковзання.

У **підрозділі 2.2** запропоновано виділити в загальній області поширення радіохвиль чотири умовних області: освітлену область простору, характеристики поля в якій визначаються в першу чергу впливом середовища поширення і багатопроменевим поширенням над поверхнею розділу; область, яка є перехідною між освітленою областю і зоною напівтіні; зону напівтіні і зону тіні. В останніх двох областях опис електромагнітного поля при його поширенні над нерівною поверхнею є можливим в представленні його багаторазовою послідовною дифракцією на вершинах освітлених нерівностей. Для аналітичного методу представлення значень вторинного електромагнітного поля при двовимірній задачі поширення радіохвиль наведені вирази для опису електромагнітного поля як суми двох компонент: поля відбиття

$$\dot{V}_C = \dot{F}_{HV}(\gamma_L) q(\gamma_L) \sqrt{\frac{\rho(r_{TS} + r_{RS}) \sin \frac{\gamma_L}{2}}{r_{TS} r_{RS}}} \exp[ik(r_{TS} + r_{RS} - r_{TR})],$$

$$q(\gamma_L) = \exp(-2k^2 \sigma_h^2 \sin^2 \gamma_L), \quad (1)$$

та дифракції

$$\dot{V}_D = \frac{q(\gamma_L)}{\sqrt{2\pi i}} \exp\left[i\frac{\pi}{2}u^2 - \frac{3}{4}\pi\right], \quad u = \sin \gamma_L \sqrt{\frac{k}{\pi} \frac{r_{TS} r_{RS}}{r_{TS} + r_{RS}}} < 1, \quad (2)$$

де  $F_{HV}$  - коефіцієнт Френеля,  $u$  - параметр дифракції;  $\sigma_h$  - середньоквадратичне значення висоти дрібномасштабних нерівностей;  $\gamma_L$  - локальний кут ковзання щодо

площини, дотичної до поверхні великомасштабної нерівності в точці відбиття;  $r_{TS}$ ,  $r_{RS}$ ,  $r_{TR}$  - відстані відповідно між джерелом поля та точкою відбиття, приймачем та точкою відбиття й між кореспондуючими пунктами;  $\rho$  - радіус кривизни в точці відбиття.

Показано, що при використуванні кута ковзання та реальних радіусів кривизни гребенів морських хвиль, можна при числових розрахунках замінювати морську хвилю еквівалентним непрозорим напівнескінченим екраном з висотою, що дорівнює висоті вершини морської хвилі і розрахунки дифракції поля вести на цих напівнескінчених екранах. Таким чином поверхню моря на трасі поширення радіохвиль схему можна представляти у вигляді набору екранів, що замінюють морські хвилі.

У **підрозділі 2.3** наведено опис числового методу, який був адаптований для опису поширення електромагнітного поля над збуреною морською поверхнею при малих кутах ковзання. Суть цього методу полягала в тому, що на трасі поширення виділялися області, в яких проходило збудження вторинних джерел Гюйгенса, які у свою чергу були джерелами вторинних циліндричних або сферичних хвиль. Для зручності розрахунків ці області простору вибиралися над освітленими вершинами нерівностей поверхні, що замінювалися еквівалентними екранами. Для двовимірної задачі поле над  $n+1$  екраном в будь-якій точці області  $y_{n+1}$  обчислювалося як

$$U_{n+1}(y_{n+1}) = \frac{e^{i\pi/4}}{2\sqrt{\lambda}} \int_{h_n}^{\infty} U_n(y_n) \frac{e^{ikr}}{\sqrt{r}} (\cos\delta + \cos\alpha) dy_n, \quad r = \sqrt{d^2 + (y_{n+1} - y_n)^2},$$

$$\cos\delta = \frac{d}{r}, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3)$$

де  $d$  - горизонтальна відстань між екранами  $n$  та  $n+1$ ;  $h_n$  - висота екрану  $n$ ;  $y_{n+1}$ ,  $y_n$  - області простору над екранами  $n+1$  та  $n$ ;  $\lambda$  - довжина радіохвилі;  $\alpha$  - кут між напрямком поширення хвилі і віссю  $OX$ .

У **підрозділі 2.4** наведені висновки до розділу 2.

У **розділі 3** представлені метод моделювання вітрового морського хвилювання в лінійному наближенні та характеристики освітлених елементів поверхні для умов поширення радіохвилі над поверхнею при малих кутах ковзання.

У **підрозділі 3.1**, що є вступом до розділу 3, наведено короткий аналіз застосовуваних раніше моделей поверхонь. Показано неприпустимість ігнорування при моделюванні поширення радіохвиль над поверхнею її реальної форми.

Опис методу моделювання форми вітрового морського хвилювання наведено в **підрозділі 3.2**. При моделюванні форми вітрового морського хвилювання виявлено вплив вибору верхньої межі спектра морського хвилювання на характеристики елементів поверхні. Відзначено, що вибір максимальної межі обрізання спектра морського хвилювання повинен враховувати ступінь хвилювання (середньоквадратичну висоту морського хвилювання) і використовувати довжину радіохвилі. Не враховані у процесі моделювання компоненти спектра морського хвилювання мають давати приріст середньоквадратичного відхилення висот

морської поверхні  $\Delta\sigma \leq \lambda = \left[ \int_{\omega_{\max}}^{\infty} \int_{-\pi}^{\pi} S(\omega, \theta) d\omega d\theta \right]^{1/2}$  не більше, ніж довжина

використовуваної радіохвилі. У цьому випадку через фундаментальні властивості дифракції на поверхні моря не буде помилкових затінь. Наведено критерії щодо вибору просторової дискретизації поверхні.

У **підрозділі 3.3** наведено результати досліджень затінь поверхні з вітровим морським хвилюванням. Залежно від кута ковзання отримані розподіли довжин, висот, нахилів, радіусів кривизни освітлених елементів поверхні. Зіставлення отриманих даних з результатами інших дослідників у цій області показало добрий збіг. Показано, що при зниженні кута ковзання з 0,25 до 0,001 рад довжини освітлених ділянок зменшуються на порядок – з сотень до одиниць метрів. Висота освітлених елементів поверхні зростає практично до максимально можливих значень. Суттєво залежать від кута ковзання і нахили освітлених ділянок: їх зміна відбувається від приблизно 0,003...0,004 рад при куті ковзання 0,25 рад до приблизно 0,08 рад при куті ковзання 0,001 рад. Складнішою виявляється залежність числа освітлених елементів поверхні від кута ковзання. При великих кутах ковзання (0,25 рад) освітлених ділянок мало (одиниці і десятки). У міру наближення кута ковзання до ефективного нахилу нерівностей морського хвилювання число освітлених ділянок різко зростає (більш ніж на порядок). Це відбувається за рахунок «дроблення» спочатку великих ділянок на менші. Подальше зниження кута ковзання призводить до затінення раніше освітлених ділянок поверхні, і число освітлених ділянок поверхні знижується.

У **підрозділі 3.4** наведені результати досліджень затінь для поверхні, що змінюється в часі. Визначено розподіл «часу життя» освітлених елементів поверхні і значення переміщень цих елементів поверхні за час їхнього «життя». На основі отриманих даних визначено розподіли швидкостей переміщень освітлених елементів поверхні за час їхнього «життя». Відзначено, що середній «час життя» освітлених елементів поверхні зростає майже в 3...4 рази при зміні кута ковзання з 0,001 до 0,05 рад. При цьому швидкість переміщень освітлених елементів поверхні практично не змінюється. Порівняння отриманих даних з експериментальними даними показало добру відповідність. Так, для подібних ступенів хвилювання і кутів ковзання проведено порівняння експериментальних даних за тривалістю сплесків радіосигналу при його відбитті від поверхні моря з даними моделювання за «часом життя» освітлених елементів поверхні та отриманих з доплерівських сигналів швидкостей переміщень розсіювачів зі швидкістю переміщення освітлених елементів поверхні, що отримані шляхом моделювання. Найбільш ймовірний «час життя» освітленого елемента поверхні при моделюванні склав близько 0,25...0,5 с. Найбільш ймовірний час сплеску радіосигналу, розсіяного морською поверхнею, склав близько 0,4...0,6 с. При моделюванні найбільш ймовірна швидкість переміщення освітлених елементів поверхні склала 1,9 м/с. Отримана в експерименті через перерахунок за ефектом Доплера найбільш ймовірна швидкість переміщення розсіювачів радіохвилі склала 1,2...1,8 м/с.

У **підрозділі 3.5** наведено отримані розподіли освітлених вершин морських

хвиль. Вершиною морської хвилі вважаємо елемент профілю поверхні, перша похідна якого змінює знак з додатного на від'ємний. Показано, що за всіх інших однакових умов кількість вершин на трасі і їх розподіл по довжині траси суттєво залежить від вибору верхньої межі спектра морського хвилювання. При збільшенні максимальної частоти спектра морського хвилювання зростають нахили морських хвиль, зростає рівень затінь, і розподіл освітлених вершин морських хвиль може трансформуватись з рівномірного в бімодальний, із зростанням поблизу кінцевих ділянок траси. Відзначено сильну залежність від кута ковзання висот освітлених вершин, що можуть набувати значень, наближених до максимальних. Це ілюструє рис.2, на якому для симетричної траси наведені залежності середніх висот освітлених вершин в залежності від кута ковзання, який визначено для середньої частини траси.

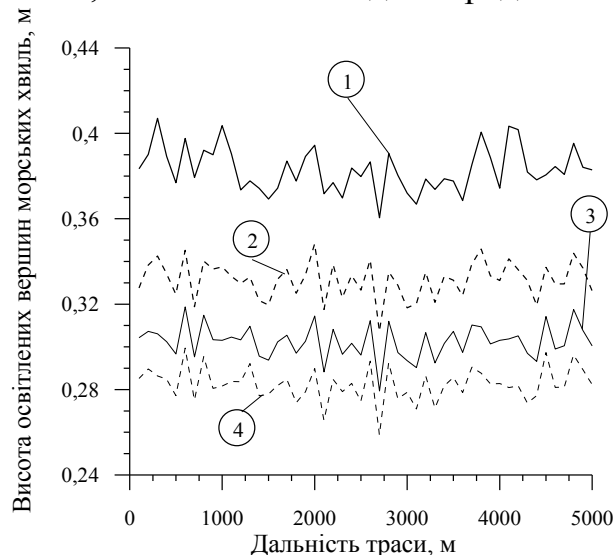


Рисунок 2 - Залежність висот освітлених вершин морських хвиль по довжині траси від кута ковзання при фіксованій дальності. Ефективна висота морських хвиль 0,2 м; 1- кут ковзання 0,02 рад; 2- кут ковзання 0,04 рад; 3- кут ковзання 0,06 рад; 4- кут ковзання 0,08 рад;

У **підрозділі 3.6** наведено висновки до розділу 3, серед яких, наприклад, висновок про те, що щільність освітлених вершин (екранів) по довжині траси не завжди можна вважати рівномірною. При суттєвому зростанні затінь крива щільності освітлених вершин може трансформуватись з рівномірної в бімодальну з максимумами поблизу кінцевих ділянок траси.

**Розділ 4** присвячений отриманню за допомогою розробленого методу опису поля множника впливу поверхні в трьох умовних областях: освітленій зоні, зоні багаторазової дифракції та перехідній зоні. Проведено детальний аналіз впливу різних ділянок траси на характеристики дзеркальної і дифузійної компонент поля. Оцінено вплив висот і розташування розсіювачів на трасі на характеристики множника впливу поверхні в умовах багаторазового дифракції поля на нерівностях поверхні. Проведено порівняння отриманих результатів з даними експериментів.

У **підрозділі 4.1** розглянуто так звану освітлену область простору, в якій характеристики поля визначаються в першу чергу впливом середовища та багатопроменевим поширенням над морською поверхнею. Розглянуто вплив полів відбиття та дифракції на формування сумарного розсіяного поверхнею моря поля. Відзначено, що дзеркальна складова формується практично областю траси першої

зони Френеля. Дифузна складова поля формується всією трасою. основний внесок у когерентну складову дає центральна частина траси (перша зона Френеля і прилеглі до неї ділянки), причому відносний внесок порівняно з випадковою компонентою зростає зі зменшенням висот кореспондуючих пунктів, тобто зі зменшенням кутів ковзання на більшій частині траси. При зменшенні збурення морської поверхні ефективно значення когерентної компоненти може істотно перевищувати значення випадкової компоненти з першої зони Френеля. З наближенням до кінців траси відбувається різке зростання інтенсивності випадкової компоненти. Максимум інтенсивності поля дифракції припадає на область навколо напрямку дзеркального відображення від площини, що відповідає за середню висоту елементів поверхні, які беруть участь у розсіянні поля.

Проаналізовано кутові спектри потужності розсіяного морською поверхнею поля. Встановлено, що область найбільш інтенсивних відбиттів має кутову ширину у вертикальній площині 10...20 мрад при висоті кореспондуючих пунктів 5 м, зростаючи до 30...40 мрад при збільшенні цієї висоти до 20 м. Максимум інтенсивності припадає на область навколо напрямку дзеркального відбиття від площини, що відповідає за середню висоту елементів поверхні, які беруть участь у розсіянні поля. Кількість пелюсток кутового спектра і положення їх максимумів не відображають кількість елементів нерівної поверхні, що розсіює поле. Присутність дрібномасштабних нерівностей поверхні призводить до зниження інтенсивності розсіання, причому найбільш суттєво послаблюються відбиття від ділянок траси, що відповідають найбільшим кутам ковзання.

У **пункті 4.1.1** наведені висновки до підрозділу 4.1, серед яких, наприклад, висновок про суттєвий вплив дифракції на гребнях хвиль на поле в безпосередній близькості від поверхні, де інтенсивність поля помітно перевершує рівень, що передбачається в рамках загальноприйнятих інтерференційних уявлень.

У **підрозділі 4.2** розглянуто зону багаторазової дифракції, до якої належать області напівтіні і тіні, в яких у процесі поширення від джерела до точки спостереження поле неодноразово взаємодіє з нерівностями поверхні, а саме з характерними для морського хвилювання гребнями хвиль. Тут домінує дифракційний механізм взаємодії хвилі з вершинами, і необхідно представляти поле за кожним з гребенів морської хвилі як результат дифракції Френеля падаючого на нього електромагнітного поля. Визначено граничну швидкість вітру над морською

поверхнею  $U_{10} > \frac{37,5\sqrt{\lambda}}{1-75\gamma}$ , за якої можна застосовувати багаторазову послідовну

дифракцію поля на вершинах хвиль. Для довжини радіохвилі  $\lambda = 1$  см та кута ковзання  $\gamma = 1$  мрад швидкість вітру не повинна бути менше ніж 4,02 м/с, що відповідає середньоквадратичному відхиленню висот морського хвилювання  $\sigma = 10$  см. В іншому випадку необхідно здійснювати облік відбитого від западини електромагнітного поля при його подальшій дифракції.

Проведено дослідження впливу за таких умов кількості освітлених гребенів морських хвиль і їх розташування по трасі на властивості множника впливу поверхні. Показано, що починаючи з чотирьох гребенів, подальше зростання їх числа не приводить до істотної зміни вигляду множника впливу поверхні при



близькій до нуля висоті джерела випромінювання. З'ясовано, що визначальний внесок у характеристики множника впливу поверхні дає вершина морської хвилі, висота і положення на трасі якої створює найбільше затінення для точки спостереження. Як правило, такою визначальною вершиною є найближча до точки спостереження. Це означає, що поле в найнижчє розташованій точці приймання визначатиметься особливостями руху і зміни висоти найближчого гребеня. Проведено порівняння експериментальних даних за множником впливу поверхні з розрахованими з урахуванням багаторазової дифракції радіохвиль на освітлених вершинах морських хвиль (рис. 3).

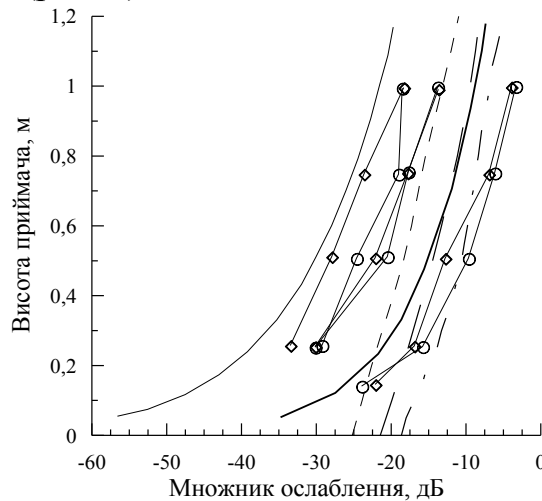


Рисунок 3 - Висотні залежності множника впливу поверхні при дальності 14,5 км, довжина хвилі 3,2 см, висота джерела радіохвилі 13 м.

- горизонтальна поляризація, дані експерименту;
- ◇— вертикальна поляризація, дані експерименту;
- розрахункова інтерференційна залежність для еквівалентного радіуса Землі 8500 км;
- розрахункова інтерференційна залежність для плоскої Землі;
- - - розрахункова дифракційна крива для плоскої Землі;
- - - розрахункова дифракційна крива для еквівалентного радіуса кривизни Землі 8500 км;
- - - розрахункова крива для комбінованої (інтерференційний та дифракційний механізм формування поля) траси з еквівалентним радіусом Землі 8500 км.

Показано, що з урахуванням багаторазової дифракції дані щодо множника впливу поверхні значно краще збігаються з експериментальними даними, ніж при розрахунках за методом дотичної площини. З'ясовано, що зі збільшенням висот кореспондуючих пунктів вище межі напівтіні залежність множника впливу поверхні від висоти стає подібною до інтерференційної, що отримана за допомогою методу дотичної площини.

У пункті 4.2.1 наведені висновки до підрозділу 4.2, серед яких, наприклад, висновки про те, що на множник впливу поверхні в області напівтіні сильно впливають віддаленість від точки спостереження і висота найближчого до неї екрана; ті ж параметри екранів, які перебувають у середній частині траси, надають істотно більш слабкий вплив, ніж крайні.

В **підрозділі 4.3** розглянуто перехідну зону поширення радіохвиль над збуреною морською поверхнею. Ця зона розташовується вище зони багаторазової дифракції, та в ній можна знехтувати взаємним впливом суміжних екранів, як і раніше розглядаючи процес розсіяння поля окремим екраном як дифракцію Френеля. Це означає правомірність використання в цій перехідній зоні променевого подання для опису механізму формування сумарного поля, розсіяного множиною нерівностей поверхні. Іншими словами, тут можна говорити про багатопроменеве поширення при дифракційному механізмі формування елементарних розсіяних хвиль.

У **пункті 4.3.1** наведено мінімальній кут ковзання залежно від довжини радіохвилі  $\lambda$  та відстані  $d$  між освітленими вершинами морських хвиль  $\gamma_0 > \sqrt{\frac{\lambda}{2d}}$ , при якому можна застосовувати наближення для перехідної зони. Отримано вирази для множника впливу поверхні в цій зоні.

У **пункті 4.3.2** визначено функціональну залежність когерентної компоненти від параметра Релея для перехідної зони. Показано, що домінуючу роль у формуванні когерентної компоненти (понад 90 % за потужністю) відіграє ділянка траси, що відповідає першій зоні Френеля на середній площині кордонів гребенів морських хвиль.

У **пункті 4.3.3** визначено функціональну залежність некогерентної компоненти від параметра Релея в перехідній зоні. Показано, що на відміну від когерентної складової домінуючий внесок в неї дає розсіяння з віддалених від точки стаціонарної фази ділянок. Таку ж властивість має розсіяння у фацетній моделі. Відзначено, що зі зменшенням кута ковзання до нуля за рахунок зменшення висот кореспондуючих пунктів коефіцієнт дифузного розсіяння не зменшується до нуля, як це витікає з методу дотичної площини, а набуває кінцевого значення, як це має місце в експерименті. Цей висновок є принципово важливим, тому що він означає присутність впливу нерівної, зокрема, морської поверхні на флуктуації амплітуд, фаз і напрямків приходу сигналів у всій області кутів ковзання. Встановлено, що зростання середньоквадратичного відхилення висот морських хвиль призводить до відповідного зростання некогерентної частини розсіяного поля.

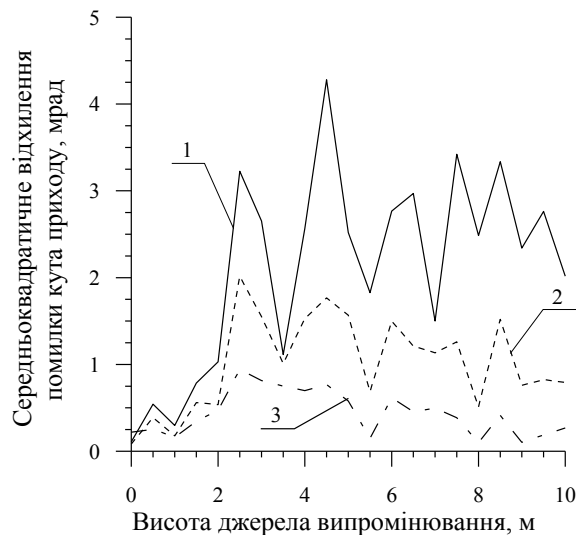
У **пункті 4.3.4** наведені висновки до підрозділу 4.3, серед яких, наприклад, висновок про те, що в широко відомої «фацетні» моделі й запропонованої в дисертації моделі послідовної дифракції на вершинах перешкод основний внесок у когерентну компоненту поля робить ділянка траси, яка відповідає першій зоні Френеля, а в дифузну компоненту – кінцеві ділянки траси. Однак принциповою відмінністю від фацетної моделі є те, що некогерентна компонента не зникає навіть при нульових кутах ковзання. Наступною відмінністю є те, що при дифракційній моделі в області застосовності променевого подання інтенсивність поля, розсіяного поверхнею, порівняно рівномірно розподілена по дистанції з максимумом у точці стаціонарної фази. При застосуванні ж методу дотичної площини інтенсивність поля в основному формується кінцевими ділянками. Зростання середнього відхилення висот морських хвиль призводить до перерозподілу розсіяної потужності: когерентна компонента зменшується, а дифузна – зростає.

У **розділі 5** проведено дослідження кутових помилок визначення координат

цілей, порівняння отриманих кутових помилок з даними експериментів і коротко досліджено найбільш поширений фізичний принцип підвищення точності вимірювання кутових координат цілей за розглянутих умов.

**Підрозділ 5.1** є вступом до розділу 5. У ньому обґрунтовано практичну цінність дослідження кутових помилок визначення координат цілей.

У **підрозділі 5.2** проведено дослідження вимірювання помилок кутів місця при багаторазовій дифракції електромагнітного поля на вершинах освітлених гребенів морських хвиль. Показано, що в області напівтіні і тіні напрямком приходу поля дифракції на морських гребенях асимптотично прагне до кута, відповідного хвилі, що випромінює край найближчого до точки спостереження екрана. У більш загальному випадку різновисоких екранів домінуючу роль гратиме межа екрана, що створює для точки спостереження більш глибоку тінь. Вище межі тіні напрямком приходу дифрагованої хвилі практично збігається з напрямком приходу у вільному просторі безпосередньо від джерела випромінювання. Підтверджено відоме з експериментів зниження кутових помилок визначення кута місця цілі при застосуванні так званого «позаосьового методу» визначення кутових координат, який полягає в простому фізичному принципі – послабленні впливу розсіяних поверхнею радіохвиль шляхом відхилення антени від горизонтальної площини на величину напівширини її діаграми спрямованості і таким чином послабленні радіосигналів від поверхні моря за рахунок їх прийняття спадною частиною пелюстка діаграми спрямованості. Так, на рис.4 наведені криві помилок вимірювання кутів місця для різних орієнтацій осі діаграми приймальної антени щодо середньої площини підстильної поверхні.



*Рисунок 4- Залежність середньоквадратичних значень помилок вимірювання кутів приходу радіохвилі в залежності від висоти джерела хвилі при різних нахилах осі діаграми спрямованості приймальної антени в кутомісцевої площині.*

*1- нахил -10 мрад; 2- нахил 0 мрад; 3-нахил +15 мрад*

З порівняння кривих 2 і 3 видно зниження кутових помилок в 2...3 рази. Проведено дослідження впливу на кутові помилки визначення кута місця висот приймальних антен, їх діаметрів і нахилів щодо лінії горизонту.

У **пункті 5.2.1** наведені висновки до підрозділу 5.2, серед яких, наприклад, висновок про те, що при вимірюванні кута місця джерела випромінювання

пеленгатором, що знаходиться нижче межі тіні, створюваної одиночною перешкодою або їх групою, вимірне значення виявляється близьким до напрямку на межу найближчого до приймача екрана. Вище межі тіні результати вимірювання в середньому відповідають напрямку на джерело випромінювання, а осциляції навколо цього напрямку подібні існуючим при пеленгації над нерівною, в середньому плоскою поверхнею розділу.

У **підрозділі 5.3** проведено дослідження азимутальних помилок вимірювання координат цілі при дифракційному поширенні радіохвиль над горизонтальними перешкодами у вигляді гребенів морських хвиль (екранів). Установлено залежність азимутальних помилок від величини дрібномасштабних нерівностей гребеня морської хвилі. Показано слабку залежність азимутальних помилок від змін висоти та діаметра апертури антенної системи. Встановлено, що значимі зміни азимутальних помилок спостерігаються при нахилі перешкод у вигляді гребенів морських хвиль у вертикальній площині, що пояснюється істотною зміною середньої висоти перешкоди. Зміна кутів повороту гребенів морських хвиль у горизонтальній площині практично не змінює азимутальні помилки. Застосування «позаосьового методу» призводить до істотного (в 3..4 рази) зниження азимутальних помилок. Принциповою відмінністю азимутальних помилок розглянутої природи від помилок, одержуваних у рамках наближення методу дотичної площини, є їх істотно відмінна залежність від висоти кореспондуючих пунктів. При дифракції Френеля помилки або практично не залежать від висоти, або зменшуються з її ростом, якщо враховується вплив діаграми спрямованості антени. Саме це і є характерним для експериментально отриманих даних. На відміну від них, у разі використання наближення методу дотичної площини при малих висотах над поверхнею азимутальні помилки зростають приблизно пропорційно висоті джерела випромінювання.

У **пункті 5.3.1** наведено висновки до підрозділу 5.3, серед яких, наприклад, висновок про те, що основний внесок в азимутальні помилки робить нахил межі екрана відносно горизонтальної площини. Їх значення і характер залежності від висоти узгоджуються з отриманими експериментально на наземних трасах, на відміну від наближення методу дотичної площини.

У **розділі 6** за допомогою числового методу розрахунку Кірхгофа–Гюйгенса проведено аналіз впливу на характеристики вторинного поля дворазового розсіяння електромагнітних хвиль.

У **підрозділі 6.1** наведено вступ до розділу 6. У ньому йдеться про складність і фундаментальність розв'язання задачі багаторазової взаємодії радіохвилі з поверхнею, на якій відбувається розсіяння. З огляду на значне послаблення поля при кожному акті взаємодії поля з поверхнею, запропоновано обмежитися розглядом дворазової взаємодії.

У **підрозділі 6.2** розглянуто вплив дворазової взаємодії електромагнітного поля з поверхнею на множник впливу поверхні. Аналіз проведено методом порівняння множників впливу поверхні при одноразовій та дворазовій взаємодії для різних, в тому числі морських, поверхонь. Встановлено значне послаблення впливу на розсіяне при дворазовій взаємодії поле дрібномасштабної складової хвилювання. Про це свідчить рис. 5, на якому наведено множники впливу поверхні з урахуванням

дрібномасштабної складової морського хвилювання (рис. 5, б) та без неї (рис. 5, а).

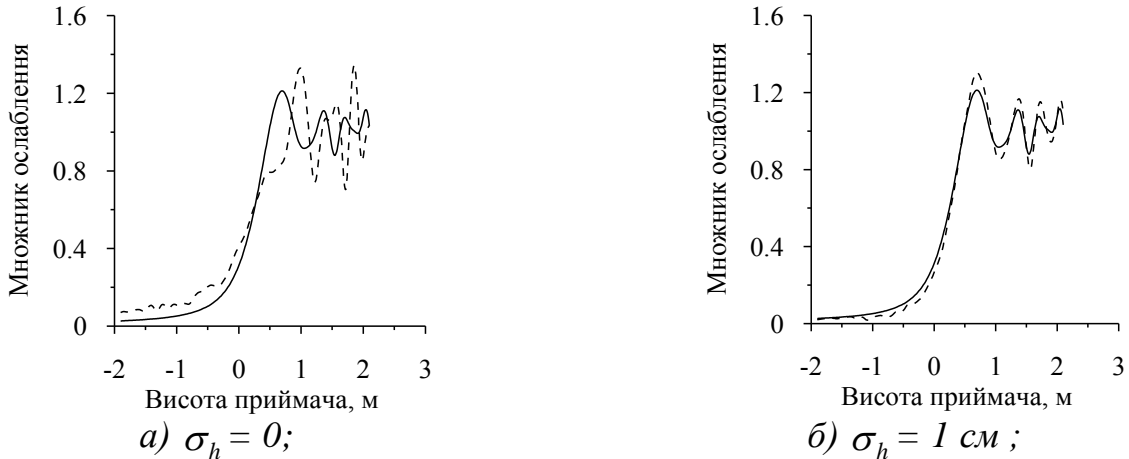


Рисунок 5 – Множник впливу поверхні при вертикальній поляризації

Суцільні криві відповідають одноразовій взаємодії поля з поверхнею, штрихові – дворазовій. Також встановлено, що ступінь дворазової взаємодії поля з поверхнею значною мірою залежить від виду застосовуваної поляризації електромагнітного поля. Внесок дворазової взаємодії поля з поверхнею виявляється більшим за умов горизонтальної поляризації сигналу, що пояснюється видом кутової залежності коефіцієнта відбиття горизонтально-поляризованого поля. Проаналізовано вплив на рівень поля у випадку дворазової взаємодії поля з поверхнею ступеня хвилювання і виду спадання спектру морського хвилювання в його високочастотній області.

У **підрозділі 6.3** наведено висновки до розділу 6, серед яких, наприклад, висновок про те, що трансформація спектру морського хвилювання в бік збільшення спектральної щільності в його високочастотній області (відносно спектра Пірсона–Московітца) призводить до зменшення впливу дворазової взаємодії поля та поверхні, що пояснюється збільшенням ефективного значення нахилів поверхні і, відповідно, зростанням затінень поверхні.

## ВИСНОВКИ

У дисертації представлено вирішення актуальної проблеми радіофізики – створення методу опису поширення радіохвиль на дистанціях в 5...7 км за умови порівнянності висот кореспондуючих пунктів з висотами нерівностей підстильної поверхні Землі. Проблему вирішено шляхом використання великого обсягу експериментальних даних і теоретичних радіофізичних досліджень, які були проаналізовані, узагальнені та опрацьовані.

У результаті проведеної роботи були виконані основні завдання дисертації:

а) виявлені та підтверджені основні фізичні процеси, що виникають у випадку розсіювання електромагнітного поля на нерівній поверхні при малих кутах ковзання і сильних затіненнях. Показано, що при розсіянні електромагнітної хвилі на освітленому елементі морської поверхні спостерігаються два одночасно діючих основних механізми взаємодії електромагнітної хвилі з поверхнею – відбиття на опуклій вершині і дифракція на ній. Допрацьовано метод розрахунку в таких умовах поля, що враховує як відбиття від вершин нерівностей, що описується в наближенні геометричної оптики, так і дифракцію на них, описувану в першому наближенні

дифракцією Френеля, причому роль другої складової (дифракційної) зростає при зменшенні кута ковзання. Допрацьовано чисельний метод розрахунку багаторазової дифракції електромагнітного поля на послідовності освітлених вершин морських хвиль, заснований на наближенні Кірхгофа і методі вторинних джерел Гюйгенса;

б) обґрунтовано підходи до створення методу опису поширення радіохвиль в умовах порівнянності висот кореспондуючих пунктів з висотами нерівностей підстильної поверхні. У рамках розробленого методу опису поширення електромагнітного поля за таких умов в якості невід'ємної його частини була розроблена модель отримання форми поверхні вітрового морського хвилювання. Дослідження форми поверхні з вітровими хвилями в розглянутих умовах її опромінення показали, що при розглянутих кутах ковзання в формуванні розсіяного поверхнею електромагнітного поля основну роль грають опуклі вершини освітлених нерівностей. Для розрахунку параметрів електромагнітного поля, що поширюється над морською поверхнею, було обґрунтовано відмову від використання методу дотичної площини, що широко застосовувався раніше. В якості альтернативи було запропоновано й обґрунтовано метод багаторазової дифракції на послідовності освітлених вершин нерівностей підстильної поверхні. У процесі роботи над дисертацією були проаналізовані експериментальні і теоретичні дані про особливості поширення міліметрових і сантиметрових хвиль при кутах ковзання, відповідних роботі радіолокаційних засобів по об'єктах, що перебувають на висотах порядку одиниць метрів над підстильною поверхнею;

в) з використанням розробленого методу опису поширення радіохвиль над поверхнею в умовах порівнянності висот кореспондуючих пунктів з висотами нерівностей поверхні були вперше оцінені просторово-часові властивості електромагнітного поля на малих (аж до нульових) висотах над поверхнею. Показано, що розроблений метод опису поширення електромагнітного поля над поверхнею підтверджує всі основні властивості поля, які спостерігаються в експерименті, й усуває суперечності між експериментальними даними та застосуванням до теперішнього часу в розрахунках методом дотичної площини. Досліджено характеристики точності вимірювань кутових координат, у тому числі з характеристиками реальних антенних систем. Проаналізовано фактори, що зменшують і збільшують кутові помилки як кутів місця, так і азимута. Зокрема зазначено, що цілком ефективним залишається застосування для вимірювання кутових координат цілей простого в реалізації так званого «позаосьового методу»;

г) розглянуто і якісно оцінено ефекти, що виникають у процесі взаємодії електромагнітного поля з кількома елементами нерівної поверхні, наприклад, дифракція на гребені і відбиття від схилу морської хвилі. Виникнення таких умов характерне для випадку слабого вітрового хвилювання. Такі ж ефекти можуть мати місце під час сильного хвилювання для кутів ковзання, близьких до нахилів енергонесучих хвиль унаслідок присутності в спектрі морського хвилювання високочастотних гармонік. Виявлено причини, що зменшують і збільшують рівень електромагнітного поля при багаторазовій взаємодії останнього з підстильною поверхнею. Виділено умови, коли ефектами багаторазової взаємодії електромагнітного поля з нерівностями поверхні можна знехтувати і коли нехтувати багаторазовою взаємодією неприпустимо.

У процесі роботи над дисертацією істотно доповнені й уточнені уявлення про фізичні механізми взаємодії радіохвиль з шорсткою поверхнею розподілу за умови порівнянності кореспондуючих пунктів з висотами нерівностей підстильної поверхні. Були отримані важливі наукові і практичні результати, які сприяли досягненню поставлених цілей. Проведені в дисертації дослідження дозволили пояснити низку особливостей характеристик підстильної поверхні і властивостей електромагнітних хвиль, що взаємодіють з нею при малих, аж до нульових, кутах ковзання:

– для дифракційної моделі формування вторинного поля зберігається правомірність його представлення у вигляді двох компонент – дзеркальної (когерентної) і дифузійної (випадкової), як це має місце і в рамках методу дотичної площини. У той же час дифракційна модель усуває один з головних недоліків методу дотичної площини, що суперечить експериментальним даним. Це спадання інтенсивності вторинного поля при зменшенні кутів ковзання в області їх малих значень, що викликане швидким зменшенням числа освітлених елементів поверхні під впливом взаємних затінь. При дифракційній моделі формування поля відбувається або зростання його інтенсивності, що виявляється, зокрема, в зростанні коефіцієнта відбиття дзеркальної компоненти, або спадання інтенсивності поля до деякого кінцевого рівня в разі дифузійної компоненти;

– вперше шляхом чисельних розрахунків дифракції радіохвилі на вершині морської хвилі обґрунтовано заміну реальної морської хвилі еквівалентним непрозорим напівнескінченим екраном з висотою, що дорівнює висоті вершини морської хвилі;

– вперше отримано розподіли висот та довжин освітлених і затінених ділянок поверхні. При зменшенні кута ковзання з 0,25 до 0,001 рад довжини освітлених ділянок морської поверхні зменшуються на порядок – з сотень до одиниць метрів. При цьому висота освітлених елементів поверхні збільшується практично до максимально можливих значень;

– вперше встановлено визначальний вплив верхньої межі спектра морського хвилювання на вигляд розподілів і основні характеристики освітлених елементів морської поверхні. Показано, що у процесі моделювання поширення радіохвиль над вітровим морським хвилюванням необхідно враховувати ступінь морського хвилювання і довжину хвилі електромагнітного поля. Відповідно до цього проводиться вибір максимальної частоти, яка враховується в спектрі морського хвилювання;

– вперше отримано дані про просторові переміщення і час перебування в освітленому стані елементів морського хвилювання. Для поверхні, що утворена вітром зі швидкістю 8 м/с, середній «час життя» освітлених елементів морського хвилювання збільшується з 0,65 до 2,4 с при зміні кута ковзання з 0,001 до 0,05 рад. При цьому їх просторове переміщення збільшується з 2,7 до 9,5 м. Спостерігається відмінність середніх значень «часу життя» і переміщень освітлених ділянок поверхні від найбільш ймовірних значень відповідних величин. Порівняння результатів моделювання за значенням найбільш ймовірного «часу життя» освітлених областей і значеннями їх найбільш ймовірних швидкостей з експериментальними даними

показало добру відповідність отриманих модельних результатів з експериментальними даними. Показано, що в досліджуваному діапазоні зміни кутів ковзання значення швидкості зсуву освітлених ділянок морської поверхні становить одиниці метрів і практично не залежить від кута ковзання, а за величиною – в кілька разів менше фазової швидкості енергонесучих хвиль;

- вперше було визначено статистичні характеристики освітлених вершин морських хвиль. Ці результати є вхідними даними для моделювання умов поширення радіохвиль під малими кутами ковзання над морською поверхнею. Показано, що щільність освітлених вершин (екранів) по довжині траси не завжди можна вважати рівномірною. У випадку суттєвого зростання затіненень крива щільності освітлених вершин може трансформуватися з рівномірної в бімодальну з максимумами поблизу кінцевих ділянок траси;

- вперше отримано розподіли висот освітлених вершин морської поверхні по довжині траси. Встановлено значне зростання середньої висоти освітлених вершин при зменшенні кута ковзання і при збільшенні ступеня морського хвилювання. При кутах ковзання в одиниці мілірадіан висоти освітлених вершин перевершують середньоквадратичне відхилення висот морського хвилювання в 2...2,5 рази;

- вперше показано суттєвий вплив дифракції на гребнях хвиль на поле в безпосередній близькості від поверхні, де інтенсивність поля помітно перевершує рівень, що передбачається в рамках загальноприйнятих інтерференційних уявлень;

- вперше відзначено істотне зниження в розсіяному полі внеску кінцевих ділянок траси під впливом дрібномасштабних нерівностей поверхні;

- вперше проведено модельний аналіз особливостей розподілу по довжині траси і по кутах приходу в точку приймання потужностей когерентної і некогерентної компонент розсіяного поверхнею моря поля. Вперше оцінено внесок різних ділянок траси в когерентну і випадкову складові вторинного поля. Встановлено, що при дифракційному механізмі взаємодії з підстильною поверхнею інтенсивність вторинного поля монотонно зростає при наближенні до області навколо точки стаціонарної фази. Відбивне трактування розсіювання поля поверхнею дає найбільшу інтенсивність від кінцевих ділянок траси. Відзначено, що при зростанні кута ковзання результати розрахунків за пропонуваним методом зближуються з результатами, які отримуються в рамках наближення методу дотичної площини;

- вперше проаналізовано особливості множника впливу поверхні на висотах, порівнянних з нерівностями поверхні, шляхом опису поля як продукту дифракції на непрозорих екранах (напівплощинах) з межами, перпендикулярними напрямку поширення радіохвиль. Показано, що застосування такого підходу правомірне в області малих кутів ковзання і малих висот одного з кореспондуючих пунктів, зокрема в області напівтіні, коли не виконуються передумови методу дотичної площини;

- вперше показано, що в разі багаторазової дифракції множник впливу поверхні при поширенні поля зі зменшенням висоти точки спостереження в зоні напівтіні спадає значно повільніше, ніж при інтерференційному поданні поля над



поверхнею, залишаючись суттєво відмінним від нуля (як правило мінус 30...20 дБ щодо поля вільного простору) на межі геометричної тіні і нижче її. Ця властивість зберігається і в тому випадку, коли ділянки траси з дифракційним механізмом передре ділянка з інтерференційним механізмом формування поля;

– вперше встановлено, що на множник впливу поверхні в області напівтіні сильно впливає віддаленість від точки спостереження і висота найближчого до неї екрана; ті ж параметри екранів, які перебувають у середній частині траси, надають істотно більш слабкий вплив, ніж крайні. Це, зокрема, означає, що в реальних умовах поширення, наприклад над поверхнею моря з вітровими хвилями, властивості флуктуацій сигналів у разі приймання в точці на малій висоті над поверхнею в першу чергу залежатимуть від особливостей просторово-часової структури нерівностей на відстанях від антени порядку довжини енергонесучої морської хвилі. В області вище межі напівтіні залежність множника впливу поверхні від висоти стає подібною до інтерференційної, зближуючись з нею при подальшому зростанні висот. Подібно до дії інтерференційного механізму формування поля тут посилюється роль екранів, що входять у перші зони Френеля на площині, в якій лежать вершини хвиль (екранів);

– встановлено, що в області кутів ковзання, коли рівні відбитого і дифракційного полів можна порівняти, дифракцію на послідовності екранів можна замінити більш ефективним з точки зору обчислювальних витрат асимптотичним поданням інтеграла Френеля і результуюче поле представляти як суму полів вільного простору й елементарних вторинних випромінювачів у вигляді лінійних меж екранів;

– вперше проведено порівняльний аналіз широко відомої «фацетної» моделі і запропонованої в дисертації моделі послідовної дифракції на вершинах перешкод. У такій моделі, як і в фацетній, основний внесок у когерентну компоненту поля робить ділянка траси, відповідна першій зоні Френеля, а в дифузійну компоненту – кінцеві ділянки траси. Однак принциповою відмінністю від фацетної моделі є те, що некогерентна компонента не зникає навіть при нульових кутах ковзання. Наступною відмінністю є те, що при дифракційній моделі в області застосовності променевого подання інтенсивність поля, що розсіяне підстильною поверхнею, порівняно рівномірно розподілена по дистанції з максимумом у точці стаціонарної фази. При застосуванні ж методу дотичної площини – інтенсивність поля в основному формується кінцевими ділянками траси. Зростання середнього відхилення висот морських хвиль призводить до перерозподілу розсіяної потужності: когерентна компонента зменшується, а дифузійна – зростає;

– вперше показано, що у випадку вимірювання кута місця джерела випромінювання пеленгатором, що знаходиться нижче межі тіні, створюваної поодинокую перешкодою або їх групою, виміряне значення виявляється близьким до напрямку на межу найближчого до приймача екрана. Вище межі тіні результати вимірювання в середньому відповідають напрямку на джерело випромінювання, а осциляції навколо цього напрямку подібні існуючим при пеленгації над нерівною, в середньому плоскою поверхнею розділу і становлять, як правило, одиниці мілірадіан;

– вперше шляхом моделювання багаторазової дифракції при поширенні радіохвиль над поверхнею моря отримано підтвердження відомого експериментально встановленого факту, що в перехідній області, коли відстань від лінії візування «пеленгатор–випромінювач» на всій трасі перевищує радіус першої зони Френеля, істотно (як правило в 2...3 рази) підвищити точність вимірювання кутів місця та азимута дозволяє застосування «позаосьового методу» пеленгування. Таким чином, цей метод виявляється ефективний як в області впливу багатопроменевого поширення над поверхнею розділу, так і при багаторазовій дифракції;

– встановлено, що основний внесок в азимутальні помилки здійснює нахил межі екрана відносно горизонтальної площини. Вони складають, як правило, частки мілірадіан, і за порядком величини їх значення і характер залежності від висоти узгоджуються з отриманими експериментально на наземних трасах, на відміну від передбачень у рамках наближення методу дотичної площини;

– вперше виявлено залежність впливу на азимутальні помилки параметра шорсткості краю перешкоди, на якому відбуватиметься розсіяння радіохвилі. При горизонтальній межі екрана азимутальні помилки мають значимі величини, які можна порівняти з експериментальними, тільки при нерівному краї екрана;

– вперше виявлено, що дрібномасштабні нерівності, що присутні практично завжди на збуреній морській поверхні і призводять до ізотропного розсіювання падаючої на морську поверхню радіохвилі, можуть значно послаблювати вплив дворазової взаємодії поля та поверхні на радіосигнал у точці приймання.

– вперше проведено аналіз щодо впливу поляризаційних характеристик електромагнітного поля на рівень його дворазової взаємодії з поверхнею. З'ясовано, що вертикально поляризовані електромагнітні хвилі, для яких абсолютні значення коефіцієнта відбиття від водної поверхні залежно від локального кута ковзання падаючої радіохвилі можуть бути близькими до нуля, меншою мірою схильні до впливу дворазової взаємодії електромагнітного поля та поверхні розподілу. Для горизонтально-поляризованих радіохвиль за інших рівних умов вплив дворазової взаємодії може істотно впливати на характеристики радіосигналу. Це пояснюється тим, що абсолютне значення коефіцієнта відбиття горизонтально-поляризованої хвилі у всьому діапазоні кутів ковзання змінюється мало (від одиниці до приблизно 0,8). Особливо цей вплив зростає в областях простору, далеких від межі тіні.

– вперше встановлено, що збільшення спектральної щільності в високочастотній області спектра морського хвилювання призводить до зменшення впливу дворазової взаємодії поля та поверхні, що пояснюється збільшенням ефективного значення нахилів підстильної поверхні і відповідно зростанням затіньованості поверхні.

– Наукові і практичні результати, що отримані в дисертації, вирішують проблему визначення властивостей електромагнітного поля в застосовуваних на практиці умовах порівнянності висот кореспондуючих пунктів з висотами нерівностей підстильної поверхні на дистанціях прямої видимості, а також дозволяють істотно доповнити уявлення про механізми взаємодії радіохвиль з

підстильними поверхнями Землі при малих кутах ковзання. З'ясовано, що розрахунки характеристик вторинного поля необхідно проводити з урахуванням домінування при малих кутах ковзання дифракційного механізму розсіювання електромагнітного поля на нерівностях підстильної поверхні. Особливо великі відмінності в розрахунках спостерігаються для методу дотичної площини і методу дифракції на вершинах нерівностей підстильної поверхні в зоні напівтіні і тіні, де метод дифракції дає більший рівень вторинного поля, що підтверджується експериментом.

– Проведені модельні дослідження з визначення кутових помилок цілей при багаторазовій дифракції радіохвилі над морською поверхнею з урахуванням реальних характеристик використовуваних на цей час антенних систем підтверджують зменшення кутових помилок цілей у випадку відхилення осі діаграми спрямованості антен вгору на фіксований кут (близько півширини діаграми спрямованості приймальної антени), які спостерігаються в експериментах. Зменшення кутових помилок відбувається і при ізотропному розсіянні електромагнітного поля від поверхні розділу, наприклад під впливом дрібних (порівнянних з довжиною падаючої радіохвилі) нерівностей поверхні.

– Показано, що багаторазова, зокрема дворазова, взаємодія радіохвиль з нерівною поверхнею сильніше проявляється при горизонтальній поляризації сигналу. Тому застосування горизонтальної поляризації є доцільним у випадках, коли потрібно отримати більший відгук розсіяного поверхнею поля, наприклад для дистанційної діагностики параметрів поверхні.

#### НАУКОВІ ПРАЦІ, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ:

1. Logvinov Yu.F. Multipath Propagation of the Microwave Above Sea Surface / Yu.F. Logvinov, Yu. A. Pedenko, V.B. Razskazovsky // *Telecommunications and Radio Engineering*. -1997. -Vol.51, N 2-3. - P. 46 -65.
2. Логвинов Ю.Ф. Влияние затенений на статистические характеристики зеркальных элементов при многолучевом распространении над морем / Ю.Ф. Логвинов // *Радиотехника и электроника: Сб. научн. тр. ИРЭ НАН Украины*. - Харьков, 1997. - 2, № 1. - С.64-68.
3. Логвинов Ю.Ф. Влияние затенений на статистические характеристики зеркальных элементов при многолучевом распространении над морем / Ю.Ф. Логвинов // *Радиофизика и радиоастрономия*. - Харьков, 1997. – Т.2, №4. - С. 450 - 456,
4. Логвинов Ю.Ф. Статистические характеристики морской поверхности при малых углах скольжения для случая обратного рассеяния радиоволн / Ю.Ф. Логвинов // *Радиотехника и электроника: Сб. научн. тр. ИРЭ НАН Украины*.- 2003. – Т. 8, №1. - С. 34-41.
5. Кириченко В.А. Пространственно-временные характеристики освещенных участков морской поверхности при наблюдении под малыми углами скольжения / В.А. Кириченко, Ю.Ф. Логвинов // *Радиофизика и электроника: Сб. научн. тр. ИРЭ НАН Украины*. – Харьков, 2004. – Т. 9, №1 С. 228-233,

6. Кириченко В.А. Статистические характеристики освещенных вершин морских волн для симметричных трасс при наблюдении под малыми углами скольжения / В.А. Кириченко, Ю.Ф. Логвинов // Радиофизика и электроника: Сб. научн. тр. ИРЭ НАН Украины. – Харьков, 2006, - Т. 11, № 1. – С.46 – 54
7. Кириченко В.А. Закон распределения флуктуаций множителя ослабления миллиметровых и сантиметровых радиоволн над морем / В.А. Кириченко, Ю.Ф. Логвинов, Ю.А. Педенко, В.Б. Разказовский. // Радиофизика и электроника: Сб. научн. тр. ИРЭ НАН Украины. – Харьков, 1998. – Т. 3, №3. - С. 68-77.
8. Логвинов Ю.Ф. Влияние затенений на спектр флуктуаций ММВ при многолучевом распространении над морем / Ю.Ф. Логвинов, Ю.А. Педенко, В.Б. Разказовский // Радиотехника и электроника. - 1998. – Т. 43, № 7. - С. 786-791.
9. Зуйков В.А. Экспериментальное изучение радиолокационных отражений от возмущений на воде при падении дождевых капель / В.А. Зуйков, Ю.Ф. Логвинов, Ю.А. Педенко, В.Б. Разказовский // Радиофизика и электроника: Сб. научн. тр. ИРЭ НАН Украины. – Харьков, 1999, - Т. 4, № 2. – С.62 – 70.
10. Логвинов Ю.Ф., Педенко Ю.А., Разказовский В.Б. Экспериментальное изучение спектров возмущений водной поверхности дождем и обратного рассеяния ими радиоволн X- и Ka-диапазонов / Ю.Ф. Логвинов, Ю.А. Педенко, В.Б. Разказовский // Радиофизика и электроника: Сб. научн. тр. ИРЭ НАН Украины. – Харьков, 2000, - Т. 5, № 3. – С.55 – 64
11. Кулёмин Г.П. Статистические характеристики почвы в задачах дистанционного зондирования / Г.П. Кулёмин, В.А. Кириченко, Ю.Ф. Логвинов // Радиофизика и электроника: Сб. научн. тр. ИРЭ НАН Украины. – Харьков, 2005, - Т. 10, № 3. – С.364 – 370.
12. Кулёмин Г.П. Временная изменчивость обратного рассеяния радиоволн смд и ммд почвой / Г.П. Кулёмин, В.А. Кириченко, Ю.Ф. Логвинов // Радиофизика и электроника: Сб. научн. тр. ИРЭ НАН Украины. – Харьков, 2005, - Т. 10, № 3. – С.371 – 376.
13. Разказовский В.Б. Влияние поверхностного слоя почвы на обратное рассеяние сантиметровых и миллиметровых радиоволн / В.А. Кириченко, Ю.Ф. Логвинов, В.Б. Разказовский. // Радиофизика и электроника: Сб. научн. тр. ИРЭ НАН Украины. – Харьков, 2006. – Т. 11, №1. - С. 38-45.
14. Разказовский В.Б. Множитель ослабления радиоволн при распространении над морем под малыми углами скольжения: модель многократной дифракции / В.Б. Разказовский, Ю.Ф. Логвинов // Радиофизика и электроника: Сб. научн. тр. ИРЭ НАН Украины. – Харьков, 2007. – Т. 12, № 1. - С. 168-176.
15. Разказовский В.Б. Множитель ослабления радиоволн при распространении над морем под малыми углами скольжения: переходная зона / В.Б. Разказовский., Ю.Ф. Логвинов // Радиофизика и электроника : Сб. научн. тр. ИРЭ НАН Украины. – Харьков, 2007. – Т. 15, № 1. - С.117-184.
16. Разказовский В.Б. Распространение сантиметровых и миллиметровых радиоволн под малыми углами скольжения: модель многократной дифракции на экранах / В.Б. Разказовский, Ю.Ф. Логвинов // Изв. вузов. Радиофизика. - 2008. - Т.51, №8. - С. 700-710.

17. Разказовский В.Б. Измерение угла места источника излучения при дифракционной модели распространения радиоволн / В.Б Разказовский., Ю.Ф. Логвинов // Радиофизика и электроника: Сб. научн. тр. ИРЭ НАН Украины. – Харьков, 2008. - Т.13, № 3. - С. 494-502.
18. Разказовский В.Б. Эвристическая модель поля миллиметровых и сантиметровых радиоволн над взволнованной морской поверхностью при сильных затенениях / В.Б Разказовский., Ю.Ф. Логвинов // Радиофизика и электрон.- Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. - 2010. – Т. 1(15), № 4. - С. 23-31.
19. Разказовский В.Б. Ошибки пеленгования источника излучения по азимуту при влиянии дифракции радиоволн на границе препятствия / В.Б Разказовский., Ю.Ф. Логвинов // Радиофизика и электроника : Сб. научн. тр. ИРЭ НАН Украины. – Харьков, 2010. - Т.1(15), № 3. - С. 51-57.
20. Разказовский В.Б. Модель многолучевого распространения миллиметровых радиоволн над морской поверхностью при сильных затенениях / В.Б Разказовский., Ю.Ф. Логвинов // Радиофизика и электроника: Сб. научн. тр. ИРЭ НАН Украины. – Харьков, 2013. - Т. 4(18), № 2. - С. 30-39.
21. Разказовский В.Б. Влияние многолучевого распространения на определение угла места маловысотного излучателя методом Root-MUSIC / В.Б. Разказовский, Ю.Ф. Логвинов, Ю.А. Педенко // Радиофизика и электроника: Сб. научн. тр. ИРЭ НАН Украины. – Харьков, 2011. – Т. 2(16), №34. – С. 34-42.
22. Logvinov Yu.F A Model of Multipath Propagation of Millimeter Radio Waves over the Sea Surface at Strong Shadowings / Yu.F. Logvinov, V.B. Razskazovskiy // Telecommunications and Radio Engineering. - 2014. - Vol.73, N 4. - P. 281-295.
23. Логвинов Ю.Ф. Влияние двукратного взаимодействия при моделировании многолучевого распространения миллиметровых радиоволн / Ю.Ф. Логвинов, В.Б Разказовский // Изв. вуз. Радиоэлектроника. - 2015. –Т. 58, №11. - С. 27-38.
24. Особенности распространения радиоволн над морской поверхностью: монография / В.Д. Еремка, В.А. Кабанов, Ю.Ф. Логвинов [и др.] ; под ред. В. Б. Разказовского. — Севастополь : Вебер, 2013. — 217 с. ISBN 978-966-335-403-3.
25. Нетрадиционные методы и средства радиолокации: монография / В.Д. Еремка, В.А. Кабанов, Ю.Ф. Логвинов [и др.] ; под ред. И. М. Мыценко. — Харьков: ФОРМ Панов А.М., 2015. — 330 с. ISBN 978-617-7293-21-6.

#### ОПУБЛІКОВАНІ ПРАЦІ АПРОБАЦІЙНОГО ХАРАКТЕРУ:

26. Logvinov Yu.F. Attenuation Factor for X-and Ka-band near Surface / Yu.F. Logvinov, Yu. A. Pedenko, V.B. Razskazovskiy // Proc. Of The 3th International Kharkov Symposium “Physics and Engineering of Millimeter and SubMillimeter Waves” (MSMW’1998), Kharkov, Ukraine, 1998. – vol. 2. - P. 455 – 457.
27. Кулемин Г.П. Статистические характеристики почвы в задачах дистанционного зондирования / Г.П. Кулемин, В.А. Кириченко, Ю.Ф. Логвинов // Материалы 2-ой Всероссийской научной конференции «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими средствами» 16-18 июня 2004 г., Санкт-Петербург, 2004. - Т.1. - С. 75-79.

28. Кириченко В.А. Статистические характеристики освещенных вершин морских волн для симметричных трасс при наблюдении под малыми углами скольжения / В.А. Кириченко, Ю.Ф. Логвинов // Материалы 2-ого Международного радиоэлектронного форума "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" 19-23 сентября 2005 г. МРФ 2005, Украина, Харьков, 2005. - Т. 2. - С. 168-171.
29. Кириченко В.А. Пространственно-временные статистические характеристики незатененных участков морской поверхности при скользящих углах наблюдения / В.А. Кириченко, Ю.Ф. Логвинов // Материалы 2-ого Международного радиоэлектронного форума "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" 19-23 сентября 2005 г. МРФ 2005, Украина, Харьков, 2005. - Т. 2. - С. 433-436.
30. Кириченко В.А. Статистические характеристики почвы в задачах дистанционного зондирования / В.А. Кириченко, Г.П. Кулемин, Ю.Ф. Логвинов // Материалы 2-ого Международного радиоэлектронного форума "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" 19-23 сентября 2005 г. МРФ 2005, Украина, Харьков, 2005. - Т. 2. - С. 369-372.
31. Кириченко В.А. Удельная эффективная поверхность рассеяния от почв лишенных растительности в диапазоне миллиметровых и сантиметровых радиоволн / В.А. Кириченко, Г.П. Кулемин, Ю.Ф. Логвинов // Материалы 2-ого Международного радиоэлектронного форума "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" 19-23 сентября 2005 г. МРФ 2005, Украина, Харьков, 2005. - Т. 2. - С. 393-396.
32. Logvinov Yu.F. Microwave Propagation Factor at Small Grazing Angle Over Sea / Yu.F. Logvinov, V.B. Razskazovskiy // Proc. Of The 4th International Kharkov Symposium "Physics and Engineering of Millimeter and SubMillimeter Waves" (MSMW'2007), Kharkov, Ukraine, 2007. – vol. 1. - P. 414 – 416.
33. Логвинов Ю.Ф. Измерение угла места источника излучения при дифракционной модели распространения радиоволн / Ю.Ф. Логвинов, В.Б. Разказовский // Материалы 3-го Международного радиоэлектронного форума "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" МРФ-2008, Украина, Харьков, 2008. - Т. 1. - С. 163-166.
34. Logvinov Yu.F. Azimuth angle errors as affected Fresnel diffraction on the large obstacles / Yu.F. Logvinov, V.B. Razskazovskiy // MSMW" 2010 Proceeding. Kharkov, Ukraine, June 21-26, 2010. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) – IEEE Catalog Number: CFP10780-CDR. – ISBN: 978-1-4244-7898-9.
35. Логвинов Ю.Ф. Дифракционная модель распространения радиоволн: азимутальные ошибки источника излучения. / Ю.Ф. Логвинов, В.Б. Разказовский // Материалы 4-го Международного радиоэлектронного форума "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" МРФ-2011, Конференция "Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии", Украина, Харьков, 2011. - Т. 1. - С. 222-225.
36. Логвинов Ю.Ф. Модель поля миллиметровых и сантиметровых радиоволн при сильных затенениях / Ю.Ф. Логвинов, В.Б. Разказовский // Материалы 4-го Международного радиоэлектронного форума "Прикладная радиоэлектроника.

Состояние и перспективы развития” МРФ-2011, Конференция ”Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии”, Украина, Харьков, 2011. - Т. 1. - С. 383-386.

37. Логвинов Ю.Ф. Исследование ошибок измерения угла места маловысотного излучателя методом ROOT-MUSIC в условиях многолучевого распространения / Ю.Ф. Логвинов, Ю.А. Педенко, В.Б. Разказовский // Материалы 4-го Международного радиоэлектронного форума “Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития” МРФ-2011, Конференция ”Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии”, Украина, Харьков, 2011. - Т. 1. - С. 226-229.
38. Логвинов Ю.Ф. Модель многолучевого распространения миллиметровых радиоволн над морской поверхностью при сильных затенениях / Ю.Ф. Логвинов, В.Б. Разказовский // Электромагнитные методы исследования окружающего пространства [Электронный ресурс]: Сб. тез. докл. Первой украинской конференции (Харьков, 25-27 сент. 2012 г.), Харьков, 2012. - С.83-85. ISBN 978-966-02-6445-8
39. Логвинов Ю.Ф. Особенности моделирования многолучевого распространения миллиметровых радиоволн при слабом ветровом волнении / Ю.Ф. Логвинов, В.Б. Разказовский // Материалы 5-го Международного радиоэлектронного форума “Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития” МРФ-2014, Конференция ”Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии”, Украина, Харьков, 2014. - Т. 1. - С. 129-132.

## АНОТАЦІЯ

Логвинов Ю. Ф. Поширення радіохвиль над збуреною водною поверхнею при малих кутах ковзання. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України, м. Харків, 2016.

У дисертації представлено вирішення актуальної проблеми радіофізики – створення методу опису поширення радіохвиль на дистанціях в 5...7 км за умови порівнянності висот кореспондуючих пунктів з висотами нерівностей збуреної морської поверхні. Для вирішення проблеми створення такого методу були проаналізовані, узагальнені та опрацьовані значні обсяги радіофізичних експериментальних та теоретичних досліджень.

Виявлено та підтверджено основні фізичні процеси, що виникають при розсіянні електромагнітного поля на нерівній поверхні при малих кутах ковзання і сильних затіненнях. Показано, що у процесі розсіяння електромагнітної хвилі на освітленому елементі морської поверхні спостерігаються два одночасно діючих основних механізми взаємодії електромагнітної хвилі з поверхнею – відбиття на опуклій вершині і дифракція на ній.

Обоґрунтовано підходи до створення методу опису поширення радіохвиль за умови порівнянності висот кореспондуючих пунктів з висотами нерівностей поверхні. В якості невід’ємної частини методу опису поширення радіохвиль

розроблено модель форми поверхні вітрового морського хвилювання. Показано, що розроблений метод опису поширення електромагнітного поля над поверхнею підтверджує всі основні властивості поля, які спостерігаються в експерименті, і усуває суперечності між експериментальними даними та застосуванням до теперішнього часу в розрахунках методом дотичної площини. Досліджено характеристики точності вимірювань кутових координат, у тому числі з характеристиками реальних антенних систем.

Розглянуто та якісно оцінено ефекти при дворазовій взаємодії електромагнітного поля з елементами поверхні. Виділено умови, коли ефектами багаторазової взаємодії електромагнітного поля з нерівностями поверхні можна знехтувати і коли нехтувати багаторазовою взаємодією неприпустимо.

**Ключові слова:** поширення радіохвиль, багаторазова дифракція, малі кути ковзання, малі висоти цілі, збурена водна поверхня.

## АННОТАЦИЯ

Логвинов Ю.Ф. Распространение радиоволн над взволнованной водной поверхностью при малых углах скольжения. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиоп физика. - Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, Харьков, 2016.

В диссертации представлено решение актуальной проблемы радиоп физики – создание метода описания распространения радиоволн на дистанциях в 5...7 км в условиях сравнимости высот корреспондирующих пунктов с высотами неровностей подстилающей взволнованной поверхности моря. Проблема решена путем использования обширных экспериментальных данных и теоретических радиоп физических исследований, которые были проанализированы, обобщены и доработаны.

Выявлены основные физические процессы, возникающие при рассеянии электромагнитного поля на неровной поверхности при малых углах скольжения и сильных затенениях. Показано, что на рассеивающем элементе подстилающей поверхности могут наблюдаться два одновременно действующих основных механизма взаимодействия электромагнитной волны: отражение на выпуклой вершине и дифракция на ней.

Доработан метод расчета рассеиваемого в таких условиях поля, учитывающий как отражение от вершин неровностей, описываемое в приближении геометрической оптики, так и дифракцию на них, описываемую в первом приближении дифракцией Френеля, причем роль второй составляющей (дифракционной) возрастает при уменьшении угла скольжения. Доработан численный метод расчета многократной дифракции электромагнитного поля на последовательности освещенных вершин морских волн, основанный на приближении Кирхгофа и методе вторичных источников Гюйгенса.

Обоснованы подходы к созданию метода описания распространения радиоволн в условиях сравнимости высот корреспондирующих пунктов с высотами неровностей подстилающей поверхности. В разработанном методе описания



распространения электромагнитного поля в таких условиях в качестве неотъемлемой ее части была разработана модель получения формы поверхности ветрового морского волнения. Установлено и проанализировано влияние выбора максимальной частоты спектра морского волнения на характеристики освещенных элементов поверхности. Предложена методика выбора максимальной частоты спектра морского волнения с учетом степени волнения моря и используемой длины радиоволны. Исследования формы поверхности с ветровыми волнами в рассматриваемых условиях ее облучения показали, что при рассматриваемых углах скольжения в формировании рассеянного поверхностью электромагнитного поля основную роль играют выпуклые вершины освещенных неровностей.

При расчетах параметров распространяющегося над морской поверхностью электромагнитного поля обоснован отказ от использования широко применяемого ранее метода касательной плоскости. В качестве альтернативы был предложен и обоснован метод многократной дифракции на последовательности освещенных вершин неровностей подстилающей поверхности.

В ходе работы над диссертацией были проанализированы экспериментальные и теоретические данные по особенностям распространения миллиметровых и сантиметровых волн при углах скольжения, соответствующих работе радиолокационных средств по объектам, находящимся на высотах порядка единиц метров над подстилающей поверхностью.

С использованием разработанного метода описания распространения радиоволн над подстилающей поверхностью в условиях сравнимости высот корреспондирующих пунктов с высотами неровностей поверхности были оценены пространственно-временные свойства электромагнитного поля на малых, вплоть до нулевых, высотах над поверхностью. Выяснено, что определяющий вклад в характеристики множителя ослабления поверхности вносит вершина морской волны, высота и положение на трассе которой создает наибольшее затенение для точки наблюдения. Как правило, такой определяющей вершиной является ближайшая к точке наблюдения.

Показано, что разработанный метод описания распространения электромагнитного поля над подстилающей поверхностью подтверждает все основные свойства поля, наблюдаемые в эксперименте, и устраняет противоречия между экспериментальными данными и применяемым до настоящего времени в расчетах методом касательной плоскости. Также исследованы в этих условиях характеристики точности измерений угловых координат в том числе и с характеристиками реальных антенных систем. Проанализированы факторы уменьшающие и увеличивающие угловые ошибки как в угломестной, так и в азимутальной плоскостях. В частности отмечено, что вполне эффективным остается применение для измерения угловых координат целей простого в реализации так называемого “внеосевого метода”.

Рассмотрены и качественно оценены эффекты, возникающие при взаимодействии поля облучающей волны последовательно с несколькими элементами неровной поверхности, например, дифракция на гребне и отражение от склона морской волны. Возникновение таких условий характерно для случая слабого ветрового волнения. Такие же эффекты могут иметь место при сильном

волнении для углов скольжения, близких к наклонам энергонесущих волн вследствие присутствия в спектре морского волнения высокочастотных гармоник. Выявлены причины, уменьшающие и увеличивающие уровень электромагнитного поля при многократном взаимодействии последнего с подстилающей поверхностью. Установлено влияние на уровень поля при двукратном взаимодействии поляризованных свойств распространяющегося поля и мелкомасштабной компоненты морского волнения. Выделены условия, когда эффектами многократного взаимодействия электромагнитного поля с неровностями поверхности можно пренебречь и когда пренебрегать многократным взаимодействием недопустимо.

**Ключевые слова:** распространения радиоволн, многократная дифракция, малые углы скольжения, малые высоты цели, взволнованная водная поверхность.

### ABSTRACT

Lohvinov Y. F. Radiowave propagation over the rough water surface at small grazing angles..- The Manuscript.

Doctoral thesis in physics and mathematics, speciality of 01.04.03 – Radiophysics. - V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, 2016.

The thesis presents a solution to the actual problem of radiophysics – development of the method of description of radiowave propagation at distances of 5...7 km when the corresponding point heights are comparable with the heights of irregularities of the underlying rough sea surface. The problem is solved using both extensive experimental data and theoretical radiophysics studies, which were analyzed, summarized and improved.

The basic physical processes occurring at electromagnetic field scattering on the uneven surface at small grazing angles and strong shading are discovered. It is shown that on the scattering element of the underlying surface one can see simultaneous operation of two main mechanisms of electromagnetic wave interaction: reflection and diffraction on the convex peak.

The approaches to developing the method for description of radiowave propagation are validated when the corresponding point heights are comparable with the heights of irregularities of the underlying surface. The model for acquiring the form of the surface of wind sea waves has been developed as an integral part of the method of radiowave propagation description in these conditions. It is shown that the developed method for description of electromagnetic field propagation over underlying surface confirms all the basic field features obtained in experiments and eliminates the contradiction between the experimental data and the method of the tangent plane used to date for calculations. The accuracy of angular coordinates measurements, including parameters of actual antenna systems, are also studied in these conditions.

The effects in the double interaction of electromagnetic field with the surface elements are considered and properly evaluated. The conditions when the effects of multiple interaction of electromagnetic field with surface irregularities can be neglected and when it is impossible to ignore them are selected.

**Keywords:** wave propagation, multiple diffraction, small grazing angles, small target height, rough water surface.