

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ РАДІОФІЗИКИ ТА ЕЛЕКТРОНІКИ
ІМ. О. Я. УСИКОВА

На правах рукопису
УДК 621.396.67

Фалькович Ігор Савелійович

ПОЛЯРИЗАЦІЯ РАДІОХВИЛЬ В ІОНОСФЕРІ,
АНТЕНИ З ПОЛЯРИЗАЦІЙНОЮ СЕЛЕКЦІЄЮ І
ЕФЕКТИВНІСТЬ ДЕКАМЕТРОВОГО РАДІОКАНАЛУ

Спеціальність 01.04.03 - радіофізика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Харків - 1997



00751916 (Т)

робота виконана в радіоастрономічному інституті НАН України

Офіційні опоненти :

доктор фізико-математичних наук, професор,
директор Науково-технічного центру електрофізичної обробки
НАН України (м. Харків)
Клепиков В'ячеслав Федорович

доктор технічних наук, професор,
зав. відділом ІРЕ НАН України (м. Харків)
Разсказовський Вадим Борисович

доктор фізико-математичних наук, професор,
професор кафедри космічної радіофізики Харківського
держуніверситету
Черногор Леонід Феоктистович

Провідна організація : Харківський Військовий університет,
кафедра комплексів управління космічними
системами

Захист дисертації відбудеться "24" червня 1997 року на
засіданні Спеціалізованої ради Д 02.29.01 з присудження вченого
ступеня доктора фізико-математичних наук в Інституті радіофізики
та електроніки НАН України ім. О.Я.Усикова за адресою : 310085,
м. Харків-85, вул. Проскури, 12, ІРЕ НАНУ. Початок засідань
Спецради о 14 годині.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці ІРЕ НАНУ за
адресою : 310085, м. Харків-85, вул. Проскури, 12, ІРЕ НАНУ.

Автореферат розісланий "23" травня 1997 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради
д. ф. - м. н.

С. М. Харківський

ВСТУП

Радіозондування іоносфери має велике практичне значення як для отримання інформації про структуру і динаміку іоносферної плазми, так і для створення високоефективних систем зв'язку, пеленгування, радіолокації (включаючи і загоризонтну) в декаметровому діапазоні хвиль. Істотними відмітними ознаками іоносферного розповсюдження радіохвиль є багатомодовість радіоканалу, що спричиняє широкий спектр кутів приходу, і поляризаційна трансформація падаючого поля. Багатомодове розповсюдження спостерігається в більшості випадків. Інтерференція кількох мод, що розповсюджуються в іоносфері по різних траєкторіях, різко знижує достовірність інформації про середовище розповсюдження, що отримана при радіозондуванні, а також призводить до помилок кутових вимірювань, зменшення пропускної здібності каналу зв'язку, ослаблення корисного сигналу на фоні шуму і заважачих сигналів.

Поряд з традиційними амплітудними і фазовими методами при розробці різних радіосистем в останні роки починають використовуватися методи, які базуються на поляризаційних властивостях електромагнітних хвиль, що стимулює розвиток відповідних теоретичних і експериментальних досліджень. При цьому виникає ряд проблем, складних і в багатьох випадках маловивчених.

Особливості поляризації хвиль в іоносферній плазмі пов'язані з анізотропією середовища розповсюдження, яка призводить до магнітоіонного розщеплення падаючого поля на дві нормальні хвилі, а також до взаємодії (трансформації) цих хвиль в нижній іоносфері при переході від ізотропного середовища на висхідній ділянці траєкторії до сильно анізотропної плазми в області максимуму іонізації шару F2 іоносфери. Поляризаційна трансформація також має місце при формуванні граничної поляризації на низхідній ділянці траєкторії в місці виходу хвилі з іоносфери. При значній дальності одного іоносферного скоку вся траєкторія хвилі може опинитися в області взаємодії. В зв'язку з цим, а також з урахуванням інтерференції кількох хвиль різних траєкторій, поляризація сигналу в точці прийому важкопередбачувана і сильно змінюється з часом внаслідок нестаціонарності іоносфери.

Траєкторії декаметрових хвиль в іоносфері та

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

ційні характеристики тісно пов'язані між собою. На різних ділянках розповсюдження хвилі в магнітоактивній плазмі можуть спостерігатися як квазіпоздовжні, так і квазіпоперечні по відношенню до геомагнітного поля умови. В першому випадку класична магнітоіонна теорія передбачає поляризацію нормальних хвиль, близьку до кругової, коли поляризаційні завмирання, породжені їх інтерференцією, обумовлені ефектом Фарадея. При поперечному розповсюдженні магнітоіонні хвилі повинні бути лінійно поляризованими, часові зміни поляризації їх суперпозиції пов'язані з ефектом Коттона-Мутона і поляризаційні завмирання мають зовсім інший характер. В зв'язку з цим при значних варіаціях кута приходу окремого іоносферного променя або при зміні траєкторії розповсюдження (перехід до відбиття від іншого іоносферного шару) квазіпоперечне розповсюдження може перейти в квазіпоздовжне з сильною зміною поляризації спостерігаемого поля. Тому поляризаційні дослідження невіддільні від траєкторних, а описані в дисертації розробки присвячені в тій або іншій мірі особливим характеристикам.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Радіозондування в декаметровому діапазоні є основним джерелом інформації про неоднорідну і нестаціонарну іоносферу Землі, а обробка сигналів в системах радіозв'язку, навігації, пеленгації і локації широко використовується для передачі інформації, знаходження місцеположення і ідентифікації радіопередаючих засобів, об'єктів, що рухаються та джерел збурення іоносфери природного і пов'язаного з діяльністю людини походження. Ефективність вирішення всіх перелічених задач в значній мірі залежить від того, наскільки повно використовуються всі характеристики декаметрового радіосигналу. При цьому ступінь освоєння якого-небудь із параметрів сигналу для наукових і практичних цілей повністю відповідає ступіню вивченості законів поведінки цього параметра при розповсюдженні в середовищі.

Іоносфера як частина навколосемного космічного простору істотно впливає на розповсюдження радіохвиль в широкому діапазо-

ні частот, через те що вона є диспергуючим, магнітоактивним, нестационарним, неоднорідним середовищем. Вона містить в собі неоднорідності з широким спектром розмірів. Крім того, при достатній інтенсивності радіохвиль іоносфера стає нелінійним середовищем, що додатково впливає на характеристики розповсюдження. В такій ситуації вплив неоднорідностей іоносфери стає одним з найсуттєвіших факторів при оцінці якості роботи сучасних вимірвальних радіосистем і систем передачі інформації.

Найменш вивченою характеристикою декаметрового радіосигналу є поляризація, або характеристика електромагнітної хвилі, що визначає закон зміни величини і напрямку вектора напруженості електричного поля за період несучої частоти. Робіт, які присвячені теоретичному і експериментальному дослідженням поляризації декаметрового сигналу при вертикальному а, тим паче, при похилому зондуванні, зовсім недостатньо. Ще менше розробок, які дозволяють використати поляризаційні параметри сигналу для підвищення ефективності роботи радіосистем декаметрового діапазону. Значне відставання експериментальних досліджень поляризаційних характеристик сигналу (в порівнянні з такими параметрами, як амплітуда, фаза, кути приходу і групове запізнення) викликано цілим рядом причин, в тому числі і труднощами вимірювання поляризації.

Одна з актуальних сучасних проблем - вивчення хвиль в слабоанізотропних неоднорідних середовищах, з якою доводиться зустрічатися в багатьох розділах радіофізики при розповсюдженні електромагнітних хвиль різних діапазонів в слабозамагніченій лабораторній, іоносферній, навколосонячній та міжзоряній плазмі. Донедавна при розгляді моделі поляризаційної структури радіосигналів, що розповсюджуються в іоносфері, враховувались в основному фактори, які пов'язані з ефектом Фарадея і наявністю невзаємодіючих магнітоіонних хвиль. Суттєва особливість слабоанізотропного середовища, до якого належить нижня частина земної іоносфери, проявляється в помітній зміні поляризації падаючого поля. Це пов'язано з інтенсивним взаємним перетворенням магнітоіонних компонент (нормальних хвиль) в області поляризаційного виродження при переході хвилі з вільного простору в суттєво анізотропне середовище (шар F2 іоносфери) на висхідній ділянці

траекторії в області виходу хвилі з іоносфери на висхідній ділянці.

В результаті, формування граничної поляризації сигналу на виході з іоносферного шару повинно відбуватися з урахуванням взаємодії (трансформації) нормальних хвиль, яка в явній формі відсутня в класичній магнітоіонній теорії (MIT). Це підтверджується рядом експериментальних робіт по вимірюванню граничної поляризації сигналів при вертикальному зондуванні іоносфери, результати яких не завжди можливо пояснити в рамках (MIT). Крім того, вертикальне зондування іоносфери представляє обмежений інтерес для практичних цілей, а результатів вимірювання граничної поляризації декаметрових хвиль на похилих трасах дальнього іоносферного розповсюдження у цей час дуже мало. Це ж можливо сказати і відносно застосування до розповсюдження іоносферних хвиль квазіізотропного наближення (KIN) методу геометричної оптики, запропонованого Ю. А. Кравцовим і дозволяючого врахувати взаємодію магнітоіонних складових в нижній іоносфері. Всупереч широко розповсюдженій думці, на протяжних іоносферних трасах можуть спостерігатися достатньо сильні ефекти лінійної трансформації мод при наявності ділянок квазіпоперечного розповсюдження.

Багатопроміньове розповсюдження, яке різко знижує надійність іоносферного радіоканалу, спостерігається в більшості ситуацій, при яких відбувається робота декаметрових радіосистем як дослідницького, так і спеціального призначення. Тому розвиток методів просторової і поляризаційної фільтрації приймаемого поля є безумовно актуальним. Якщо в відношенні удосконалення методів просторової селекції на базі великих горизонтально орієнтованих антенних ґраток зроблено достатньо багато (приміром цьому може бути найбільший декаметровий радіотелескоп УТР-2 Радіоастрономічного інституту НАН України), то поляризаційна фільтрація та методи її реалізації стосовно до особливостей іоносферного розповсюдження досліджені не достатньо добре. Враховуючи низькі кути місця сигналів на дальніх трасах, коли розрішення горизонтальних антен істотно погіршується, перспективним перехід до вертикально орієнтованих антенних систем з поляризаційною селекцією, які поєднують в собі високу спрямованість при малих кутах

місця з можливостями поляризаційної обробки.

Зв'язок роботи з науковими програмами і темами. Всі основні наукові і практичні результати дисертаційної роботи отримано при виконанні держбюджетних НДР "Искра-86", "Искра-91" в рамках планів фундаментальних досліджень НАН України, а також госпдоговірних НДР "Объем", "Тузлук", "Бузина-1", "Бузина-Х", "Игла".

Метод роботи є теоретичне і експериментальне дослідження поляризації декаметрових радіосигналів при похилому зондуванні іоносфери з урахуванням взаємодії магнітосферних хвиль, а також високоспрямованих антенних ґраток з поляризаційною селекцією і методів оптимального прийому сигналів двох ортогональних поляризацій. Вона включає такі задачі:

1. Дослідження тонкої структури кутових спектрів прийомних іоносферних хвиль і методів її вимірювання, які базуються на використанні високоспрямованої антенної ґратки, вимірюванні часової неузгодженості нулів поляризаційних завмирань в просторово рознесених точках, вимірюванні різниці фаз магнітосферних хвиль.

2. Дослідження можливостей підвищення просторової вибіркової вертикальних фазових антенних ґраток (ФАГ) за рахунок зменшення рівня бокових лепестків діаграми спрямованості поблизу головного лепестка і звуження останнього при розташуванні антени над похилою площиною. Вивчення нових методів високоточного вимірювання комплексної діелектричної проникності границі розділу (коефіцієнтів Френеля) і їх використання для уточнення просторових і поляризаційних характеристик приземних антен. Пропонування фізичних принципів побудови і реалізація вертикальної ФАГ з поляризаційною селекцією, яка ефективно використовує відбиття від напівпровідникової підстилкової поверхні.

3. Дослідження методів оптимального прийому сигналів двох ортогональних поляризацій (кругової і лінійної) при іоносферному розповсюдженні радіохвиль з урахуванням параметрів магнітосферних компонент, впливу скривлення ортогонального поляризаційного базису антени і флуктуаційної чутливості прийомної системи.

4. Рішення рівняння переносу поляризації в квазіізотропному наближенні з урахуванням поглинання при квазіпоздовжньому і квазіпоперечному розповсюдженні. Отримання аналітичних рішень для фазору спостерігаемого поля. Побудова алгоритму і проведення розрахунків поляризації хвилі вздовж траєкторії і граничної поляризації методом чисельного рішення рівнянь КНН.

5. Експериментальні дослідження поляризації декаметрових сигналів на протяжних іоносферних трасах з допомогою слабоспрямованої турнікетної антени і вертикальної ФАГ, її радіофізичні випробування в поляриметричному режимі. Використання вертикальної ФАГ для знаходження дальності до джерела радіовипромінювання. Постановка і проведення експериментів похилого поляризаційно-узгодженого зондування іоносфери і дослідження взаємодії магнітоіонних хвиль.

Наукова новизна отриманих результатів.

Вперше в декаметровому діапазоні запропоновано фізичні принципи побудови і досліджено характеристики вертикальної ФАГ, яка має ортогонально поляризовані елементи, а також принципи формування сім'ї променів антени з урахуванням відбитого від напівпровідникової землі сигналу, який вдвічі зменшує ширину головного лепестка діаграми спрямованості (ДС). Вивчено новий метод додаткового зменшення до двох разів ширини головного лепестка ДС при використанні похилої ділянки земної поверхні.

Запропоновано і досліджено легко реалізуемий на ПЕОМ новий підхід до розрахунку поля земної хвилі в ближній зоні, який базується на прямому розрахунку інтегралів Зоммерфельда, попередньо перетворених для забезпечення їх швидкої сходимості. З його допомогою обгрунтовано і досліджено два нових методи знаходження комплексної діелектричної проникності землі, які використовують вимірювання поперечної поляризації і ослаблення вертикальної компоненти поверхневої хвилі на малих відстанях (1...10 довжин хвиль) від випромінювача. Вивчено також два нових методи, які дозволяють безпосередньо вимірювати коефіцієнти Френеля при відбитті іоносферної хвилі від поверхні землі і які базуються на роздільному прийомі падаючої і відбитої хвилі. В першому з

них для цих цілей використано сформовані вертикальною ФАГ дві зеркальні відносно горизонту ДС, в другому - застосовано різносно-фазовий пеленгатор з вертикальним розносом елементів. Всі чотири методи експериментально апробовані і дали близькі результати.

Отримано аналітичне рішення рівняння переносу поляризації в квазіізотропному наближенні з урахуванням поглинання для граничних випадків квазіпоздовжнього і квазіпоперечного розповсюдження і для конкретних моделей іоносфери. Показано, що всі поляризаційні характеристики сигналу, а також його повна амплітуда є осцилюючими функціями довжини шляху хвилі в плазмі. Розроблено чисельний алгоритм рішення системи рівнянь Ю.А. Кравцова для слабоанізотропної плазми, застосування якого дозволило виявити помітні в ряді випадків відмінності результатів розрахунку поляризації іоносферних хвиль з використанням квазіізотропного наближення і класичної магнітоіонної теорії, що викликані трансформацією хвиль. Виявлено, що гранична поляризація залежить від електронної концентрації в нижній іоносфері (в шарах D та E). Така залежність відсутня в магнітоіонній теорії.

Експериментальні дослідження характеристик нормальних хвиль з допомогою слабоспрямованої антени на протяжних трасах південного і північного напрямків показали, що поляризація може бути як близькою до кругової (прийом з Півдня), так і суттєво еліптичною взаємно неортогональною (прийом з Півночі). В останньому випадку це зумовлено квазіпоперечними умовами на низхідній ділянці траєкторії. Використання високоспрямованої вертикальної ФАГ вперше дозволило вивчити поляризацію окремих іоносферних мод в умовах багатопроменевості, спостерігати лінійну поляризацію нормальних хвиль траєкторій 1F2 і 1E. Лінійна поляризація моди 1E зумовлена високими градієнтами іонізації в E шарі і відбиттям хвилі без магнітоіонного розщеплення. Реалізація режиму поляризаційно-узгодженого зондування іоносфери дала можливість роздільно вивчити поляризацію звичайної і незвичайної хвиль при квазіпоперечному розповсюдженні.

Спільне використання поляризаційних вимірювань і вимірювань кутів місця дозволило експериментально встановити ефект взаємодії магнітоіонних хвиль в нижній іоносфері, який проявляється в

квазіперіодичних флуктуаціях повної амплітуди сумарного поля при різниці кутів місця парціальних хвиль менше 1 градуса.

Практична значущість роботи. Електромагнітні хвилі декаметрового діапазону широко використовуються в системах радіозондування іоносфери, які в останній час стають невід'ємною частиною комплексів зв'язку, пеленгування і локації, що дозволяє підвищити ефективність роботи цих комплексів за рахунок адаптації до постійно змінюваних умов розповсюдження радіохвиль. Іоносферний декаметровий радіоканал має ряд безумовних переваг: він завжди існує, не вимагає матеріальних затрат на своє утримання, його практично неможливо вивести з ладу. До числа основних характеристик, які зумовлюють можливості радіоканалу, належить і поляризаційна структура електромагнітного поля. Проте, як показує аналіз наукової літератури, саме ця характеристика відбитих від іоносфери радіохвиль вивчена відносно слабо. Ця обставина є причиною того, що багато питань надійності прийому багатопроменевих сигналів не вирішені до цього часу. По цій же причині в згаданих застосуваннях не використовується факт характерної поляризації радіохвиль, відбитих від іоносфери.

Методи поляризаційної обробки знаходять поки що обмежене застосування, хоч в ряді випадків вони дають не менший вигравш, ніж частотно-часові або просторово-часові. Треба наголосити, що традиційно поляризаційні параметри антенних систем вибиралися на базі знаходження середнього параметрів сигналів на виході радіоканалу. В той же час нестаціонарність каналу, зумовлена в першу чергу ефектом Фарадея і багатопроменевістю, робить такий вибір малоефективним. Перехід же до поляризаційних методів обробки або адаптивних по поляризації, хоч і дозволяє досягти більш високої ефективності, до цього часу обмежувався насамперед відсутністю конструктивних розробок і відповідних публікацій по оцінкам параметрів поляризації радіосигналів і ефективності введення цієї обробки. При цьому поляризаційні методи допускають вдале поєднання з усіма іншими методами підвищення надійності радіоканалу. Рішення цієї задачі шляхом підвищення енергетики передаючих засобів не є раціональним, особливо з урахуванням енергетичної кризи і завантаженість радіодіапазонів. Найбільш конструктивні-

ми виявляються методи, які базуються на поляризаційній селекції і підвищенні спрямованості випромінюючих та приймачих антен.

По вказаним вище причинам отримані в цій роботі результати мають велике практичне значення. Це зумовлюється насамперед розробкою і спорудженням високоспрямованої багатопроменевої антенної ґратки з поляризаційною селекцією, випробування якої показали істотний виграш в ефективності в порівнянні з горизонтально орієнтованими антенами, які мають одну лінійну поляризацію. Досліджені способи підвищення просторової селективності вертикальних ФАГ дозволили додатково підвищити цей виграш. Запропоновані методи вимірювання параметрів підстилаючої поверхні, крім уточнення поляризаційних і просторових характеристик приземних антен, мають самостійне значення в діагностиці стану земної поверхні, оцінці запасів вологи і т.п. Дослідження методів використання сигналів двох поляризацій дозволило з урахуванням різних факторів знайти оптимальний, мінімізуючий глибину залишкових завмирань і максимізуючий відношення сигналу до флюктуаційного шуму. Розробка приймально-передаючої апаратури і реалізація режиму похилого поляризаційно-узгодженого зондування іоносфери на трасі середньої дальності забезпечили помітну стабілізацію поляризації приймаемого сигналу, коли збуджуєма "корисна" хвиля перевищувала на 20 дБ другу магнітійну хвилю, що є додатковим фактором підвищення надійності іоносферного декаметрового радіоканалу.

Особистий внесок автора роботи полягає в запропонованні фізичних принципів побудови, розрахунку характеристик і експериментальних дослідженнях вертикальної ФАГ з поляризаційною селекцією; постановці задачі, дослідженні і реалізації методів вимірювання параметрів підстилаючої поверхні; запропонованні і дослідженні способів підвищення просторової селективності антен з поперечною спрямованістю; оптимізація методів використання сигналів двох поляризацій; постановці задачі і рішення рівнянь переносу поляризації в слабоанізотропній іоносферній плазмі в граничних випадках квазіповздовжнього і квазіпоперечного розповсюдження; побудови алгоритму чисельного рішення рівнянь квазіізотропного наближення; проведенні багато-

річних поляриметричних спостережень на Радіоастрономічній обсерваторії РІ НАН України; запропонуванні і реалізації експериментів поляризаційно - узгодженого зондування іоносфери; обробці отриманих даних і фізичній інтерпретації результатів.

В усіх згаданих вище НДР, результати яких покладені в основу цієї дисертації, автор приймав участь як відповідальний виконавець, зам. наукового керівника і науковий керівник робіт.

А п р о б а ц і я р о б о т и . Отримані в дисертації результати були доповідані на конференціях і симпозіумах:

- Всесоюзному симпозіумі " Іоносфера і взаємодія декаметрових хвиль з іоносферною плазмою (Москва, 1989 р.);
- Всесоюзній конференції "Теорія і практика застосування методу некогерентного розсіяння для дослідження іоносфери" (Харків, 1987 р.);
- Міжнародному симпозіумі по антенам (JINA 92, Франція, 1992 р.);
- XVII Всесоюзній конференції по розповсюдженню радіохвиль (Ульяновск, 1993 р.);
- XXIV Генеральній асамблеї УРСІ (Японія, 1993 р.);
- Міжнародному симпозіумі по антенам (JINA 94, Франція, 1994 р.);
- Міжнародному симпозіумі " Прогрес в електромагнітних дослідженнях" (PIERS 96, Австрія, 1996 р.).

П у б л і к а ц і і . Основні результати роботи викладені в 23 публікаціях, які включають статті у вітчизняних і закордонних журналах, авторські свідоцтва і тези доповідей, які мають пріоритетне значення.

О б ' є м т а с т р у к т у р а д и с е р т а ц і і .
Робота складається з Вступу, п'яти розділів, Висновка та переліка цитованої літератури (139 найменувань). Вона містить 300 сторінок друкованого тексту, 15 сторінок переліка використаних джерел, 87 малюнків, 28 таблиць. Загальний об'єм дисертації - 399 сторінок.

ЗМІСТ РОБОТИ

У Вступі обґрунтована актуальність вибраної галузі досліджень і їх наукова новина; сформульована мета дисертації і практична значущість роботи; показано особистий внесок автора і зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, а також об'єм та структура дисертації.

В першому розділі проведено огляд літератури, присвяченої особливостям поляризаційних і просторових характеристик декаметрових радіохвиль в іоносферному радіоканалі, а також запропоновано нові методи і досліджена тонка структура кутових спектрів декаметрових радіосигналів на основі високої просторової селекції і поляризаційного аналізу.

Обґрунтований Ю. А. Кравцовим і далі розвинутий ним і іншими авторами метод квазіізотропного наближення (КІН) геометричної оптики дозволив по-новому підійти до опису поляризації електромагнітних хвиль в неоднорідній анізотропній плазмі. З використанням цього методу стало можливим коректно розглянути ефект лінійної взаємодії хвиль, який пов'язаний із зняттям поляризаційного виродження при переході хвилі з ізотропного в трьохмірнонеоднорідне анізотропне середовище, розрахувати коефіцієнти трансформації нормальних хвиль в області квазіпоперечності, обговорити ефекти граничної поляризації сигналу, а також розглянути проблему "зшивання" геометрооптичних мод і рішень квазіізотропного наближення. Однак, стосовно іоносферної плазми повнота наявних результатів недостатня. Частково це пояснюється широко розповсюдженою думкою, що товщина перехідного шару в земній іоносфері мала, тому і впливом взаємодії мод на поляризацію можна нехтувати, що в якійсь мірі справедливо у випадку вертикального зондування іоносфери. В найбільш інтересному для практики використання декаметрового радіоканалу випадку похилого зондування іоносфери при невеликих кутах випромінювання і дистанціях 1000...3000 км вся траєкторія хвилі може опинитися усередині квазіізотропного шару і інтегрально накопичуваний ефект взаємодії хвиль може стати відчутним. Слабо розроблені з точки зору КІН питання стійкості поляризаційно-узгодженого зондування іоносфери, а також питання граничної поляризації магнітних

хвиль для конкретних моделей іоносфери з урахуванням поглинання.

Результати розрахунково-експериментальних робіт, присвячених дослідженню поляризації декаметрових хвиль, які пройшли шар іоносферної плазми, в значній мірі також належать до випадку вертикального зондування. Вертикальне випромінювання, по-перше, простіше організувати з допомогою іоносферних станцій, які є в наявності, а подруге, поляризаційний аналіз відбитої від іоносфери хвилі може бути здійснено в моностатичному варіанті з суміщенням або невеликим розносом точок випромінювання і прийому. Крім того, при малих зенітних кутах в якості антен поляриметра можна використати схрещені в горизонтальній площині вібратори, а результати вимірювання поляризації будуть слабо залежати від характеристик відбитої від землі хвилі. Для практичного застосування більш характерно похиле іоносферне розповсюдження хвиль з низькими кутами місця, коли антени поляриметра необхідно розташовувати в вертикальній площині і стає суттєвим розрахунок польів, відбитих від напівпровідникової землі. Останнє призводить до необхідності використання методів і відповідної апаратури для вимірювання коефіцієнтів Френеля з введенням комплексних поправок "на землю" в результати поляриметрії.

Розгляд літературних даних дозволив зробити висновок, що напрямок подальших теоретичних і експериментальних робіт повинен полягати в розрахунках з застосуванням КІН поляризації декаметрових радіохвиль на похилих іоносферних трасах, розробці і проведенні поляриметричних експериментів дальнього іоносферного розповсюдження з урахуванням впливу характеристик підстилкової поверхні як в випадку однопроменевого прийому, так і при багатопроменевості, коли необхідно застосування високоспрямованих антенних систем з поляризаційною селекцією. Це дозволить обґрунтувати ефективність застосування різних алгоритмів поляризаційної фільтрації і вибіркового збудження однієї із іоносферних мод в цілях підвищення надійності іоносферного радіоканалу.

Використання різних методів вимірювання кутів приходу декаметрових радіосигналів призводить в ряді випадків до результатів які важко порівняти, що дає при різносно-фазовій пеленгації, наприклад, хибне розуміння великих і швидких флуктуацій кутів

місця в умовах багатопроменевості. В зв'язку з цим в пункті 1.2.1 наведено результати річного циклу вимірювання просторових кутових спектрів на меридіанальних радіолініях з допомогою високоспрямованої антенної ґратки радіотелескопа УТР-2. На відміну від фазових методів діаграмний метод розділення інтерферувчих мод помітно більш сталий і є прямопоказувчим. Азимутальні відхилення в проведених дослідженнях не показали яких-небудь помітних аномалій і не перевищували кількох градусів відносно розрахованого азимуту. Спектри кутів місця мали велику різноманітність і добре відповідали розрахункам. На більш короткій трасі 2000 км спостерігалися сигнали, відбиті від кожного з трьох іоносферних шарів E , F_1 , F_2 , а також їх комбінації $1E + 1F_2$, $1F_2 + 1F_2p$. Перехід від одного типу розповсюдження до іншого відбувався за кілька хвилин. Такий же часовий масштаб мали і квазіперіодичні варіації кутів місця моди $1F_2$. Амплітуди вказаних мод в більшості випадків були схожі. Спектри кутів місця сигналу, який пройшов трансекваторіальну радіотрасу 6000 км, спостерігалися двох основних типів: з добре помітним максимумом при кутах $11...13^\circ$ (траєкторія $3F_2$) і монотонно спадаючі в область високих кутів місця, пов'язані з ефектом F -розсіяння. В цілому протяжна радіотраса в порівнянні з більш короткою характеризувалася помітно більш розмитими кутовими спектрами і меншою їх різноманітністю.

В пунктах 1.2.2. та 1.2.3. запропоновано і досліджено методи вимірювання тонкої структури траєкторних характеристик: різниці кутів приходу магнітоіонних хвиль і слабких варіацій кутів місця однопроменевого сигналу. Перший метод базується на застосуванні двох рознесених секцій радіотелескопу УТР-2, спостереженні часової неузгодженості нулів поляризаційних завмирань і дозволяє вимірювати різницю кутів місця двох нормальних хвиль менше ніж 1° . Можлива модифікація методу в режимі двохканального інтерферометру. Високе кутове розрішення при знаходженні слабких варіацій вертикальних кутів досягається за рахунок зв'язку між малими змінами кута місця і достатньо великою зміною різниці фазових шляхів магнітоіонних хвиль, що дозволяє використовувати сумісно з поляриметром слабоспрямовану турнікетну антену замість антенної ґратки протяжністю близько 2000 метрів.

В другому розділі вивчені фізичні принципи

побудови і формування діаграм спрямованості (ДС) вертикальних антенних ґраток (ВФАГ) з поляризаційною селекцією, які ефективно використовують відбиття від напівпровідникової землі.

Розповсюдження радіохвиль декаметрового діапазону при дальністях більше 200...300 км відбувається з відбиттям, часто багатократним, від іоносфери і землі. Як результат структура поля в точці прийому виявляється дуже складною і, як правило, визначається інтерференцією кількох променів, кожен з яких має дискретну і дифузну компоненти. Амплітуда поля набуває коливальної просторово-часової структури, яка призводить до нерегулярних замирань сигналу, що знижує надійність передачі інформації. Одним з способів подолання цього явища може бути використання високоспрямованих прийомних антен, які забезпечують достатнє відношення сигналу до перешкод навіть в мінімумах корисного сигналу. Антенні системи, які використовувалися до цього часу, це лінійні горизонтальні багатопроменеві ґратки, промені яких притиснуті до площини антени. Відомо, що антени цього типу по розриваючій здібності істотно поступаються системам з поперечною спрямованістю. Однак останні в межах бувшого СРСР раніше не розроблялися, оскільки їх спорудження - достатньо складна проблема, тому пропонувалося в якості компромісного варіанту системи, які розташовані похило. Відомо також, що по міркуванням технічної складності відомі антени аналогічного типу, які побудовані в США, також є горизонтальними фазованими ґратками (ФАГ).

В підрозділах 2.1...2.5 розглянуто інший варіант - вертикальна ФАГ, для спорудження якої в цей час є реальні можливості. В основу було покладено спосіб променеутворення ФАГ, який дозволив при заданих розмірах вдвоє підвищити її спрямованість. Проведено аналіз характеристик антени з урахуванням реальних властивостей ґрунту для кругової і лінійної поляризації, досліджено діаграми спрямованості в залежності від числа елементів ФАГ, відстані між ними, способу збудження, частоти і поляризації. Це стало базовою для розробки і спорудження 15 елементної вертикальної ФАГ з поляризаційною селекцією.

На характеристики горизонтальних ФАГ істотно впливає поверхня землі. Завдяки симетрії такі антени однаково "опромінюють" верхній напівпростір і поверхню розділу. Оскільки при малих ку-

тах місця коефіцієнт відбиття практично для всіх властивостей границі розділу дорівнює -1 , пряме і відбите поле віднімаються, повне поле під малими кутами місця наближається до нуля, а промінь антени "відкидається" від горизонту вгору. Тому забезпечити ефективну роботу горизонтальних ФАГ під кутами місця, меншими $5...10^\circ$, в діапазоні декаметрових хвиль дуже важко: необхідно мати антени системи величезних поздовжніх розмірів.

Інша ситуація має місце для вертикальних ФАГ. Тут діаграма спрямованості (ДС) може бути несиметричною відносно горизонтальної площини. Якщо кут місця більше ширини променя, то поверхня розділу практично не опромінюється і на діаграму спрямованості не впливає. Однак є можливість іншого більш ефективного підходу: можливо так сформувати ДС вертикальної ФАГ, що опромінення поверхні розділу при малих кутах місця буде корисним. Для цього необхідно, щоб сума фази поля в точці відбиття і фази коефіцієнту відбиття була кратна 360° . Тоді пряме і відбите поле будуть складатися, а не відніматися, як це було в розглянутих вище випадках. Оскільки при малих кутах місця коефіцієнти відбиття для горизонтальної і вертикальної поляризації рівняються -1 не залежно від властивостей ґрунту, фаза поля, опромінюючого землю, і фаза просторового поля повинні відрізнитися на 180° . Для реалізації цієї ідеї антена повинна мати два променя (точніше, ДС с двома максимумами). Один повинен бути спрямованим під кутом місця Δ_0 , інший - під кутом місця $-\Delta_0$. Якщо поле другого променя протифазно полю першого, то після відбиття вони складуться в дальній зоні синфазно, практично подвоюючи ефективну висоту антени.

В підрозділах 2.2, 2.3 проаналізовано вплив напівпровідникової землі на ДС і поляризаційні характеристики ВФАГ для довільної лінійної поляризації. Виявлено слабкий вплив параметрів підстилаючої поверхні на форму головного лепестка ДС і поляризаційну селективність при кутах місця, менших за кут Брістера. Розраховано сімейства ДС в вертикальній площині для ВФАГ з різною кількістю елементів по основній та побічній поляризаціям.

В підрозділі 2.4 досліджено принципи формування віяла ортогональних променів ВФАГ і методи синтезу діаграмоформувачих схем (ДФС). Описаний алгоритм синтезу ДФС дозволяє побудувати

багатопроменеву матрицю без фазових здвигів будь-якого порядку з мінімальною кількістю елементів.

В підрозділі 2.5 описано розробку та реалізацію діючих макетів 15 - елементної багатопроменевої ВФАГ висотою 180 м з поляризаційною селекцією і амплітудною матрицею розмірності 15×15 для формування сімейства променів в площині кута місця.

В підрозділі 2.6 вивчено методи підвищення просторової селективності вертикальних ФАГ. Запропоновано метод зниження рівня близьких до напрямку фазування бічних лепестків ВФАГ, який базується на відключенні (або протифазному включенні) одного елемента ґратки. На відміну від амплітудного струморозподілу з використанням атенваторів, запропонований спосіб не призводить до зменшення ККД антени.

Розглянуто варіант розміщення ВФАГ над похилою площиною, який дозволяє синфазно складати три хвилі: падаючу, відбиту від похилої площини та відбиту від горизонтальної ділянки земної поверхні. В цьому варіанті досягається підвищення просторової селективності ВФАГ за рахунок зменшення ширини головного лепестка ДС до двох разів.

Характеристики вертикальної ФАГ і поляризація залежать від параметрів підстилаючої поверхні, тому значна увага приділяється розробці і апробації методів вимірювання комплексної діелектричної проникності землі і коефіцієнтів Френеля. В підрозділі 2.7 обґрунтовано, досліджено і експериментально апробовано чотири нових методи вимірювання параметрів підстилаючої поверхні з метою уточнення характеристик приземних антен з використанням як просторових, так і поверхневих хвиль. Для вимірювання коефіцієнтів Френеля з допомогою просторових хвиль застосовувалась ВФАГ і різносно-фазовий пеленгатор з вертикальним рознесенням елементів. Точні розрахунки компонент поля поверхневої хвилі дозволили реалізувати два незалежних методи знаходження комплексної діелектричної проникності. Вимірювання параметрів землі з використанням всіх чотирьох методів дали близькі результати.

В третьому розділі досліджено методи оптимального прийому сигналів двох поляризацій при іоносферному розповсюдженні декаметрових радіохвиль. Багатопроменева структура приймаемого поля призводить до інтерференції і, як наслідок, до

глибоких завмирань сигналів, а також до "розтягнення" імпульсів у часі. Ефективним способом боротьби з цим є використання високо-спрямованих багатопроменевих антен в точці прийому. Таким чином можливо в значній мірі знизити заважаючий вплив іоносферних мод і різко підвищити "якість" прийому сигналів. Однак, завдяки малому кутовому розносу магнітоіонних компонент інтерференція між ними, що зветься поляризаційними завмираннями, не може бути ліквідована при реальних розмірах антен тільки за рахунок просторової селекції. Для зниження поляризаційних завмирань є природним використати той факт, що магнітоіонні хвилі (звичайна і незвичайна) мають різну поляризацію. В розділі 2 описана антена, яка здатна розділяти компоненти по поляризації, тобто антена з поляризаційною селекцією. При цьому виникає задача оптимального використання вказаної властивості антени з допомогою відповідним чином функціонуючої апаратури прийому та обробки сигналів в двох каналах поляризаційного рознесення. Рішенню цієї задачі присвячено розділ 3, в якому запропоновано і досліджено кілька методів обробки як з точки зору мінімізації глибини завмирань, так і з точки зору підвищення відношення сигналу до шуму. Аналіз дозволив вибрати серед розглянутих методів оптимальний, який суміщує в собі простоту реалізації з високою ефективністю. Таким є метод двохканального прийому з складанням огинаючих після лінійного детектування. Для його реалізації потрібно радіоприймальний засіб, який має два канали, настроєні на одну частоту, і схему післядетекторного складання.

Показано, що оптимальним способом ослаблення поляризаційного фідінгу є адаптивна поляризаційна фільтрація, коли поляризація антени "слідкує" за поляризацією приймаемого поля, що динамічно змінюється, якщо воно формується сукупністю двох магнітоіонних компонент одного іоносферного променя. При наявності міжпроменевої інтерференції адаптивний поляризаційний фільтр (ПФ) забезпечує мінімальну глибину залишкових завмирань в порівнянні з іншими способами поляризаційної фільтрації, оскільки завмирання на виході двохканального засобу обробки визначаються тільки флуктуаціями повної інтенсивності приймаемого сигналу, ліквідувати які без розділення іоносферних мод принципово неможливо. Поляризаційна фільтрація однієї магнітоіонної хвилі

поступається по ефективності адаптивному ПФ. Її результати можуть виявитися негативними при невдало вибраній поляризації падаючої на іоносферу хвилі.

Перехід від адаптивного ПФ до післядетекторного складання огинавчих сигналів ортогонально поляризованих каналів не призводить до помітного погіршення результатів обробки при врахуванні впливу скривлення поляризаційного базису, параметрів магнітоіонних хвиль і флюктуаційної чутливості приймальної системи. Порівняння двох основних поляризаційних базисів показало більшу ефективність кругового базису при квазіпоздовжному розповсюдженні хвиль, яке частіше всього має місце на середньоширотних іоносферних траєктах.

В четвертому розділі вивчено вплив слабкої анізотропії на поляризацію декаметрових радіохвиль.

Сигнал, який пройшов шар магнітоактивної неоднорідної плазми, звичайно подаєть у вигляді суперпозиції незалежних магнітоіонних хвиль, які розповсюджуються по близьким траєкторіям. Інтерференція цих хвиль породжує добре відомі поляризаційні замирання сигналу, які пов'язані з ефектом Фарадея. Оскільки магнітоіонні хвилі в найпростішому випадку мають взаємно ортогональні поляризації, то при відсутності взаємодії поляризаційні замирання можливо було б ліквідувати шляхом вибору поляризації приймальної антени або використанням зведеного ортогонально поляризованого прийому, який описано у розділі 3. Однак, повністю усунути замирання неможливо, оскільки модель нормальних хвиль, які незалежно розповсюджуються в іоносфері, неприйнятна в загальному випадку.

Додатковий інтерес до дослідження поляризації декаметрових радіохвиль, які пройшли шар анізотропної плазми, визвали роботи Ю. А. Кравцова 1968...1971 р.р., які присвячені квазіізотропному наближенню (KIH) методу геометричної оптики. Цей метод дозволяє описати розповсюдження сигналу у вигляді суми двох взаємодіючих характеристичних (магнітоіонних) хвиль в області поляризаційного виродження, коли різниця показників заломлення цих хвиль $\Delta n \leq 1/k_0 l$, де k_0 - хвильове число у вільному просторі, l - характерний масштаб зміни параметрів середовища. Уявлення про поляризацію, які існували до того часу, полягають у тому, що гранична

поляризація характеристикних хвиль в класичній магнітній теорії (MIT) залежить тільки від величини магнітного поля, кута між магнітним полем і хвильовим вектором і не залежить від електронної концентрації плазми. З цього робився висновок, що експериментальне знаходження граничної поляризації не може бути джерелом нових знань про іоносферу, оскільки магнітне поле відоме з достатньою точністю.

В підрозділі 4.1 отримано аналітичне рішення рівняння переносу поляризації в області поляризаційного виродження для граничних випадків квазіпоздовжнього і квазіпоперечного розповсюдження. Показано, що у випадку пересічення френелівських об'ємів двох магнітних хвиль граничні умови (поляризація поля на вході в квазіізотропний шар) визначаються сумарним полем цих хвиль. У протилежному разі граничні умови треба формулювати для кожної хвилі і розглядати незалежно їх розповсюдження до точки виходу хвиль з іоносферної плазми. З'ясовано, що при малих кутах між магнітним полем і хвильовим вектором основний внесок в деполаризацію сигналу вносить поглинання в нижній іоносфері. При значних величинах цього кута присутність поглинання може компенсувати деполаризацію за рахунок ефекту Коттона-Мутона, яка звичайно вважається визначальною.

Отримані аналітичні рішення рівнянь переносу поляризації зручні при аналізі умов розповсюдження нормальних хвиль з урахуванням їх взаємодії, а також для оцінок впливу на спостережувану поляризацію поглинання і ефекту Коттона-Мутона. Розрахунки поляризації сигналу, який спостережується на виході з іоносфери (граничної поляризації), краще проводити чисельно. Такий підхід є особливо ефективним, коли вся траєкторія хвилі може бути описана з допомогою рівнянь квазіізотропного наближення (KIN). Мета розгляду, описаного у підрозділі 4.2, - чисельне інтегрування рівнянь квазіізотропного наближення геометричної оптики для дослідження граничної поляризації радіохвиль, які пройшли скрізь іоносферу Землі, що дозволило знайти помітні відмінності результатів KIN і магнітної теорії (MIT), котрі спостерегаються при наявності на траєкторії хвилі ділянки квазіпоперечного розповсюдження. У випадку відсутності такої ділянки розрахунки поляризації з використанням KIN і MIT близькі.

Гранична поляризація характеристичних іоносферних мод в КІН виявляється залежною від електронної концентрації в області поляризаційного виродження, тобто у шарах D і E іоносфери, тоді як в МІТ така залежність відсутня. Мають місце розбіжності і в залежності параметрів граничної поляризації характеристичних хвиль від кута між магнітним полем і хвильовим вектором в точці виходу сигналу з іоносфери, які спричинені ефектом трансформації хвиль. Як результат цього ефекту з'являється можливість дистанційного знаходження поляризації випромінюючої антени і електронної концентрації в квазіізотропному шарі по спостереженням граничної поляризації сигналу. Останнє реалізується, якщо висхідна ділянка траєкторії характеризується квазіпоперечними умовами розповсюдження, що має місце, наприклад, на трасі Харків-Москва.

В п'ятому розділі наведено результати експериментальних досліджень поляризації декаметрових радіосигналів на протяжних трасах далекого іоносферного розповсюдження.

Поляризація іоносферних радіохвиль залишається до цього часу найменш дослідженим параметром сигналу. В плані теорії це пояснюється складністю рішення рівняння переносу поляризації в магнітоактивній плазмі з урахуванням зіткнень, що розглядалося у розділі 4. Нестача експериментальних досліджень пов'язана з необхідністю використання пари антен, створюючих ортогональний базис, і розробки поляриметричної апаратури, яка б працювала в реальному часі. Більша частина експериментів, що були проведені раніше, це експерименти вертикального зондування іоносфери із застосуванням систем з двох схрещених у горизонтальній площині вібраторів. Реалізація похилого зондування, яке викликає найбільший практичний інтерес в задачах радіолокації і радіозв'язку, при достатньо низьких кутах місця потребує переходу до вертикальної орієнтації площини турнікетної пари, що створить труднощі при установці антен. Наявність відбитого від землі поля спотворює поляризацію падаючої хвилі, а усунення цих викривлень потребує знання кутів місця приймаемого сигналу і параметрів підстилаючої поверхні з залученням методів їх вимірювання, подібних розглянутих у розділі 2. Крім того, похиле зондування іоносфери викликає у більшості випадків багатопроменеве розповсюдження радіохвиль з близькими кутами приходу окремих іоносферних мод.

В цих умовах малорозмірні антенні системи не дозволяють виділяти окремі моди, що приводить до бажання використати високоспрямовані антенні ґратки з поляризаційною селекцією, розробка і спорудження яких - досить складна і дорога задача. Використання описаної в розділі 2 вертикальної багатопроменевої ФАГ забезпечило упевнене в більшості випадків розділення іоносферних мод, дослідження поляризації будь-якої з них і помітно підвищило надійність радіозв'язку на трасах довжиною до 10000 км.

В підрозділі 5.1 описано поляриметр декаметрового діапазону хвиль, який працює в реальному часі в круговому і лінійному базисах з урахуванням впливу параметрів земної поверхні спільно з вимірвачем кутових спектрів на базі антенних ґраток радіотелескопа УТР-2. В підрозділі 5.3 наведено результати вимірювання граничної поляризації нормальних хвиль, які спостерігаються на довготних радіолініях в режимі однопроменевого прийому. Для трас південного, а також західного напрямку поляризація магнітоіонних хвиль виявилась близькою до кругової, що зумовило високу ефективність методів поляризаційної фільтрації, які базуються як на виділенні однієї хвилі, так і на формуванні повної амплітуди сумарного поля. У випадку прийому сигналу з північного напрямку (траса Москва-Харків) при квазіпоперечному розповсюдженні на низхідній ділянці траєкторії спостерігаємо магнітоіонні хвилі в ряді випадків мали суттєво еліптичну взаємно неортогональну поляризацію. Це обумовило погіршення результатів поляризаційної селекції при залишковій глибині флуктуацій рівня сигналу до 25%.

Використання розробленої і спорудженої високоспрямованої вертикальної ФАГ дозволило вивчити поляризацію окремих іоносферних мод в умовах багатопроменевості (підрозділ 5.4), а також оцінити виграш в достовірності прийому інформації в порівнянні з типовою антеною бігучої хвилі БС-2, яка має горизонтальну орієнтацію і одну лінійну поляризацію. Спостерігаємо на радіотрасі Санкт-Петербург - Краснодар поляризація нормальних хвиль моди F_2 при кутах місця $\Delta \approx 20^\circ$ виявилась близькою до лінійної. Мода $1E$ часто також була лінійно поляризованою внаслідок високих градієнтів іонізації в шарі E іоносфери і відбиття хвилі без магнітоіонного розщеплення. Виграш ФАГ в порівнянні з БС-2 по критерію середньої вірогідності помилки досягав 32 разів при

використанні оптимального променя ВФАГ з двома ортогональними поляризаціями. Високоточне вимірювання кутових спектрів з допомогою ВФАГ стало основою для рішення задачі знаходження дальності до джерела радіовипромінювання. При використанні комбінованого методу побудови профілю електронної концентрації помилка знаходження дальності не перевищувала кількох процентів.

В підрозділі 5.5 наведено опис апаратурного комплексу для випромінювання в декаметровому діапазоні хвиль довільної еліптичної поляризації, з допомогою якого проведено поляризаційно - узгоджене зондування іоносфери на похилій трасі протяжністю 1200 км. Реалізація режиму поляризаційного узгодження дозволила роздільно вивчити поляризацію магнітоіонних хвиль при квазіпоперечному розповсюдженні, а також помітно стабілізувати поляризаційні характеристики приймаемого сигналу за рахунок перевищення на 16...20 дБ амплітуди збуджуємої "корисної" хвилі. Розглянуто метод формування лінійно поляризованої антеною сигналу довільної поляризації (від лінійної до кругової), який базується на комплексних властивостях коефіцієнтів Френеля і може бути використаний при здійсненні вибіркового збудження магнітоіонних хвиль.

Реалізація сумісних вимірювань поляризації і кутів місця дозволила експериментально виявити ефект взаємодії магнітоіонних хвиль в нижній іоносфері, який проявляється у квазіперіодичних змінах повної амплітуди сумарного поля при різниці кутів місця парціальних хвиль менше 1° , а також у зменшенні коефіцієнту еліптичності нормальної хвилі в порівнянні з результатами магнітоіонної теорії (підрозділ 5.6). Окрім чисто фізичного інтересу, розглянутий ефект важливий для практики використання декаметрового радіоканалу. В проведених експериментах глибина змін повної амплітуди приймаемого сигналу не перевищувала 20...25%. Це означає, що у випадку однопроменевого прийому і при використанні двохканальної ортогонально поляризованої системи поляризаційні замирання не перевищуватимуть вказаної величини і, відповідно, не вплинуть помітно на надійність радіоканалу.

В підрозділі 5.7 вивчена ефективність застосування просторово-поляризаційного фільтра (ППФ) з базою близько 3λ для усунення інтерференційних і поляризаційних замирань в умовах

багатопроменевості. Експериментально показано, що при прийомі двохпроменевого сигналу $1E + 1F2$ на трасі Москва - Харків ППФ дозволяє повністю усунути завмирання на рівні -10 дБ відносно максимального значення.

У В и с н о в к у наведено основні результати і висновки роботи.

О с н о в н і р е з у л ь т а т и, я к і в и н о с я т ь - с я н а з а х и с т :

1. Вперше в декаметровому діапазоні запропоновано фізичні принципи побудови, досліджено діаграми спрямованості (ДС) і поляризаційні характеристики і реалізована вертикальна ФАГ, яка має дві ортогональні поляризації і використовує відбиття від землі для звуження вдвоє ширини головного лепестка ДС. Вивчена можливість додаткового зменшення ширини ДС до двох разів при розміщенні антени над похилою площиною.

2. Запропоновано легко реалізуємиий на ПЕОМ алгоритм розрахунку трьох компонент поля земної хвилі в ближній зоні, який базується на прямому обчисленні інтегралів Зоммерфельда, попередньо перетворених для забезпечення їх швидкої сходимості. З його допомогою обґрунтовано і досліджено два нових методи знаходження комплексної діелектричної проникності підстилаючої поверхні, які дозволили виявити річні варіації ефективної площі найбільшого декаметрового радіотелескопу УТР-2.

3. Отримано аналітичне і чисельне рішення рівняння переносу поляризації в квазіізотропному наближенні з урахуванням поглинання для конкретних моделей іоносфери. Показано, що всі поляризаційні характеристики сигналу і його інтенсивність є осцилюючими функціями довжини шляху хвилі в плазмі, що принципово обмежує можливість усунення поляризаційних завмирань в іоносферному радіоканалі. Виявлено, що внаслідок ефекту трансформації хвиль гранична поляризація іоносферних мод залежить від електронної концентрації в нижній іоносфері. Така залежність в класичній магнітоіонній теорії відсутня.

4. В результаті експериментального дослідження нормальних хвиль отримано, що їх поляризація може бути як близькою до кругової (траси південного і західного напрямків), так і суттєво еліптичною взаємно неортогональною (північний напрямок), що

викликано квазіпоперечними умовами на низхідній ділянці траєкторії. Використання високоспрямованої ВФАГ вперше дозволило вивчити поляризацію окремих іоносферних мод в умовах багатопроменевості, спостерігати лінійну поляризацію нормальних хвиль траєкторії F2 і E. Експериментально виявлено ефект взаємодії магнітоіонних хвиль в нижній іоносфері, який проявляється в квазіперіодичних змінах повної інтенсивності сумарного поля.

Б. Запропоновано і досліджено методи оптимального прийому сигналів двох поляризацій при іоносферному розповсюдженні радіохвиль, які мінімізують глибину замирань сигналу і максимізують відношення корисного сигналу до флуктуаційного шуму.

Публікації за темою дисертації:

1. Фалькович И.С. Способ снижения боковых лепестков вертикальной антенной решетки, использующей отражения от границы раздела // Радиотехника и электроника. - 1990. - Т.35, N 3. - С.637-639.
2. Седин Л.Г., Фалькович И.С. Изучение траекторных характеристик КВ сигналов с помощью протяженной антенной решетки // Электросвязь. - 1990. - N 4. - С.14-16.
3. Фалькович И.С., Глибицкий М.М. Вертикальная антенная решетка, размещенная над наклонной плоскостью // Радиотехника и электроника. - 1991. - Т.36, N 6. - С.1124-1128.
4. Фалькович И.С. Ослабление поляризационных замираний при ионосферном распространении декаметровых волн // Электросвязь. - 1992. - N 1. - С.31-33.
5. Степанова Н.А., Фалькович И.С. Взаимодействие магнитоионных волн в нижней ионосфере // Геомагнетизм и аэронавигация. - 1992. - Т.32, N 6. - С.68-77.
6. Bruck Yu.M., Inyutin G.A., Falkovich I.S. and Sodin L.G. A multibeam polarized broadband vertical array antenna for high reliability communication systems // Journees Internationales sur les Antennes. - 1992. - V.6. - P.637-639.
7. Брук Ю.М., Седин Л.Г., Фалькович И.С. и др. Вертикальная многолучевая антенная решетка КВ диапазона с поляризационной селекцией // Электросвязь. - 1993. - N 7. - С.17-18.
8. Falkovich I.S., Kalinichtnko N.N., Sodin L.G. and

Stanislavsky A.A. An effective technique for measuring the dielectric constant of the ground to determine parameters of antennas, above an interface // Journées Internationales sur les antennes. 1994. - V.7. - P.370-374.

9. Содин Л.Г., Фалькович И.С. Измерение коэффициентов Френеля с помощью вертикальной фазированной антенной решетки // Радиотехника и электроника. - 1995. - Т.40, N 4. - С.562-565.

10. Фалькович И.С., Калиниченко Н.Н. КВ антенна круговой поляризации на основе линейного диполя, размещенного над полупроводящей землей // Электросвязь. - 1995. - N3. - С.29-31.

11. Фалькович И.С., Калиниченко Н.Н., Станиславский А.А. Экспериментальные исследования наклонного поляризационно-согласованного зондирования ионосферы в декаметровом диапазоне волн // Геомагнетизм и аэронавигация. - 1995. - Т.35, N 6. - С.123-131.

12. Содин Л.Г., Фалькович И.С., Шпак А.И. Экспериментальные исследования многолучевой вертикальной ФАР КВ диапазона // Электросвязь. - 1996. - N 2. - С.29-31.

13. Содин Л.Г., Фалькович И.С., Калиниченко Н.Н. Использование поверхностной и пространственной волн для измерения диэлектрической проницаемости почвы и уточнения характеристик наземных антенн // Радиотехника и электроника. - 1996. - Т.41, N 10. - С.1191-1196.

14. Фалькович И.С., Калиниченко Н.Н. Применение разностно-фазового пеленгатора для измерения коэффициентов отражения от земли // Электросвязь. - 1996. - N 2. - С.32-33.

15. Фалькович И.С. Поляризация радиоволн в ионосфере: магнитонная теория и квазиизотропное приближение // Радиофизика и радиоастрономия. - 1996. - Т.1, N 2. - С.260-265.

16. Фалькович И.С. Измерение флуктуаций углов прихода декаметрового радиосигнала по углу поворота плоскости поляризации // Украинський метрологічний журнал. - 1997. - N 2. - С.11-13.

17. Содин Л.Г., Фалькович И.С., Калиниченко Н.Н. Определение параметров земли по измерению поперечной поляризации поверхностной волны // Радиотехника. - 1997. - Т.52, N 1. - С.95-102.

18. Фалькович И.С. Измерение поляризации многолучевого сигнала с помощью пространственно-поляризационного фильтра // Украинський метрологічний журнал. - 1997. - N 1. - С.49-50.

19. А.с. 1660090 СССР. Способ формирования диаграммы направленности в угломестной плоскости вертикальных антенных решеток слабонаправленных горизонтально поляризованных элементов / И.С.Фалькович, М.М.Глизицкий (СССР). - Заявлено 01.12.1988. Оpubл. 01.03.1991. - Бюл. N 24.
20. А.с. 302987 СССР. КВ антенное устройство с веерной ДН для разнесенного по углам прихода приема сообщений от удаленных корреспондентов / Ю.Д.Ротенко, К.А.Федоров, А.И.Шпак, А.В.Кучерявый, И.С.Фалькович (СССР). - Заявлено 17.06.1988. Оpubл. 2.10.1989.
21. Фалькович И.С. Эффективность поляризационной фильтрации КВ на наклонных трассах // Тезисы докладов Всесоюзного симпозиума "Ионосфера и взаимодействие декаметровых волн с ионосферной плазмой". - Ч. II. - М.: Наука, 1989. - С. 33.
22. Фалькович И.С. О возможности поляризационного согласования на передающем конце КВ радиотрассы // Тезисы докладов XVII Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. - Секц.9. - М.: Наука, 1993. - С. 45.
23. Stepanova N.A., Falkovich I.S. Polarization of the HF signal passed through the Ionosphere // Abstracts of the XXIV-th General Assembly of the International Union of Radio Science. - Japan, 1993. - P. 313.

АННОТАЦИЯ

Фалькович И. С. Поляризация радиоволн в ионосфере, антенны с поляризационной селекцией и эффективность декаметрового радиоканала. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 - радиофизика. Рукопись. Институт радиофизики и электроники НАН Украины им. А. Я. Усикова, Харьков, 1997.

Защищаются 23 научные работы, которые содержат результаты теоретических и экспериментальных исследований поляризации декаметровых радиоволн, распространяющихся в магнитоактивной ионосферной плазме. С использованием квазиизотропного приближения геометрической оптики получены аналитическое и численное решения уравнения переноса поляризации. Показано, что поляризационные характеристики сигнала являются осциллирующими функциями длины пути волны в плазме, а предельная поляризация нормальных ионосферных мод зависит от электронной концентрации в нижней ионосфере. Применение разработанной вертикальной антенной решетки впервые позволило изучить поляризацию магнитоионных волн в условиях многолучевости, экспериментально установить эффект взаимодействия нормальных волн. Предложены и исследованы методы оптимального приема сигналов двух поляризаций при дальнем ионосферном распространении.

ABSTRACT

Falkovich I.S. Polarization of radiowaves in ionosphere, antennas with polarization selectivity and efficiency of HF radiochannel. Dissertation for Scientific Degree of Doctor of Sciences (Physics and Mathematics) in Speciality 01.04.03-Radiophysics as a manuscript. Institute of Radiophysics and Electronics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, 1997.

23 scientific articles are defended that contain the results of the theoretical and experimental investigations of the HF radiowaves polarization which is propagated in the ionospheric plasma. The analytical and numerical solutions of the polarization transfer equation have been obtained by using the quasi-isotropic approximation of the geometrics optics . It was demonstrated that the polarization parameters of a signal are oscillating functions of length path of wave in plasma and limiting polarization of characteristic ionospheric modes depend on

electron density in lower ionosphere. The use of the elaborated vertical antenna array allowed the investigations to be made of the magneto-ionic waves polarization in the multiray conditions and it allowed to discover the transformation effect of the characteristic waves. For long ionospheric paths the methods of the optimum signal receiving of two polarizations have been suggested and investigated.

Ключові слова: поляризація, магнітоіонна хвиля, квазіізотропне наближення, антенна ґратка, взаємодія хвиль.

Відповідальний за випуск Коноваленко О.О.

Підписано до друку 15.05.1997 р.. Формат паперу 60x80x16.

Папір офс.. Офс. друк.. Об'єм 1,8 фїз. д. л..

Заказ N 53 . Тираж 100 прим.. Безкоштовно.

Ротапринт ІРЕ НАН України,
Харків-85, вул. Акад. Проскури, 12.

AP. 07. 23

438/147

...the accuracy of these ...
...the experimental ...
...it allowed to measure the transformation effect of ...
...the characteristic ... for long atmospheric paths the method ...
...of the optical signal resulting of two polarizations have been ...
...reported and investigated

...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...