

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

ХАЛАМЕЙДА ДМИТРО ДМИТРОВИЧ

УДК 621.371.33:551.510.52

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕФРАКЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТРОПОСФЕРИ ЗА  
ДОПОМОГОЮ РАДІОІНТЕРФЕРОМЕТРА

01.04.03 – радіофізика

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата  
фізико-математичних наук

Харків – 2013

Дисертація на правах рукопису.

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

**Науковий керівник** кандидат технічних наук, старший науковий співробітник  
**Хоменко Станіслав Іванович**,  
Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України, старший науковий співробітник відділу фізичних основ радіолокації

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

кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник  
**Галушко Володимир Григорович**,  
Радіоастрономічний інститут Національної Академії наук України, старший науковий співробітник відділу радіофізики геокосмосу

Захист відбудеться « 25 » квітня 2013 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03 Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Леніна, 14.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Леніна, 14.

Автореферат розісланий « 22 » березня 2013 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Д 64.052.03



В.М. Безрук

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Визначення координат за допомогою сучасних систем глобальної навігації має здійснюватись з достатньо високою точністю. У той же час, вплив середовища розповсюдження радіохвиль може бути вельми значним, у зв'язку із чим вивчення параметрів середовища представляє значний інтерес. Зокрема явище рефракції у тропосфері може призвести до значних змін параметрів сигналів різних радіотехнічних систем, маючи на увазі радіолокаційні, радіонавігаційні та системи зв'язку. Використовуючи інформацію про рефракцію в тропосфері, можна передбачити завмирання сигналу, розрахувати рефракційні поправки до кута приходу та фази сигналу, а також уточнити координати повітряних об'єктів.

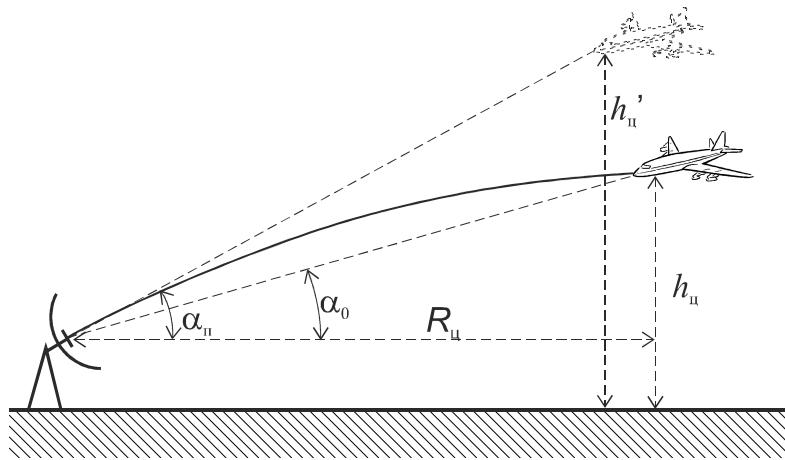


Рис. 1. Радіолокаційне спостереження повітряного об'єкта

відрізняється від дійсного кута місця  $\alpha_0$  за рахунок рефракції. Тому виникає помилка визначення висоти повітряного об'єкта  $\Delta h_{ц} = h'_{ц} - h_{ц} = R_{ц}(tg\alpha_{ц} - tg\alpha_0)$ , яка може досягати значної величини.

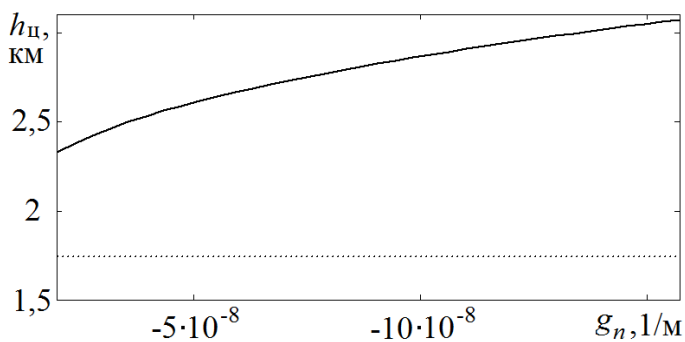


Рис. 2. Висота об'єкта, що вимірюється за допомогою РЛС, в залежності від градієнта коефіцієнта заломлення в тропосфері

Прикладом важливості використання рефракційних властивостей тропосфери є радіолокаційний вимір висоти знаходження повітряного об'єкта, що використовується в системах керування повітряним рухом та у військових цілях. В цьому випадку РЛС спостерігає об'єкт під кутом приходу  $\alpha_{ц}$  (рис. 1), який

На рис. 2 показана залежність висоти об'єкта (гладка крива), яка вимірюється за допомогою РЛС, залежно від градієнта коефіцієнта заломлення тропосфери, який розраховано для дальності  $R_{ц} = 100$  км, дійсного кута місця  $\alpha_0 = 1^\circ$ , дійсної висоти  $h_{ц} = 1,7$  км (пунктир). Як можна бачити, помилка визначення висоти повітряного об'єкта може досягати  $0,8 \div 1,3$  км., що у

деяких випадках неприпустимо і підкреслює необхідність розробки методів дослідження рефракційних властивостей тропосфери.

У теперішній час вимірювання рефракції здійснюється, в основному контактними методами, наприклад за допомогою куль-зондів, що потребує значних матеріальних витрат і не дозволяє отримувати оперативну інформацію. Тому більш перспективним є застосування дистанційних методів зондування тропосфери, зокрема за допомогою штучних супутників Землі (ШСЗ).

При цьому значний інтерес представляє використання сигналів геостаціонарних супутників Землі для отримання рефракційних характеристик тропосфери. Перевага такого підходу полягає у тому, що супутник розташовано над тією самою точкою і напрям на супутник не змінюється по азимуту і по висоті над горизонтом, що дозволяє вести безперервний моніторинг рефракційних властивостей атмосфери.

Як відомо, рефракційні властивості тропосфери визначаються кутом приходу сигналу, в даному випадку сигналу геостаціонарного ШСЗ, тому цілком природним є використання інтерференційних методів дослідження явища рефракції у тропосфері.

Таким чином, є актуальною тема дисертаційної роботи, що присвячена експериментальному дослідженню рефракційних властивостей тропосфери із використанням інтерференційного методу на базі розробленого радіоінтерферометра у надвисокочастотному діапазоні радіохвиль.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційні дослідження пов'язані з держбюджетними НДР: «Радіофізичні дослідження атмосфери, морської акваторії і суші для вирішення завдань радіолокації, океанографії, екології, ліквідації наслідків природних і техногенних катастроф» (1999-2003), ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України, № ДР 01004006444 (виконавець); «Дослідження поширення електромагнітних і акустичних хвиль в середовищах з просторово-часовою дисперсією і поглинанням» (2003-2006), ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України, № ДР 0103U002266 (виконавець); «Дослідження та розробка активно-пасивних методів моніторингу навколишнього середовища», шифр «Зонд» (2006-2011), ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України, державний № ДР 0107U001080 (виконавець).

**Мета і задачі дослідження.** Мета дисертаційної роботи полягає в подальшому розвитку дистанційного зондування рефракційних властивостей тропосфери за допомогою інтерференційного методу та використанням сигналів геостаціонарних штучних супутників Землі (ШСЗ).

Для досягнення зазначеної мети в роботі розв'язано наступні задачі:

1. Наукове обґрунтування методу дистанційного зондування властивостей рефракцій тропосфери із використанням сигналів геостаціонарних ШСЗ.
2. Аналіз впливу відношення сигнал-шум, багатопроменевого поширення, флуктуацій показника заломлення і параметрів орбіти ШСЗ на роботу радіоінтерферометра.

3. Розробка експериментального радіофізичного комплексу для натурних досліджень статистичних характеристик рефракції у тропосфері.
4. Сезонні дослідження ефективного градієнта коефіцієнта заломлення тропосфери в натурних умовах.
5. Розробка моделі неоднорідних включень у тропосфері на основі аналізу відмінностей експериментальних і теоретичних даних.

*Об'єктом дослідження є рефракційні властивості тропосфери.*

*Предметом дослідження є метод дистанційного зондування ефективного градієнта коефіцієнта заломлення тропосфери за допомогою радіоінтерферометра, що приймає сигнали геостаціонарного ШСЗ.*

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

1. Метод геометричної оптики для розрахунку поля електромагнітних хвиль при поширенні в середовищі з неоднорідним профілем коефіцієнта заломлення;
2. Метод Монте-Карло для чисельного моделювання поширення електромагнітної хвилі в турбулентному середовищі.
3. Методи спектрально-кореляційного аналізу і статистичної обробки результатів експериментальних досліджень.
4. Експериментальний метод дослідження рефракційних властивостей тропосфери.

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

- Отримав подальший розвиток інтерференційний метод дослідження ефективного градієнта коефіцієнта заломлення тропосфери за допомогою радіоінтерферометра, що приймає сигнали геостаціонарного супутника Землі. На відміну від відомих методів дистанційного зондування тропосфери, розроблений метод дозволяє значно знизити залежність результатів вимірів від характеристик поверхні, що підстилає, а також забезпечує можливість постійного моніторингу рефракційних властивостей тропосфери.
- Розроблена нова модель роботи радіоінтерферометра, яка, на відміну від попередніх розробок, дозволила отримати нові результати щодо впливу турбулентної тропосфери та поверхні що підстилає на результати дистанційного зондування.
- Отримано нові дані щодо впливу метеорологічних утворень складної форми на результати дистанційного зондування рефракційних властивостей тропосфери. Доведено, що кулясті та клиноподібні метеоутворення в тропосфері призводять до істотної неузгодженості даних контактних і дистанційних вимірів із використанням експоненціальної моделі висотного профілю коефіцієнта заломлення тропосфери, що дозволяє обґрунтувати аномальні значення кутів рефракції, які спостерігалися при натурних дослідженнях.

**Практичне значення одержаних результатів** проведених досліджень обумовлене тим, що запропонований в роботі метод дослідження ефективного градієнта коефіцієнта заломлення може бути використаний для діагностики умов поширення радіохвиль, що значною мірою визначає роботу багатьох радіотехнічних систем.

Результати вимірів ефективного градієнта коефіцієнта заломлення представляють значний інтерес для використання в системах управління повітряним рухом у зв'язку із розрахунками дистанційної залежності множника ослаблення і визначення зон завмирання радіозв'язку.

Крім того, отримані результати дозволяють поліпшити точність систем глобальної навігації при малих кутах місця, де рефракція значно впливає на поширення радіохвиль і суттєво обмежує можливості використання супутників поблизу горизонту.

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

**Особистий внесок здобувача** полягає у розробці математичних моделей роботи радіоінтерферометра для вимірювання градієнта коефіцієнта заломлення тропосфери, проведенні чисельного моделювання системи, розробці методики експериментальних досліджень, участі у створенні експериментального вимірювального макета радіоінтерферометру, проведенні натурних досліджень та обробці їх результатів, аналізу та інтерпретації.

У роботах [1, 2] автор взяв участь в розробці та налагодженні експериментального радіофізичного комплексу, проведенні експериментальних досліджень, виконав обробку експериментальних даних тривалого циклу вимірів кута рефракції і приземного коефіцієнта заломлення, а також виконав інтерпретацію отриманих результатів.

У роботах [3, 4] автор взяв участь в проведенні експериментальних досліджень флуктуацій амплітуди сигналу геостаціонарних супутників Землі, виконав обробку отриманих даних і провів інтерпретацію отриманих результатів.

У роботі [5] автором проведено модернізацію радіофізичного комплексу для цифрової обробки даних досліджень у реальному часі, а також виконано аналіз впливу різних чинників на роботу радіоінтерферометра, включаючи шуми приймача, нестабільність положення фазових центрів антен, нестабільність параметрів антено-фідерного тракту, похибки визначення положення ШСЗ на орбіті і багатопроменеve поширення за рахунок поверхні, що підстилає.

У роботах [6, 7] автором розроблено програмне забезпечення для обробки даних досліджень і виконано чисельне моделювання функціонування радіоінтерферометра за допомогою метода "Монте-Карло" при падінні на антенну систему радіохвилі, що минула турбулентне середовище із врахуванням флуктуацій його фази. Також отримано якісні показники радіоінтерферометра,

що визначаються параметрами середовища, і конструкцією радіоінтерферометра.

У роботі [8] автором запропоновано і експериментально досліджено метод виміру ефективного градієнта коефіцієнта заломлення тропосфери за допомогою радіоінтерферометра, що набув подальшого розвитку у роботі автора. Крім того, виконано обробку отриманих результатів досліджень ефективного градієнта коефіцієнта заломлення.

У роботі [9] автором запропоновано і досліджено ряд моделей, що дозволило обґрунтувати аномально великі значення кута рефракції, які спостерігалися в процесі натурних експериментів.

**Апробація результатів дисертації.** Отримані в дисертаційній роботі результати доповідались на семінарах Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України «Поширення радіохвиль та дистанційне зондування» та 9 науково-технічних конференціях і симпозіумах, у тому числі: - Кримська міжнародна конференція “НВЧ техніка і телекомунікаційні технології” Севастополь, Крим, Україна, 2008р., 2010-2012рр.; VI Харківська конференція молодих вчених «Радіофізика і електроніка» 13-14 грудня 2006; Другий міжнародний радіоелектронний форум «Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку» МРФ–2005, Харків, Україна; Signal Processing Symposium SPS-2009, Jachranka, Poland; European Microwave Week 2009, Rome, Italy; European Radar Conference, Manchester, UK October 9th – 14th 2011.

**Публікації.** Основні результати наукових досліджень, отримані в рамках дисертаційної роботи, опубліковано в 7 статтях у закордонних та вітчизняних фахових виданнях [2-6,8,9], а також у 9 матеріалах тез доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях і симпозіумах [1,6].

**Структура та обсяг дисертаційної роботи.** Дисертація складається із переліку умовних позначень, вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації складає 120 сторінок і включає 60 рисунків, а список використаних джерел на 11 сторінках нараховує 105 найменувань.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, визначено об’єкт і предмет дослідження. Наведено методи, що використовувались, вказано на зв’язок роботи з науковими програмами, сформульовано наукову новизну і практичну значимість одержаних результатів, наведено дані про їх апробацію, а також визначено особистий внесок автора.

У **першому розділі** «Огляд дистанційних методів дослідження рефракційних властивостей тропосфери» розглянуто сучасний стан та області застосування ефективного градієнта коефіцієнта заломлення тропосфери. Вказано, що найбільш важливим є використання інформації про рефракційні властивості тропосфери в системах управління повітряним рухом, де інформація про ефективний градієнт дає можливість прогнозувати зони

завмирання сигналу. Також підкреслено, що дані про ефективний градієнт дозволяють підвищити точність систем супутникової глобальної навігації.

Приведено історичний огляд вивчення проблеми рефракції в тропосфері і розглянуто основні методи дослідження ефективного градієнта коефіцієнта заломлення, а також зроблено висновки про переваги і недоліки кожного із методів.

Вказано, що метод дослідження тропосферної рефракції за допомогою вимірювання затухання сигналів наземного джерела у зоні тіні дозволяє отримати ефективний градієнт коефіцієнта заломлення для нижніх шарів тропосфери при умові застосування високостабільного випромінювача. Метод радіозаходів ШСЗ дозволяє отримати достовірні результати тільки для квазідзеркальної поверхні, що підстилає, а радіометричний метод не забезпечує необхідну точність. Лімбовий метод має добру роздільну здатність по висоті, але погану в горизонтальній площині. Крім того, його застосування пов'язано із великими витратами і потребує використання ШСЗ із заданими параметрами орбіти.

У другому розділі розглянуто використання радіоінтерферометра для дослідження властивостей рефракції тропосфери за допомогою сигналів геостационарних ШСЗ. Дослідження проведено в рамках експоненціальної моделі, яка описується виразом

$$n(h) = 1 + \Delta n_0 \exp\left(\frac{g_n h}{\Delta n_0}\right), \quad (1)$$

де  $g_n$  - ефективний градієнт коефіцієнта заломлення;  $h$  - висота;  $\Delta n_0 = n_0 - 1$ ;  $n_0$  коефіцієнт заломлення на поверхні Землі.

Рефракційні властивості тропосфери у рамках експоненціальної моделі визначаються за допомогою інтегрального рівняння

$$\frac{\alpha_a - \alpha_v}{\Delta n_0 a \sin \alpha_a} = \int_a^R dh \frac{g_n \exp\left(\frac{g_n h}{\Delta n_0}\right)}{\left(1 + \Delta n_0 \exp\left(\frac{g_n h}{\Delta n_0}\right)\right) \sqrt{\left(1 + \Delta n_0 \exp\left(\frac{g_n h}{\Delta n_0}\right)\right)^2 h^2 - \Delta n_0^2 a^2 \sin^2 \alpha_a}}, \quad (2)$$

де  $R$  - верхня межа тропосфери;  $\alpha_a$  - кут місця ШСЗ;  $\alpha_v$  - кут приходу сигналу ШСЗ;  $a$  - радіус Землі.

Для знаходження ефективного градієнта показника заломлення необхідно

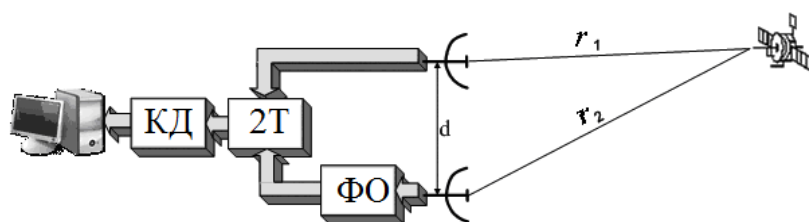


Рис. 3. Схема радіоінтерферометра

знати кут приходу супутника -  $\alpha_a$ , кут місця супутника -  $\alpha_v$  і коефіцієнт заломлення на поверхні Землі  $n_0$ . Значення  $\alpha_v$  обчислюється згідно з існуючими методами

траєкторного аналізу і програмного продукту Trakstar, а коефіцієнт заломлення



$n_0$  може бути отримано за результатами виміру температури, тиску і вологості за допомогою психрометра та барометра на поверхні Землі.

В дисертаційній роботі запропоновано використати інтерферометр для вимірювання кута приходу супутника –  $\alpha_a$  згідно із рис. 3. Радіоінтерферометр (рис. 3) містить дві антени, які розташовані на базі  $d$ , вихідні сигнали подаються на балансну схему  $2T$ , в одному з його плечей якого встановлено фазообертач ФО для виміру кута місця ШСЗ шляхом встановлення рівності фаз обох плечей балансної схеми. Вихідний сигнал надходить на квадратичний детектор КД, а обробка даних зондування здійснюється за допомогою персонального комп'ютера. При цьому кут приходу сигналу ШСЗ  $\alpha_a$  обчислюється із використанням мінімуму пеленгаційної характеристики  $\alpha_a = \arcsin \frac{\lambda \Delta \varphi}{2\pi d} + \alpha_0$ ,

де  $\alpha_0 = \alpha_{\text{ТИ}} - \arcsin \frac{\lambda \Delta \varphi_{\text{ТИ}}}{2\pi d}$  - кут, що калібрується,  $\Delta \varphi_{\text{ТИ}}$  – фазове зрушення фазообертача,  $\alpha_{\text{ТИ}}$  – кут місця крапкового випромінювача.

У розділі наведено вирази та графіки для діаграми спрямованості і пеленгаційної характеристики інтерферометра. Показано, що для забезпечення необхідної похибки виміру ефективного градієнта коефіцієнта заломлення  $g_n = -(3 \div 4,5) \cdot 10^{-8}$  необхідно забезпечити середньоквадратичне відхилення помилки вимірів кута рефракції близько  $0,1'$ . Відповідно до цього проведено аналіз впливу різних чинників на роботу радіоінтерферометра, включаючи багатопроменеве поширення радіохвиль, тропосферну турбулентність, похибки визначення положення ШСЗ на орбіті, шуми приймача та нестабільність положення фазового центру антен (вітрові та механічні впливи), що дозволило сформулювати вимоги до параметрів радіоінтерферометра.

Турбулентність в тропосфері призводить до флуктуацій коефіцієнта заломлення, що маскує зміни кута приходу за рахунок рефракції. Якщо на антену падає випромінювання крізь шар турбулентної тропосфери, то в наближенні дальній зони  $\chi = 4L/kl_0^2 \gg 1$  сигнал на виході антени записується у вигляді

$$U(\theta_i) = U_0 \frac{e^{jkr}}{r} \int_{-D/2}^{D/2} dx A(x) e^{j \frac{kx}{2} \sin \theta_i + j\psi(x)}, \quad (3)$$

де  $\theta_i$  - кут приходу променя джерела;  $A(x)$  – амплітудно-фазовий розподіл апертури антени;  $\psi = \psi' + j\psi''(x)$  - фаза падаючого поля ( $\psi'$  і  $\psi''$  - випадкова модуляція фази і амплітуди поля).

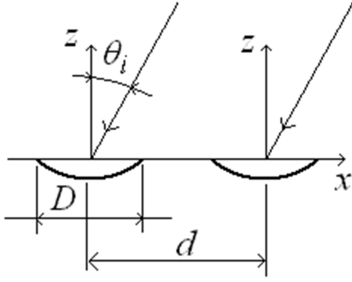


Рис. 4. Система координат

Якщо товщина турбулентного шару істотно перевищує інтервал кореляції  $L_C \gg l_0$ , то флуктуації фази і рівня поля мають бути одного порядку. Однак двоканальна схема інтерферометра набагато менш чутлива до флуктуацій амплітуди, у зв'язку з чим, у подальшому розгляді обмежимося флуктуаціями фази  $\psi = \psi'$ . Об'єднуючи сигнали плечей інтерферометра (рис. 4),

сигнал балансної схеми дорівнює:

$$U_{\Sigma}(\theta_i) = U_1 - e^{j\Phi} U_2 = U_0 \frac{e^{jkr}}{r} \left( \int_{-D/2}^{D/2} dx A(x) e^{j \frac{kx}{2} \sin \theta_i + j\psi(x)} - e^{j\Phi - \frac{kd}{2} \sin \theta_i} \int_{-D/2}^{D/2} dx A(x) e^{j \frac{kx}{2} \sin \theta_i + j\psi(x+d)} \right), \quad (4)$$

де  $D$  – діаметр антен;  $\Phi$  – фазовий зсув фазообертача.

Сигнал на виході квадратичного детектора (рис. 4) обчислюється за допомогою отриманого виразу

$$U_D = U_0 \iint_D dx_1 dx_2 A(x_1) A(x_2) e^{j \frac{k}{2} (x_1 - x_2) \sin \theta_i} \left\{ \begin{array}{l} e^{j[\psi(x_1, t) - \psi(x_2, t)]} - \\ - e^{j[\Phi_d - \Phi + \psi(x_1, t) - \psi(x_2 + d, t)]} - \\ - e^{j[\Phi - \Phi_d + \psi(x_1 + d, t) - \psi(x_2 + d, t)]} + \\ + e^{j[\psi(x_1 + d, t) - \psi(x_2 + d, t)]} \end{array} \right\}, \quad (5)$$

де  $\Phi_d = \frac{kd}{2} \sin \theta_i$  – зсув фаз між плечима інтерферометру;  $U_0$  – амплітуда сигналу.

Отримані вирази не дозволяють виконати розрахунки в аналітичній формі, тому було використано метод статистичного моделювання (метод Монте-Карло) роботи інтерферометра в умовах турбулентної тропосфери. Флуктуації коефіцієнта заломлення застосовувались у вигляді моделі Гауса

$n(r) = \langle \Delta n^2 \rangle \exp\left(-\left(\frac{r}{l_0}\right)^2\right)$ , де  $\langle \Delta n^2 \rangle$  – дисперсія флуктуацій коефіцієнта заломлення.

При великому значенні параметра  $\chi = \frac{4L}{kl_0^2} \gg 1$  (дифракція Фраунгофера),

вигляд кореляційної функції флуктуацій фази збігається із кореляційною функцією флуктуацій коефіцієнта заломлення, яка в площині антен інтерферометра записується у вигляді

$$\langle \Delta \psi(x_1) \Delta \psi(x_2) \rangle = \langle \Delta \psi^2 \rangle \exp\left(-\frac{|x_1 - x_2|^2}{l_0^2}\right), \quad (6)$$

де  $\langle \Delta \psi^2 \rangle = 2\pi^{\frac{5}{2}} \frac{l_0 L}{\lambda^2} \langle \Delta N^2 \rangle 10^{-12}$ ;  $\langle \Delta N^2 \rangle$  – дисперсія флуктуацій індексу рефракції  $N$ -од. Для ширини турбулентного шару  $L \approx 10$  км, довжини хвилі

$\lambda \approx 0,1$  м і радіусу кореляції  $l_0 \approx 1$  м, мали флуктуації показника заломлення  $\delta_{\Delta N} = \sqrt{\langle \Delta N^2 \rangle} \approx 1$  N-од. відповідають середньоквадратичному відхиленню (СКВ) флуктуацій фази  $\approx 0,4^\circ$ , а великі флуктуації коефіцієнта заломлення  $\delta_{\Delta N} \approx 10$  Nод відповідають СКВ флуктуацій фази  $\approx 4^\circ$ .

Випадкове числове поле генерувалось із просторовим періодом дискретизації 0,01м, періодом дискретизації 4 мс і розподілом Гауса в рамках моделі “замороженої” тропосфери, коли флуктуації коефіцієнта заломлення  $n$  залежать від просторової і тимчасової координат у вигляді  $n[r, (t - \tau)] = n[(r - V\tau), t]$ , де  $V$  – поперечна швидкість перенесення неоднорідності по відношенню до траси поширення радіохвиль;  $\tau$  – часовий зсув.

Чисельне моделювання проводилось відповідно до структурної схеми - рис. 5 (2Т – балансна схема, ФНЧ – фільтр нижніх частот, ПК – персональний

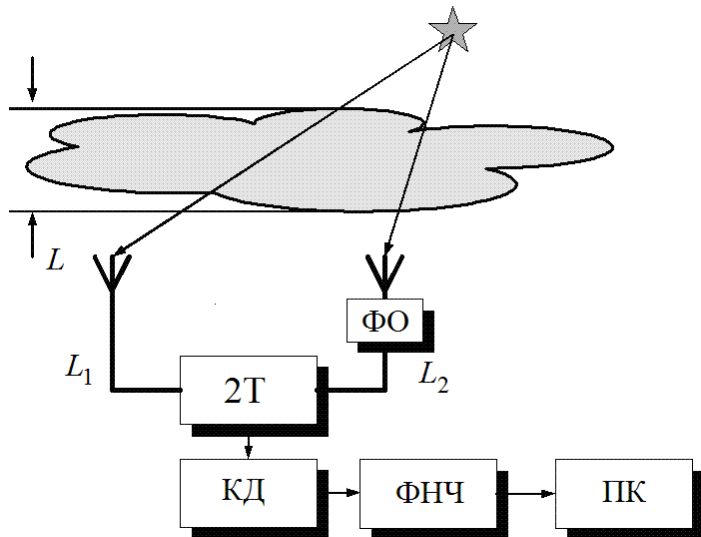


Рис. 5.Схема чисельного моделювання.

комп'ютер. Для зменшення впливу флуктуацій коефіцієнта заломлення на роботу радіоінтерферометра на виході квадратичного детектора застосовано ФНЧ, напруга якого дорівнює

$$U_{\text{ФНЧ}}(t) = \int_0^{\infty} dt' U_{\text{Д}}(t') H(t' - t),$$

де  $H(t' - t)$  - імпульсна характеристика фільтру, яка для фільтру першого порядку має вигляд

$$H(\tau) = \frac{1}{\tau_{\phi}} \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_{\phi}}\right), \text{ де } \tau_{\phi} -$$

постійна часу фільтру.

В результаті чисельного моделювання встановлено, що для бази інтерферометра  $d=3$  м необхідна точність виміру кута приходу забезпечується при постійній часу фільтру  $\tau_{\phi} \geq 10$  с.

Сигнал на виході фазового детектора з урахуванням впливу багатопроменевого розповсюдження описується виразом

$$I_{\delta} = I_0 \left| \begin{array}{l} F(\theta) \frac{e^{-jk r_1}}{r_1} + \dot{\Gamma}_{\text{эф}} F(\theta') \frac{e^{-jk r_1'}}{r_1'} - \\ - F(\theta) \frac{e^{-j(k r_2 + \Delta \varphi)}}{r_2} - \dot{\Gamma}_{\text{эф}} F(\theta') \frac{e^{-j(k r_2' + \Delta \varphi)}}{r_2'} \end{array} \right|^2, \quad (7)$$

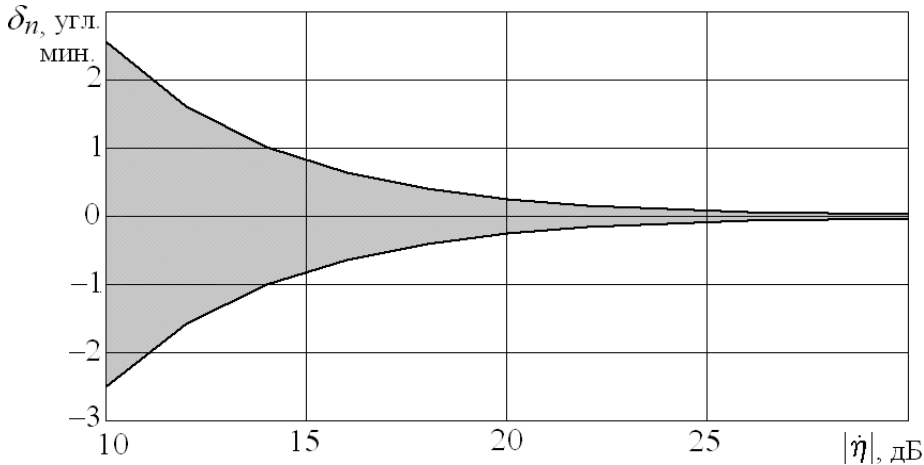


Рис. 6. Похибка кута приходу

де  $\Gamma_{эф}$  - ефективне значення комплексного коефіцієнта відбивання поверхні, що підстилає,  $\Delta\varphi = \Delta\varphi_k + \Delta\varphi_\phi$  - зсув фаз,  $r_1, r_2, r'_1, r'_2$  - довжини прямих і відбитих променів,  $F(\theta)$  - діаграма

спрямованості антени. У результаті аналізу показано, що похибка вимірювання кута приходу  $\delta\theta$  відхиляється у позитивний або негативний бік у залежності від фази коефіцієнта відбивання  $\varphi_\Gamma$  та зменшується згідно до експоненціального закону при зменшенні модуля загального ослаблення дзеркально відбитого променя  $|\eta|$  як показано на рис. 6 (параметри траси: висота антени  $h_a = 50$  м, відстань до ШСЗ  $h_c = 36000$  км,  $\alpha_a = 4,4^\circ$ ,  $d = 3,56$  м,  $D = 1,5$  м,  $\lambda = 8,3$  см).

Таким чином показано, що для усунення впливу багатопроменевого поширення ослаблення дзеркального променя має бути не менше 25÷30 дБ, що вимагає застосування антен із низьким рівнем бокового випромінювання в широкому діапазоні кутів.

Вплив шумів приймача оцінювався за допомогою виразу  $\delta_{ш} = \Delta\theta_{ш} \frac{2}{\pi\sqrt{R_m}}$ ,

де  $\Delta\theta_{ш} \approx 1,03 \frac{\lambda}{d}$  - ширина інтерференційного пелюстка за рівнем половинної потужності;  $R_m = 2L_p L_m \frac{S}{N}$  - енергетичний коефіцієнт;  $L_p$  - коефіцієнт втрат, пов'язаний з формою характеристики пеленгації;  $L_m$  - коефіцієнт втрат, обумовлений недосконалістю погодженої фільтрації;  $\frac{S}{N}$  - відношення потужності сигналу та шуму. Показано, що необхідна точність пеленгації ( $\delta_{ш} \leq 0,05'$ ) досягається при відношенні сигнал/шум не менш ніж 30÷40 дБ.

Крім того показано, що неточна орієнтація електричних осей антен, а також неідентичні діаграми спрямованості антен істотно не впливають на похибку визначення кута приходу.

Температура навколишнього середовища не впливає на похибку вимірювання кута приходу для сполучних кабелів каналів інтерферометра рівної довжини, але для кабелів різної довжини похибка може досягати помітної величини. Тому, для виключення впливу температурних змін довжини тракту

фідера, обидва його плечі вибиралися ідентичними і були розташовані в термоізоляційних кожухах.

Помилка у визначенні ефективного градієнта коефіцієнта заломлення залежить від того, наскільки точно розраховані координати ШСЗ на орбіті за даними контрольних станцій (NORAD), що обчислюється за допомогою програми Trackstar по наборах орбітальних даних TLE (Two-Line Element Set). В ході проведеного дослідження показано, що усунення впливу помилки визначення кута місця супутника може бути забезпечено коли відбраковується частина даних, для яких час з моменту оновлення TLE і до моменту вимірів кута приходу  $\alpha_v$  не перевищує 12 годин. В цьому випадку похибка визначення кута місця ШСЗ  $\sigma_{\alpha\alpha}$  не перевищує  $1''$ .

У третьому розділі приводиться опис структурної схеми, основних співвідношень розробленого і виготовленого радіофізичного стенду в діапазоні  $\lambda=10$  см, а також процедури калібрування. Приведено зіставлення вимірів ефективного градієнта  $g_n$  з даними контактних вимірів, отриманих за допомогою запуску кулі-зонда і наведено результати сезонного циклу досліджень ефективного градієнта за період “зима-весна”.

Для отримання високої чутливості приймач обладнано малошумливим підсилювачем, а радіотехнічні пристрої забезпечують потрібне перетворення частоти із виходом на персональний комп'ютер. Для оцінки впливу теплових шумів і зовнішньої температури на характеристики розробленого радіофізичного комплексу проведено експериментальні дослідження із застосуванням високостабільного НВЧ-генератора, потужність і частота якого відповідає сигналу ШСЗ на виході антен інтерферометра. Для проведення експериментальних досліджень характеристик комплексу антени інтерферометра встановлені на висоті 27 м, база інтерферометра дорівнює  $d = 3,56$  м, а діаметр антен  $D_1 = 1,5$  м і  $D_2 = 1,8$  м –рис. 7.

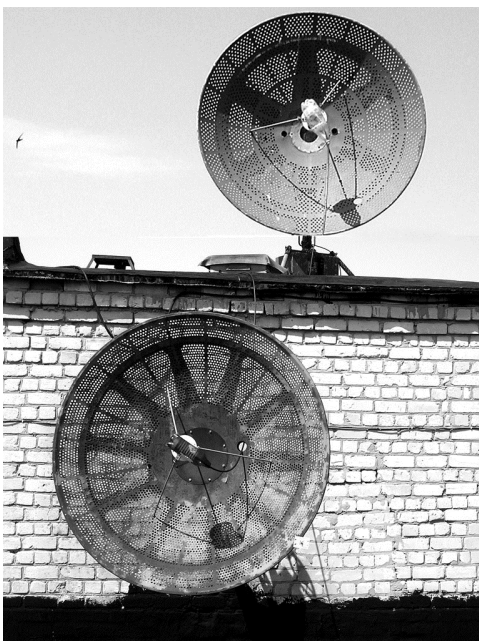


Рис.7. Вигляд інтерферометру

Дослідження впливу теплових шумів на точність інтерферометра показало, що СКВ положення мінімуму пеленгаційної характеристики відповідає СКВ похибки виміру кута приходу не більш  $0,05''$ .

Для комплексної оцінки точності розробленого інтерферометра, включаючи вплив зовнішньої температури на антенно-фідерний тракт і багатопроменевого розповсюдження, проведено вимір точності пеленгації крапкового джерела випромінювання. Рупорна антена розташована в дальній зоні інтерферометра, а виміри проводились у літній час (вранці, вдень і увечері) протягом 5 діб з інтервалом в 30 хвилин, коли добовий перепад температури досягав

12 °С. Як показано, СКВ похибки виміру кута приходу складає 0,1', що, відповідає СКВ виміру ефективного градієнта коефіцієнта заломлення  $\sigma_{g_n} \leq 3 \cdot 10^{-9}$  1/м.

На рис. 8 приведено результати вимірів ефективного градієнта, де вісь абсцис відповідає часу проведення вимірів, а вісь ординат - значенням ефективного градієнта. Штрих-пунктирна лінія показує тренд середнього значення градієнта  $g_n$ , що апроксимоване поліномом другого ступеня, а темна область відповідає СКВ із інтервалом усереднення 30 діб.

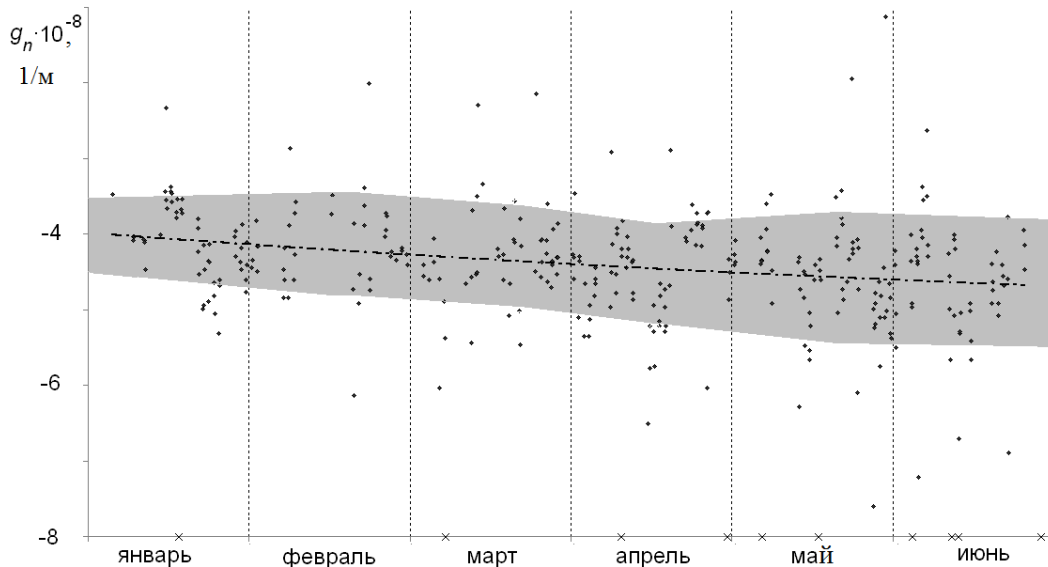


Рис. 8. Результати вимірів ефективного градієнта коефіцієнта заломлення

У процесі вимірів спостерігалися аномальні значення ефективного градієнта у випадках, коли форма профілю сильно відрізнялась від експоненціальної. На рис. 8 ці випадки відмічені хрестиками на осі абсцис. На рис. 9 побудовано гістограму значень ефективного градієнта коефіцієнта заломлення за весь період досліджень.

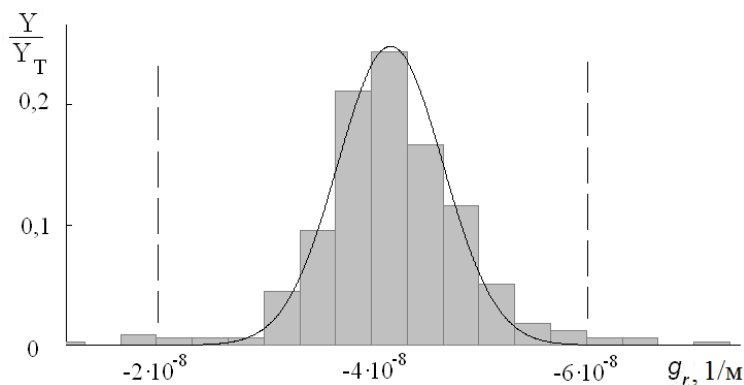


Рис. 9. Гістограма значень ефективного градієнта  $g_n$ .

Проведений цикл досліджень показав, що частина значень (~1%) не узгоджуються з експоненціальною моделлю. Тому в роботі проаналізовано умови, коли можливі аномально великі значення кута приходу і, відповідно, варіації ефективного градієнта.

У результаті запропоновано декілька моделей атмосферних утворень, включаючи хмари, які мають досить складну форму зі зміною коефіцієнта заломлення понад 40 N одиниць на кордонах утворень. Розглянуто два випадки, коли форму хмари можна апроксимувати клином і кулею - рис. 10. Вираз для кута помилки рефракції в даному випадку відповідає куту відхилення  $\delta_{np}$ , має вигляд.

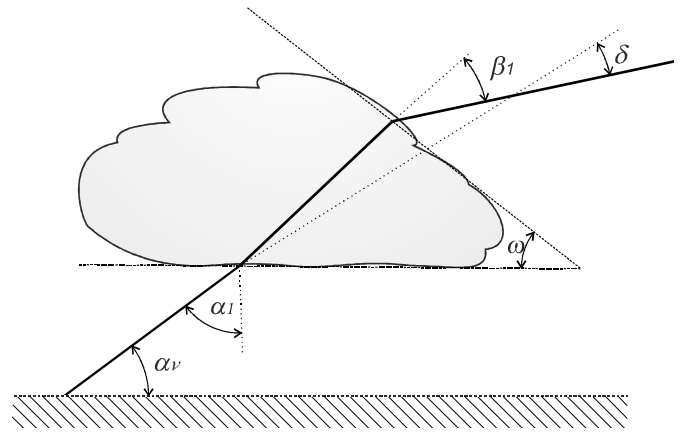


Рис. 10. Розповсюдження ЕМХ через клиновидну хмару.

$$\delta_{np} = \alpha_1 - \omega + \arcsin \left\{ \frac{n_2}{n_1} \sin \left[ \omega - \arcsin \left( \frac{n_1}{n_2} \sin(\alpha_1) \right) \right] \right\} \quad (8)$$

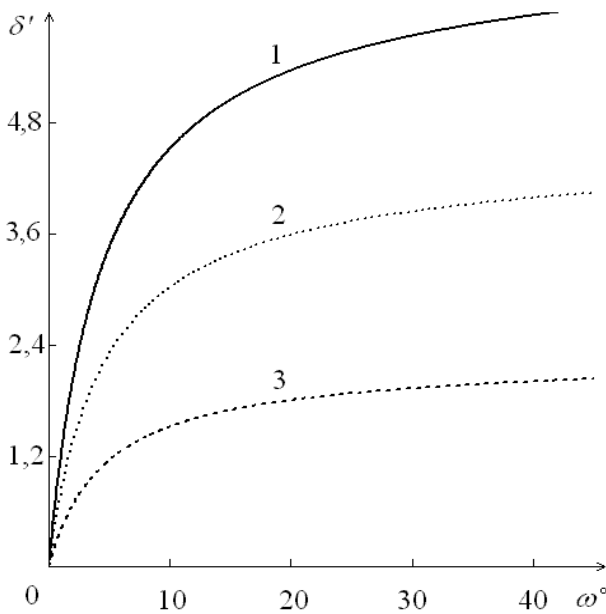


Рис. 11. Кут відхилення  $\delta_{np}$  від кута при вершині призми  $\omega$ : 1 –  $\Delta N = 150$ , 2 – 100, 3 – 50.

Залежність кута рефракції  $\delta$  від кута  $\omega$  при вершині призми для різних значень перепадів коефіцієнта заломлення на кордоні хмари  $\Delta N$  показані на рис. 11. Як видно, значення кута відхилення при  $\Delta N = 150$  може досягати  $5'$ , що на порядок більше, ніж для експоненціальної моделі, і досить близько до експериментальних результатів (розмах кута рефракції натурних вимірів  $\delta$  досягає 5-6').

Аналогічна ситуація також має місце для метеорологічних об'єктів кулястої форми, що характерно для купчасто-дошової хмарності. В цьому випадку використання геометрично-оптичних співвідношень дозволяє отримати залежність кута відхилення від відносного віддалення траєкторії променя від центру сфери  $\frac{\Delta l}{r_{cf}}$  в наступному вигляді

$$\delta_{cf} = \arcsin \left\{ \frac{n_2}{n_1} \sin \left[ \arcsin \left( \frac{\Delta l_1}{r_{cf}} \right) - \arcsin \left( \frac{n_2}{n_1} \frac{\Delta l_1}{r_{cf}} \right) \right] \right\} - \arcsin \left( \frac{\Delta l_1}{r_{cf}} \right), \quad (9)$$

де  $\Delta l_1$  – видалення траєкторії променя від центру сфери,  $r_{\text{сф}}$  – радіус сферичного метеорологічного утворення.

Як було отримано, заломлення променів на кордоні кулястих метеоутворень приводить до кутів відхилення того ж порядку (5'–6'), як і для клиновидних метеооб'єктів. Таким чином, явище заломлення на метеорологічних утвореннях може маскувати відхилення променя за рахунок рефракції і викликати аномально великі варіації значень кута приходу.

Щоб зменшити вплив описаного явища, що приводить до спотворення даних, в процесі проведення натурних вимірів за допомогою розробленого радіофізичного комплексу здійснювався контроль умов поширення для обмеженого набору даних. На рис. 12 наведено відібрані дані в умовах, коли форма висотного профілю коефіцієнта заломлення близька до експоненціальної моделі згідно контактних вимірювань, проведених одночасно. Висотний профіль контролювався за допомогою рефрактометра, що встановлено на кулі-зонді.

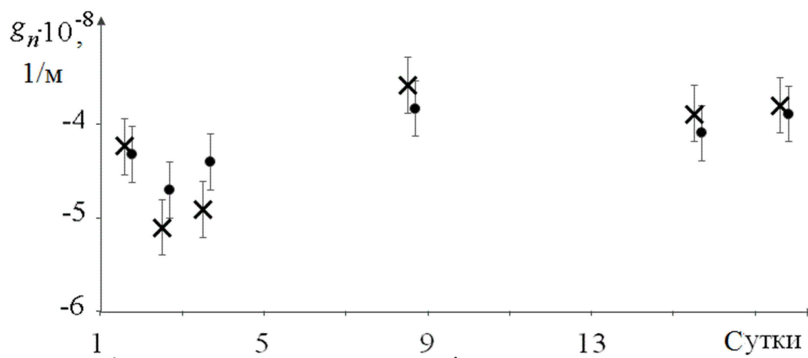


Рис. 12. Вимір ефективного градієнта коефіцієнта заломлення: контактні виміри – кружки, дистанційні виміри

Як видно (рис. 12), результати дистанційних вимірів за допомогою розробленого радіоінтерферометра близькі до даних контактних вимірів.

Таким чином, можна зробити висновок, що відхилення результатів дослідження ефективного градієнта коефіцієнта рефракції від

розрахункових даних обумовлено відмінністю реальних умов поширення радіохвиль від використаної моделі, що застосовано у розрахунках. Але частка таких даних досить мала порівняно із загальною кількістю проведених спостережень. Тому можна вважати, що застосована експоненціальна модель висотного профілю коефіцієнта заломлення у більш ніж 90% випадків відповідає реальним умовам розповсюдження радіохвиль і може бути використана для діагностики стану тропосфери на практиці.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна наукова задача подальшого розвитку інтерферометричного методу вимірювання градієнта коефіцієнта заломлення за допомогою сигналів геостаціонарного ШСЗ, а також дослідження рефракційних властивостей тропосфери. Це забезпечило можливість здійснення постійного моніторингу рефракційних властивостей тропосфери та дозволило усунути впливу поверхні що підстилає на результати проведених досліджень. При цьому отримано наступні нові наукові результати:



1. У результаті огляду опублікованих даних, де розглянуто сучасний стан та області застосування ефективного градієнта коефіцієнта заломлення тропосфери, показано, що існуючі методи, зокрема метод “радіозаходів” ШСЗ, потребує високої однорідності поверхні, що підстилає, а також не дозволяє здійснювати постійний моніторинг тропосфери через періодичність прольоту ШСЗ.
2. Проведено чисельне моделювання функціонування радіоінтерферометра в умовах турбулентної тропосфери і отримано нові дані щодо впливу турбулентності на результати дистанційного зондування. Показано, що база інтерферометра має бути не менш 30 довжин хвиль, а постійна інтегрування приймального пристрою – не менш 10 с.
3. Розроблено модель радіоінтерферометра, що дозволило отримати нові результати щодо впливу різних факторів на характеристики вимірювального комплексу, включаючи відбиття від поверхні, що підстилає, нестабільність положення антен, співвідношення сигнал-шум, вплив температури навколишнього середовища та інше. Показано, що для усунення впливу багатопроменевого поширення на результати зондування, ослаблення дзеркального променя має бути не менше 25÷30 дБ, що вимагає застосування антен із низьким рівнем бокового випромінювання в широкому діапазоні кутів.
4. Створено двоканальний радіоінтерферометр та розроблено методику дослідження рефракційних властивостей тропосфери шляхом виміру кута приходу сигналів геостаціонарного ШСЗ.
5. Проведено експериментальне дослідження характеристик розробленого радіоінтерферометра і показано, що досягнуті показники радіоінтерферометра забезпечують вимірювання ефективного градієнта коефіцієнта заломлення із похибкою не більше  $3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^{-1}$ ;
6. В результаті натурних досліджень ефективного градієнта коефіцієнта заломлення в період “зима-літо” показано, що сезонні зміни середнього значення  $g_n$  і його СКВ виражені слабо;
7. Показано, що 99% даних експериментальних досліджень ефективного градієнта коефіцієнта заломлення  $g_n$  відповідають експоненціальній моделі тропосфери;
8. Вперше показано, що поява у тропосфері метеоутворень складної форми призводить до аномально великих значень кута приходу сигналів ШСЗ, що призводить до маскуванню даних дистанційного зондування при застосуванні експоненціальної моделі висотного профілю коефіцієнта заломлення тропосфери.
9. У результаті зіставлення характеристик дистанційного зондування за допомогою “радіозаходів” ШСЗ та за допомогою розробленого радіоінтерферометра, який приймає сигнали геостаціонарного ШСЗ, що досліджено у дисертації, показано, що останній має значні переваги, за рахунок безперервного моніторингу рефракційних властивостей

тропосфери та практично не залежить від властивостей поверхні, що підстилає.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Хоменко С.И. Использование радиоизлучения геостационарных спутников земли для оценки рефракционных свойств тропосферы / С.И. Хоменко, Д.Д. Халамейда, И.С. Тургенев // Второй международный радиоэлектронный форум «прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ–2005), 2005 г. Харьков, Украина. – Том 2, С. 568 – 572.
2. Халамейда Д.Д. Некоторые результаты оценки рефракционных свойств тропосферы с использованием радиоизлучения геостационарных спутников / Д.Д. Халамейда, С.И. Хоменко // Радиофизика и электроника: сб. научн. тр. ИРЭ НАН Украины. – 2006. – Т.11, № 1. – С. 61 – 64.
3. Mytsenko I.M. Use of Geostationary Satellite Radio Signals for Determining of Hydrometeor Parameters / I.M. Mytsenko, D.D. Khalameyda, S.I. Khomenko // Telecommunications and Radio Engineering, 2008, vol.67, Issue 1, P. 87 – 95.
4. Mytsenko I.M. Using of Radar and Geostationary Satellite Signals for Determination of Hydrometeor Water Content / I.M. Mytsenko, D.D. Khalameyda // Telecommunications and Radio Engineering, 2012, vol.71, Issue 20, P. 1881 – 1888.
5. Халамейда Д.Д. Инструментальные ошибки интерферометрического метода исследования рефракции в тропосфере на трассе ГИСЗ – Земля / Д.Д. Халамейда // Радиофизика и электроника: сб. научн. тр. ИРЭ НАН Украины. – 2008. – Т.13 – № 3. – С. 503-511.
6. Халамейда Д.Д. Влияние флуктуаций коэффициента преломления радиоволн в тропосфере на работу радиоинтерферометра / Д.Д. Халамейда // Радиофизика и электроника. – 2010. – Т.15, № 4. – С. 39 – 44.
7. Халамейда Д.Д. Влияние флуктуаций в турбулентной тропосфере на работу радиоинтерферометра / Д.Д. Халамейда, Г.И. Хлопов, С.И. Хоменко // 20-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» 13-17 сентября 2010 г. Севастополь, Крым, Украина. – С. 1197 – 1198
8. Хоменко С.И. Измерительный интерферометрический комплекс для исследования рефракционных свойств тропосферы с помощью радиоизлучения геостационарных искусственных спутников Земли / С.И. Хоменко, Г.И. Хлопов, Д.Д. Халамейда // Радиофизика и электроника – 2011. – Т.16, № 3. – С. 61 – 66.
9. Хоменко С.И. Исследование рефракционных свойств тропосферы с помощью радиоинтерферометра / С.И. Хоменко, Г.И. Хлопов, Д.Д. Халамейда // Радиофизика и электроника. – 2012. – Т.3(17), № 2. – С. 50 – 53.

## АНОТАЦІЯ

Халамейда Д. Д. Дослідження властивостей рефракції тропосфери за допомогою радіоінтерферометра. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. – Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України, Харків, 2013.

У дисертаційній роботі вирішено актуальну наукову задачу подальшого розвитку методу дослідження рефракційних властивостей тропосфери за допомогою радіоінтерферометра, що приймає сигнал геостаціонарного штучного супутника Землі, який знаходиться під малим кутом місця. Для вирішення цієї задачі спроектовано вимірювальний комплекс, досліджено вплив різних чинників на роботу радіоінтерферометра у рамках експоненціальної моделі висотного профілю коефіцієнта заломлення тропосфери, а також проведено чисельне моделювання проходження сигналу крізь турбулентні шари тропосфери за допомогою методу Монте-Карло. Оцінено вплив флуктуацій коефіцієнта заломлення тропосфери і багатопроменевого поширення на роботу радіоінтерферометра, що дало можливість сформулювати вимоги до параметрів розробленої апаратури.

Доведено, що аномальні значення ефективного градієнта коефіцієнта заломлення, які було отримано в ході натурного експерименту пояснюються присутністю метеоутворень складної форми, характеристики яких відрізняються від експоненціального висотного профілю коефіцієнта заломлення. Проведено моделювання проходження сигналу крізь кулясті та клиноподібні метеоутворення, що підтвердило зроблений висновок.

**Ключові слова:** висотний профіль коефіцієнта заломлення, ефективний градієнт коефіцієнта заломлення, інтерферометр, геостаціонарний штучний супутник землі, метеоутворення.

## АННОТАЦИЯ

Халамейда Д. Д. Исследование рефракционных свойств тропосферы с помощью радиоинтерферометра. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика. – Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков, 2013.

В диссертационной работе решена актуальная научная задача дальнейшего развития метода исследования рефракционных свойств тропосферы с помощью радиоинтерферометра, принимающего сигнал геостаціонарного искусственного спутника Земли находящегося под малым углом места в рамках экспоненциальной модели высотного профиля коэффициента преломления тропосферы. Для решения задачи спроектирован радиофизический комплекс дистанционного зондирования тропосферы, изучено влияние различных факторов на работу радиоинтерферометра, в том числе: шумов приемного устройства, нестабильности взаимного положения фазовых центров антенн, температурных изменений окружающей среды, точности определения положения спутника на орбите и расчета его координат. Получены

математические соотношения, описывающие работу радиointерферометра и проведено численное моделирование прохождения сигнала сквозь турбулентную тропосферу с помощью метода Монте-Карло, исследовано влияние флуктуаций коэффициента преломления тропосферы и многолучевого распространения на работу радиointерферометра, что дало возможность сформулировать требования к параметрам разработанной аппаратуры. Проведены натурные исследования эффективного градиента коэффициента преломления с помощью разработанного и изготовленного радиofизического комплекса на базе радиointерферометра, принимающего сигнал геостационарного ИСЗ, результаты которых сопоставлены с данными контактных измерений по результатам запусков шара-зонда. В результате получено удовлетворительное соответствие данных в случаях, когда форма высотного профиля коэффициента преломления тропосферы близка к экспоненциальной.

Показано, что аномальные значения эффективного градиента коэффициента преломления, полученные в ходе натурных экспериментов могут быть объяснены присутствием гидрометеообразований сложной формы, в частности шарообразной и клиновидной формы. Проведено моделирование прохождения сигнала сквозь подобные метеообразования и сформулирован вывод о том, что подобные образования способны маскировать рефракционные эффекты, что накладывает ограничения на использование экспоненциального высотного профиля коэффициента преломления в исследуемом методе.

**Ключевые слова:** высотный профиль коэффициента преломления, эффективный градиент коэффициента преломления, интерферометр, геостационарный искусственный спутник земли, гидрометеообразование.

#### ABSTRACT

D.D. Khalameyda. Studying of refraction properties of troposphere with the help of radio interferometer. – The manuscript.

The thesis for PhD degree in physical and mathematical sciences by the specialty 01.04.03 – radiophysics. – O.Ya. Usikov Institute of Radiophysics and Electronics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, 2013.

Scientific problem of further development of the method for studying of troposphere refraction on the base of radio interferometer that receive radio signals from geostationary satellite was solved. Numerical simulation of radio propagation through turbulent media with fluctuations of refraction index was performed. An influence of index refractivity fluctuation and multipath propagation on operation of the interferometer was studied and hardware requirements were stated. Radiophysical complex of remote sensing was developed and designed as well as full-scale experiments were performed during one year period. A problem of method applicability was solved by studying of different troposphere phenomena, which could lead to abnormal value of reduced gradient of troposphere refractivity index obtained during the experiment.

**Key words:** refractivity index profile, reduced gradient of refractivity index, interferometer, geostationary satellite, hydrometeor.