

Міністерство освіти і науки України
Національний аерокосмічний університет
ім. М.Є. Жуковського “Харківський авіаційний інститут”

ПУЛЯЄВ Валерій Олександрович

УДК 621.396 : 550.338

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ІОНОСФЕРИ
ПРИ ДИСТАНЦІЙНОМУ МОНІТОРИНГУ
МЕТОДОМ НЕКОГЕРЕНТНОГО РОЗСІЯННЯ**

05.07.12 – дистанційні аерокосмічні дослідження

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2006

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Інституті іоносфери НАН і МОН України

Науковий консультант: доктор фізико-математичних наук, професор Рогожкін Євген Васильович, професор кафедри радіоелектроніки Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” МОН України, лауреат премії Ради Міністрів СРСР

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук Потехін Олександр Павлович, заступник директора по науковій роботі Інституту сонячно-земної фізики Сибірського відділення Російської академії наук (м. Іркутськ)

доктор технічних наук, професор Коваль Юрій Олександрович, професор кафедри основ радіотехніки Харківського національного університету радіоелектроніки МОН України

доктор технічних наук, професор Печенін Валерій Васильович, професор кафедри радіоелектронних пристроїв та систем Національного аерокосмічного університету ім. М. С. Жуковського “Харківський авіаційний інститут” МОН України

Провідна установа: Інститут радіофізики і електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, відділ поширення радіохвиль у природному середовищі (м. Харків)

Захист відбудеться 17.02.2006 року о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.062.07 у Національному аерокосмічному університеті ім. М.С. Жуковського “Харківський авіаційний інститут” за адресою: 61070, м. Харків, вул. Чкалова, 17.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного аерокосмічного університету ім. М.С. Жуковського “Харківський авіаційний інститут” за адресою: 61070, м. Харків, вул. Чкалова, 17.

Автореферат розіслано 27.12. 2005 року.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради

Лукін В. В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дослідження іоносфери обумовлено необхідністю подальшого розвитку сучасних уявлень про характер сонячно-земних зв'язків і про ближній космос. Важливість і актуальність цих досліджень підтверджується створенням глобальної системи іоносферного моніторингу, у рамках якої координуються іоносферні вимірювання на спеціалізованих радарних установках, розташованих у різних регіонах земної кулі (проект SPARC - створення віртуальної лабораторії спільного наукового користування у складі міжнародної мережі радарів некогерентного розсіяння, проект GEM - геопросторове моделювання навколишнього середовища).

Дослідження стану навколоземного космічного середовища сприяють розвитку фундаментальної науки і пов'язані з аналізом іоносферних процесів, у тому числі тих, що відбуваються як у нижніх її шарах, так і на висотах більше 1000 км, де важливого значення набувають довготні варіації легких іонів у плазмі. Вивчення стану навколоземного космічного простору також важливе і для розуміння тих процесів в атмосфері, що впливають безпосередньо на життєдіяльність людини. Ці процеси відображають результат впливу на іоносферу сонячних спалахів і викликаних ними магнітних бур, результат техногенної діяльності (вибухи, пуски ракет, екологічні катастрофи та ін.).

Радар обсерваторії Інституту іоносфери НАН і МОН України (м. Харків) є єдиною установкою некогерентного розсіяння (НР) на середніх широтах у європейському регіоні для досліджень, в тому числі, і тих висотних діапазонів, де вимірювання за допомогою іонозондів в принципі неможливі. Завдяки його унікальності, постановою Кабінету Міністрів України цей радар віднесено до об'єктів, що складають її національне надбання (реєстраційний номер 1709 від 19.12.2001 р.). У переліку задач радара входить участь у дистанційному моніторингу з метою корегування існуючих і апробації знову створюваних моделей середовища поширення радіохвиль з метою ефективного їх використання службами наземного радіозв'язку, загоризонтної радіолокації, службами забезпечення радіозв'язку з супутниками і т.п.

Щоб проводити повноцінний і якісний іоносферний моніторинг у широкому інтервалі висот за допомогою подібних радарних систем, необхідно врахувати вплив наступних чинників.

1. У світлі всі зростаючого наукового і практичного інтересу до досліджень іоносфери прагнення до подальшого збільшення обсягу та поліпшення якості геофізичної інформації обмежуються технічним потенціалом радіолокаційних установок НР. Можливості базової апаратури радара (ефективна потужність випромінювання передавачів PG порядку 10 ГВт, ефективна поверхня антен до $10^4 - 10^5 \text{ м}^2$ та реальна чутливість радіоприймальних пристроїв до 0.05 - 0.1 мкВ) можна вважати практично вичерпаними і навряд чи будуть істотно поліпшені в найближчому майбутньому. У зв'язку з цим необхідний підхід, що полягає в подальшій оптимізації процесу зондування, модифікації обчислювальних процедур і модернізації пристроїв обробки.

2. До найбільш проблемних (з точки зору оцінки фізичних властивостей складної, багатокомпонентної іонної структури плазми) відносяться діапазони висот нижче 200 км і особливо вище 1000 км, що потребує використання зондувальних імпульсів різної тривалості. Практика вимірювань показує, що в цьому випадку надійне визначення параметрів середовища можливе лише за умови, якщо відношення сигнал/шум по потужності має значення $q > 0.1$. Для подолання цього обмеження (у випадку реального зменшення значень q на цих іоносферних рівнях до 0.01 і менше та появи в результаті цього похибок у розрахунках параметрів середовища більше 50 %) необхідні більш достовірні процедури оцінювання статистичних характеристик сигналу розсіяння.

3. Як показує аналіз, труднощі одержання достатнього ступеня точності при оцінці висотно-часового розподілу параметрів сигналу НР пов'язані і з рядом апаратурно-методичних обмежень методу, що звичайно супроводжують процедури розрахунків статистичних характеристик сигналів – спектрів або автокореляційних функцій (АКФ). Для аналізу обмежень потрібні дослідження моделей сигналу НР і процедур обчислення його АКФ. Також потрібні пропозиції щодо структури зондувального сигналу, яке дозволяє як одержати неспотворений висотний профіль перерізу розсіяння іонізованого середовища і АКФ його флуктуацій одночасно в діапазоні висот, як мінімум, 100 - 1500 км, так і підвищити завадостійкість алгоритмів обробки.

4. Труднощі збільшення ступеня точності і вірогідності вимірювань посилюються наявністю імпульсних завад, а також багатокомпонентністю плазми. У сукупності з шумовою природою сигналу НР вони є основною перешкодою в процедурах розв'язку зворотної задачі при встановленні однозначної залежності між характеристиками цього сигналу і параметрами середовища розсіяння. Для реалізації методик одержання додаткової інформації про іоносферу (у тому числі і про її іонний склад) із сигналу розсіяння, які б задовольняли вимогам точності, потрібен адекватний статистичний аналіз неоднозначних розв'язків. Адаптація зворотної задачі електродинаміки до особливостей НР (надалі – зворотна задача розсіяння), як можна думати, дозволить максимально наблизитися до теоретично обґрунтованого (не гірше 10 %) рівня похибок, які виникають в процесі розрахунку параметрів іоносферної плазми.

Таким чином, необхідність збільшення обсягу та якості геофізичної інформації як за рахунок розширення висотного діапазону, так і переліку вимірюваних параметрів стало підставою для проведення досліджень у рамках даної дисертаційної роботи. В цілому, за вихідну точку взято те, що в умовах, коли подальше підвищення енергетичного потенціалу як харківського, так і інших радарів НР уже нездійсненне, одержати додаткову інформацію про іоносферу все ж можливо за рахунок впровадження сучасних інформаційних технологій, спрямованих на оптимізацію ключових обчислювальних процедур у методі НР і орієнтованих на використання сучасної комп'ютерної техніки.

Розгляд сукупності окреслених задач і дає змогу вирішити важливу **науково-прикладну**

проблему – підвищення ефективності визначення параметрів іоносфери при обробці сигналу розсіяння в процесі її дистанційного моніторингу методом НР, що обумовлює **актуальність** дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами. Результати роботи одержано у рамках ряду Програм фундаментальних досліджень іоносфери обсерваторією Інституту іоносфери (ІОН) і обсерваторіями НР США, остання з яких затверджена у 1998 році Міністром освіти України і Президентом НАН України, і у рамках Постанови з питань розширення європейської інтеграції України від 2003 року. Результати знайшли відображення у щорічних науково-технічних звітах про НДР за 1990 - 2005 роки, в яких автор брав участь як виконувач та відповідальний виконувач. Серед них такі: “Дослідження нижньої іоносфери методом НР” (номер держреєстрації 0100U003065); “Дослідження висотного розподілу іонів водню та гелію вище максимуму іонізації області F в період зростання сонячної активності” (номер держреєстрації 0199U003875); “Дослідження висотного розподілу електронної концентрації, температур електронів та іонів, швидкості дрейфу плазми в періоди, що передбачені Міжнародним геофізичним календарем” (номер держреєстрації 0199U003876); “Дослідження параметрів іоносфери в районі максимуму шару F методом НР” (номер держреєстрації 0198U005400); “Дослідження іоносфери над Україною в період зростання сонячної активності” (номер держреєстрації 0198U005391); “Дослідження висотного розподілу N_e , T_i , T_e методом НР. Розробка емпіричної моделі” (номер держреєстрації 0197U009260); “Дослідження впливу магнітних бур і сонячних спалахів на теплові та динамічні процеси у навколоземній космічній плазмі на фазі зниження сонячної активності” (номер держреєстрації 0102U001301), а також міжнародний проект “POLITE” (NSF grant ATM-97-14638, ІОН спільно з MIT Haystack Observatory, USA).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності визначення параметрів іоносфери при дистанційному моніторингу методом НР за рахунок а) зменшення методичних і статистичних похибок АКФ сигналу розсіяння і б) підвищення стійкості розв'язків зворотної задачі при оцінці характеристик, що описують висотно-часовий розподіл багатокomпонентного іонізованого середовища.

Способом досягнення мети є застосування перспективних інформаційних технологій і їх адаптація до особливостей некогерентного розсіяння в іоносферній плазмі, удосконалення і подальший їх розвиток, для того, щоб звузити діапазон неоднозначних оцінок параметрів середовища, особливо в умовах критично малих відношень сигнал/шум.

Для досягнення цієї мети пропонується системний підхід, при якому середовище (іоносфера), пристрої (радары), процедури зондування й обробки розглядаються як взаємозалежні елементи загальної системи, зв'язки між якими і їх конкретне виконання узгоджуються зі специфікою геофізичного експерименту. Цей підхід спрямовано на збільшення обсягу і поліпшення якості пе-

рвісної інформації (АКФ сигналу розсіяння), на розробку і впровадження сучасних процедур їх статистичної обробки і наступної максимально однозначної інтерпретації, що в цілому дозволяє максимально використати потенційні можливості методу НР.

Відповідно до зазначеної проблеми і поставленої мети проведено аналіз принципових особливостей і можливостей дистанційного зондування іоносфери Землі за допомогою імпульсних радарних систем НР, аналіз існуючих методик обробки сигналів, методів, що використовуються для оцінки параметрів середовища (включаючи використання паралельних і незалежних джерел інформації). Це дозволило конкретизувати для наступного розв'язування такі задачі:

1. Обґрунтування і розробка в рамках системного підходу моделі вимірювальних перетворень сигналу НР з урахуванням характеристик кодованого зондувального сигналу, технічних характеристик радіолокаційної системи і апіорних характеристик, що описують просторово-часову поведінку іоносферної плазми. В тих же рамках – розробка принципів структурування зондувальних сигналів, у тому числі і для випадку складної іонної структури. Впровадження поточної діагностики з використанням додаткових кодованих контрольних елементів у структурі зондувального сигналу.

2. Моделювання сигналу НР з метою аналізу довірчих інтервалів і наступного врахування значень статистичного розкиду ординат його АКФ в обчислювальних процедурах, дослідження на стійкість і ефективність алгоритмів оцінки параметрів іоносферної плазми. Удосконалення методів аналізу сигналу НР при вимірюваннях його АКФ в умовах критично малих відношень сигнал/шум.

3. Адаптація процедур розв'язків зворотної задачі до особливостей некогерентного розсіяння в іоносферній плазмі за умов одно-, двох- і трьохкомпонентного іонного складу. Модернізація процедур, які не задовольняють у сучасному вигляді умовам стійкості розв'язання зворотної задачі при розрахунках параметрів іоносфери по АКФ сигналу НР. Врахування і використання в процедурах статистичних методів обробки, регуляризація розв'язків.

4. Модернізація структури інформаційно-обчислювальної системи на базі радара НР і локальної комп'ютерної мережі для реалізації в реальному часі багатоканальної прискореної експрес-обробки даних збільшеного об'єму при проведенні дистанційного дослідження навколоземного космічного простору.

5. Організація локальної бази експериментальних даних радара НР з урахуванням обсягу й особливостей інформаційних потоків великої щільності. Розробка і впровадження пакетів прикладних програм з урахуванням вимог сучасних діалогових інформаційно-обчислювальних систем статистичної обробки. Узгодження форматів даних, призначених для обміну і для наступного їх уточнення відповідно до вимог міжнародної бази радарів НР.

6. Апробація працездатності й ефективності розроблених методів, алгоритмів і пристроїв в процесі проведення систематичних координованих іоносферних досліджень.

Об'єкт дослідження - радіолокаційне зондування іоносфери Землі при використанні методу некогерентного розсіяння радіохвиль.

Предмет дослідження - особливості некогерентного розсіяння в іоносферній плазмі при дослідженні його властивостей в розширеному інтервалі висот, перспективні технології зондування й обробки сигналу розсіяння, процедури аналізу статистичних характеристик цього сигналу як інструмент оцінки стану іоносферного середовища у випадку багатокomпонентності іонного складу.

Методи дослідження: моделювання процесу зондування; використання теорії кодування сигналів; статистичний аналіз АКФ сигналу НР; аналіз розв'язків зворотної задачі з урахуванням особливостей НР; використання теорії синтезу штучних нейронних мереж; комп'ютерне моделювання процедур іоносферних вимірювань.

Наукова новизна результатів полягає в тому, що в умовах, коли на діючих радарів НР практично відсутня можливість збільшення їх енергетичного потенціалу, в результаті сукупних теоретичних і практичних розробок отримано можливість розширення висотного інтервалу досліджень за рахунок підвищення точності оцінки параметрів іоносферної плазми. Це досягнення забезпечено такими новими науковими результатами:

1. Одержала подальший розвиток дискретна модель сигналу НР, яка дозволяє реалізувати комп'ютерне моделювання процедур розрахунку АКФ сигналу НР по заданих параметрах іоносфери і характеристиках радіолокаційної системи при довільному зондувальному сигналі.

2. Вперше отримані результати теоретичних розрахунків довірчих інтервалів при моделюванні статистичних характеристик сигналу некогерентного розсіяння. Використання сімейств середньоквадратичних відхилень дозволяє мінімізувати похибки обчислень при розрахунках експериментальних АКФ сигналу розсіяння, а також при функціонуванні процедур оцінки по ним локальних параметрів плазми.

3. Одержала подальший розвиток теорія рішення зворотної задачі для випадку некогерентного розсіяння радіохвиль в іоносферній плазмі з багатокomпонентною іонною структурою. Для успішного функціонування цієї задачі модифіковано процедури корекції форми АКФ, обумовлені апаратними і методичними факторами. Розроблено модель, яка, використовуючи одночасне функціонування прямої і зворотної задач, дозволяє дати статистичну оцінку ефективності розрахунків параметрів іоносферного середовища.

4. Набула подальшого розвитку теорія регуляризації і стійкості розв'язків зворотної задачі розсіяння, що базується на врахуванні ступеня спотворення форми АКФ і накладанні обмежень на характер висотного розподілу іоносферних параметрів. Як наслідок, вперше в практиці НР для метрового діапазону при зменшенні відношень сигнал/шум до 0.01 по потужності зведено до мінімуму число цих розв'язків при похибках розрахунків, що не перевищують 10 %.

5. Вперше запропоновано модель зворотної задачі, що дозволяє збільшити швидкість розрахунків параметрів іоносфери використанням масованої паралельності обробки інформації за допомогою ідентифікуючої структури на базі штучних нейронних мереж. Моделювання показано, що апаратурна реалізація такої мережі при аналізі швидкоплинних процесів у іоносфері дозволить до одиниць секунд за сеанс скоротити процес ідентифікації АКФ сигналу НР у зворотній задачі розсіяння.

6. Розроблено методичні пропозиції щодо синтезу технічної структури радарної системи НР, яка реалізує підтримку запропонованих режимів функціонування в автоматизованому режимі і забезпечує можливість її інтеграції у світову мережу радарів НР. Узагальнено принципи побудови багатofункціонального сигнального процесора.

7. Тривалими іоносферними вимірюваннями підтверджено безпосередню ефективність і дієздатність розроблених і удосконалених методик. За рахунок цього вперше для середніх широт європейського регіону отримано відомості про характер висотно-часового розподілу іонів кисню, гелію і водню в зовнішній (1000 - 1500 км) іоносфері і важких (молекулярних) іонів у висотному діапазоні 100 - 250 км.

Практичне значення отриманих результатів визначається впровадженням перспективних інформаційних технологій і технічним удосконаленням конкретного радара, що забезпечило підвищення ефективності радіолокаційних досліджень навколоземного космічного середовища методом НР. В результаті стало можливим одержання надійних експериментальних даних про детальну структуру і динаміку середньоширотної іоносфери в висотному діапазоні, як мінімум, 100 - 1500 км. Ці результати представляють собою важливий внесок у розвиток геофізичного моніторингу на Україні в інтересах фундаментальних і прикладних досліджень. Зокрема, практичне значення має те, що:

– реалізовано уточнену оперативну обробку інформації при застосуванні удосконалених режимів зондування і процедур аналізу розв'язків в зворотній задачі розсіяння, що дозволило оптимізувати процес визначення параметрів іоносфери і вирішити практичні питання по ефективному відстеженню її стану в розширеному інтервалі висот;

– знайдено технічне рішення по удосконаленню та об'єднанню радіотехнічних пристроїв і комп'ютерних засобів у єдиний дослідницький комплекс у складі міжнародної мережі радарів НР;

– синтезовано процедури інформаційних перетворень великих об'ємів (до 10 Гбайт за добу) вхідної інформації в зворотній задачі розсіяння, реалізовано конвеєризацію процесу обробки іоносферних даних;

– розроблено прикладне програмне забезпечення, що відповідає вимогам сучасних діалогових інформаційно-обчислювальних систем і призначене для підтримки автоматизованої обробки

експериментальних даних, уточнення результатів досліджень у реальному часі з обсерваторіями багатьох країн;

– на прикладі радара НР Інституту іоносфери сформовано базу іоносферних даних, куди ввійшли унікальні експериментальні результати досліджень за період 1990 - 2005 р., отримані в розширеному діапазоні висот, і які використовуються при створенні емпіричної моделі середньо-широтної іоносфери над європейським регіоном і при розробці глобальної моделі збурень у навколоземному космічному просторі.

Реалізація роботи. Основні наукові положення, методика і рекомендації з вибору високоінформативних зондувальних сигналів, розроблені пристрої, алгоритми і програмні засоби апробовано і застосовано при модернізації радара НР метрового діапазону в процесі створення Іоносферного зонду Інституту іоносфери. Результати використовуються в створеному з метою підготовки науково-педагогічних кадрів вищої кваліфікації науково-навчальному центрі “Іоносфера” при НТУ “ХПІ” (м. Харків), а також в навчальному процесі кафедри “Радіоелектроніка” НТУ “ХПІ”. Результати дисертаційної роботи можуть бути реалізовані і при рішенні ряду прикладних задач, пов’язаних з аналізом стану іоносфери як каналу радіозв’язку, з аналізом поширення радіохвиль у неоднорідних, дисперсійних середовищах, з функціонуванням супутникової апаратури зв’язку у відкритому космічному просторі і т.д.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи у 21 самостійній публікації автором одержані і викладені особисто. У роботах, виконаних у співавторстві, здобувачеві належить: у [7, 10, 12, 24 - 27, 30] – розробка структурних і функціональних схем спеціалізованих пристроїв для обробки сигналу НР, синтез алгоритмів їх функціонування, розробка складених сигналів із використанням кодування, розробка методів вимірювань параметрів іоносфери, контролю перехідних процесів на радарів НР; 2) у [2, 5, 6, 8, 9, 22, 23] – обґрунтування доцільності і необхідності аналізу результатів зондування з використанням теорії марківських процесів, дослідження властивостей модельних АКФ, впровадження алгоритмів обробки, що використовують довірчі інтервали та вірогідність оцінок ординат АКФ, теоретичні розрахунки, що підтверджують ефективність використання густини розподілу ординат АКФ, моделювання алгоритмів обробки і проведення якісного та кількісного аналізу впливу параметрів АКФ на точність ідентифікації іоносферних параметрів, висновки; 3) у [36 - 38, 40 - 47] – синтез програм обробки та візуалізації даних, а з їх допомогою – дослідження іоносферних ефектів збурень геомагнітного поля і оцінка параметрів іоносферної плазми при проведенні різноманітних експериментів, обробка і аналіз статистичних матеріалів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи було представлено та обговорено на робочій групі *URSI* з НР (Харків) у 1995 р., на 23-й Європейській конференції з фізики плазми (Київ) у 1996 р., на семінарах з представниками обсерваторій Хайстек

(Масачусетський інститут технології, США) та Аресибо (Національний науковий фонд, США) у 1995 р. та 1999 р., на міжнародній конференції з атмосферних досліджень (Боулдер, Колорадо, США) у 1999 р., на 1-й і 2-й Міжнародних конференціях з теорії і техніки передачі, прийому й обробки інформації (Харків-Туапсе) у 1994 р. і 1996 р., на VII симпозиумі з сонячно-земної фізики Росії і країн СНД (Москва) у 1998 р., на 19 Всеросійській науковій конференції з розповсюдження радіохвиль (Казанський держуніверситет) у 1998 р., на XX Всеросійській конференції з розповсюдження радіохвиль (Нижній Новгород: Талам) у 2002 р., на 1-й, 2-й і 3-й українських конференціях з перспективних космічних досліджень (Київ: Інститут космічних досліджень НАНУ-НКАУ) у 2001 - 2002 рр., на 2-й і 3-й Міжнародних науково-технічних конференціях з проблем інформатики і моделювання (Харків: НАНУ, ПАНМ, ХВУ) у 2001 р. і 2003 р., на шести Міжнародних науково-технічних конференціях “MicroCAD” з інформаційних технологій: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я (Харків, НТУ “ХПІ”) у 1999 - 2004 рр.

Публікації. Основні результати по темі докторської дисертації опубліковано в 27 статтях у періодичних журналах і науково-технічних збірниках, що входять у перелік ВАК України (в автореферат дисертації винесено 24, з них 11 одноосібних), у 22 доповідях в працях конференцій і 15 звітах по НДР. Отримано 1 патент на спосіб і пристрій.

Структура й обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, 6 розділів, висновку, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 371 сторінку, у тому числі: 20 малюнків на 20 окремих сторінках, 10 таблиць на 6 сторінках, бібліографія з 183 найменуваннями на 18 сторінках, 9 додатків на 43 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У вступі до дисертації розглядається стан наукових розробок, спрямованих на забезпечення оперативного і докладного аналізу стану навколосемного космічного простору. Обґрунтовується актуальність теми роботи і приймається рішення про розширення в півтора разу діапазону досліджуваних висот і про збільшення кількості (за рахунок оцінки іонного складу) розраховуваних параметрів іоносферної плазми. При цьому основну увагу приділено модернізації тих інформаційних процедур (у першу чергу, пов’язаних з розрахунками АКФ і їх подальшою ідентифікацією), від яких залежить ефективна оцінка параметрів середовища в зворотній задачі розсіяння.

Показано взаємозв’язок проведених у дисертації досліджень з науковими програмами і темами, визначено об’єкт і мету досліджень, сформульовано основні задачі, відображено наукову новизну і практичну цінність досліджень. Приведено дані про особистий внесок автора, апробацію результатів роботи і про їх впровадження.

У першому розділі “Аналіз і врахування особливостей дистанційного зондування іоно-

сфери Землі за допомогою радарів некогерентного розсіяння” приводиться схема вимірювальних перетворень сигналу НР, у якій відображаються особливості процедур оцінки параметрів іоносферної плазми по сигналу розсіяння. Її аналіз показав можливість зниження похибок оцінки параметрів у випадку впровадження сучасних методологічних підходів до обробки сигналу НР і використання статистичного аналізу розв’язків зворотної задачі.

Для реалізації цієї можливості розглянуто особливості визначення параметрів іоносферної плазми в процесі аналізу статистичних характеристик сигналу НР і відмінності у розрахунках характеристик сигналу НР на різних висотних рівнях. Із аналізу випливає, що існує декілька режимів зондування, і кожний з них має певні переваги перед іншими, але у своєму обмеженому інтервалі висот. Через суттєві зміни з висотою характеру флуктуації електронної концентрації важко або неможливо, застосовуючи тільки прості зондувальні сигнали, з однаковою точністю вимірювати спектри або АКФ флуктуацій перерізу розсіяння на всіх висотних рівнях. Циклічний перехід від режиму до режиму зменшує ефективність кожного з них у зв’язку із втратою статистичної точності вимірювань і проблемами у роботі передавачів [1].

Проведено аналітичний огляд сучасного стану діючих радіолокаторів НР і їх апаратурного оснащення, вказано на недоліки окремих пристроїв. Більшість радіолокаційних систем, що використовують метод НР, проводять зондування іоносфери Землі лише до 1000 км, що визначається потенціалом радіолокаційних установок [2]. Звідси випливає, що подальше розширення діапазону досліджуваних висот без погіршення висотно-часового розділення лежить на шляху використання перспективних методологічних підходів до обробки іоносферної інформації.

З метою узагальнення і модернізації теорії та практики імпульсного зондування пропонується [3 - 6] для подальшого аналізу узагальнена схема (рис. 1) вимірювальних перетворень у методі НР. Згідно їй, є можливість використовувати як кодування зондувальних сигналів, більш точно обчислювати і ідентифікувати АКФ, так і проводити адаптивне управління і координацію експерименту. Схема містить систему розпізнавання, що складається із сукупності алгоритмічних засобів аналізу інформації при тривалих іоносферних вимірюваннях. До неї відносяться статистичні процедури розрахунку параметрів, які дозволяють при зменшенні відношення сигнал/шум до 0.01 все ще достатньо надійно оцінювати стан іоносферної плазми і проводити якісний поточний геофізичний аналіз, послідовно уточнюючи результати досліджень. В цілому ці обчислювальні перетворення синтезовані на базі системного підходу, що враховує як характеристики зондувального сигналу і просторово-часові характеристики іоносферної плазми, так і апаратурні особливості радарної системи і програмні можливості комп’ютерних мереж.

Рис. 1. Процедури одержання, інформаційної обробки та аналізу геофізичної інформації в методі НР

Другий розділ “Ефективність зондування іоносфери складними сигналами с заданими кореляційними характеристиками. Дослідження властивостей автокореляційних функцій сигналу НР” присвячено розгляду питань, пов’язаних із аналізом закономірностей кодування зондувального сигналу, розробкою варіантів складених сигналів для зондування іоносфери у висотному інтервалі одночасно від 100 км до 1500 км. Проведено математичне дослідження процесу вимірювань ординат АКФ і розгляд властивостей цих ординат при моделюванні сигналу НР, що дає можливість аналізу довірчих інтервалів і статистичної атестації його нормованих АКФ.

I. Так як процес розсіяння є випадковим процесом і може бути описаний з використанням АКФ флуктуації електронної концентрації, то виникає необхідність у подальшому розвитку теорії синтезу зондувальних сигналів із заданими кореляційними характеристиками. Це дозволяє більш точно охарактеризувати статистичні властивості сигналу НР у випадку зондування іоносфери в широкому діапазоні висот [1, 3]. На основі розвиненої дискретної моделі розсіяння проведено аналіз, який дозволив узагальнити принципи кодування зондувальних сигналів врахуванням особливостей некогерентного розсіяння радіохвиль і апаратурного оснащення радара НР метрового діапазону. Було визначено, що в результаті зондування іоносферного середовища реєструється розсіяння, яке характеризується багатомірним випадковим вектором, і яке можна описати матрицею $\mathbf{Z} = \mathbf{A} \times \mathbf{G} \times \mathbf{U}$ виду

$$\mathbf{Z}(n \times m) = \begin{pmatrix} a_1 g_1 u_{0,0} & a_1 g_2 u_{1,1} & \dots & a_1 g_m u_{n-1,m-1} \\ a_2 g_1 u_{-1,0} & a_2 g_2 u_{0,1} & \dots & a_2 g_m u_{n-2,m-1} \\ a_3 g_1 u_{-2,0} & a_3 g_2 u_{-1,1} & \dots & a_3 g_m u_{n-3,m-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_n g_1 u_{1-n,0} & a_n g_2 u_{2-n,1} & \dots & a_n g_m u_{0,m-1} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де $\mathbf{A} = \text{diag}(a_1, a_2, \dots, a_n)$ – n -елементний вектор, що описує зонд, $\mathbf{G} = \text{diag}(g_1, g_2, \dots, g_m)$ – m -елементний вектор, що описує імпульсну характеристику приймача і може представляти характеристику, узгоджену із ФМ і АМ сигналом, $\mathbf{U} = (u_{i,k})$ – матриця, елементи якої відповідають коефіцієнтам відбиття, і яка відображує просторово-часові характеристики іоносферної плазми.

Обчислення за прийнятим сигналом розсіяння ординат АКФ і синхронне їх декодування (використовуючи коефіцієнти “ ± 1 ”) можна пов’язати із закономірностями проходження вздовж висоти елементів кодової послідовності \mathbf{A} . В результаті їх аналізу виявлена можливість мінімізувати як складові, що відносяться до бічних (вище і нижче центрального шару товщиною $cT/2n$) іоносферних шарів цього періоду випромінювання, так і складові декількох попередніх періодів, а також адитивні складові шумів різної природи. Циклічно змінюючи закон кодування та усереднюючи ре-

зультати на протязі достатньо великої кількості радіолокаційних розгорток, можна компенсувати ці складові, одержавши значний вигравш у вигляді збільшеної розрізнявальної спроможності вимірювань з одночасним покращенням завадостійкості прийому.

Таке матричне кодування дозволяє використовувати для зондування сигнали з фазовою, амплітудною маніпуляцією, а також маніпуляцією напрямком обертання плоскості поляризації. На базі цих матричних кодів запропоновані складені радіолокаційні сигнали, що містять дискретні частотні елементи різної тривалості зі своїми законами зміни несучої. В цілому вони призначені для одночасного зондування всіх (в інтервалі 100 - 1500 км) висотних рівнів іоносфери (рис. 2).

Рис. 2. Структура складеного зондувального сигналу і процедура прийому його елементів

На цій основі запропоновано коди [7], що дозволяють врахувати модуляційну похибку вимірювань (визвану, наприклад, процесами відновлення робочих характеристик антенного комутатора). Вони можуть знаходитись у складі сигналу у вигляді допоміжних складових (інтервал $\phi_{\text{відновл}}$) або представляти модифіковані елементи на частоті f_3 .

II. Проведено дослідження властивостей статистичних характеристик нормованих АКФ сигналу НР на прикладі аналізу моделі випадкового комплекснозначного марківського процесу $z(t)$, який запропоновано описати стохастичними рівняннями виду $dz(t)/dt + \nu z(t) = u(t)$ (першого роду) і $d^2z(t)/dt^2 + 2\nu dz(t)/dt + \omega^2 z(t) = u(t)$ (другого роду), де $u(t)$ – породжувальний процес “білого шуму”. Цей процес характеризується нульовим середнім, інтенсивністю ν та коефіцієнтами, що задають експонентну та гармонійну складові форми його АКФ – декрементом загасання ν і середньою частотою ω .

На основі аналізу дискретної і неперервної реалізацій сигналу НР були сформульовані послідовності тверджень [8], що дозволило обґрунтувати статистичні властивості кореляційного функціоналу відповідно до випадків його адитивного та інтегрального видів

$$K_i = \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N \left(z_n^* z_{n+i} + z_n z_{n+i}^* \right), \quad K(\tau) = \frac{1}{2T} \int_0^T \left(z^*(t) z(t+\tau) + z(t) z^*(t+\tau) \right) dt \quad (2)$$

де ϕ – часовий інтервал затримок; $i = \tau / \tau_0$ – індекс дискретного інтервалу затримки; ϕ_0 – елемент затримки, значення якого кратне періоду дискретизації сигналу; $2N, 2T$ – об’єми вибірок із генеральної сукупності випадкових значень відліків нормального марківського процесу.

Були знайдені аналітичні вирази для опису характеристичних функцій $Q(\lambda)$ випадкових значень з цих функціоналів. Із цих виразів випливає, що густину розподілу ймовірностей випадкових значень кореляційного функціоналу можна інтерпретувати як згортку

$f_i(\eta) = f_+(\eta) \times f_-(\eta) = \int_{-\infty}^{\infty} f_+(\xi) f_-(\eta - \xi) d\xi$ густини розподілу ймовірностей $f_+(\eta)$ і $f_-(\eta)$, пов'язаних із кореляціями і антикореляціями у випадкових функціоналах K_i и $K(\phi)$. У свою чергу, функції $f_+(\eta)$ і $f_-(\eta)$, як і сама густина $f_\phi(z)$, визначаються як результат зворотного перетворення Лапласа від відповідних характеристичних функцій $Q_0(\lambda_+)$ і $Q_0(\lambda_-)$.

В результаті такого моделювання вперше отримані сімейства кривих густини розподілу для статистичної атестації АКФ сигналу НР, одержаних на різних висотних рівнях. Вони дозволяють розраховувати довірчі інтервали D значень їх ординат при різних умовах експерименту. Розкид ординат пов'язаний зі ступенем корельованості вхідних даних НР, випадковим характером послідовностей та залежить від кількості відліків у процесі їх висотного стробування. Така інформація дозволяє оцінити ступінь вірогідності результатів і мінімізувати помилки у подальших розрахункових процедурах.

а

Рис. 3. Сімейства густини розподілу $f_\phi(z)$ інтегральних автокореляційних функціоналів $K(\phi)$ процесу $z(t)$ першого (а) і другого (б-г) роду і значення довірчих інтервалів $D(\phi)$ для довірчої ймовірності $p = 0.8$

а

б

Рис. 4. Варіанти сімейства густини розподілу ординат адитивного кореляційного функціоналу при зменшенні числа відліків N сигналу НР

На рис.3а приведено одержані сімейства густини розподілу $f_\tau(z)$ випадкових значень z інтегрального кореляційного функціоналу для процесу, що описується рівнянням першого роду [3, 5]. Криві отримано для значень індексу затримок $\phi/\tau_0 = 0, \dots, 1.5$, інтенсивності процесу $\sigma = 1$ і декременту загасання $\nu=2$. На рис. 3б-г приведено розраховані сімейства густини розподілу $f_\phi(z)$ інтегрального кореляційного функціоналу у випадку аналізу процесу, що описується рівнянням другого роду [6, 9], з урахуванням середньої частоти ω . Криві одержано для значень індексу $\tau/\tau_0 = 0, \dots, 1.5$ при інтенсивності $\sigma = 1$, декременту $\nu=5$, а також частоти $\omega = 5$ – у першому випадку, $\omega = 7.5$ – у другому і $\omega = 10$ – у третьому.

На рис. 4 приведено варіанти сімейства кривих густини розподілу $f_i(\eta)$ ординат адитивного кореляційного функціоналу (2) в залежності від зменшення числа відліків від $N = 20$ до $N = 1$. Криві розраховані [2] для значень $\nu = 0.5$, $y = 1$ при затримках $\tau/\tau_0 = 0; 5$ (а) і $\tau/\tau_0 = 0; 2; \dots; 16$ (б).

Отримані залежності несуть статистично вичерпну інформацію, необхідну для розрахунку значень довірчих інтервалів для кожної із затримок $D(\phi)$ у залежності від рівня задаваної довірчої ймовірності p . Ці відомості використовуються при перетвореннях АКФ, аналізі і обробці даних, у тому числі і в алгоритмах розв'язання зворотної задачі в якості вагових (регуляризуючих) коефіцієнтів при ординатах експериментальних АКФ.

У третьому розділі “Ефективність визначення параметрів іоносферної плазми при багатокomпонентному іонному складі” розроблено методи і алгоритми, призначені для уточненого аналізу результатів і відбраковування завад із сигналу НР та його АКФ. Запропоновано процедури більш коректного розв'язання зворотної задачі при оцінці параметрів багатокomпонентної іоносферної плазми, адаптовані до особливостей некогерентного розсіяння в інтервалі висот 100 - 1500 км. Також розроблено процедури, що дозволяють оцінювати точність та вірогідність обчислень.

I. Представлено варіанти статистичної обробки сигналу розсіяння і його АКФ в сеансах вимірювань кінцевої тривалості і при довільних співвідношеннях сигнал/шум в умовах реального фону імпульсних і флуктуаційних завад. Для цього розроблено систему розпізнавання, що складається із сукупності технічних і алгоритмічних засобів аналізу інформації. У системі використовується апіорна інформація, яка, відповідно до обраної класифікації ознак, відносить завади до різних класів $\square_1, \square_2, \dots, \square_i, \dots$ (амплітудна перешкода у вигляді відбиття від дискретних об'єктів, перешкода із-за збою апаратури обробки, завада, викликана частотною нестабільністю передавача або приймача і т.д.). Ця апіорна інформація, необхідна для функціонування процедур розпізнавання, представлена деякою інформаційною сукупністю, що задана значеннями своїх n ознак $[x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, \dots, x_n^{(i)}] \in \square_i$ завад. Мета процедури – організація розпізнавання цих сигналів шляхом багаторазового пред'явлення системі їх ознак для подальшого виділення і виключення завад із загальної інформації.

Результати спостережень сигналу розсіяння звичайно представляють собою масиви двомірних $(n \times m)$ послідовностей, що описують висотно-часові варіації суміші сигнал+шум (рис. 5), а також ординат ненормованих АКФ і коефіцієнтів кореляції сигналу НР (рис. 6). Через статистичні помилки вимірювань, специфічний характер геофізичних явищ і перешкоди, що накладаються, ці послідовності представляють собою спотворені вибірки.

Рис. 5. Висотно-часовий розподіл суміші НР сигнал+шум та значень його потужності

Рис. 6. Висотний розподіл ненормованих АКФ сигналу НР і її коефіцієнтів кореляції

З метою аналізу вхідних даних було розглянуто особливості цих експериментальних кривих і запропоновані варіанти їх обробки. Так, на першому етапі, при прийомі сигналу НР, пропонується

проводити адаптивну апаратуру фільтрацію за допомогою аналогових фільтрів [10], а потім – додаткову обробку, використовуючи спеціальні алгоритми [11].

Перша процедура здійснюється при прийомі сигналу НР, коли в залежності від радіолокаційної затримки використовуються фільтри з різною смугою пропускання (від 5 до 20 кГц для випадку метрового діапазону радіохвиль). Використовуючи швидкодіючий комутатор, запропоновано відслідковувати ширину спектра сигналу НР, підтримуючи на кожній висотній ділянці максимальні значення сигнал/шум.

Для реалізації другої процедури запропоновано такі алгоритми.

1. Аналіз часових вибірок $x_1(h_k), \dots, x_i(h_k), \dots, x_n(h_k)$, взятих для k -ї висоти в n розгортках цифрового сигналу НР (рис. 5) з відбраковуванням аномальних значень. Використовуємий критерій – значення $x_i(h_k)$ повинні відповідати довірчому інтервалу при їх порівнянні з дисперсією $s^2(h_k)$ у частині вибірки, що залишилася після відкидання аномальних значень.

2. Аналіз ординат АКФ сигналу НР (рис. 6) та коефіцієнтів кореляції в процесі їх статистичного усереднення, взятих для суми p розгортки. У першому випадку – в групі із n АКФ з однієї висоти по кожній ординаті реалізується процедура, аналогічна алгоритмові п.1. У другому – виділення m висотних ділянок АКФ (нижче і вище максимуму іонізації, в максимумі) і аналіз уже висотного розподілу вибірок $x_p(h_1), \dots, x_p(h_k), \dots, x_p(h_m)$ з використанням критерію, що їх вибіркова дисперсія повинна знаходитись в припустимих межах на фоні отриманих за експериментальним рядом кривих різних розподілів (експоненти, суми експонент, параболи та ін.). У третьому – статистичний аналіз висотних вибірок коефіцієнтів кореляції сигналу, який використовує відомості про статистику і довірчі інтервали $D(\phi)$ із кривих густини розподілу кореляційних функціоналів (2).

Всі зазначені процедури будуються на режимі інтерактивного контролю, який дозволяє по довірчому інтервалу для довірчої ймовірності 0.68...0.95 виявити розбіжність при перевірці числових масивів на відхилення, які логічно несумісні або суперечать попередній інформації про правдоподібні межі значень сигналу на окремих висотних ділянках. Це дозволяє виявити ті екстремальні значення, що виходять за межі довірчих інтервалів. Також для виявлення груп аномальних значень проводиться аналіз тих суміжних відліків, що із великим ступенем упевненості можна вважати сильно пов'язаними.

II. Розроблені методика та алгоритми [12] виявлення і вимірювання радіальної швидкості літальних об'єктів у діапазоні значень, близьких до нульових, відбиття від яких серйозно ускладнює аналіз сигналу НР, особливо при наявності тонких спорадичних шарів. Для ідентифікації таких об'єктів зазвичай використовуються імпульси великої тривалості і кореляційні вимірювання при великих значеннях затримок, що веде до погіршення розрізнявальної спроможності Dh радіолокатора за дальністю. Використовуючи ж обчислення коефіцієнтів кореляції у характерних точках АКФ, можна ідентифікувати літальний об'єкт, вимірявши фазовий зсув прийнятого сигналу щодо

зондувального і обчисливши радіальну швидкість за приростом цього фазового зсуву за значний інтервал часу, що кратний, наприклад, періоду повторення зондувального імпульсу. При цьому значення швидкості можна обчислити, використовуючи вираз

$$V_r = -\frac{1}{2} \frac{\Delta\varphi_n^0}{360^\circ} \frac{\lambda}{nT_n}, \quad n = 1, 2, 3, \dots,$$

де V_r – радіальна швидкість об'єкта, λ – довжина робочої хвилі, T_n – період повторення зондувального імпульсу. Приріст фазового зсуву $\Delta\varphi_n^0$ (у градусах) за інтервал часу, що дорівнює nT_n , визначається із умов:

$$\Delta\varphi_n^0 = \begin{cases} \varphi_{j+n} - \varphi_j, & |\varphi_{j+n} - \varphi_j| \leq 180^\circ \\ \varphi_{j+n} - \varphi_j - 360^\circ, & \varphi_{j+n} - \varphi_j \geq 180^\circ \\ \varphi_{j+n} - \varphi_j + 360^\circ, & \varphi_{j+n} - \varphi_j \leq -180^\circ \end{cases},$$

у якому φ_j – початковий результат вимірювання фазового зсуву, φ_{j+n} – фазовий зсув, вимірний через n періодів повторення. При цьому ці фазові зсуви визначаються за двома відліками напруг $U(t)$ і $U(t+\Delta t_0)$, які на проміжній частоті пов'язані з періодом коливань t_0 рівнянням

$$\frac{U(t)}{U(t + \Delta t_0)} = \frac{\sin \varphi_i}{\sin(2\pi\Delta + \varphi_i)},$$

де $t = t_i$ – радіолокаційна затримка, Δ – фіксована частка періоду коливань проміжної частоти (наприклад, $1/3$, $1/4$, $5/4$ і т. п.).

Так як інтервал кореляції для сигналу НР значно менше періоду повторення T_n , то такий спосіб дає можливість вияви та ідентифікації сигналу від літальних об'єктів під час основного режиму вимірювань. Покращується завадостійкість методу іоносферного зондування, зокрема, при малих радіолокаційних затримках (малі висоти).

III. Проведено дослідження перспективних технологій, що дають можливість оперативної ідентифікації іоносферних параметрів для випадків одно-, дво-, і, в перспективі, багатоконпонентного іонного складу. При цьому розглянута можливість адаптації розв'язків зворотної задачі до особливостей некогерентного розсіяння радіохвиль.

Процедура визначення іоносферних параметрів та їх висотного розподілу раніше зводилась до спрощених математичних обчислень, коли розв'язання зворотної задачі заміняв аналіз і зіставлення табличних або графічних даних, які відображали поведінку ординат поблизу лише деяких характерних точок нормованих АКФ сигналу НР (положення першого ϕ_1 , другого ϕ_2 нулів функції і локальний мінімум на інтервалі між ними). Маючи значні похибки апроксимації, цей метод до того ж не дає можливості оцінювати поведінку плазми при багатоконпонентному іонному складі, тому що в цьому випадку необхідно проводити аналіз форми експериментальної АКФ на більш протя-

жному інтервалі кореляції.

Для реалізації більш коректної процедури запропоновано обчислювальні алгоритми [2, 13 - 17], що дозволяють реалізувати розв'язання зворотної задачі, використовуючи різні варіанти її виконання. Наприклад, реалізовано варіант експрес-обробки, який призначено для середнього висотного діапазону (250 - 500 км), тобто у випадку наявності однокомпонентного іонного складу. Цей варіант призначено для відстеження початку аномальних подій у іоносфері, пов'язаних із магнітними збуреннями, вибухами, землетрусами, запусками ракет. Задача при цьому – максимально скоротити тривалість обчислень при ідентифікації параметрів. Процедура полягає у такому.

Спочатку для приведення АКФ сигналу НР до АКФ флуктуацій електронної густини іоносфери здійснюється корекція її форми з урахуванням характеристики зондувального імпульсу, імпульсної характеристики приймача і вибірки по дальності. Потім реалізується алгоритм пошуку мінімуму, за допомогою якого в процесі покоординатного спуску визначається найменше сумарне відхилення усіх ($i = 1 \dots k$) скорегованих експериментальних ординат АКФ $r_{\Theta}(\tau_i, h_r; \Theta)$ від відповідних ординат із набору S теоретичних (у вигляді моделей, одержаних при розв'язанні прямої задачі) АКФ $r_T^S(\tau_i; \Theta)$. Цей функціонал має вигляд

$$\chi^2(h_r; \Theta) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k r_{\Theta}(\tau_i, h_r; \Theta) - r_T^n(\tau_i; \Theta) \quad (3)$$

де Θ – вектор іоносферних параметрів, який для випадку однокомпонентного (O^+) іонного складу приймається рівним $\Theta(P^j) = N_e, T_i, T_e, O^+, \delta P^j$, де j – число параметрів P в такому складі: N_e – електронна концентрація, T_i, T_e – іонна та електронна температури заряджених часток іоносферної плазми, δP^j – довірчі інтервали для кожного параметра як функція статистичного усереднення результатів. Розв'язок за допомогою цього функціоналу відшукується при аналізі експериментальних АКФ окремо на усіх висотних ділянках із центрами на висотах h_r ($r = 1 \dots n$), узятих через деякий інтервал.

Наступні варіанти запропонованої обробки реалізують оцінку стану іоносферної плазми з урахуванням її двохкомпонентного іонного складу [комбінація іонів кисню O^+ з молекулярними іонами M^+ (суміш O_2^+, NO^+ і N_2^+) на висотах 100 - 250 км], та трьохкомпонентного складу (комбінація іонів кисню O^+ , водню H^+ і гелію He^+ на висотах 500 - 1500 км). У цьому випадку вектор Θ приймається рівним $\Theta(P^j) = N_e, T_i, T_e, f_m^+, \delta P^j$, де f_m^+ – відносні густини для кожного із m (у загальному випадку) варіантів іонного складу.

Розглянута подальша модифікація цих алгоритмів за рахунок підвищення стійкості методу мінімізації функціоналу (3). Це визвано тою необхідністю, що збільшення розмірності вектора Θ призводить до збільшення числа неоднозначних розв'язків, особливо при зменшенні відношення

сигнал/шум. Причина в тому, що на практиці проявляються апаратурно-методичні обмеження методу НР, які значно ускладнюють процес обчислення експериментальних ординат. Так, наприклад, немає технічних можливостей реалізувати нескінченно велике число кореляційних каналів для відстеження АКФ на всьому інтервалі кореляції, що, в свою чергу, не забезпечує достатню точність у подальших Фур'є-перетвореннях. Проявляють себе і статистичний розкид ординат, використання кінцевого інтервалу для значень компонентів вектора та ін.

Неоднозначність завжди буде існувати, тому що в реальних вимірюваннях при наявності статистичних і (або) інших похибок зміна положення вектора θ в n -мірному просторі за рахунок зміни однієї із компонент вектора може бути скомпенсована зміною значень інших компонент. У зв'язку з цим було запропоновано [2] інакше поставити умову розв'язання зворотної задачі. Її розв'язанням будуть такі значення параметрів, що реалізують мінімум функціоналу (3), але при залученні допоміжних регуляризованих (по максимуму правдоподібності) операторів, які враховують вплив задаваних обмежень. Їх призначення наступне.

Нехай функціонали $F_i[r(\tau)]$, $i = 1, 2, \dots$ такі, що i -й із них визначено на функціях $r(\phi)$, що задовольняють i -й вимозі, яка накладається на ординати. Ці функціонали характеризують особливості АКФ. Аналогічно, нехай функціонали $\Psi_k[\theta(M)]$, $k = 1, 2, \dots$ такі, що кожний із них визначено на функціях $\theta[M]$, що задовольняють k -й умові, яка накладається на розподіл іоносферних параметрів. Ці функціонали характеризують середовище розсіяння – плазму. Виходячи з цього, потрібні функціонали $F_i[r] = \sum_{i=1}^n \beta_i F_i[r]$, визначені на n функціях, що задовольняють усім умовам, що накладаються на нормовані АКФ сигналу НР (або на АКФ флуктуацій електронної концентрації), і функціонали $\Psi_k[\theta(M)] = \sum_{k=1}^m \gamma_k \Psi_k[\theta]$, визначені на m функціях, що задовольняють всім умовам, що накладаються на характеристики середовища. При цьому β_i і γ_k – множники значимості, обрані відповідно до впливу вказаних умов.

Виходячи з цього, наближеним розв'язанням зворотної задачі будемо вважати параметри $\theta \in \tilde{M}$ – точки M , що реалізують мінімум загального функціоналу $F[r_\theta(\tau) - A(\theta)] + \alpha \Psi[\theta]$, де $A(\theta)$ – пряма задача, а $F[*]$ – цільовий функціонал (3). Додаток $\Psi[\theta]$ являє собою стабілізуючий функціонал або регуляризований оператор, а α – параметр значимості регуляризації, що характеризує вплив обмежень на розподіл параметрів, і який погоджено з похибкою, що знаходиться по нев'язці.

Стосовно до методу НР такі регуляризовані оператори, що використовують додаткову ап'іорну інформацію, були розроблені. Так, допоміжні дані про характер висотного розподілу параметрів іоносфери можна одержати із їх модельних уявлень (у тому числі, і як деяка лінійно-кусочна

апроксимація), із практики іоносферних спостережень або із аналізу цих параметрів на суміжних висотних ділянках. Наприклад, оператор $\{\mathbf{T}\} = (T_e, T_i)$, що враховує монотонність висотного розподілу температур електронів T_e та іонів T_i і корегує апріорний напрям вектора $\boldsymbol{\theta}$ у n -мірному просторі, має вигляд:

$$\Psi\{\mathbf{T}\} = \chi_D^2(h_r, T_i, T_e) = \left[T_e(h_r) - \left\{ T_e(h_{r-1}) + [T_e(h_{r-1}) - T_e(h_{r-2})] \cdot \frac{h_r - h_{r-1}}{h_{r-1} - h_{r-2}} \right\} \right]^2 + \left[T_i(h_r) - \left\{ T_i(h_{r-1}) + [T_i(h_{r-1}) - T_i(h_{r-2})] \cdot \frac{h_r - h_{r-1}}{h_{r-1} - h_{r-2}} \right\} \right]^2. \quad (4)$$

У якості регуляризуючого оператора, що дозволяє запобігти появі неприпустимо великих градієнтів висотного розподілу компонент іонного складу, наприклад, іонів гелію $He^+(h)$, можна використовувати функціонал виду $\Psi[He^+] = u''(h)$, де $u''(h)$ – друга похідна від функції, що описує графічний вид висотного розподілу цих іонів. Цю функцію можна одержати із підтверджених практикою моделей іоносферної плазми.

Додатково внесено зміни і в процедуру підготовки масивів первісних даних до розв'язання зворотної задачі. Замість відновлення спотворених шумами експериментальних кореляційних функцій $r_C(\tau_i, h_r; \boldsymbol{\theta})$ до виду $r_{MT}^S(\tau_i; \boldsymbol{\theta})$ запропоновано проводити зворотні перетворення за допомогою математичних операцій над їх теоретичними аналогами $r_T^S(\tau_i; \boldsymbol{\theta})$. Такий підхід [18] дозволяє уникнути збільшення дисперсії похибок експериментальних ординат АКФ із-за виключення нелінійних операцій. Крім того, підвищується точність розв'язків функціоналу, тому що додатково використовується інформація про статистичний розкид ординат із їх густини розподілу, яка розраховується для рівня задаваної довірчої ймовірності ($p = 0.68 \dots 0.95$).

В результаті використання приведених вище умов було модифіковано процедуру оцінки висотного розподілу параметрів іоносферної плазми і тепер є можливість реалізувати алгоритм розв'язання зворотної задачі за критерієм максимально можливої точності обчислень. При цьому використовується різницевий функціонал такого вигляду:

$$\chi^2(h_r; \boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left[\frac{r_C(\tau_i, h_r; \boldsymbol{\theta}) - r_{MT}^n(\tau_i; \boldsymbol{\theta})}{\Delta(\tau_i)} \right]^2 + \chi_D^2(h_r; \boldsymbol{\theta}), \quad (5)$$

де $\chi_D^2(h_r; \boldsymbol{\theta})$ – додаткові складові функції нев'язки від використання операторів регуляризації, що характеризують середовище, а $\Delta(\tau_i)$ – розрахункова виморочна дисперсія із густини розподілу (2), що характеризує АКФ і відображує процес збільшення дисперсії з ростом номера ординати АКФ і зменшенням відношення сигнал/шум.

Суттєвий ефект дає запропонований у дисертації і додатковий статистичний аналіз поверхні функції нев'язки, який виявляє групу нерельєфно визначених локальних мінімумів (рис. 7). Викор-

ристовуюючи процедуру знаходження центру їх розсіяння як деяке середнє $\bar{\theta}$ по кожному параметру P , є можливість уточнити положення справжнього мінімуму [19 - 21].

Таким чином, вперше при НР реалізовано комплекс алгоритмів обробки, адаптованих до особливостей розсіяння (характеру висотного розподілу сигналу НР) і до особливостей поведінки параметрів плазми (їх “інерційності”), в яких, до того ж, використовується інформація і про стохастичну природу відліків сигналу НР.

Варіант процедури найбільш точного розрахунку параметрів іоносферної плазми представлено на рис. 8.

Рис. 8. Процедура розрахунку параметрів іоносферної плазми по АКФ сигналу НР

IV. Проведено оцінку ефективності процедур розрахунку іоносферних параметрів при розв’язанні зворотної задачі з метою визначення довірчих інтервалів $D(\theta)$ при заданій довірчій вірогідності p результатів обчислень. Досліджувався вплив на потенційну точність обчислень ступеня методичних спотворень АКФ сигналу НР, кількості k її ординат, кроку затримки та ін. [22, 23].

Оптимізація кількості ординат АКФ пов’язана з мінімізацією витрат як машинного часу, так і об’єму записів у базу даних. Занадто мале число ординат, як і неоптимальне їх розташування, неминуче призводять до втрати інформації, знижують точність і вірогідність статистичних розрахунків, підвищує ймовірність некоректного розв’язання зворотної задачі. Для оцінки цих факторів була розроблена модель для статистичних випробувань, яка дозволяє проводити ряд чисельних експериментів. Модель складається із блоку формування (імітація поведінки іоносфери) висотного розподілу j параметрів іоносфери [вектор $\theta(P^j)$], блоку розрахунку (пряма задача) АКФ $r_{\text{мод}}$, блоку спотворень (імітація впливу апаратури прийому й обробки) АКФ за допомогою датчика випадкових чисел, блоку оцінки (зворотна задача) параметрів (вектора θ_0) по мінімуму функціоналу (5). В неї також входить блок обчислення ступеня збігу заданих і знайдених параметрів та обчислення довірчих інтервалів $D(\theta) = \bar{P}^j - \alpha \delta P^j, \bar{P}^j + \alpha \delta P^j$, де \bar{P}^j – вибіркове середнє значення оцінки j -го

параметру вектора θ_0 ; $\delta P^j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{l=1}^n \bar{P}^j - P_l^j}$; α – масштабний множник довірчого інтервалу; n – число випробувань, обумовлене точністю обчислень.

Дослідження показали, що мінімальна кількість ординат і крок за затримкою, що зумовлюють достатнє інформаційне навантаження, визначаються ступенем спотворення кривої АКФ (рис. 9) та інтервалом кореляції $[0 \dots \phi_2]$. Як показує практика вимірювань, при роботі у реальному часі можна обмежити число ординат АКФ значеннями $k = 15 \dots 20$, при цьому довірчий інтервал D при

розрахунках температур для довірчої ймовірності $p = 0.68$ не перевищить допустимої межі (<10%). Також виявлено, що розташування ординат АКФ варто вибирати з рівномірним кроком і таким чином, щоб охопити найбільш інформаційні ділянки досліджуваної кривої (від її початку і до другого нуля функції).

Рис. 9. Спотворення АКФ сигналу НР і порівняльний розрахунок довірчих інтервалів оцінок по АКФ іоносферних параметрів

У табл.1 приведено співставлення результатів такого чисельного моделювання впливу адитивного шуму системи на потенційну точність оцінки модельних (центральні точки на рис. 9) параметрів іоносферного середовища для випадку найбільш типового сеансу накопичення. Оцінка довірчих інтервалів проводилася при залученні функціоналу (5) і з урахуванням наявності суміші іонів водню, гелію і кисню в іоносфері з використанням і без процедури регуляризації (внутрішні і зовнішні лінії графіка) і статистичного аналізу розв'язків у зворотній задачі розсіяння. Показані результати для найбільш типових значень відношень сигнал/шум q демонструють можливість одержання надійної оцінки іоносферних параметрів за допомогою розроблених методик аж до $q = 0.01$. Подальше зменшення цього значення (що характерно для іоносфери вище 1500 км) викликає різкий ріст дисперсії оцінок, що в більшості випадків не може задовольнити дослідників при проведенні ними аналізу процесів в іоносферній плазмі і потребує подальшої модернізації методик ідентифікації параметрів.

Таблиця 1

Співставлення довірчих інтервалів оцінок іоносферних параметрів у методі НР, одержаних при введенні модернізованих методик розрахунку

Відношення сигнал/шум	ДТ _i , %		ДТ _e , %		ДН ⁺ , %		ДНе ⁺ , %	
	Старі	Нові	Старі	Нові	Старі	Нові	Старі	Нові
10	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0.3	0.1	0.4	0.2	0.5	0.2	0.3	0.1
1	0.9	0.3	1.2	0.6	1.4	0.5	0.5	0.2
0.5	2.5	0.8	4.7	1.6	4.8	1.2	3.3	0.6
0.1	6	1	18	2.5	12	1.8	13	1.1
0.05	27	4	28	6	37	5	34	4
0.01	52	8	55	10	61	8	58	9
0.005	>100	30	>100	45	>100	28	>100	32
0.001	>100	60	>100	85	>100	55	>100	63

Таким чином, за рахунок комбінування варіантів обробки та при використанні регуляризації забезпечується стійкість розв'язків і збіжність оцінок параметрів (електронної концентрації, електронної та іонної температур, іонних складових) при їх ідентифікації одночасно в висотному інтервалі 100 - 1500 км. В результаті цього стала максимально наближеною до однозначного розв'язання зворотна задача, а результуюча похибка в режимі детальної оцінки параметрів іоносферної плазми, яка залежить від величини q і тривалості сеансу спостережень, при $T_c = 15$ хв. зазвичай знаходиться в межах до 10 %.

Результати моделювання дозволили з'ясувати також і вплив технічних та методичних факторів на точність і надійність оцінки іоносферних даних. Значення довірчого інтервалу D для заданої довірчої ймовірності p можна використовувати при виборі оптимального сполучення точності обробки, тривалості обчислень і апаратурних ресурсів. Одержані в результаті моделювання відомості є базовими при виборі алгоритмів обробки, при визначенні складу технічних пристроїв і розподілі точностей між обчислювальними засобами.

У четвертому розділі “Структура технічних засобів для ефективної оцінки параметрів іоносфери Землі при дистанційному моніторингу методом НР” проведено розробку і комплексування технічних засобів для забезпечення функціонування радару НР як активного елемента глобальної системи дистанційного зондування іоносфери в процесі одержання, аналізу і обміну експериментальними даними в режимі реального часу.

Показано, що необхідна така організація роботи радару, коли формування зондувальних сигналів, обробка сигналу розсіяння, управління радіотехнічною системою, оперативний розрахунок параметрів і обмін інформацією здійснюються в рамках єдиної апаратурної структури. Така побудова радіотехнічної системи [3] на базі імпульсного радару НР має на увазі функціонування основних його блоків (передавача, приймача, антени з комутатором прийом-передача, блока гетеродинів). Крім того, в неї додатково вводяться: елементи для реалізації амплітудної, фазової, частотної і поляризаційної маніпуляцій на передавальній стороні, маніпулятори знаку на прийомній стороні, пристрої кореляційної обробки сигналів, елементи синхронізації та управління.

З метою подальшого розвитку систем обробки іоносферних сигналів модернізовано спеціалізований пристрій [24, 25], структура якого потребує лише програмної перебудови для реалізації обчислень спектру, кореляційної функції, обробки ФМ сигналів в режимі імітації роботи оптимального фільтра чи кореляційної обробки складених сигналів. У цю структуру входять ряд ідентичних каналів для виконання операцій типу “множення” та “складання”. Кожний канал має АЦП, ОЗП, елементи “ ± 1 ”, що дозволяють управляти знаком результату, і суматори для статистичного накопичення.

Розроблено технічні пропозиції щодо комплексування радіотехнічної апаратури радару сумісно із багаторівневою комп'ютерною мережею у єдиний автоматизований дослідницький ком-

плекс [1] для оперативної обробки даних та управління процесом вимірювань. Визначено склад інформаційно-обчислювальних засобів на базі ПК та їх взаємодію при організації конвеєрної обробки.

У разі проведення багатодобових вимірювань потрібен обмін гігабайтними об'ємами інформації між підсистемами радара. У випадку їх територіальної роз'єднаності запропоновано структуру автономного радіоканалу передачі даних [26] із підвищеною завадостійкістю.

Одночасно з процесом вимірювань запропоновано контроль правильності функціонування автоматизованої системи, а саме [1, 7, 27]:

- контроль перехідних процесів у антенно-фідерній системі радара;
- врахування і аналіз рівня адитивного шуму у каналах обробки для вибору оптимального процесу усунення завад;
- перевірка якості кореляційної обробки, тестування інформаційних каналів і візуалізація результатів проходження даних у контрольних точках;
- поточний контроль і діагностика стану апаратури із використанням імітатора сигналу НР та ін.

З метою подальшого розвитку процедур та структури інформаційної підсистеми вперше запропоновано [28, 29] реалізувати функціонування зворотної задачі, використовуючи елементи, що імітують принцип дії штучних нейронних мереж. Так як нейронні мережі забезпечують виконання швидкодіючих процедур паралельного множення матриць, ця цінна властивість дозволяє синтезувати оптимальний склад технічних засобів для значного (на порядок) підвищення загальної швидкодії алгоритмів у процедурах оцінки параметрів при обробці щільних потоків інформації.

Для цього випадку на основі радіально-базисної композиції розроблено модель такої ідентифікуючої нейронної мережі (рис. 10). На базі функціоналу (5) вона реалізує алгоритм розрахунку параметрів при багатокомпонентному іонному складі плазми і дозволяє проводити адаптивне підстроювання своїх зв'язків при зміні параметрів сигналів і характеристик технічних систем.

Рис. 10. Ідентифікуюча нейронна мережа
для реалізації розв'язання зворотної задачі у методі НР

Рис. 11. Апаратурна реалізація автоматизованої системи НР
для дистанційного зондування іоносфери Землі

В цілому, загальна архітектура [1, 30] автоматизованої системи на базі радара НР повинна мати такі структурні ланки (рис. 11):

- *радіолокаційну підсистему* для одержання вихідної інформації про кореляційні і спектральні характеристики сигналу розсіяння, яка здійснює випромінювання і прийом, аналіз сигналу НР і

первинну обробку інформаційних масивів;

– *інформаційну підсистему* для оцінки по статистичним характеристикам сигналу розсіяння параметрів іоносферної плазми за допомогою обчислювальних засобів, для вибору режимів адаптивної обробки сигналу НР і оптимальної кількості оцінюваних параметрів у залежності від зміни умов експерименту;

– *підсистему геофізичного аналізу* для управління базою даних і обміну результатами досліджень. Вона призначена для оптимізації режимів і пристроїв зондування, перспективного синтезу пристроїв обробки сигналів і алгоритмів оцінки параметрів іоносферної плазми, для аналізу геофізичної інформації, розробки адекватних моделей іоносфери, синтезу стратегічних узагальнюючих рекомендацій і т. п.

Для адаптивного контролю і корегування процесу обробки даних призначено зворотні зв'язки. Використовуючи додатково введені технічні елементи (імітатори) і спеціальні програмні засоби, вони реалізують тестування і внесення поправок у режими зондування з огляду на добові, сезонні умови та аномальні процеси в іоносфері.

П'ятий розділ “Організація локальної бази даних і її підключення до міжнародної бази радарів НР. Розробка і впровадження програмного забезпечення” присвячено аналізу інформаційних потоків у методі НР, формуванню задач інформаційної системи на базі даних некогерентного розсіяння, розробці і впровадженню локальної бази експериментальних даних радара НР ПОН, а також розробці програмного забезпечення щодо супроводу радіофізичних експериментів.

I. У відповідності зі специфікою некогерентного розсіяння і інтенсивністю (рис. 12) інформаційних потоків, які породжують необхідність оперувати у реальному часі гігабайтними обсягами, і з врахуванням особливостей структури міжнародної бази даних радарів НР сформульовані вимоги до локальної бази даних [4, 31]. Визначено функції цієї бази в цілому. Основними серед них є наступні:

- поповнення бази допоміжною інформацією інших джерел (фіксація відомостей, що надходять з допоміжних радіотехнічних систем);
- представлення результатів інформаційних перетворень у формі, зручної для подальшого аналізу, мінімізація обсягу даних і часу обміну по каналах передачі;
- формування управлінської інформації для забезпечення надійності іоносферних вимірювань і підтримки якості шляхом адаптивного керування і контролю процесу інформаційних перетворень;
- забезпечення збереження всієї геофізичної інформації, одержаної в результаті проведення експериментів.

Рис. 12. Структура інформаційних потоків при моніторингу іоносфери методом НР

Розроблено структуру локальної бази даних, що взята за основу при її впровадженні на радарі Інституту іоносфери. Вона є центральною ланкою інформаційної підсистеми і містить відомості про радіоапаратуру на всі періоди вимірювань і умови їх проведення, про висотно-часові залежності АКФ і спектрів сигналу НР, про висотно-часові варіації параметрів іоносфери над Україною за 1990 - 2005 рр. і результати їх аналізу.

Реалізовано програмний інтерфейс і оговорено формати експериментальних даних [32, 33, 35], призначених для загальнодоступного користування у світовій мережі радарів НР. Оговорено процедури для їх оперативної передачі [1, 34] по Інтернет у базу даних радарів НР *MADRIGAL* (Масачусетський інститут технології, Бостон, США) і у центр даних *CEDAR* (Національний центр атмосферних досліджень, Боулдер, США).

Після включення радару ПОН до складу світової мережі радарів НР у міжнародному каталозі станцій йому було присуджено особисті коди, що ідентифікують технічний склад і призначення цієї радарної установки, алгоритми її функціонування та процедури обробки при різних режимах випромінювання (включаючи прості і складені сигнали).

II. Для обробки результатів іоносферних вимірювань створено і впроваджено програмне забезпечення по підтримці взаємодії ряду функціонально нестандартних задач у методі НР, на базі якого створено сучасну діалогову інформаційно-довідкову систему [1, 35]. До неї увійшли розроблені автором (табл.2) спеціалізовані пакети для роботи у реальному часі, задачею яких є:

- організація управління радіотехнічною апаратурою;
- конвеєрна обробка результатів вимірювань із функціонуванням процедур збору, аналізу та сортування інформації;
- ідентифікація стану іоносферної плазми за АКФ сигналу НР;
- управління базою даних, візуалізація, обмін і порівняння результатів радіофізичних досліджень з результатами, отриманими у північно-американському регіоні тощо.

Також реалізовано програмне забезпечення процедур надійного аналізу і статистичної оцінки нестационарних іоносферних процесів, аналізу сезонно-добових варіацій їх параметрів, аналізу розвитку збурень у залежності від рівня геомагнітної активності. Воно дозволяє узагальнювати всі результати для одержання більш повних відомостей про стан навколосемного космічного простору в українському регіоні.

Таблиця 2

**Загальна структура розробленого програмного забезпечення
автоматизованої системи на базі радару НР
Інституту іоносфери НАН і МОН України**

ЗАПУСК І СУПРОВІД РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ПІДСИСТЕМИ		ІНТЕРАКТИВНА ОБРОБКА У ІНФОРМАЦІЙНІЙ ПІДСИСТЕМІ		ПІДГОТОВКА ДО ГЕОФІЗИЧНОГО АНАЛІЗУ	
Синтез матриць зондувальних сигналів	Керування апаратурою	Одержання АКФ і усунення за- вад	Параметрич- на ідентифі- кація АКФ сигналу НР	Управління базою даних радару НР	Представ- лення і обмін результатами
Побудова моделі сиг- налу розсі- яння	Вибір параметрів режимів	Приєм та ци- фрове пе- ретворювання сигналу	Формування бібліотеки те- оретичних АКФ	Формування бази даних радару НР	Одержання добових та сезонних залежностей
Пошук елементів матриць кодованих сигналів	Програму- вання вводу пристроїв у синхронізм	Обчислення АКФ і спектра- льних характе- ристик сигналу	Детальний розрахунок по АКФ пара- метрів іоносфери	Поповнення і збереження нових експе- риментальних даних	Порівняння результатів із теоретични- ми розрахун- ками
Синтез складених кодованих сигналів	Контроль параметрів пристроїв і відобра- ження стану системи	Статистичний аналіз АКФ си- гналу НР на фоні завад та їх виділення	Оперативна візуалізація ра- діофізичних даних при їх обробці	Перетворення радіотехнічної інформації для геофізичного аналізу	Перетворення форматів, обмін резуль- татами із закордон- ними обсерва- торіями
Модельна перевірка процедур зондування і обробки даних	Екс- прес-обробка АКФ, реалі- зація адап- тивного управління	Формування сеансів необхідної тривалості	Тесто- во-діагностичні інформаційні процедури	Візуальне відображення результатів експериментів	Порівняння результатів досліджень на різних радарх НР

Система одержання АКФ і експрес-обробка функціонують у автоматичному режимі при використанні мов Асемблер і TurboBasic. Система ідентифікації і контролю іоносферних даних використовує мови TurboBasic і C⁺⁺ сумісно з Windows-додатками.

У шостому розділі “Результати експериментальних досліджень структури і динаміки іоносферної плазми” наведено приклади оцінки іоносферних процесів, одержаних із використанням розроблених у дисертації пристроїв і методик обробки сигналу розсіяння. Також приведено зіставлення експериментальних даних харківської радарної системи НР із даними радарів обсерваторій Хайстек (Масачусетс, США) і Аресібо (Пуерто-Ріко, США) при взаємному обміні інформацією.

I. Аналіз висотної і часової поведінки іоносферної плазми здійснювався при оцінці розподілу іоносферних параметрів у координовані дні, які визначаються міжнародним геофізичним календарем для світової мережі радарів НР. При цьому в широкому діапазоні висот проводилися експерименти по розрахунку основного набору параметрів іоносферної плазми: перерізу розсіяння, концентрації електронів, температури електронів і іонів, іонного складу та вертикального дрейфу

плазми.

Експерименти були спрямовані на дослідження морфологічної картини розвитку іоносферних процесів в умовах середньоширотної іоносфери європейського регіону. При цьому накопичено значний обсяг інформації про процеси у плазмі в зовнішній іоносфері (до висот 1500 км), та про іоносферно-магнітосферно-термосферну взаємодію. Були отримані дані, що описують поведінку іоносфери у періоди геомагнітних збурень і дозволяють оцінити висотний розподіл її параметрів при різних рівнях цієї активності.

Отримані експериментальні дані щодо детальної структури іоносфери також і у нижній частині області F, що знаходиться у спокійному стані [36, 37], а також в умовах магнітних збурень [38, 39]. Вони дозволили підтвердити правильність гіпотези щодо зв'язку електронної концентрації N_e іоносфери з сонячною і геомагнітною активністю, а також із параметрами нейтральної атмосфери, які визначають законі рекомбінації, за якими відбуваються процеси втрат іоносферної плазми. Приведені узагальнені результати, що ілюструють варіації основних параметрів іоносфери у залежності від часу доби, сезонів року і рівня сонячної активності.

Експерименти дозволили дослідити: комплекс фізичних явищ, що приводять до виникнення шаруватої структури іоносферної плазми у нижній частині області F; відносний іонний склад в області переходу від молекулярних іонів O_2^+ та NO^+ , що є домінуючими на висоті 120 км, до іонів O^+ , з яких складається плазма області F (рис. 13, низ); довготні відмінності параметрів іоносфери нижньої частини області F при порівнянні їх з результатами, одержаними на радарх обсерваторій Хайстек (МІТ, США) і Іркутська (Інститут сонячно-земної фізики СВ РАН, Росія) та ін.

Для дослідження добових і сезонних варіацій кінетичних температур іоносферної плазми також проводився ряд експериментів [40, 41], коли порівнювалися між собою літні і зимові значення температур іонів. З'ясувалося, що в області F влітку й взимку T_i має різний хід протягом доби. Це, насамперед, пояснюється тим, що взимку іоносфера знаходиться в умовах більш низької освітленості Сонцем. Крім того, в літніх умовах більш різко виражені варіації температури, що досягають величини ~ 500 К/доба, для висот 300 км, а у зимових умовах ця величина складає ~ 250 К/доба. Як у літніх, так і в зимових умовах мінімальні значення T_i протягом доби приходяться на другу годину, а максимальні – на 14 - 16 годин місцевого часу.

Рис. 13. Результаті вимірювань іонного складу іоносферної плазми над Харковом

Експериментальні результати також дозволили отримати закономірності, що характеризують циклічні зміни поведінки іонів водню (рис. 13, верх) та гелію (рис. 13, середина) в зовнішній іоносфері над Харковом. Вимірювання показали [42], що в період низької сонячної активності в

спокійних геофізичних умовах вночі висоти, на яких відносна концентрація іонів водню H^+ складає 10 - 40 %, у грудні на 50 - 100 км нижче, ніж у червні. Іони гелію He^+ взимку і влітку залишаються другорядними іонами в багатоконпонентній плазмі зовнішньої іоносфери. Їх відносна концентрація протягом року не перевищує значень 15 - 25 %. Добові варіації висоти шару іонів гелію носять різний характер, наближаючись до поведінки більш легких іонів водню взимку і більш важких іонів кисню – влітку. Особливість сезонної поведінки іонів гелію He^+ полягає в тому, що взимку їх відносна концентрація перевищує літні значення приблизно у 2.5 рази вночі, та у 2 рази – вдень.

Удосконалені методики дозволили провести експерименти зі спостережень реакції іоносфери на часткове (73 %) затемнення Сонця 11 серпня 1999 р., а також затемнення 31 травня 2003 р. [43, 44]. Було отримано нові результати, у тому числі і про зміну процесів переносу плазми, що поряд із процесами іонізації і рекомбінації впливають на розповсюдження заряджених часток. Установлено, що вдень під час затемнення відбувається порушення балансу іонізації у шарі F2 і короткочасна перебудова іоносфери до нічних умов.

За допомогою харківської автоматизованої системи зареєстровано ефекти впливу на іоносферу потужного короткохвильового випромінювання, що проявляється у різкому посиленні іонної та електронної частин спектру некогерентного розсіяння [45]. Також досліджувались динамічні процеси в області F іоносфери під час інтенсивної магнітної бурі [46, 47] на основі вимірювань швидкості вертикального переносу плазми і її варіацій, що в збурений день змінює знак і стає висхідною у висотному інтервалі 200 - 500 км. Таку поведінку швидкості V_z можна пояснити як збільшенням спрямованої до екватора меридіональної складової швидкості нейтрального вітру, так і, ймовірно, спустошенням геомагнітної силової трубки. Останнє може супроводжуватися зменшенням граничного потоку плазми до протоносфери за рахунок глобального перерозподілу нейтрального водню і зменшення його концентрації. Установлено, що ці ефекти призводять до порушення процесів обміну плазмою між нижньою і верхньою атмосферою.

II. З метою порівняння інформаційних технологій розрахунку параметрів іоносферної плазми, що використовуються на різних радарних установках, проведено ряд експериментів з перехресної обробки даних харківського радара НР та радара обсерваторії Хайстек. Було зафіксовано значну відмінність результатів оцінки параметрів при аналізі сигналу НР верхніх іоносферних висотних рівнів, що визвало необхідність уточнення особливостей процедур ідентифікації параметрів.

Аналіз методик показав, що так як зовнішня іоносфера характеризується ростом температур іонів і електронів та суттєвим зменшенням значень електронної концентрації в залежності від висоти, то в деяких випадках в перерізі розсіяння необхідно враховувати співвідношення між дебаєвським радіусом екранування λ_D і робочою частотою. При робочій довжині хвилі $\lambda_0 = 1.90$ м (радар Інституту іоносфери) похибки визначення температур та іонних складових до висоти 1500

км через неврахування λ_D складають лише тисячні частки відсотка, тому дебаєвський радіус не приймався у розрахунок. При використанні же зондувальної хвилі з довжиною $\lambda_0 = 0.682$ м, прийнятої на радарі НР у Мілстоун-Хілі, похибки стають досить великими, і це призводить до значних (десятки відсотків) систематичних неточностей у роботі харківських методик по експериментальним даним обсерваторії Хайстек.

Врахування цього дало можливість провести ряд впевнених порівнянь і уточнень (рис. 14) результатів вимірювань різними радарми і виявити при цьому довготні відмінності у поведінці середньоширотної іоносфери європейського і північноамериканського регіонів. Ці відмінності виявляються, насамперед, у різних денних значеннях концентрації (визваних різними тепловими режимами східної і західної півкулі Землі). Вони обумовлені, в першу чергу, неспівпаданням географічного і геомагнітного полюсів, що призводить до деякої асиметрії іоносферних властивостей.

Рис. 14. Результати оцінок іоносферних параметрів над Мілстоун-Хілом при порівнянні різних методик обробки даних

База даних харківського радару НР з інформацією про стан зовнішньої іоносфери має унікальне значення для теоретичних досліджень фізики іоносфери і моделювання іоносферних процесів. Вона використовується для рішення практичних задач, у тому числі, наприклад, для калібрування результатів одночасних вимірювань легких іонів на супутниках *NASA*. Дані харківського радару неодноразово були використані дослідниками США і країн СНД для врахування впливу іоносфери на функціонування багатьох радіотехнічних систем.

З радарми міжнародної мережі і з міжнародною базою *MADRIGAL* налагоджено обмін [31, 32] результатами розрахунків іоносферних параметрів за періоди вимірювань, що обумовлені Міжнародним геофізичним календарем: з 1996 р. почався повноцінний двосторонній обмін першими результатами досліджень іоносферних параметрів, з 1999 р. – експерименти поповнилися результатами про характер висотного розподілу іонів водню, а з 2001 р. – також і іонів гелію над українським регіоном.

У додатку наведені: акт впровадження результатів дисертаційної роботи; відзиви провідних закордонних дослідників – представників світової мережі радарів НР; розрахунки по обґрунтуванню властивостей кореляційного функціоналу сигналу НР; деякі програмні й алгоритмічні реалізації по інтерактивній обробці даних НР, їх геофізичному аналізу і представленню для міжнарод-

дного обміну; демонстраційні матеріали про принципи оцінки стану космічного простору над європейським регіоном; частина результатів досліджень структури і динаміки іоносферної плазми над Харковом з переліком дат проведення більшості геофізичних експериментів.

ВИСНОВКИ

У дисертації в рамках існуючої теорії НР одержали подальший розвиток теоретичні положення, моделі і алгоритми, а також реалізована практична база для розширення інформаційних можливостей методу НР. Це сприяло розв'язанню важливої науково-прикладної проблеми – підвищення ефективності визначення параметрів іоносфери при дистанційному моніторингу навколоземного космічного простору.

Показано, що режими, які використовуються для імпульсного зондування і обробки даних, та радіотехнічні пристрої не дозволяють проводити повноцінний і якісний іоносферний моніторинг іоносфери Землі на висотах понад 1000 км. Це пов'язано із неможливістю значно підняти енергетичний потенціал радіолокаційної установки, а також і з недовикористанням можливостей зондувальних сигналів та недосконалістю аналізу сигналу НР при розв'язанні зворотної задачі розсіяння.

Основні висновки, які підтверджені експериментальними даними, зводяться до наступного.

1. Показано, що для організації ефективних іоносферних спостережень необхідно використовувати системний підхід до процесу вимірювань. При цьому досліджуване середовище, пристрої і процедури зондування, а також алгоритми обробки повинні розглядатися як елементи загальної системи, причому з метою одержання максимально достовірної іоносферної інформації зв'язки між ними і конкретне виконання елементів визначаються умовами спостережень. В результаті узагальнено і запропоновано для реалізації комплекс інформаційних перетворень з впровадженням процесів адаптивного зондування, ефективного виділення геофізичної інформації із статистичних характеристик сигналу НР та оперативного обміну і уточнення результатів спостережень.

2. Запропоновано нові підходи до синтезу зондувальних сигналів із заданими кореляційними властивостями. Вперше розроблено складені зондувальні сигнали, що мають в своєму складі елементи для поточного контролю технічного стану радара НР. Розроблено дискретну модель формування АКФ сигналу розсіяння для аналізу можливостей зондування одночасно нижніх і верхніх висотних рівнів. На її основі дано математичне обґрунтування принципів кодування елементів зондувальних сигналів, які враховують специфіку некогерентного розсіяння радіохвиль і апаратурне оснащення радарів НР і, зокрема, радара НР метрового діапазону.

3. Проведено математичне моделювання процесу розрахунків нормованих АКФ сигналу НР. Під час цього на основі аналізу марківських процесів одержано аналітичні вирази, що імітують кореляційні функціонали, результат же аналізу їх властивостей дозволив вперше обчислити сімейства

кривих густини розподілу випадкових значень ординат АКФ. Це дає можливість проводити їх статистичну атестацію. Вперше оцінені значення довірчих інтервалів АКФ в різних умовах експерименту, особливо при аналізі сеансів короткої тривалості, що дозволяє мінімізувати похибки, пов'язані з апаратурними і методичними факторами.

4. Одержали подальший розвиток процедури розв'язання зворотної задачі електродинаміки для випадку її адаптації до особливостей некогерентного розсіяння радіохвиль. В руслі цього розглянуто питання узагальнення і подальшого розвитку процедур регуляризації оцінок, що вперше дозволило істотно звузити інтервал можливих розв'язків задачі і підвищити завадостійкість алгоритмів при малих (до 0.01 по потужності) відношеннях сигнал/шум. В результаті у 1.5 раз розширено висотний діапазон зондування, а результуюча похибка вимірювань при довірчій імовірності 0.68 ... 0.95 (відповідно $[\pm y \dots \pm 2y]$) не перевищує 10 %, що підтверджують результати чисельного моделювання.

5. Уперше розроблено стійкі алгоритми для визначення параметрів іоносферної плазми при багатокомпонентному іонному складі. Реалізовано ряд оптимальних (як за критерієм мінімуму обчислювальних операцій, так і максимуму точності обчислень) розрахунків висотно-часового розподілу перерізу розсіяння $y(h, t)$, електронної концентрації $N_e(h, t)$, електронної $T_e(h, t)$ та іонної $T_i(h, t)$ температур, дрейфу $V_r(h, t)$ іоносферної плазми, складових іонної компоненти: іонів атомного кисню $O^+(h, t)$, гелію $He^+(h, t)$, водню $H^+(h, t)$ і молекулярних іонів $M^+(h, t)$ (суміш NO^+ , O_2^+ та ін.).

В остаточному підсумку ці відомості дозволяють розраховувати добові і сезонні залежності іоносферних параметрів на висотному інтервалі одночасно від 100 км до 1500 км.

6. Вперше розроблено модель, яка на основі одночасного розв'язання прямої та зворотної задач дає можливість визначати ефективність статистичного оцінювання параметрів іоносферної плазми при багатокомпонентному іонному складі. З її допомогою для заданих довірчих інтервалів досліджено вплив вибору кількості і кроку по затримці експериментальних ординат АКФ, а також рівня адитивного шуму на потенційну точність обробки інформації. Отримані відомості є базовими при визначенні складу технічних засобів, точності обчислювальних операцій, швидкодії алгоритмів обробки.

7. Запропоновано сумісну дослідницьку систему з використанням власне радара НР та мережі інформаційно-обчислювальних засобів, яка на новому функціональному рівні сприяє покращанню якості вимірювань. При цьому одержали подальший розвиток різноманітні варіанти систем зондування та структура операційної частини кореляційного каналу для обробки кодованого сигналу будь-якої складності. Також вперше запропоновано модель багатоканальної структури для реалізації оперативного розв'язання зворотної задачі, що використовує принцип дії елементів штучних нейронних мереж. Запропоновано структуру швидкодіючого радіоканалу для передачі результатів

між територіально віддаленими підсистемами радара. Розглянуто адаптивне керування апаратурою і поточний контроль ходу іоносферних вимірювань.

Дані розробки сприяли створенню автоматизованого комплексу засобів – Іоносферного зонду Інституту іоносфери НАН і МОН України, призначеного для спільних міжнародних аерокосмічних досліджень і оперативного відстеження стану і динаміки іоносфери Землі. Як наслідок успіхів, досягнутих у розробці перспективних технологій з моніторингу іоносфери, за рекомендацією Національного наукового фонду США харківський радар включено до складу учасників міжнародної мережі радарів НР.

8. Реалізовано програмне забезпечення для підтримки одночасної взаємодії ряду функціонально нестандартних задач. Вони реалізують як управління радаром НР і імовірнісний аналіз сигналу розсіяння у реальному часі, так і оцінку статистичних характеристик сигналу НР і параметрів нестационарних іоносферних процесів, з відображенням їх сезонно-добових варіацій. Програмне забезпечення також реалізує обмін результатами з іншими обсерваторіями з метою одержання уявлень про стан навколоземного космічного простору як над європейським регіоном, так і над іншими регіонами земної кулі.

9. Проведено розробку локальної бази іоносферної інформації радара НР Інституту іоносфери, що відповідає особливостям НР. Організовано її зв'язок з міжнародною базою даних радарів НР, для чого синтезовано програмно-алгоритмічні процедури обробки експериментальних даних для оперативної їх передачі по e-mail і Інтернет у базу *MADRIGAL* (Масачусетський інститут технологій, США) і в центр даних *CEDAR* (Національний центр атмосферних досліджень, США).

10. В процесі апробації працездатності й ефективності розроблених методів, алгоритмів і пристроїв при проведенні систематичних координованих іоносферних досліджень отримано значний обсяг експериментальних даних про структуру і динаміку іоносферної плазми, що дозволило за період 1990-2005 рр. сформувати унікальний інформаційний масив про стан іоносфери над середніми широтами європейського регіону. Цей масив за своїм обсягом і якісній стороні відповідає міжнародним стандартам.

11. Стосовно до стану іоносфери над українським регіоном, у рамках фундаментальних і прикладних досліджень, екології та інших наук експериментальні дані вперше дозволили одержати таке:

- визначено особливості розподілу гелію He^+ і водню H^+ на висотах 500 - 1500 км у періоди низької і високої сонячної активностей;
- зареєстровано особливості поведінки молекулярних іонів на висотах 100 - 250 км;
- оцінено вплив на стан і поведінку іоносфери над Харковом особливостей іоносфери у магнітосполученій точці (о. Мадагаскар);
- зареєстровано ефекти іоносферних бур, викликаних магнітними бурями і процесами, що

відбуваються на Сонці;

– виявлено ефекти різкого посилення іонної та електронної частин спектру некогерентного розсіяння при впливі на іоносферу потужного короткохвильового випромінювання;

– відзначено ефекти утворення штучних іоносферних збурень, викликаних антропогенним впливом на іоносферу.

Таким чином, в результаті розвитку теоретичних та практичних аспектів методу некогерентного розсіяння вирішена важлива науково-прикладна проблема – підвищення ефективності визначення параметрів іоносфери в інтервалі висот 100 - 1500 км за умов, коли відсутня можливість подальшого збільшення енергетичного потенціалу радарної системи. Використання основних положень дисертації в існуючій світовій мережі радарів НР дозволить здійснювати надійний контроль і прогнозування глобальних процесів в іоносфері в її спокійному і збуреному станах.

СПИСОК ОСНОВНИХ ПУБЛІКАЦІЙ

1. Пуляев В.А. Автоматизированная система исследования параметров ионосферной плазмы на базе радара некогерентного рассеяния // Радиотехника. Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. – 2003. – № 135. – С. 78-86.
2. Мазманишвили А.С., Пуляев В.А., Рогожкин Е.В. Особенности определения высотных зависимостей параметров ионосферной плазмы при НР // Космічна наука і технологія. – Київ, 2004. – Т. 10, № 2/3. – С. 36-44.
3. Пуляев В.А. Автоматизация процесса определения параметров ионосферной плазмы радаром некогерентного рассеяния // АСУ и приборы автоматики. Всеукр. научн.-техн. сб. – 2004. – № 127. – С.22-28.
4. Пуляев В.А. Программное обеспечение автоматизированной системы радара некогерентного рассеяния // Вестник НТУ “ХПИ”: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2003. – № 26. – С. 91-94.
5. Мазманишвили А.С., Пуляев В.А. Статистические и расчетные зависимости в задачах адаптивного оценивания параметров ионосферной плазмы // Вестник НТУ “ХПИ”: Системный анализ, управление и информационные технологии. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2003. № 18 . – С. 51-56.
6. Мазманишвили А.С., Пуляев В.А. Корреляции и антикорреляции в задачах анализа опытов по некогерентному рассеянию радиоволн // Космічна наука і технологія. – Київ, 2004. – Т. 10, № 4. – С. 74-80.
7. Рогожкин Е.В., Пуляев В.А., Антонова В.А. Особенности контроля переходных процессов на радарх НР // Системи обробки інформації. – Харків: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2001. – Вип. 6(16).

– С. 98-103.

8. Мазманишвили А.С., Пуляев В.А. Распределение корреляционного функционала при точечном измерении данных // Известия вузов. Радиофизика. – Н. Новгород, 2004. – Т. XLVII, № 9. С. 789-797.

9. Мазманишвили А.С., Пуляев В.А. Обоснование статистических свойств корреляционного функционала сигнала НР // Радиоэлектроника и информатика. Всеукр. научн.-техн. журнал. – 2004. – № 3. – С. 23-27.

10. Пуляев В.А., Капустян А.М., М.И. Егорова. Устройство квазиоптимальной фильтрации сигналов некогерентного рассеяния // Вестник НТУ “ХПИ”: Автоматика и приборостроение. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2004. – № 17. – С. 91-94.

11. Пуляев В.А. Информационная обработка сигнала НР на фоне импульсных и флуктуационных помех // Вестник НТУ “ХПИ”: Радиофизика и ионосфера. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2002. – Т. 5, № 9. – С. 57-60.

12. Патент 20022075909 України, МКИ G 01 S 13/95. Спосіб визначення малих радіальних швидкостей в когерентних РЛС і пристрій для його здійснення // Є.В. Рогожкін, В.О. Пуляєв, В.В. Лізогуб; Заявл. 03.01.01; Опубл. 15.08.01, Бюл. № 7. – 9 с.

13. Пуляев В.А. Обработка сигнала некогерентного рассеяния при вычислении параметров ионосферной плазмы // Космічна наука і технологія. Додаток. – Київ, 2003. – Т. 9, № 2. – С. 164-168.

14. Пуляев В.А. Оценка параметров ионосферной плазмы в методе некогерентного рассеяния радиоволн // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2003. – 5(5). – С. 12-14.

15. Пуляев В.А. Вычислительные методы при обработке корреляционных функций сигнала НР // Вестник ХГПУ: Физические аспекты современных технологий. – Харьков: ХГПУ. – 2000. – Вып. 103. – С. 94-96.

16. Пуляев В.А. Вычислительные методы при обработке корреляционных функций сигнала НР // Труды VII Междунар. научн.-техн. конф. “MicroCAD '99” “Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье”. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – С. 30.

17. Пуляев В.А. Расчет параметров ионосферной плазмы по корреляционной функции сигнала некогерентного рассеяния // Сб. тезисов 1-й укр. конф. по перспективным космическим исследованиям. – Киев: Ин-т косм. иссл. НАНУ-НКАУ. – 2001. – С. 134-137.

18. Пуляев В.А. Влияние аппаратурных факторов на выбор обработки сигнала некогерентного рассеяния // Вестник НТУ “ХПИ”: Ионосфера. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып. 31. – С. 87-89.

19. Пуляев В.А. Статистическое оценивание параметров ионосферы в методе некогерентного рассеяния радиоволн // Радиотехника. Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. – 2002. – № 129. – С.

98-102.

20. Пуляев В.А. Алгоритм анализа функций невязки в процессе расчета ионосферных параметров по АКФ сигнала некогерентного рассеяния // Вестник НТУ “ХПИ”: Автоматика и приборостроение. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2001. – № 4. – С. 216-218.

21. Пуляев В.А. Минимизация ошибок при анализе среднеквадратичных отклонений в процессе обработки корреляционных функций сигнала НР // Труды Междунар. научн.-практ. конф. “MicroCAD '2001” “Наука и социальные проблемы общества: человек, техника, технология, окружающая среда”. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2001. – С. 30.

22. Мазманишвили А.С., Пуляев В.А. Разработка информационных технологий оценки параметров ионосферной плазмы в методе некогерентного рассеяния радиоволн // Космічна наука і технологія. – Київ, 2003. – Т. 9, № 4. – С. 73-78.

23. Мазманишвили А.С., Пуляев В.А. Метод статистических испытаний эффективности алгоритмов оценки ионосферных параметров в методе некогерентного рассеяния // Вестник НТУ “ХПИ”: Радиофизика и ионосфера. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2003. – Т. 4, № 7. – С. 59-64.

24. Пуляев В.О., Рогожкін Є.В., Хлебніков О.М. Мікропроцесорна система для вимірювання характеристик випадкових процесів // Праці 1-ї Міжнар. конф. “Теорія і техніка передачі, прийому і обробки інформації”. – Ч. 1. – Харків: ХПІ. – 1994. – С. 44.

25. Пуляев В.О., Хлебніков О.М. Комп’ютерна система обробки випадкових сигналів // Праці 2-ї Міжнародної конференції “Теорія і техніка передачі, прийому і обробки інформації”. – Ч. 1. – Харків-Туапсе: ХІРЕ. – 1996. – С. 64.

26. Пуляев В.А., Лизогуб В.И. Галенин Е.П. Канал передачи данных для организации потоковой обработки ионосферной информации // Вестник НТУ “ХПИ”: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2004. – №34. – С. 153-156.

27. Рогожкин Е.В., Пуляев В.А., Антонова В.А. Особенности контроля переходных процессов на радарх НР // Сб. тр. межд. научн.-техн. конф. “Проблемы информатики и моделирования”. – Харьков: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2001. – С. 4.

28. Пуляев В.А. Определение ионосферных параметров в методе некогерентного рассеяния на основе использования искусственных нейронных сетей // Вестник НТУ “ХПИ”: Радиофизика и ионосфера. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2004. – № 23. – С. 83-86.

29. Пуляев В.А. Статистическая обработка ионосферных данных с помощью нейронной сети // Труды XII Междунар. научн.-практ. конф. “MicroCAD '2004” “Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье”. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2004. – С. 672.

30. Pulyayev V. A., Belozarov D. P. The automatic system for investigating the parameters of ionospheric plasma and the monitoring of the environment // Proc. the 9th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics WMSCI-2005 (July 10-13), – Orlando, Florida (USA) – 2005. – P.

115.

31. Пуляев В.А. База ионосферных данных Харьковского радара НР // Труды X Междунар. научн.-практ. конф. "MicroCAD '2002" "Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье". – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2002. – С. 431-432.

32. Пуляев В.А. Разработка алгоритмов преобразования данных Харьковского радара согласно требований Международного формата // Труды VIII Междунар. научн.-техн. конф. "MicroCAD '2000" "Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье". – Харьков: ХГПУ. – 2000. – С. 23.

33. Pulyayev V.A. Kharkov's incoherent scatter radar: the data parameters for the CEDAR DATA BASE // Proc. the Incoherent Scatter Radar Working Group Workshop: Incoherent scatter. – USA: Millstone-Hill. – 1999. – P. 19.

34. Пуляев В.А. База данных международной сети радаров НР // Труды XI Междунар. научн.-практ. конф. "MicroCAD '2003" "Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье". – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2003. – С. 602.

35. Пуляев В.А. Программное обеспечение автоматизированной системы радара НР // Сб. тр. 3-й межд. научн.-техн. конф. "Проблемы информатики и моделирования". – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2003. – С. 8.

36. Dziubanov D.A., Grigorenko Ye.I., Pulyayev V.A., Lysenko V.N. Cyclical Variations of the F2 Region Parameters from the IS Radar Data // Proc. the 23rd European Physical Society Conference on "Controlled Fusion and Plasma Physics". – Kiev: Bogolyubov Institute for Theoretical Physics. – 1996. – P. 442.

37. Живолуп Т.Г., Пуляев В.А. Сезонные вариации относительного содержания молекулярных ионов по данным Харьковского радара НР // Сб. тезисов 2-й укр. конф. по перспективным космическим исследованиям. – Киев: Ин-т косм. иссл. НАНУ-НКАУ. – 2002. – С. 152.

38. Taran V.I., Goncharenko L.P., Pulyayev V.A. Diagnostics of the artificial ionospheric disturbances above Kharkov by using IS Radars // Proc. the International Radio Science Meeting. – Vol 2. – USA: Millstoun-Hill. – 1995. – P. 70.

39. Pulyayev V.A. Kharkov's radar: Ionospheric investigation by incoherent scatter method // Proc. the Incoherent Scatter Radar Working Group Workshop: Incoherent scatter. – USA: Boulder, Colorado, National Center for Atmospheric Research. – 1999. – P. 15.

40. Григоренко Е.И., Боговский В.К., Емельянов Л.Я., Кияшко Г.А., Пуляев В.А., Смагло Н.А. Вариации параметров ионосферы в периоды высокой и низкой солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. – М.: 2001. – Т. 41, № 2. – С. 199-203.

41. Григоренко Е.И., Боговский В.К., Емельянов Л.Я., Кияшко Г.А., Пуляев В.А., Смагло Н.А. Вариации параметров: N_e , T_e , T_i в периоды высокой и низкой солнечной активности // Труды VII

Симпозиума по солнечно-земной физики России и стран СНГ. – М.: ИЗМИРАН. – 1998. – С. 126-127.

42. *Таран В.И., Григоренко Е.И., Гринченко С.В., Живолуп Т.Г., Пуляев В.А.* Исследование высотного распределения ионов водорода // Труды VII Симпозиума по солнечно-земной физики России и стран СНГ. – М.: ИЗМИРАН. – 1998. – С. 125-126.

43. *Григоренко Е.И., Пазюра С.А., Пуляев В.А., Таран В.И., Черногор Л.Ф.* Динамические процессы в ионосфере во время геокосмической бури 30 мая и затмения Солнца 31 мая 2003 года // Космічна наука і технологія. – Київ, 2004. – Т. 10, № 1. – С. 12-25.

44. *Боговский В.К., Григоренко Е.И., Пазюра С.А., Пуляев В.А., Скляров И.Б., Таран В.И., Черногор Л.Ф.* Эффекты солнечного затмения 31 мая 2003 года, развивающиеся на фоне восстановительной фазы магнитной бури // Сб. тезисов 3-й укр. конф. по перспективным космическим исследованиям. – Крым, Кацивели: Ин-т косм. иссл. НАНУ-НКАУ. – 2003. – С. 143.

45. *Гончаренко Л.П., Дзюбанов Д.А., Пуляев В.А., Таран В.И.* Нелинейные эффекты в ионосфере, зарегистрированные радаром некогерентного рассеяния в Харькове // Труды XIX-й Всерос. науч. конф. “Распространение радиоволн”. – Татарстан: Казанский госун-тет. – 1999. – С. 351-352.

46. *Емельянов Л.Я., Пуляев В.А., Скляров И.Б.* Высотно-временные зависимости скорости движения ионосферной плазмы, полученные по корреляционным измерениям методом НР // Труды XX Всерос. научн. конфер. по распространению радиоволн. – Нижний Новгород: Талам. – 2002. – С. 48-49.

47. *Таран В.И., Лысенко В.Н., Григоренко Е.И., Пуляев В.А.* Ионосферные эффекты магнитной бури по наблюдениям на радаре некогерентного рассеяния в Харькове // Вестник ХГПУ: Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып. 7, Ч. 3. – С. 381-383.

АНОТАЦІЇ

Пуляев В.О. Підвищення ефективності визначення параметрів іоносфери при дистанційному моніторингу методом некогерентного розсіяння. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за фахом 05.07.12 – дистанційні аерокосмічні дослідження. – Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського “ХАІ”, Харків, 2006.

У дисертації з метою підвищення ефективності визначення параметрів іоносфери при дистанційному моніторингу іоносфери Землі методом некогерентного розсіяння (НР) у широкому інтервалі висот розглядаються питання узагальнення теорії і практики зондування та обробки сигналу некогерентного розсіяння, а також багатопараметричної ідентифікації стану плазми по автокореляційним функціям цього сигналу.

Розроблено теоретичні положення, сформульовано принципи побудови систем імпульсного зондування і обробки, створено алгоритми їх функціонування при синтезі інформаційних технологій, адаптованих до особливостей некогерентного розсіяння радіохвиль. Модифіковано методи і алгоритми аналізу та обробки сигналу розсіяння, що сприяло подальшому розвитку теорії розв’язку зворотної задачі електродинаміки.

Обґрунтовано структуру спеціалізованого пристрою багатоканальної обробки, синтезовано загальну структуру апаратних засобів для їх спільної взаємодії з багаторівневою комп’ютерною мережею у випадку функціонування у складі міжнародної мережі радарів НР. Організовано локальну базу даних радара, розроблено прикладне програмне забезпечення, отримано нові експериментальні дані про структуру і динаміку іоносферної плазми в інтервалі висот 100 – 1500 км.

Ключові слова: іоносферний моніторинг, дистанційне зондування, некогерентне розсіяння радіохвиль, параметри іоносферної плазми, радіолокаційні пристрої, автокореляційна функція, зворотна задача розсіяння.

Пуляев В.А. Повышение эффективности определения параметров ионосферы при дистанционном мониторинге методом некогерентного рассеяния. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.12 – дистанционные аэрокосмические исследования. – Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков, 2006.

В диссертации, с целью повышения эффективности определения параметров ионосферы Земли при ее дистанционном мониторинге методом НР в широком интервале высот, рассматриваются и обобщаются вопросы теории и практики импульсного зондирования, эффективной обработки сигнала некогерентного рассеяния (НР), многопараметрической идентификации состояния ионосферной плазмы по статистическим характеристикам этого сигнала – автокорреляционным

функциям (АКФ).

Показано, что радиолокационные системы, использующие метод НР, позволяют наземными средствами проводить исследование ионосферы Земли в интервале высот, который без применения перспективных информационных технологий определяется лишь потенциалом радиолокационной установки: импульсной мощностью передатчиков, эффективной поверхностью используемых уникальных антенн и чувствительностью приемников.

Так как эти характеристики радиолокационных систем ограничены, дальнейшее увеличение точности измерений, расширение диапазона исследуемых высот, а также увеличение высотного-временного разрешения лежат на пути использования комплексного методологического подхода к реализации более эффективных зондирующих сигналов и алгоритмов обработки ионосферной информации.

В процессе решения этого комплекса задач развиты теоретические положения, сформулированы и обоснованы принципы построения импульсных радаров НР и систем обработки информации. На основе современных информационных технологий разработаны алгоритмы функционирования, процедуры обработки, адаптированные к особенностям некогерентного рассеяния радиоволн в ионосферной плазме.

Разработана дискретная модель сигнала рассеяния на выходе радиоприемной системы и проведен анализ, который позволил обосновать принципы кодирования зондирующих сигналов, учитывающие особенности некогерентного рассеяния радиоволн и аппаратурное оснащение радара НР метрового диапазона.

В рамках этой модели предложен синтез зондирующих сигналов с заданными характеристиками в виде составных сигналов, в которые включены элементы для проведения и текущего контроля, что в целом предназначено для одновременного (в одном сеансе) и надежного исследования ионосферы в высотном интервале от 100 км до 1500 км.

Проведено математическое моделирование процесса измерения АКФ сигнала НР при исследовании корреляционного функционала, определенного на комплекснозначном нормальном марковском процессе. Получены аналитические выражения, описывающие статистические свойства такого функционала и найдены плотности распределения вероятностей для статистической аттестации ординат АКФ сигнала рассеяния, рассчитаны их доверительные интервалы. Приведен пример использования найденных плотностей распределения для повышения достоверности оценки параметров ионосферной плазмы. Разработаны методы и алгоритмы, предназначенные для статистического анализа и фильтрации отсчетов сигнала НР и его АКФ в случае слабого, до 0.01 (по мощности) от уровня шумов, сигнала рассеяния.

Рассмотрены технологии обработки ионосферной информации, использующие минимизацию решения обратной задачи рассеяния (теория электродинамики) применительно к особенностям

НР при импульсном зондировании с учетом локальных характеристик плазмы на различных высотных интервалах. С целью сужения диапазона возможных решений обратной задачи предложены процедуры, обеспечивающие регуляризацию и сходимость оценок за счет использования дополнительной априорной информации о характере высотного распределения параметров.

Получили дальнейшее развитие вопросы построения систем обработки сигналов НР и обобщена структура специализированного устройства. Предложена модель реализации системы многоканальной обработки, предназначенная для решения обратной задачи и использующая принцип действия элементов искусственных нейронных сетей.

Проведен синтез общей структуры аппаратных средств для организации процесса зондирования ионосферной среды и выделения радиофизической информации, используя комплексирование технических средств совместно с многоуровневой компьютерной сетью.

Сформирована локальная база экспериментальных данных при исследовании ионосферы радаром НР Института ионосферы НАН и МОН Украины (г. Харьков), реализовано ее подключение к международной базе радаров НР. Разработано прикладное программное обеспечение для управления информационными потоками в методе НР. При апробации результатов исследований получены достоверные экспериментальные данные о структуре и динамике ионосферной плазмы при погрешности измерений до 10 %.

Ключевые слова: ионосферный мониторинг, дистанционное зондирование, некогерентное рассеяние радиоволн, параметры ионосферной плазмы, радиолокационные устройства, автокорреляционная функция, обратная задача рассеяния.

Pulyayev V.A. Increase of efficiency of parameters definition of an ionosphere at remote monitoring by a method of an incoherent scatter. – Manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Technical Science in specialty 05.07.12 – Remote aerospace investigations. – National Aerospace in University named after N.Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, 2006.

In a thesis is regarded an issue generalizations of the theory both practice of parameters definition and processing of a signal of incoherent radio wave scatter, multiparameter identification on autocorrelation functions of a signal of scattering of a condition of ionized plasma. The theoretical positions designed, the principles of construction of systems of probing and data processing are formulated, the algorithms of their operation are created with the purpose of researches efficiency of an ionosphere at remote monitoring by a method of an incoherent scatter in a broad interval of altitudes.

The methods both algorithms of the analysis and processing of a signal of scattering designed, using the theory of a return problem of an scatter. The structure of the specialized device of multiway processing, general scheme of hardware means for a team working with a multilevel computer network is updated at their operation in a structure of a global system of remote monitoring of the Earth ionosphere. The local

database of the radar is organized, the applied software designed, the experimental data about structure and dynamics of ionospheric plasma are obtained.

Keywords: ionospheric monitoring, remote sounding, incoherent radiowave scatter, parameters of ionospheric plasma, radar devices, autocorrelation function, the return problem of a scatter.

Відповідальний за друк Лукін В.В.
Підписано до друку 29.12.2005 р.
Умовн.-друк. арк. 1.2. Замовлення 475.
Тираж 100 прим. Безкоштовно.

Міністерство освіти і науки України
Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського
“Харківський авіаційний інститут”
61070, м. Харків, вул. Чкалова, 17
Видавничий центр “ХАІ”
61070, м. Харків, вул. Чкалова, 17