

Министерство высшего и среднего специального образования
Р С Ф С Р

Горьковский ордена Трудового Красного Знамени
научно-исследовательский радиопизический институт (НИРФИ)

П р е п р и н т № 306

РАДИОФИЗИЧЕСКИЙ ПРИЕМНО-ПЕРЕДАЮЩИЙ КОМПЛЕКС "ДЪМЕР"
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН

Н.М. Богута
В.А. Иванов
В.А. Кульчицкий
Ю.В. Нога
В.П. Урядов
В.В. Шумаев

Горький 1990

Богута Н. М.^х, Иванов В. А.^{хх},
Кульчицкий В. А.^х, Нога Ю. В.^х,
Урядов В. П., Шумаев В. В.^{хх}

РАДИОФИЗИЧЕСКИЙ ПРИЕМНО-ПЕРЕДАЮЩИЙ КОМПЛЕКС "ДЫМЕР" ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЙ ИОНОСФЕРЫ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН. // Препринт
№ 306. - Горький: НИРФИ. - 1990. - 58 с.

УДК 550.388.2

Описана функциональная схема приемно-передающего комплекса "Дымер" для исследования ионосферы и распространения коротких радиоволн методами НЗ и ВНЗ. Представлены результаты экспериментальных исследований статистических, доплеровских и угловых характеристик кругосветных сигналов, сигналов обратно-рассеянных мелкомасштабными неоднородностями субполярной и модифицированной среднеширотной ионосферы. Описан алгоритм цифровой обработки монограмм наклонного ЛЧМ зондирования на базе ПЭВМ "Нейрон". Представлены экспериментальные результаты работы автоматизированного ЛЧМ ионозонда. Обсуждаются возможности использования комплекса "Дымер" в решении научных и практических задач ионосферного распространения КВ.

^х - сотрудники Киевского отделения Радиоастрономического института АН УССР

^{хх} - сотрудники Мари́йского политехнического института

В в е д е н и е

Выдвигаемые наукой и практикой задачи в области ионосферного распространения коротких радиоволн предполагают проведение комплексных радиофизических исследований состояния ионосферы и распространения радиоволн с использованием различных диагностических средств, оснащенных современной вычислительной техникой. На базе полугона КО РИАН УССР в п. Димер Киевской области создан автоматизированный приемно-передающий комплекс, предназначенный для исследования ионосферы и распространения радиоволн методами НЗ и ВНЗ и оснащенный аппаратурой для угловых, доплеровских измерений и аппаратурой ЛЧМ зондирования для диагностики ионосферного КВ радиоканала. Автоматизация измерений осуществляется на базе ПЭВМ "Нейрон" в реальном масштабе времени. В настоящей работе дается описание приемно-передающего комплекса "Димер" и представлены результаты экспериментальных исследований по НЗ, ВНЗ естественной и модифицированной ионосферы.

В первом разделе дается описание комплекса, включающего КВ передатчик "ВНЗ" мощностью 25 кВт, две передающие горизонтальные ромбические антенны типа РГ $\frac{65}{4}$ -I, антенную решетку для измерений углов прихода, аппаратуру для измерений доплеровских, угловых, статистических характеристик КВ сигналов и аппаратуру ЛЧМ зондирования. Здесь же рассматриваются методы цифровой обработки и анализа ионограмм наклонного ЛЧМ зондирования на базе ПЭВМ "Нейрон".

Во втором разделе представлены результаты экспериментальных исследований кругосветных сигналов, полученные за 1983-1989 гг.

В третьем разделе приведены результаты измерений методом ВНЗ характеристик КВ сигналов, обратно-рассеянных мелкомаштабными ионосферными неоднородностями субполярной и модифицированной среднеширотной ионосферы.

В заключение сформулированы основные результаты работы и обсуждаются возможности использования комплекса в решении научных и практических задач ионосферного распространения КВ.

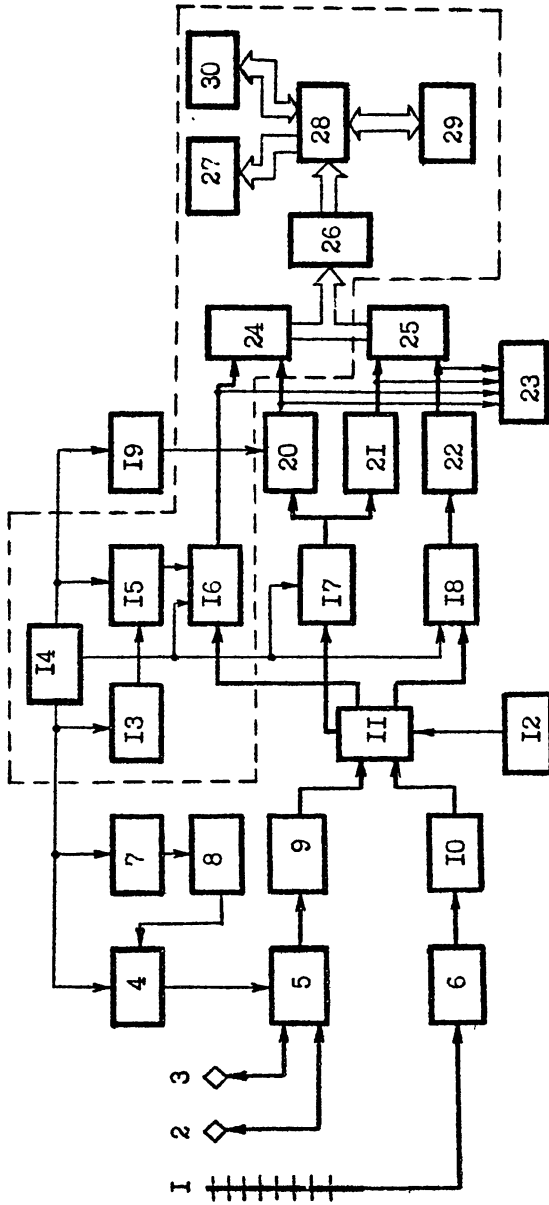
I. Аппаратурное и программное обеспечение приемно-передающего комплекса "Дымер"

Автоматизированный приемно-передающий комплекс, расположенный в п. Дымер Киевской области предназначен для проведения исследований неоднородной структуры ионосферы и условий распространения декаметровых радиоволн на трассах различной протяженности и ориентации. Комплекс оснащен аппаратурой для работы в режиме ВЧЗ, макетного ЛЧМ зондирования ионосферы, измерения вертикальных углов прихода и доплеровских спектров КВ сигналов. Обработка данных наблюдений и управление комплексом осуществляется на базе ЭВМ "Нейрон". Структурная схема комплекса приведена на рис. I.1.

I.1. Антенны и аппаратура для ВЧЗ ионосферы

Антенная система для излучения и приема КВ сигналов состоит из двух горизонтальных ромбических антенн типа $P1_{\frac{65}{4}}I(\lambda_0=18m)$, ориентированных на географический север (азимут $\varphi=0^\circ$) и на северо-восток ($\varphi=51_0^\circ$). Выбор антенны производится дистанционно с пульта управления антенным переключателем.

Для измерений вертикальных углов прихода используется антенная решетка, состоящая из 8 горизонтальных диполей, установленных на мачте высотой 93м. Сигналы с диполей через коаксиальные фидеры одинаковой электрической длины подводятся к блоку формирования диаграммы направленности (ВФДН). ВФДН предназначен для формирования диаграммы направленности в вертикальной плоскости с помощью комбинаций синфазного и противофазного сложения сигналов с различных диполей. В таблице I.1 для ряда используемых частот приведены расчетные значения диаграммы направленности (угол прихода Δ , ширина главного лепестка $-\Delta\lambda$) на выходах В1 - В4 ВФДН. Сигналы с выходов В1 - В4 с помощью быстродействующего переключателя поочередно подключаются ко входу РЧУ "Катран", детектируются и через АЦП вводятся в ЭВМ "Нейрон" для регистрации и обработки данных.



1-антенная решетка; 2,3-антенна РГ⁶⁵ I; 4-КВ передатчик "ВЯЗ" 2М-УС; 5-антенный переключатель; 6-БФДН; 7-счетчик-делитель Ф5093; 8-блок синхронизации и стробирования; 9-блок защиты входа РЛУ; 10-быстродействующий переключатель; 11-антенный коаксиатор; 12-ГСС Г4-158; 13-синхронизатор Ч7-15; 14-стандарт частоты Ч1-69; 15-ДЧМ-синтезатор; 16,17,18-РЛУ "Каграм"; 19-синтезатор частоты Ч6-31; 20-блок регистрации ДСЧ; 21-блок регистрации амплитуд; 22-блок угловых измерений; 23-магнитограф НО-67; 24-анализатор спектра СК4-72/2; 25-АП; 26-блок сопряжения; 27-принтер Д-100; 28-ПЭВМ "Нейрон"; 29-видеомонитор; 30-накшитель на гибких магнитных дисках.

Рис.1.1

Таблица I.I.

Частота кГц	Вых.1		Вых.2		Вых.3		Вых.4	
	α_1 ,град	δ_1 ,град	α_2 ,град	δ_2 ,град	α_3 ,град	δ_3 ,град	α_4 ,град	δ_4 ,град
16604	6	6	14	6	30	7	85	=
18197	6	6	12,5	6	27	6,5	65	14
19830	4,5	5	11,5	6	24	6	54	9

Для лонгитудинальных неоднородностей естественного и искусственного происхождения и изучения распространения КС используется КВ передатчик ВЯЗ" 2М-УС мощностью 25 кВт. При работе передатчика в приемника на облучение ромбическую антенну применяется переключатель прием-передача, реализованный на четвертьволновых отрезках двухпроводной линии и разрядниках. Дополнительно, для защиты приемника используется блок защиты, выполненный на р-п диодах. Уровень подавления зондирующего импульса на входе приемника составляет 60дБ, вносимое ослабление в режиме приема 1дБ.

Управление работой передатчика "ВЯЗ" осуществляется с помощью блока синхронизации и стробирования, который формирует синхронимпульсы с заданной частотой следования и требуемой длительностью для запуска передатчика, стробимпульсы с регулируемой задержкой в интервале 2...200мс для стробирования отраженных моношерой сигналов по дальности и импульсы управления быстродействующим переключателем. В качестве опорного генератора приемно-передающего комплекса используется высокостабильный рубидиевый стандарт частоты Ч1-69. Калибровка амплитуд регистрируемых сигналов производится с помощью генератора стандартных сигналов Г4-158.

1.2. Аппаратура для измерения доплеровского сдвига частоты

Для исследования спектральных характеристик КВ сигналов используется специально разработанная доплеровская установка, позволяющая

тая проводить измерения как при наклонном (НЗ), так и возвратно-наклонном (ВНЗ) зондировании. В случае ВНЗ установка представляет собой импульсно-доплеровский радиолокатор.

Принцип работы заключается в следующем. Передатчик излучает последовательность импульсов на несущей частоте f_c , длительностью τ_c , и частотой повторения F_c . Излучение сигналов производится на одну из ромбических антенн, прием - на те же ромбические антенны, либо на антенную решетку. Принятый сигнал строится по дальности и после преобразования в РЧУ "Катран" поступает на фазовый детектор, где сравнивается с когерентным сигналом синтезатора частоты ЧЗ-31. Значение фазы запоминается и в паузе между принятыми импульсами подается на ФНЧ с переключаемой частотой среза F . Спектр зондирующего сигнала передатчика имеет вид отдельных линий, смещенных на величину F_c , а его полная ширина равна $\frac{1}{\tau_c}$. В процессе ионосферного распространения происходит уширение спектра, а сам спектр смещается на величину F_q . Чтобы избежать неопределенности в определении величины ДСЧ частота следования импульсов передатчика F_c выбирается исходя из условия $F_q < 2F_c$, а частота среза ФНЧ определяется неравенством $F_q < F < 2F_c$. Для определения знака ДСЧ производится растрейка синтезатора на величину $\Delta > |F_q|$. Сигнал с выхода ФНЧ дополнительно усиливается и подается на низкочастотный анализатор спектра СКМ-72/2. Результаты анализа по цифровому каналу вводятся в ПЭВМ "Нейрон" в виде сканов, состоящих из 200 точек, где производится усреднение статистически независимых реализаций, накопление и вывод 3-х мерных изображений на печать. С целью дальнейшей обработки сигналы ДСЧ параллельно записываются на магнитограф Н067. Детальная обработка данных ДСЧ проводилась на ЭВМ СОУ-2 с помощью алгоритма БП автокорреляционной функции. С целью уменьшения дисперсии и получения устойчивых оценок спектра применялся метод стягивания окна / 8 /. Использовалось корреляционное окно Тьюки

$$w_T(u) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi u}{M} \right), & |u| \leq M \\ 0, & |u| > M \end{cases}$$

где M - точка отсечения.

При обработке в ЭВМ вводился массив $N = 2048$ точек, интервал дискретизации определялся наивысшей частотой в спектре ДСЧ и требованием теоремы Котельникова и обычно был равен $1/F_c$, где F_c - частота следования импульсов передатчика, записанная на параллельной дорожке магнитографа.

1.3. Структура приемного комплекса ДЧМ зондирования ионосферы

Интенсивно развиваемые в последние десятилетия исследования ионосферы и распространения радиоволн показывают перспективность использования ДЧМ ионозонда для ВЗ, НЗ, и ВНЗ естественной и модифицированной ионосферы /Г-6/. Приемный пункт "Дымер" оснащен аппаратурой ДЧМ зондирования, предназначенной для работы автоматизированного комплекса в региональной сети станций ДЧМ НЗ и ВНЗ с целью решения научных и практических задач ионосферного распространения КВ. Упрощенная структурная схема приемной части ДЧМ ионозонда выделена на общей блок-схеме аппаратурного комплекса (рис.1.1) пунктирной линией. Приемная часть включает приемник, синтезатор ДЧМ сигналов, эталон частоты, синхронизатор, специпроцессор БМ, ПЭВМ "Нейрон" с видеомонитором, НМД, принтером. Основные технические характеристики приемной части ДЧМ ионозонда приведены в таблице 1.2

Таблица 1.2

№	Параметр	Величина
1.	Диапазон частот, Δf	1...30 МГц
2.	Скорость изменения частоты, f	0,01...1 МГц/с
3.	Полоса пропускания, ΔF	0,3:1,0:3,0:10,0 кГц
4.	Коэффициент шума	≤ 3 дБ
5.	Чувствительность	0,1 мкВ
6.	Динамический диапазон	70 дБ
7.	Временное разрешение, Δt	$\Delta F / 2^{10} \cdot f$
8.	Частотное разрешение, δf	$1/\Delta t$
9.	Регистрация и отображение результатов зондирования	НМД, принтер, видеомонитор
10.	Программное обеспечение	пакет прикладных программ, включающий алгоритмы по очистке ионограмм НЗ от помех, построения ДЧМ, АЧХ, алгоритмы прогнозирования ионосферного КВ радиоканала по данным наклонного ДЧМ зондирования

Принцип работы ЛЧМ монозонда достаточно подробно описан в/3/. Кратко он заключается в следующем. Синхронизация временной работы приемной и передающей частей ЛЧМ монозонда осуществляется с помощью синхронизирующих ЛЧМ радиопульсов./3/. Формируемый генератором ЛЧМ сигнал в качестве гетеродинного поступает на приемник, в котором происходит селекция и усиление принятого сигнала, его преобразование и сжатие по спектру в низкочастотную область. Низкочастотный сигнал с выхода приемника записывается в аналоговой форме на магнитную ленту для документирования результатов зондирования и параллельно через АЦП преобразуется в цифровую форму с разрядностью удовлетворяющей заданной точности обработки данных зондирования. Спектральная обработка сигналов производится с помощью спецпроцессора БИМ, который совместно с ПЭВМ преобразует данные зондирования в ДЧХ и АЧХ трассы. В качестве примера на рис.1.2,1.3 показаны ДЧХ и АЧХ на трассах наклонного ЛЧМ зондирования Йошкар-Ола-Дымер, Хазарск-Дымер, иллюстрирующие изменение модовой структуры сигнала с течением времени суток.

Программное обеспечение (ПО) ЛЧМ комплекса позволяет автоматизировать процесс регистрации, документирования и обработки данных зондирования в реальном масштабе времени.

1.4. Методы цифровой обработки и анализа монограмм наклонного ЛЧМ зондирования на базе ПЭВМ "Нейрон"

Йошкар-Ола - Динер

Дата: 10.02.90 г. Время: 06^h47^m

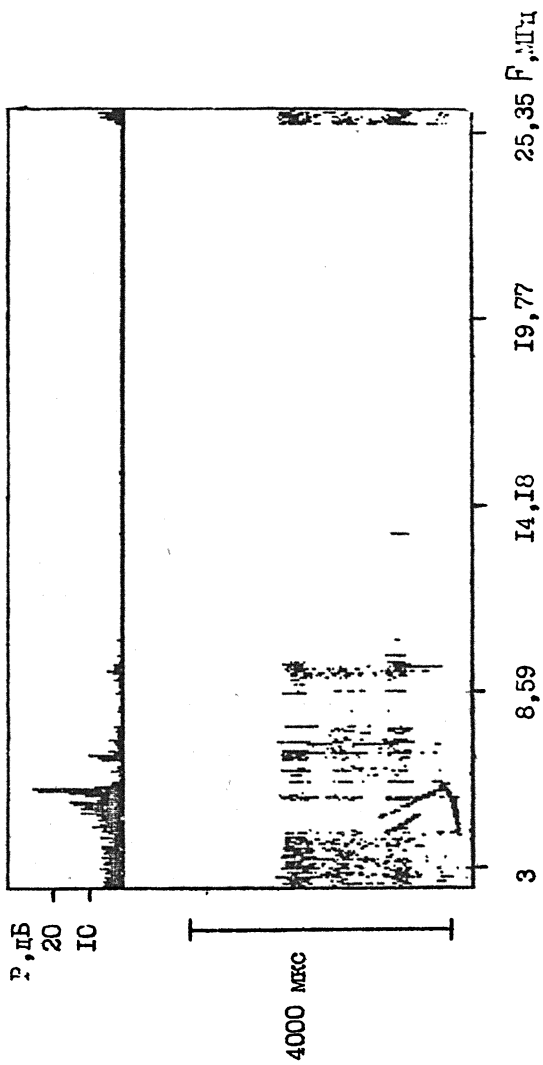


Рис. I.2 а

Иошкар-Ола - Динэр

Дата: 07.02.90 г. Вре.и: 12.09^м

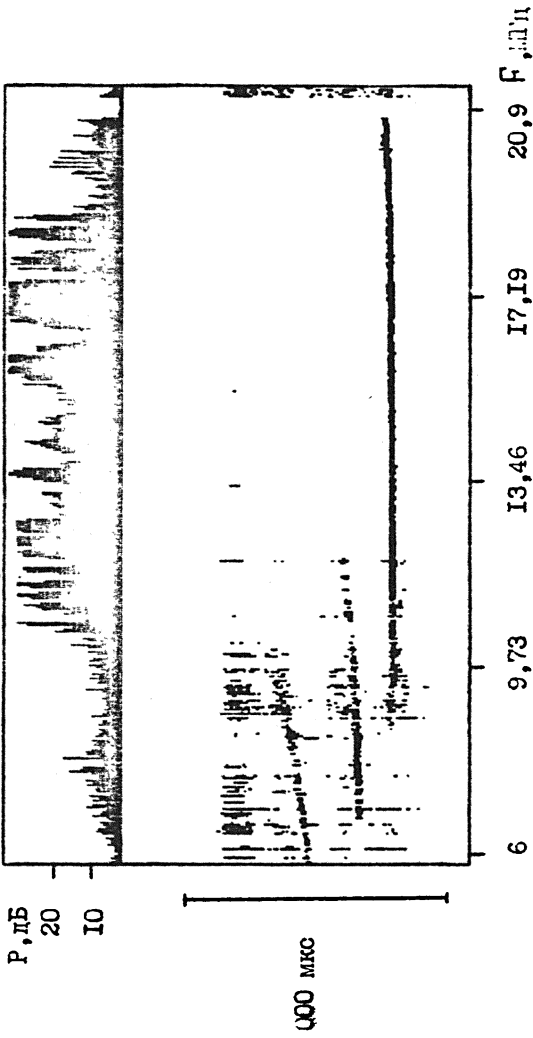


Рис. I.2 б

Йошкар-Ола - Дымер

Дата: 09.02.90 г. Время: 17.51^hm

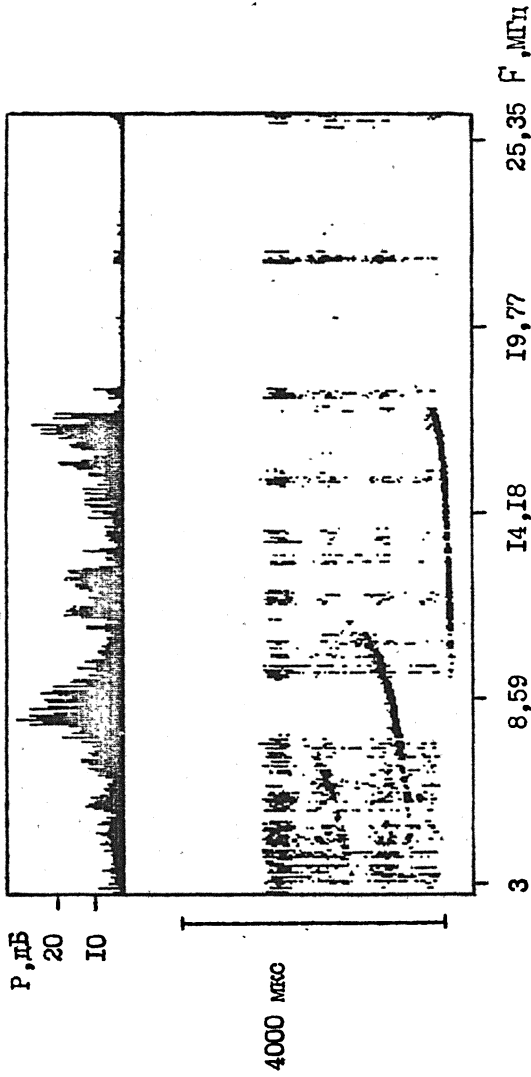


Рис. I.2 В

Хабаровск - Динер
21.02.90 г. 12 ч.43 м.

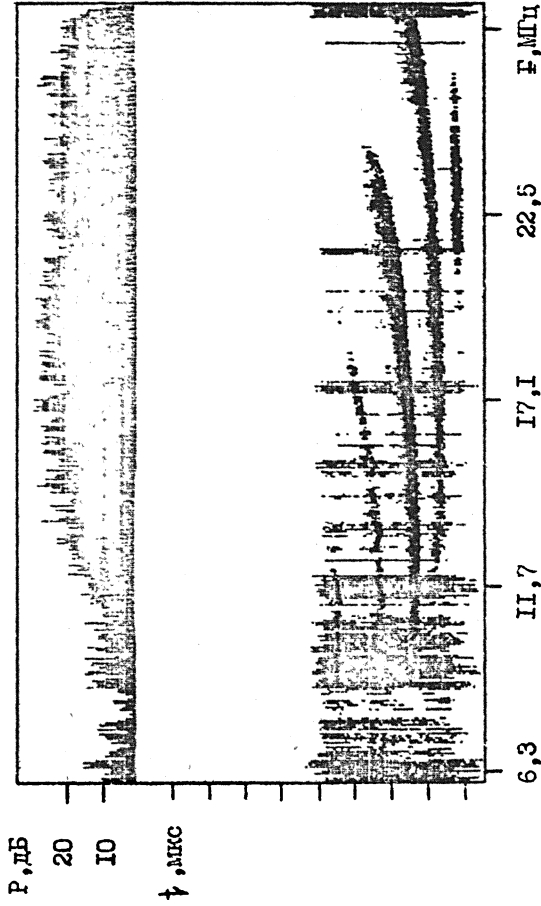
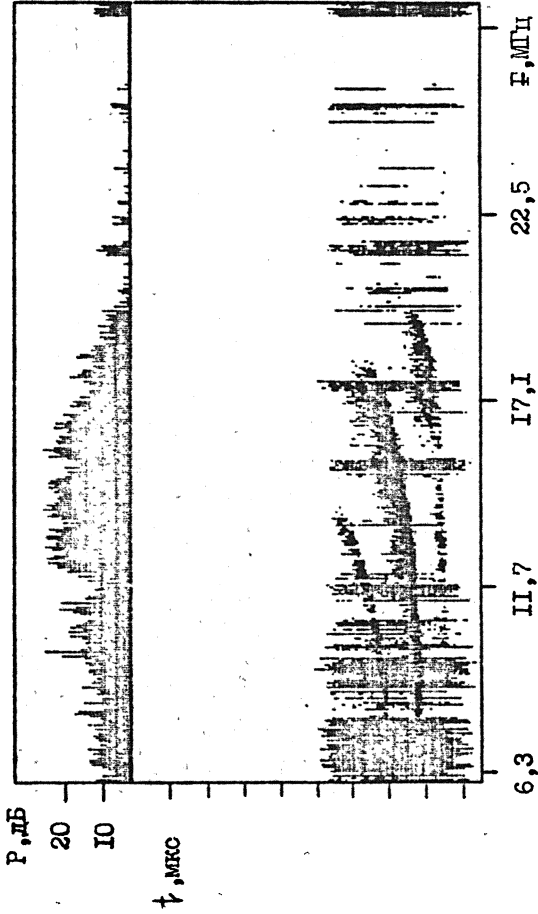


Рис. I.3 а

Хабаровск - Димер
21.02.90 г. 15 ч.53 м.



ГО.И.3.6

Хабаровск - Дымер

20.02.90 г. 21 ч.05 м.

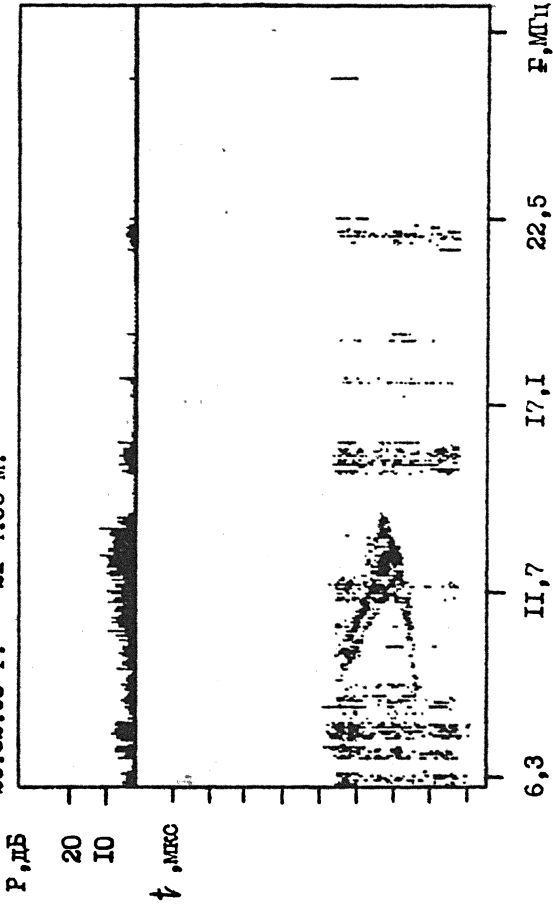


Рис. I.3 B

1.4.1. Первичная обработка данных ЛЧМ НЗ ионосферы

При анализе данных ЛЧМ НЗ ионосферы необходимо решить достаточно трудную проблему определения параметров, характеризующих состояние ионосферы и КВ радиоканала по исходному информационному массиву больших размерностей, включающему в себя кроме полезной информации и шумовые компоненты. Традиционно решение указанной проблемы осуществляется в четыре этапа:

- съем исходных данных ЛЧМ ионозонда в ПЭЕМ;
- подавление помех и шумов;
- построение ДЧХ по следам отражений;
- определение требуемых параметров (МНЧ, ННЧ, отношение сигнал/шум и т.д.).

Для того, чтобы обеспечить съем спектров в реальном масштабе времени со спектроанализатора в ЭЕМ, была разработана и реализована на языке низкого уровня (ассемблер) подпрограмма, выполняющая функции драйвера и дешифровщика одновременно. За время одного сеанса зондирования (~1 мин.) она снимает порядка 1600 спектров (сканов), каждый из которых состоит из 200 8-разрядных отсчетов. Этот массив является основой для построения полного трехмерного изображения ионограммы, поступившей с ионозонда.

Необходимо также отметить, что уже на этом уровне проводится первая предварительная обработка данных, а именно: осреднение спектров. Среднее находится по пяти соседним строкам (этот параметр может быть изменен пользователем). Применением такой процедуры достигается: во-первых, получение более достоверного спектра, поскольку спектральный анализ проводится для реализации случайного сигнала, а не его автокорреляционной функции; во-вторых, существенное уменьшение требуемого для полного трехмерного изображения ионограммы объема ОЗУ (с 320 кбайт до 64 кбайт). Это позволяет обрабатывать ионограммы на микро ЭЕМ со средней емкостью оперативной памяти (256 кбайт для ПЭЕМ "Нейрон").

На втором этапе первичной обработки естественным было бы использование многочисленных результатов исследований по обнаружению полезного сигнала на фоне помех и шумов применительно к каждому конкретному скану. Однако, поскольку в каждом отдельно взятом скане практически отсутствует информация, позволяющая выделить характерные признаки полезного сигнала, применение классических методов подавления шумов и помех недостаточно. В связи с этим в данном случае представляется необходимым применение также методов обработки изображе-

ний, получивших в настоящее время широкое развитие, особенно применительно к созданию цифровых телевизионных систем.

В литературе, посвященной обработке изображений (см., например, / 7 /), описан ряд цифровых фильтров (низкочастотная пространственная фильтрация, метод скользящего среднего, медианный фильтр и т.д.), используемых для подавления шумов и помех. Очень часто и довольно эффективно применяется простой пороговый метод подавления шумов /7/

. Некоторые из указанных методов и были использованы при разработке алгоритмов подавления шумов и помех на ионограммах (рис. I.4 а, б) Ниже они перечислены в порядке их действия:

1. Фильтр скользящего среднего

$$z_i = \sum_{j=-K}^K x_{i+j} / (2K+1)$$

2. Пороговый метод подавления шумов

$$z_i = \begin{cases} 0, & x_i \leq x_{\text{пор}} \\ x_i - x_{\text{пор}}, & x_i > x_{\text{пор}} \end{cases} \quad i = \overline{1, N}$$

где x_i - отсчеты амплитуды на исходном скане, z_i - отсчеты амплитуды на выходном скане, N - длина одного скана (для спектроанализатора СК 4 - 72/2 она равна 200), $x_{\text{пор}}$ - пороговое значение.

$$x_{\text{пор}} = d \sum_{i=1}^N x_i / N$$

Параметр d устанавливается пользователем.

3. Низкочастотная пространственная фильтрация.

Однако, как показали численные эксперименты с реальными данными (рис. I.4 в), указанные методы не позволяют подавить все шумы и помехи, присутствующие на ионограмме. Это можно, наверное, объяснить тем, что спектр случайного сигнала является также случайной величиной. Обычно для спектрального анализа случайных сигналов используется автокорреляционная функция / 8,9 /. Спектр такой функции является уже детерминированной величиной и более устойчив к шумовым составляющим с малым радиусом корреляции. В связи с этим используем некоторые соотношения из спектрально-корреляционного анализа. Согласно теории спектр кросс-корреляционной функции двух сигналов равен произведению спектров этих сигналов. Пусть j -му скану соответствует во временной области сигнал $U(t)$, $t \in [t_1, t_2]$, а $(j+1)$ - $U(t + \Delta t)$. Тогда кросс-корреляционная функция этих двух сигналов, с одной стороны, равна автокорреляционной функции самого сигнала $U(t)$ (при определенных ограничениях на Δt), а с другой, равна произведению спектров этих сигналов, т.е. произведению соответствующих амплитуд отсчетов j и $(j+1)$ сканов, поступающих со спектроанализатора.

Хабаровск - Дымер
23.02.90 г. $T = 13^{\circ}18^m$

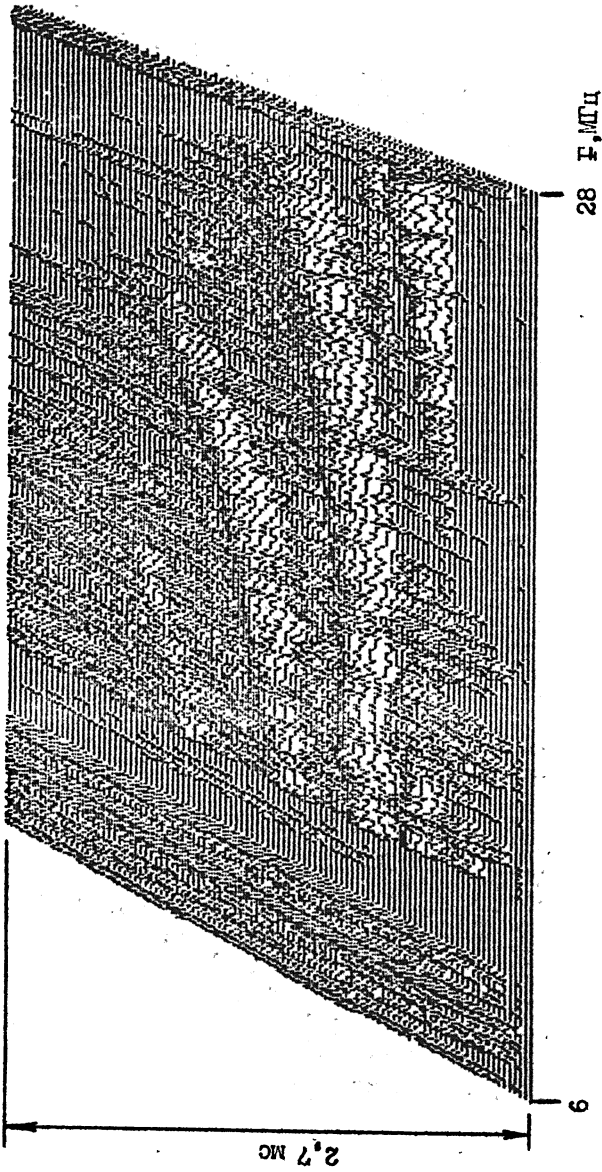
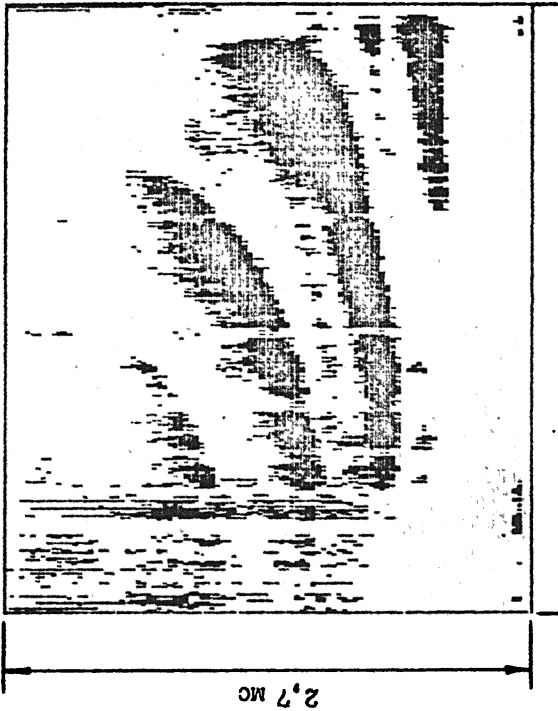


Рис. I.4 а

Хабаровск - Дидер

23.02.90 г. T = 13^h 18^m



6

28 Р.МЦ

Рис. I.4 б

Хабаровск - Цирер
23.02.90 г. $T = 13,18^{\circ}\text{C}$

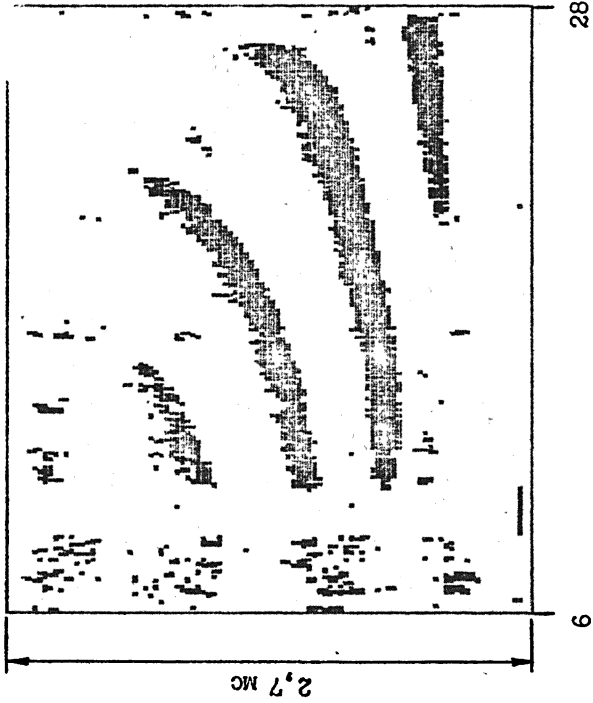
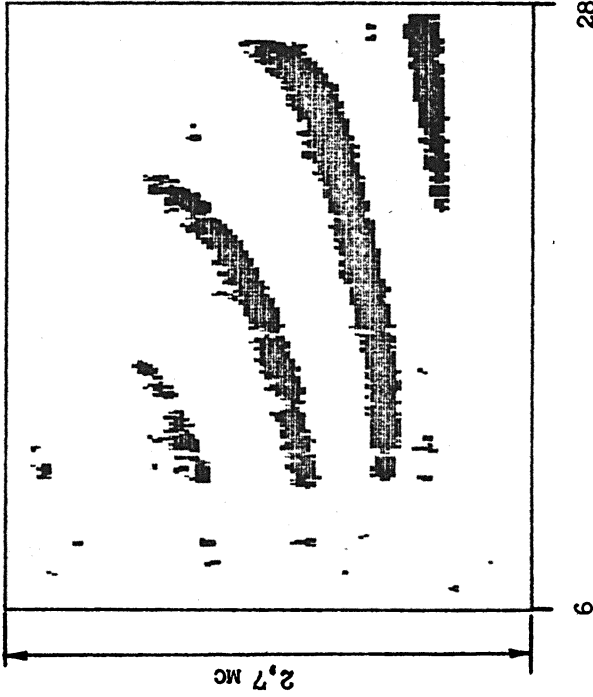


Рис. I.4 B

Хабаровск - Димер
23.02.90 г. T = 13^h 18^m



28 F, МГц

Рис. I.4 Г

Хабаровск - Дымер
23.02.90 г. T = 13^h 18^m

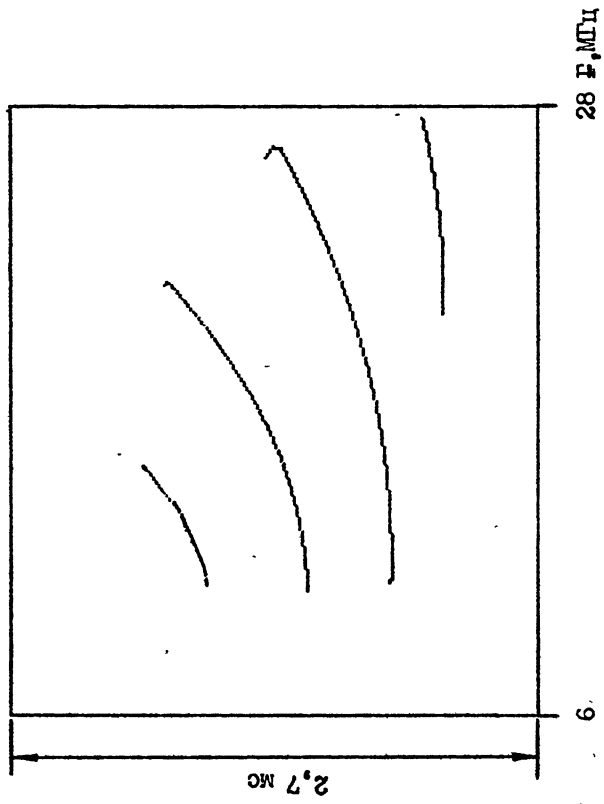


Рис. I.4 Д

Хабаровск - Дилер
23.02.90 г. $\Gamma = 13^h 18^m$

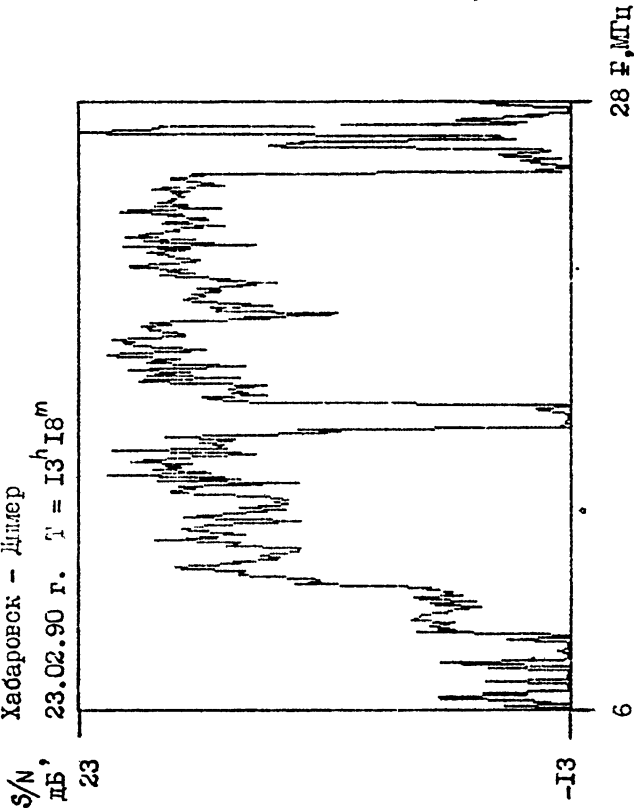


Рис. I.4 e

Эта процедура была реализована в качестве этапа в блоке программы, отвечающей за подавление шумов и помех. Как показывают численные расчеты для реальных ионограмм (рис. 1,4 г), эффективность этой процедуры обратно пропорциональна временному радиусу корреляции помех и шумов.

На третьем этапе первичной обработки данных производится построение ДЧХ для ЛЧМ НЗ ионосферы. Эту задачу можно с уверенностью отнести к теории распознавания образов. Несмотря на то, что в настоящее время этот раздел науки развивается очень бурно, не существует методов, позволяющих в автоматическом режиме надежно выделять те или иные характеристики изображения. Каждая конкретная задача требует своего подхода, развития своих методов решения, которые с удивительной степенью достоверности могут работать в одной области и совсем непригодны в другой. Поэтому существующие сейчас методы в той или иной степени учитывают особенности решаемой задачи / 7 /. Так, например, для искусственно созданного изображения применяются методы, основанные на заранее заданном множестве стандартных шаблонов. Существуют методы для проблемы построения треков. Наиболее известным является метод поворотных гистограмм, получивший широкое применение для автоматического обнаружения элементарных частиц на снимках, сделанных в пузырьковых и искровых камерах / 10 / С его помощью строились треки высотно-частотной характеристики ВЗ ионосферы. Нами был предложен подход, в котором отсутствует процедура перебора масок присущая методу поворотных гистограмм. Это позволило получить определенный временной выигрыш при обработке информации на ЭВМ.

Его основная идея следующая. Каждому следу отражения очищенной от шумов ионограммы приписывается некоторая потенциальная функция единичного источника (стока). Далее для текущей опорной точки через градиент суммарного потенциального поля определяется направление, вдоль которого и предполагается расположение трека ДЧХ. При численной реализации на ПЭВМ этого подхода возникла задача отбраковки ложных треков, построенных алгоритмом по следам отражений сосредоточенных шумов. Ее решение основывалось на следующей процедуре. Для каждой опорной точки на основании предыдущего направления градиента суммарного потенциального поля и анализа локального распределения следов отражений определяется ширина трека. Кроме того, производится сравнение суммарного потенциального поля с пороговым значением для прерывания этого трека. Задавая пороговое значение отношения длины трека к его ширине можно в значительной степени избавиться от ложных треков.

Необходимо также отметить, что для каждой опорной точки заранее определяется область плоскости изображения, оказывающая на нее существенное влияние. Это позволяет значительно сократить время ПЭМ для определения суммарного потенциального поля.

Далее используются аналогичные методу поворотных гистограмм процедуры установки меток занятости для обработанных точек, разрешения конфликтных ситуаций и другие.

После использования вышеописанных процедур мы получаем несколько наборов координат $\{x_i, y_i\}_{i=1}^{N_k}$ в плоскости изображения, каждый из которых описывает трек или его часть. Построенные по этим наборам ДЧХ ЛЧМ НЗ ионосферы представляют собой кусочно-непрерывные кривые. Для исключения случайных выбросов, нарушающих гладкость ДЧХ, строится следующая процедура сглаживания.

Предположим, что трек можно аппроксимировать кривой второго порядка:

$$f(x) = ax^2 + bx + c \quad ,$$

где a, b, c - неизвестные коэффициенты. Тогда, используя метод наименьших квадратов для каждого из наборов $\{x_i, y_i\}_{i=1}^{N_k}$, получим

$$c_k = \frac{(d_3 X_4 - d_1 X_2)(X_2 X_4 - X_3 X_3) - (d_2 X_4 - d_1 X_3)(X X_4 - X_2 X_3)}{(N_k X_4 - X_2 X_2)(X_2 X_4 - X_3 X_3) - (X X_4 - X_2 X_3)^2} \quad ;$$

$$b_k = \frac{d_2 X_4 - d_1 X_3 - c_k (X X_4 - X_2 X_3)}{X_2 X_4 - X_3 X_3} \quad ;$$

$$a_k = \frac{d_1 - c_k X_2 - b_k X_3}{X_4} \quad ;$$

где $d_1 = \sum_{i=1}^{N_k} x_i^2 y_i$; $d_2 = \sum_{i=1}^{N_k} x_i y_i$, $d_3 = \sum_{i=1}^{N_k} y_i$;
 $X = \sum_{i=1}^{N_k} x_i$; $X_n = \sum_{i=1}^{N_k} x_i^n$; $n = 2, 4$.

Подставляя полученные таким образом коэффициенты a_k, b_k, c_k в функцию $f(x)$ и заставляя x пробегать множество $\{x_i\}_{i=1}^{N_k}$, мы получим один из сглаженных треков ДЧХ или его часть.

На рис. 1.4 д представлены результаты работы процедуры построения ДЧХ для тех же двух ионограмм.

1.4.2. Определение заданных параметров по результатам первичной обработки

Последний этап первичной обработки данных заключается в определении МЧ, НЧ, отношения сигнал/шум, участков частот, на которых

удовлетворяется заданный уровень многолучевости. После того, как построены треки ДЧХ и проведен их анализ на предмет истинности, определение этих параметров не представляет особой сложности. Так, например, для определения отношения сигнал/шум построенные треки с учетом их характерной ширины вычитаются с исходной ионограммой. После этого определяется спектральная плотность мощности шумов и помех для каждой из частот:

$$U_{шj}^2 = \sum_f U_{ijш}^2 / \Delta f_{jш} ,$$

где $U_{ijш}$ - отсчеты амплитуд шумов и помех для j -го скана, $\Delta f_{jш}$ - суммарная частотная ширина шумовых сигналов в j -том скане.

Параллельно на очищенной ионограмме определяется спектральная плотность мощности полезного сигнала для каждого скана:

$$U_{cj}^2 = \sum_f U_{ijc}^2 / \Delta f_{jc} ,$$

где U_{ijc} и Δf_{jc} имеют тот же смысл.

Тогда отношение сигнал/шум для каждого скана (что эквивалентно одной частоте зондирующего сигнала) определяется стандартным выражением:

$$(S/N)_j = 10 \lg \frac{U_{cj}^2}{U_{шj}^2} .$$

На рис. I.4 е приведены зависимости отношения сигнал/шум от частоты для этих же ионограмм.

Вышеописанная процедура применяется и для определения отношения сигнал/шум для каждого из построенных треков.

Первичная обработка данных ЛЧМ наклонного зондирования ионосферы заканчивается записью определенных параметров (таких, как МНЧ, ННЧ, отношений сигнал/шум, участков частот, удовлетворяющих заданному пользователем уровню многолучевости); на внешний носитель, в качестве которого в настоящее время выбран накопитель на гибких дисках.

Некоторые аспекты разработки алгоритмов краткосрочного прогнозирования основных параметров КВ радиоканала на основе данных первичной обработки результатов ЛЧМ зондирования ионосферы

Полученный набор требуемых параметров по нескольким сеансам зондирования представляет в общем случае нестационарный временной ряд. Их прогнозирование по этому временному ряду можно осуществить в рамках регрессионной модели. Так, например, в / II / показано, что краткосрочный прогноз основных ионосферных параметров достаточно адекватно описывается следующей линейной моделью авторегрессии:

$$y(t) = ay(t - \Delta t) + by(t - 24 \text{ ч.}) - aby(t - \Delta t - 24 \text{ ч.}) + n(t),$$

где $y(t)$ - прогнозируемый параметр, Δt - временной шаг, с которым снимаются параметры, a и b - значения автокорреляционной функции параметра $y(t)$ для задержек T , равных Δt и 24 часа соответственно, $n(t)$ - ошибки прогноза.

Дисперсия ошибок прогноза на один временной шаг вперед можно вычислить по формуле $\sigma_y^2 = (1 + a^2)\sigma_n^2$, где σ_n^2 - дисперсия временного ряда.

2. Результаты исследований кругосветных сигналов

Зондирование ионосферы на сверхдальних трассах представляет интерес с точки зрения контроля и прогнозирования ионосферной обстановки, влияющей на распространение коротких радиоволн в планетарном масштабе. Вместе с тем, сведения о статистических, доплеровских и угловых характеристиках КС могут быть использованы для выяснения роли того или иного механизма в дальнейшем распространении КВ.

2.1 Статистические и угловые характеристики КС

Наблюдения КС проводились в п. Дымер Киевской области в период с 1983 по 1989 гг. Большая часть данных получена в период низкой солнечной активности. В измерениях использовался КВ передатчик "ВЯЗ" мощностью 25 кВт, излучавший импульсы длительностью 1 мс с частотой повторения 5 Гц. Излучение осуществлялось на горизонтальную ромбическую антенну $RT_{4}^{65}T$, ориентированную в северо-восточном направлении с азимутом $\psi = 51^\circ$. Прием КС проводился на антенную систему, состоящую из 8 горизонтальных диполей, размещенных по высоте на мачте с $h = 93$ м. С помощью этой антенны и специальной системы фазирования измерялись вертикальные углы прихода КС. Для проведения доплеровских измерений разработана аппаратура, позволяющая получать данные о спектральных характеристиках КС с использованием машинной обработки на ПЭВМ "Нейрон".

Большинство данных получено при наблюдениях КС в декабре-марте в утренние и дневные часы. Измерения проводились в диапазоне частот $f = 16,6 - 23,2$ МГц. Частотный диапазон прохождения КС составлял $\sim 3 \dots 4$ МГц, с максимальной вероятностью приема на частоте $f = 19,85$ МГц. На рис. 2.1 для различных периодов наблюдений сплошной и пунктирной линиями показаны временные интервалы прохождения КС на частотах $f = 18,2$ и $19,85$ МГц и интервалы наблюдений соответственно. Как можно видеть из рисунка временные интервалы прохождения КС $\sim 2 - 4$ часа сосредоточены вблизи полудня. При этом в

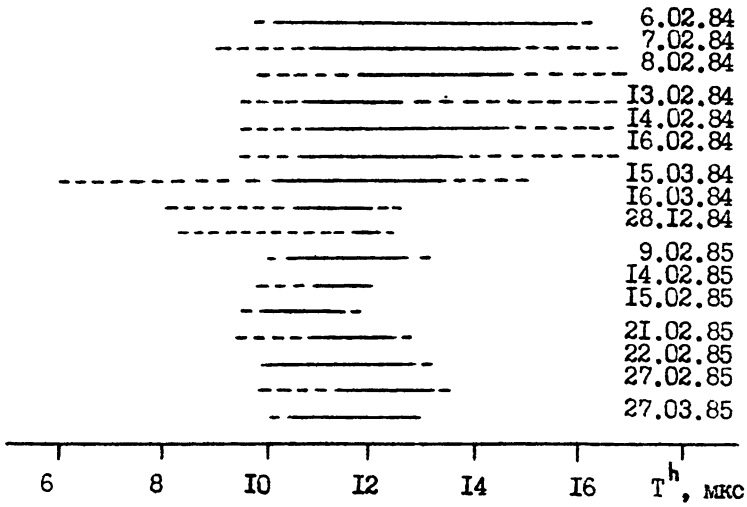


Рис.2.1

зависимости от сезона и времени наблюдений угол между линией терминатора и направлением излучения (в пределах диаграммы направленности антенны) варьируется в интервале значений $\sim 15 \dots 45^\circ$. Сопоставление данных о прохождении КС с магнитной активностью по ст. Киев показало, что КС наблюдались в период низкой магнитной активности $K_p = 2-2,5$. С ростом K_p наблюдалась тенденция сужения временного интервала прохождения КС (см. рис. 2.1, данные за 28.12.84г., когда $K_p = 4$).

Существенной особенностью сверхдальних сигналов являются быстрые изменения амплитуды сигналов. Расчет автокорреляционной функции дает значение радиуса временной корреляции $\tau_k \approx 0,1-0,2$ с. Малые значения τ_k могут быть обусловлены интерференцией волн, о чем свидетельствуют, в частности, результаты статистической обработки распределений амплитуд КС и спектральный анализ его модовой структуры. Функции распределения амплитуд КС характеризуют степень развития флуктуационных процессов и многомодовость сигнала. Анализ экспериментальных распределений КС позволяет делать некоторые заключения о механизмах распространения КВ на сверхдальних трассах. В то же время сведения о распределениях амплитуд КС могут быть использованы для решения практических задач дальней КВ радиосвязи. Согласно полученным данным из 60 сеансов приема КС в 8% случаев распределения амплитуд подчиняются закону Райса, в 6% - распределению Накагами со средним значением параметра $\bar{m} = 1,41$ (m - отношение квадрата средней мощности сигнала к дисперсии его мощности, $m = \frac{(\bar{A}^2)^2}{(A^2 - \bar{A}^2)^2}$). Остальные случаи относятся к аномальным распределениям с двумя, тремя вершинами и более сложной структурой. Физическая природа возникновения аномальных законов распределения амплитуд КС может быть связана с многомодовостью сигнала, интерференцией магнитных компонент при наличии доплеровского сдвига частоты между ними, фокусировкой, дефокусировкой радиоволн крупномасштабными ПИВ и с

рассеянием радиоволн на мелкомасштабных неоднородностях /12/. Распространение КВ на значительные расстояния характеризуется многообразным механизмом передачи электромагнитной энергии. Поэтому возникает трудность в интерпретации результатов измерений. Важную информацию дают измерения вертикальных углов прихода КС, позволяющие восстановить с определенной достоверностью механизм дальнего распространения КВ сигналов. Таких измерений немного и они носят разрозненный характер/13/. На рис.2.2 показаны гистограммы распределения углов прихода КС для различных сезонов. Как можно видеть из рисунка КС принимаются в основном в интервале углов $\sim 3 \dots 12^\circ$, преимущественные значения составляют величины $\sim 5-7^\circ$. Наблюдаются вариации углов прихода КС для различных сезонов. Например, для марта 1964г. в гистограмме распределений углов прихода КС центр "тяжести" смещен в сторону больших значений по сравнению с декабрем 1963г. Было проведено сопоставление результатов измерений углов прихода КС с ионосферной обстановкой. Существенной оказалась связь градиентов электронной концентрации в точках предполагаемого выхода КС с углами прихода КС. Согласно проведенному анализу, значения градиентов критических частот вдоль трассы $\frac{df_oF_2}{dx}$ в области выхода, рассчитанные по прогнозным ионосферным данным составляют величины $0,02 \frac{\text{МГц}}{100\text{км}}$ и $0,035 \frac{\text{МГц}}{100\text{км}}$ для декабря 1963г. и марта 1964г. соответственно. При этом с увеличением градиента возрастает угол прихода КС.

Для сопоставления с экспериментальными данными были проведены численные расчеты лучевых траекторий КС. Пример такой траектории, рассчитанной для частоты $f = 18,2 \text{ МГц}$ по прогнозным ионосферным данным для февраля 1969г. и $T = 10 \text{ час. мск}$ показан на рис.2.3. Как видно из рисунка на трассе реализуется комбинированный механизм распространения, когда на части пути КС проходит в приподня-

* Гистограммы построены для каждого луча, формируемого антенной решеткой.

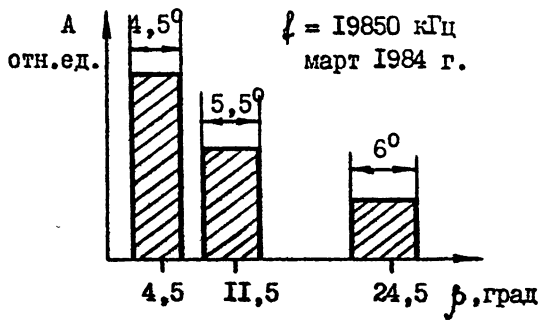
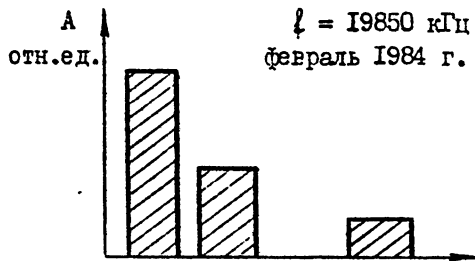
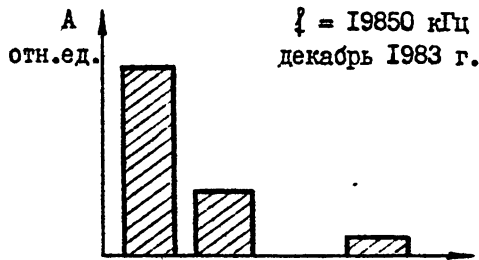


Рис.2.2

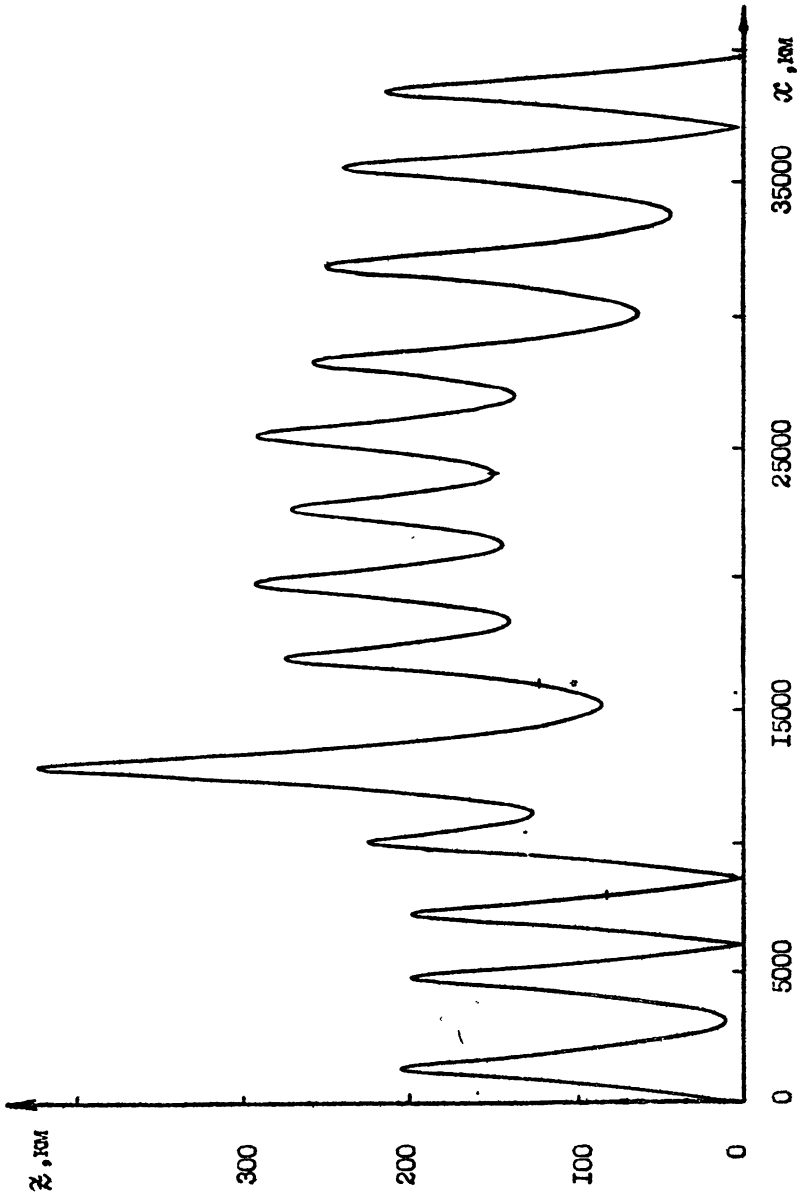


Рис. 2.3

том ионосферном волноводе с малыми потерями на поглощение. При этом захват и выход радиоволны из ИВК осуществляется за счет рефракции радиоволны на горизонтальных градиентах электронной концентрации. Расчетные значения углов прихода КС $\beta_c \approx 6^\circ$ и затухания $\Gamma \approx 20$ дБ согласуются с экспериментальными данными.

2.2 Результаты спектральных измерений КС

Важную информацию о модовой структуре КС дают результаты спектрального анализа. Сведения о доплеровском сдвиге частоты, ширина спектра в различных геофизических условиях наблюдений позволяют сделать некоторые выводы о влиянии ионосферных параметров на характеристики КС, а также могут служить индикатором проявления магнитно-ионосферных возмущений в глобальном масштабе. Спектральные измерения КС проводились в феврале 1989 г. На рис. 2.4, 2.5а показаны примеры динамических спектров КС, а на рис. 2.4, 2.5б соответствующие им йенограммы, записанные на уровне компарирования равным - 6 дБ. Для спектра КС, показанного на рис. 2.5, характерна 2-х модовая структура, обусловленная, по-видимому, доплеровским расщеплением на величину $\delta F_d \approx 1$ Гц магнитомных компонент КС. Согласно [12] такая структура спектра сигнала приводит к бимодальному закону распределения амплитуд КС, что соответствует результатам статистической обработки сигналов. Результаты проведенных исследований показывают, что величина доплеровского сдвига частоты КС составляет величину $F_d \approx 0,2 \dots 0,8$ Гц, а общая ширина спектра $\Delta F_d \approx 2 \dots 4$ Гц. С ростом магнитной возмущенности спектр КС уширяется и на сонограммах регистрируется сложная модовая структура КС. Это связано с влиянием нестационарных процессов, вызываемых ионосферно-магнитными возмущениями на вариации фазовых путей различных мод сигнала.

Таким образом, совокупность экспериментальных и расчетных данных по КС позволяет сделать вывод, что благоприятные условия для распространения КС выполняются для направлений составляющих с тер-

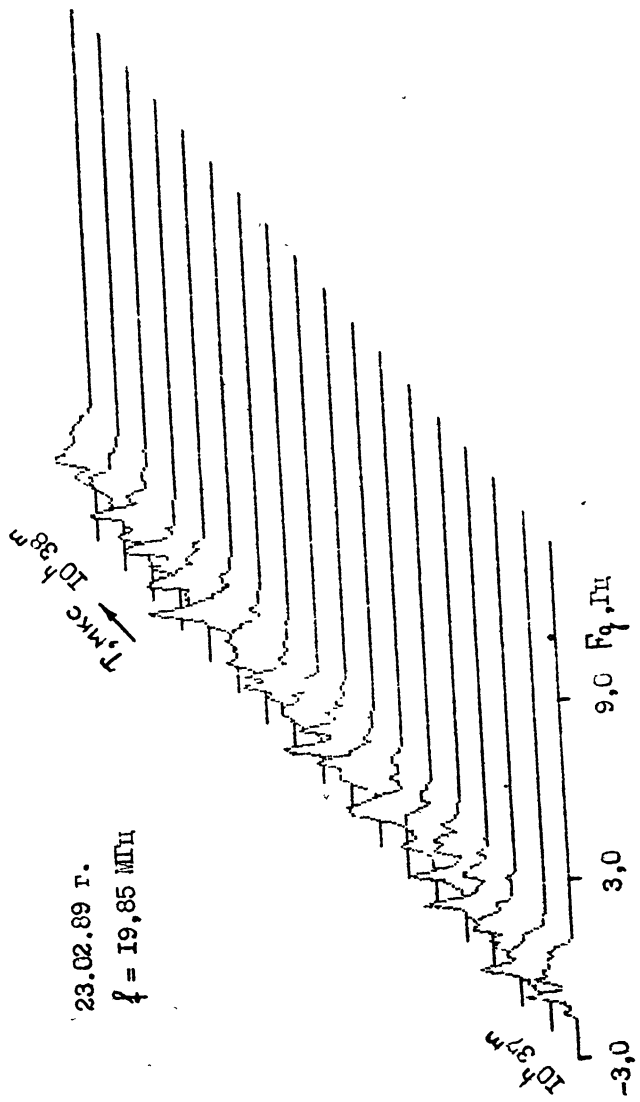


Рис. 2.4 а

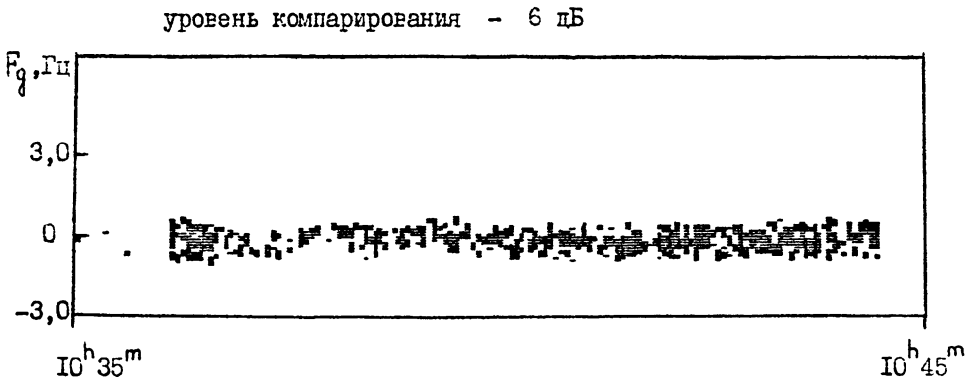


Рис.2.4 б

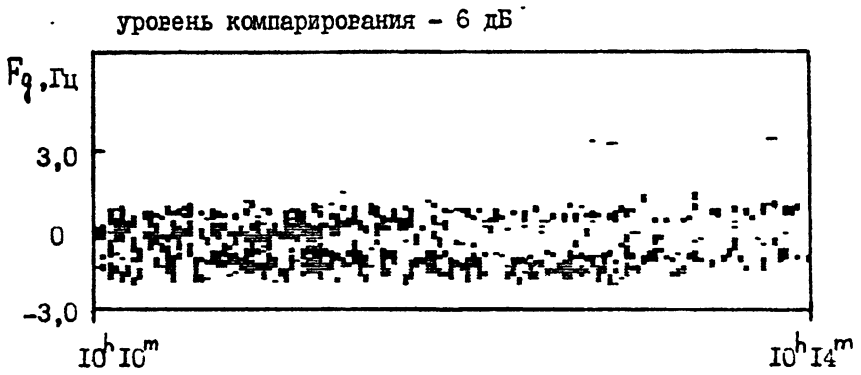


Рис.2.5 б

минатором углы $\sim 15 \dots 45^\circ$. При этом за счет прямого рефракционного захвата и выхода радиоволн из ИБК реализуется комбинированный (волноводный + скачковый) механизм распространения КВ.

3. Обратное рассеяние коротких радиоволн маломасштабными неоднородностями субполярной и модифицированной среднеширотной ионосферы

Радарный метод локации маломасштабных неоднородностей широко применяется в исследованиях высокоширотной ионосферы. В последние десятилетия этот метод активно используется для зондирования ионосферы, модифицированной мощным наземным КВ радиозлучением /14, 15/. Сопоставление результатов радарных исследований ионосферных неоднородностей естественного и искусственного происхождения открывает широкие возможности для изучения механизмов образования неоднородностей и динамики ионосферных процессов.

3.1. Обратное рассеяние КВ неоднородностями F-слоя субполярной ионосферы

При постановке эксперимента и интерпретации результатов радарных исследований важную роль играет геометрия рассеяния радиоволн на вытянутых вдоль силовых линий геомагнитного поля маломасштабных неоднородностях. В высоких широтах ориентация магнитного поля близка к вертикали, поэтому из-за геометрии рассеяния использование высокочастотных радаров, например, в УКВ диапазоне, где мала ионосферная рефракция, дает возможность получать сведения только о неоднородностях, расположенных на высотах E слоя ионосферы /16/. В то же время использование КВ радара позволяет с учетом рефракции радиоволн лоцировать неоднородности, расположенные в F слое ионосферы /17-20/.

В экспериментах, проведенных в 1965-1967 гг. на базе полигона Дымер Киевской области ($\varphi_{\text{пол}} = 48^\circ$) для локации ионосферы использовался КВ передатчик "ВЯЗ". Передатчик работал на ряде фиксированных частот в диапазоне $\sim 11 \dots 20$ МГц в импульсном режиме с пиковой мощностью $P_0 = 25$ кВт: длительность импульса $\tau = 1 \mu\text{с}$, частота повторения $\Omega = 20 \text{Гц}$. Излучение осуществлялось с помощью двух горизонтальных ромбических антенн типа РГ $\frac{65}{2} \text{I}$, ориентированных в северном ($\varphi = 0^\circ$) и

северо-восточном ($\psi = 51^\circ$) направлениях. Переключение антенны осуществлялось дистанционно с пульта управления. Прием сигналов проводился на те же антенны, а также на антенную решетку, состоящую из 8 горизонтальных широкополосных диполей, установленных на мачте высотой $h = 93$ м, с помощью которой измерялись вертикальные углы прихода рассеянных сигналов.

При работе на антенну "север" наблюдались сигналы двух типов: тип I - сигналы с задержками $\tau \approx 7 \dots 10$ мс и тип 2 - с задержками $\tau = 13 \dots 20$ мс. При переключении передатчика с антенны "север" на антенну "северо-восток" уровень сигнала типа I падал на $10 \dots 20$ дБ, а уровень сигнала типа 2 либо не изменялся, либо несколько возрастал. Характер сигналов резко отличался друг от друга. Сигналы типа I принимались только в вечерние и ночные часы, имели высокую скорость флуктуаций и идентифицировались нами как сигналы, рассеянные ионосферой. Сигналы типа 2, задержка которых увеличивалась с ростом частоты, идентифицировались как сигналы, отраженные от Земли (сигналы ВНЗ). Возрастание уровня сигнала типа 2, по-видимому, связано с геометрией эксперимента, поскольку с северо-восточного направления сигнал ВНЗ отражается от Земли в районе Уральских гор. На рис. 3.1 приведена усредненная по всем частотам гистограмма временной зависимости появляемости рассеянных сигналов типа I. Как видно из рисунка, сигналы рассеянные ионосферой принимаются в основном в вечерние и ночные часы $\sim 20^h \dots 24^h$ с максимум появляемости в $21^h \dots 22^h$ (время московское).

Анализ ионосферных и магнитных данных по ст. Ленинград показал, что на фоне умеренно низкой магнитной активности с K_p индексом равным 2-3, вероятность наблюдения рассеянных сигналов увеличивается с ростом критической частоты f_oF_2 в области рассеяния. Для значений $f_oF_2 \leq 3$ МГц появляемость рассеянных сигналов заметно падала. Это указывает на важную роль рефракции при наблюдении обратного рассе-

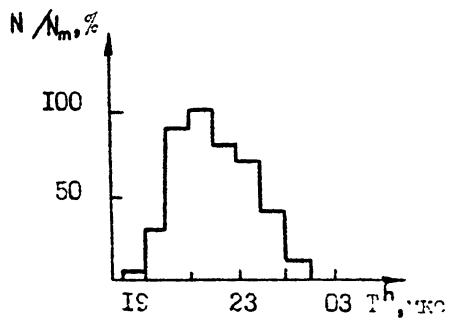


FIG. 3.1

нения КВ субполярной ионосферой.

Для локализации положения области ионосферы, ответственной за рассеяние КВ были проведены расчеты лучевых траекторий с использованием результатов измерений углов прихода и времени задержки рассеянных сигналов. Расчеты проводились в предположении ракурсно-го характера рассеяния КВ на магнитно-ориентированных неоднородностях. В нашем случае для приема обратнорассеянных сигналов в области рассеяния должно выполняться условие ортогональности волнового вектора падающей волны к геомагнитному полю. В субполярной F области это условие может быть выполнено только с учетом рефракции радиоволн в ионосфере. Результаты расчетов, выполненные с учетом реальных монограмм вертикального зондирования, снятых в пп Дымер и Ленинград, представлены на рис.3.2. На рисунке для каждой траектории указаны углы прихода луча и утолщения отмечены участки, где выполняются условия ортогональности волнового вектора падающей волны геомагнитному полю. Эти участки соответствуют по дальности экспериментально наблюдаемым величинам задержек рассеянных сигналов. Как можно видеть из рисунка, за рассеяние ответственна F область субполярной ионосферы на высотах ~220...310 км. При этом по дальности положение рассеивающей области приходится на интервал геомагнитных широт ~57...58,5°, что совпадает с положением южной границы главного ионосферного провала /22/.

На основе полученных данных были проведены оценки интенсивности неоднородностей, ответственных за рассеяние. В расчетах используется выражение для принимаемой мощности рассеянного излучения, записанное в борновском приближении /21/

$$P_s = \frac{P_0 \lambda^2 e^{\tau}}{16\pi^2} \int \frac{G_1(\theta, \varphi) \cdot G_2(\theta, \varphi) G dV}{z_1^2 z_2^2} \quad (3.1)$$

ж) Углы прихода на частотах 10,8 и 16,6 МГц попадают в интервал значений ~11 ± 3°.

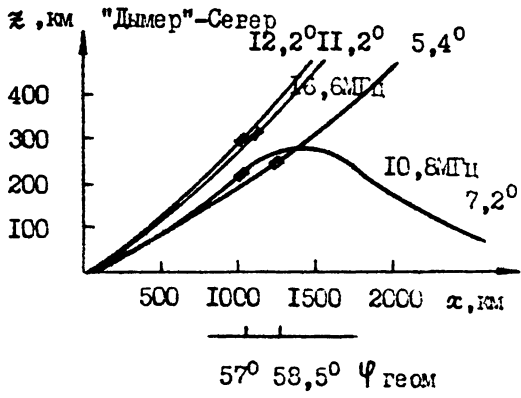


Рис.3.2

где $\sigma = \frac{P_0}{2} k_0^4 \Phi_E(x) \cdot \sin^2 \chi$ — эффективное сечение рассеяние единичного объема, P_0 — мощность передатчика λ — длина волны, $k_0 = \frac{\omega}{c}$ — волновое число, G_1 и G_2 — коэффициенты усиления передающей и приемной антенн, $e^{-\Gamma}$ — потери сигнала, $\Phi_E(x)$ — спектральная плотность флуктуаций диэлектрической проницаемости, χ — угол между волновым вектором рассеянной волны и вектором поля падающей волны, z_1 и z_2 — расстояния от передатчика и приемника до рассеивающей области.

В случае рассеяния КВ на магнитно-ориентированных неоднородностях выражение для $\Phi_E(x)$ можно представить в виде /23/

$$\Phi_E(x) = C_0^2 \cdot \exp\left(-\frac{x_{\parallel}^2 l_{\parallel}^2}{4}\right) / \left[1 + \left(\frac{x_{\perp}}{L}\right)^2\right]^{p/2}, \quad (3.2)$$

т.е. спектр имеет степенной вид для поперечных к геомагнитному полю масштабов неоднородностей, $l_{\parallel} = \frac{2\sqrt{\epsilon}}{k_0}$, и гауссово обрезание для продольных масштабов l_{\parallel} , $L = \frac{2\sqrt{\epsilon}}{k_0}$ — внешний масштаб неоднородностей. Коэффициент C_0^2 находится из условия нормировки

$$\int \Phi_E(x) d^3x = \langle (\Delta \epsilon)^2 \rangle = \frac{\omega_0^4}{\omega^4} \langle \left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2 \rangle, \quad C_0^2 = \frac{\omega_0^4}{\omega^4} l_{\parallel} k^2 \langle \left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2 \rangle \times [4\epsilon^{3/2} \cdot B(2, p-2) \cdot {}_2F_1(1, p/2-1; p/2+1, 1)]^{-1}. \quad (3.3)$$

B — бета функция, ${}_2F_1$ — обобщенная гипергеометрическая функция. Принимая для обратного рассеяния $z_1 = z_2 = z$, $\sin^2 \chi = 1$ и вводя угол Ψ между направлением волнового вектора падающей волны и направлением вытянутости неоднородностей ($x_{\parallel} = 2k_0 \cos \Psi$, $x_{\perp} = 2k_0 \sin \Psi$, после подстановки (3.3), (3.2) в (3.1) подынтегральное выражение принимает вид

$$\int \frac{G_1 \cdot G_2 \cdot \exp[-4x^2 (l_{\parallel}/\lambda)^2 \cos^2 \Psi] z^2 dz \sin \theta d\theta d\psi}{z^4 [1 + 4 \sin^2 \Psi (L/\lambda)^2]^{p/2}}.$$

Для используемых в эксперименте приемопередающих антенн со сравнительно широкими диаграммами направленности вертикальный размер рассеиваемого объема будет определяться гауссовым обрезанием при отклонении рассеянного излучения от зеркального направления. При этом интервал углов $\Delta \theta \sim 4\Psi \sim \frac{\lambda}{2\epsilon l_{\parallel}}$. Горизонтальный размер рассеиваемого объема

определяется шириной диаграммы направленности передающей ромбической антенны, которая составляет в нашем случае величину $\Delta\psi \approx 15^\circ$. Размер эффективного объема Δz в направлении вектора рассеяния можно оценить по расплыванию импульсного сигнала $\Delta z = (c/2)(\tau_R - \tau_T)$, где τ_T и τ_R - длительности излучаемого и принимаемого сигналов, c - скорость света.

Для значений $\tau_T = 1 \text{ мс}$, $\tau_R \approx 1,7 \text{ мс}$, $z = 1000 \text{ км}$, $h/\lambda = 5$ получаем эффективную величину объема рассеяния $V_{\text{эфф}} = \epsilon^2 z^2 \Delta z \sin^2 \theta \Delta\psi = 3 \cdot 10^5 \text{ км}^3$. После подстановки в (3.1) значений $P_0 = 2,5 \cdot 10^4 \text{ Вт}$, $P_s = 6 \cdot 10^{-14} \text{ Вт}$, $h/\lambda = 10^3$, $f = \omega/2\pi = 16,6 \text{ МГц}$, $f_0 = \omega_0/2\pi = 4 \text{ МГц}$, $G_1 \cdot G_2 = 5 \cdot 10^2$, $\rho = 2,5$, $\epsilon^2 = 0,3$ получаем $\sqrt{\langle (\Delta N/N)^2 \rangle} \approx 1,7 \cdot 10^{-3}$.

3.2 Спектральные характеристики КВ сигналов, рассеянных субполярной ионосферой

При изучении спектральных характеристик КВ сигналов широко применяется доплеровский метод. Данные о доплеровском смещении частоты, ширине спектра, их вариациях с изменением ионосферных условий позволяют получать сведения о тонкой структуре ионосферы, динамике быстропротекающих процессов.

Эксперимент по измерению спектральных характеристик КВ сигналов, рассеянных неоднородностями, расположенными в области экваториальной стенки главного ионосферного провала проводился в апреле 1987г. с 21 до 24 час. мск. Излучение и прием рассеянных ионосферой сигналов осуществлялось на антенну РГ $_{\frac{65}{4}}$ I ($\lambda_0 = 18 \text{ м}$), ориентированную в северном направлении. Обработка записей проводилась на ЭВМ методом Фурье-преобразования автокорреляционной функции, взвешенной на корреляционное окно Тьюки /8/. Длительность одной реализации составляла 40,5с с шагом дискретизации 0,02с.

Характерной особенностью данных измерений является небольшой доплеровский сдвиг рассеянных сигналов $\sim 1 \dots 1,5 \text{ Гц}$ с общей шириной спектра $\sim 4,5 \dots 7 \text{ Гц}$. На рис.3.3 приведены примеры спектров, постро-

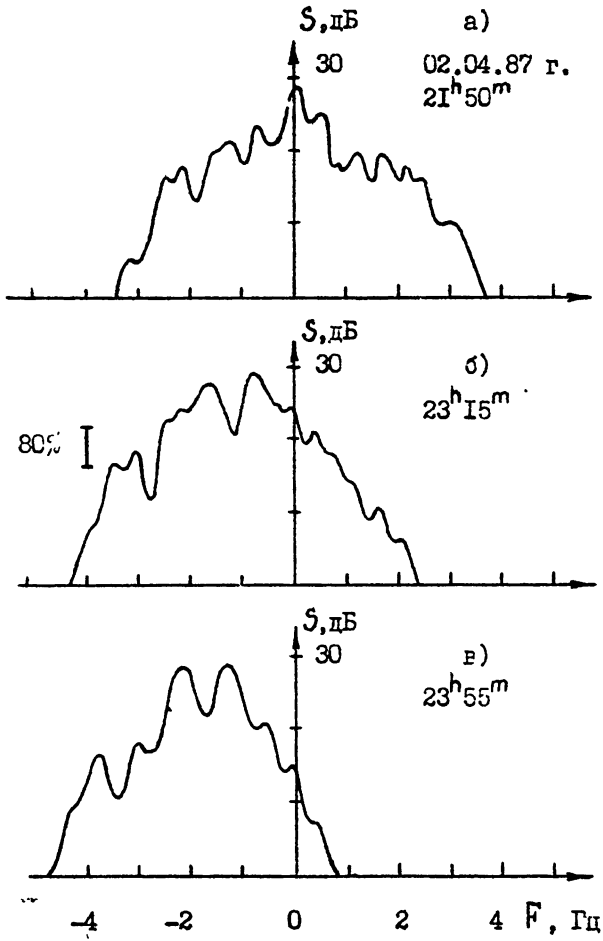


Рис. 3.3

енных в логарифмическом масштабе для частоты излучения $f = 16,6 \text{ МГц}$. Там же указан 80% доверительный интервал. Видно что с течением времени происходит смещение всего спектра по оси частот, при этом общая ширина спектра изменяться в пределах 7-4,5 Гц.

Интерпретация полученных данных проведена с учетом влияния на результаты измерений конечной угловой ширины диаграммы направленности используемой антенны. Дело в том, что для данной геометрии эксперимента, когда восточно-западная компонента скорости дрейфа неоднородностей, регистрируемая в высоких широтах /24/, ориентирована ортогонально главному лепестку диаграммы антенны, уширение доплеровского спектра рассеянного сигнала будет определяться сдвигом частоты на краях диаграммы антенны, а положении самого спектра на частотной оси - соотношением между угловой полушириной диаграммы антенны $\Delta\psi$ и углом α , составляемым вектором скорости дрейфа с восточно-западным направлением для рассеивающей области. Можно показать, что случай $\alpha \approx 0$ соответствует примеру спектра, показанному на рис.3.3а, случай $\alpha < \Delta\psi$ соответствует спектру, показанному на рис.3.3б, а случай $\alpha = \Delta\psi$ соответствует спектру, приведенному на рис.3.3в. По уширению спектра F можно оценить величину скорости дрейфа и угол α

$$F_1 \approx -[2V \sin(\beta_1 + \alpha)]/\lambda, \quad F_2 \approx [2V \sin(\beta_2 - \alpha)]/\lambda,$$

где F_1 и F_2 - значения частоты на краях доплеровского спектра рассеянного сигнала, λ - длина волны, V - скорость дрейфа, β_1 и β_2 - углы, составляемые волновым вектором падающей волны с направлением на географический север для крайних точек рассеиваемого объема в пределах главного лепестка диаграммы направленности антенны. Данные выражения получаются из точной формулы для доплеровского смещения частоты при обратном рассеянии радиоволны на движущихся неоднородностях $F = -(2V/\lambda) \cos(\vec{k}_0 \cdot \vec{V})$ для случая горизонтальной компоненты скорости дрейфа V и значений углов $\gamma \ll 1$ (γ - угол, составляемый волновым вектором падающей волны с горизонталью в точке рассеяния),

что подтверждается расчетами лучевых траекторий. Для определения углов β_1, β_2 проведены расчеты рекурсного рассеяния радиоволн на неоднородностях с размерами $l_1 = \lambda/2$ по методике, изложенной в [25], с использованием результатов измерений дальности до рассеивающего объема и углов прихода рассеянных сигналов. Согласно расчетам за обратное рассеяние КВ сигналов ответственны неоднородности, расположенные на высотах 200 - 240 км субполярной ионосферы. При этом для значений углов $\Delta\varphi \approx 7^\circ$ [26] углы β_1, β_2 лежат в пределах $7-8,2^\circ$. Тогда, для типичных значений $F_1 = -4,5 \dots -3,5$ Гц, $F_2 = 0,5 \dots 3,5$ Гц имеем $V \approx 150-240$ м/с, а угол α в зависимости от времени суток меняется в пределах $0 \leq \alpha \leq 7^\circ$.

3.3 Результаты измерений доплеровского смещения частоты КВ сигналов, обратно-рассеянных мелкомасштабными неоднородностями модифицированной среднеширотной ионосферы

Явление рекурсного рассеяния радиоволн на искусственных магнитно-ориентированных неоднородностях, возбуждаемых в среднеширотной ионосфере мощным пучком декаметровых радиоволн легло в основу измерений динамических спектров и доплеровского смещения частоты КВ сигналов. Возмущение ионосферы осуществлялось с помощью нагревного стенда "Сура", расположенного в Васильсурске Горьковской области. Модернизация области возмущения проводилась с полигона "Дымер" Киевской области. КВ передатчик "ВАС" работал в импульсном режиме с длительностью импульса $\tau = 1$ мс и частотой повторения 50 Гц. Излучение и прием КВ сигналов осуществлялось на ромбическую антенну РГ₄⁶⁵ I, ориентированную в северо-восточном направлении. На рис. 3.4а, б показаны динамический спектр рассеянного сигнала и его сонограмма на уровне компарирования равным 6 дБ. Период нагрева ионосферы отмечен сплошной линией. Как можно видеть из рисунка доплеровский сдвиг частоты рассеянного сигнала носит колебательный характер с

18.05.1989 г. $f = 19,85$ МГц

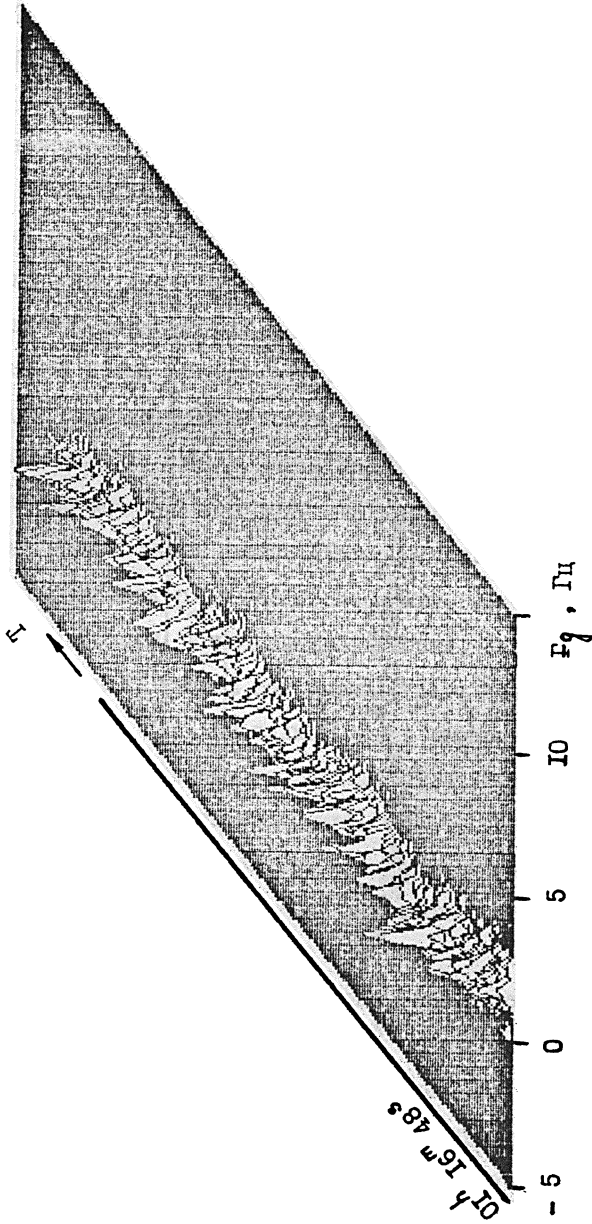


Рис.3.4 а

18.05.1989 г. $f = 19,85$ МГц
уровень компарирования - 6 дБ

$F_{\text{г}}, \text{дБ}$

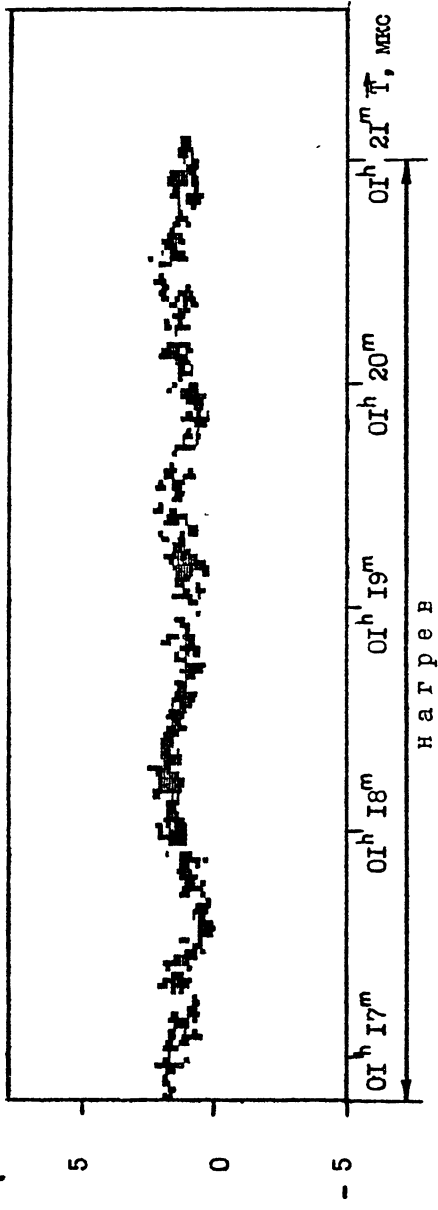


Рис.3.4 б

периодом 40...60с. Среднее значение доплеровского сдвига частоты составляет величину $\sim 2...3$ Гц. Для определения местоположения в ионосфере рассеивающих центров разработана методика расчета геометрии ракурсного рассеяния радиоволн с учетом ионосферной рефракции /25/. В расчетах область ионосферы, ответственная за рассеяние задается в виде диска положение которого по высоте над нагревным стендом может изменяться в пределах ионосферного слоя. Расчеты геометрии обратного рассеяния КВ на трассе "Дымер"- "Сура"- "Дымер" проводились на ряде фиксированных частот в диапазоне 16,6-19,85МГц по прогнозным ионосферным данным для мая 1989г., $T = 00^h$ мск. В расчетах радиус диска брался равным 50км, что соответствует угловой ширине диаграммы направленности антенны возмущающего передатчика, а его положение по высоте варьируется от 250 до 390км. Вертикальный размер диска, заполненного искусственными мелкомасштабными неоднородностями, взят равным 20км. Согласно расчетам, наиболее оптимальные условия ракурсного рассеяния радиоволн выполняются на частоте $f = 19,85$ МГц, когда неоднородности, ответственные за рассеяние, сосредоточены вблизи максимума F-слоя ионосферы в интервале высот $\approx 370-390$ км. Рис.3.5 иллюстрирует распределение рассеивающих центров (в географических координатах Ψ, λ), ответственных за обратное рассеяние КВ на трассе "Дымер"- "Сура"- "Дымер". Как можно видеть из рисунка конфигурация области рассеяния отличается от формы диска что связано с влиянием рефракции радиоволн на выполнение ракурсных условий рассеяния.

Измерения доплеровских сдвигов частоты позволяют оценить величину проекции скорости дрейфа искусственных мелкомасштабных неоднородностей в направлении вектора рассеяния. Для случая обратного рассеяния $V = F_2 \cdot \lambda / 2$. Согласно полученным данным среднее значение поперечной компоненты скорости дрейфа искусственных неоднородностей с поперечными размерами $h_p = \lambda / 2 \approx 7,5$ м составляет на высотах F-слоя среднеширотной ионосферы величину $V \approx 15...22$ м/с.

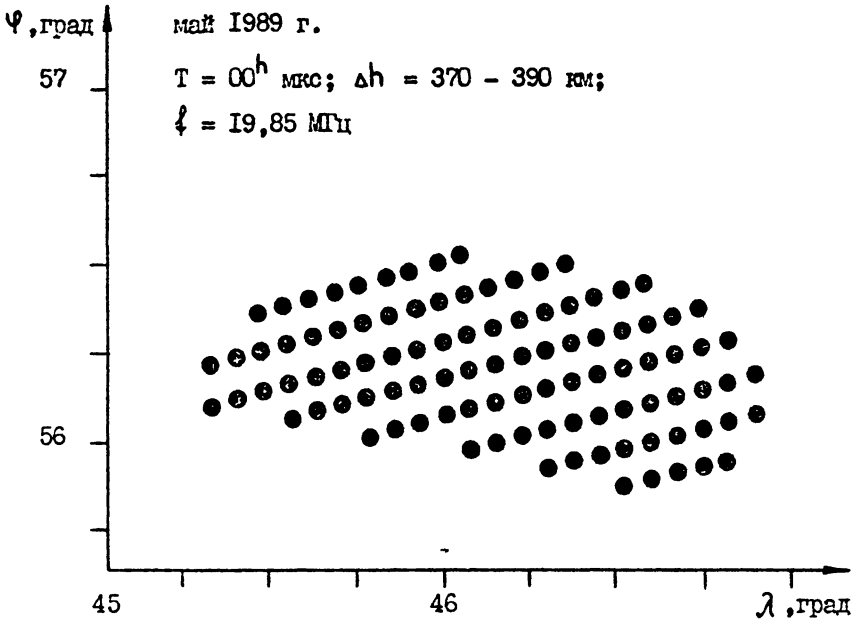


Рис.3.5

Заключение

Сформулируем основные результаты работы

1. Создан приемно-передатный комплекс "Дымер", оснащенный аппаратурой для доплеровских, угловых измерений КВ сигналов и аппаратурой ДЧМ зондирования, предназначенной для решения научных и практических задач конусообразного распространения КВ при работе в режимах НЗ и ВВЗ ионосферы. На базе ПЭВМ "Нейрон" разработан пакет прикладных программ для автоматизированного съема и обработки монограмм наклонного ДЧМ зондирования для прогнозирования параметров конусообразного КВ радиоканала в реальном масштабе времени.

2. В период 1983-1989гг. проведены измерения характеристик кругосветных сигналов. Получено, что оптимальные условия распространения КС наблюдаются в околополуденные часы декабря-февраля, когда направление максимума излучения диаграммы направленности передатной антенны составляет с линией терминатора углы $\sim 15 \dots 45^\circ$. Вертикальные углы прихода КС составляют $\sim 5 \dots 7^\circ$. Доплеровский сдвиг частоты КС $\sim 0,2 \dots 0,8$ Гц, общая ширина спектра КС $\sim 2 \dots 4$ Гц. Путем сопоставления экспериментальных и расчетных данных по приему КС показано, что при распространении КС реализуется комбинированный механизм, когда часть трассы КС проходит в приподнятом ионосферном волноводе с малыми потерями на поглощение за счет прямого рефракционного захвата и выхода радиоволны из ИЖ на поверхность Земли.

3. Проведены исследования обратного рассеяния КВ маломасштабными неоднородностями субполярной и модифицированной среднеширотной ионосферы. Показано, что в период низкой солнечной активности в феврале-апреле 1985-1987гг. наибольшая вероятность приема сигналов, обратно-рассеянных неоднородностями расположенными в F слое в области южной границы главного ионосферного провала наблюдается в 20^h-24^h мск. На основе доплеровских измерений спектров обратно-рассеянных сигналов сделаны оценки величины и направления (относительно

линии восток-запад) скорость дрейфа мелкомасштабных неоднородностей которые составляют величины $150 \dots 240 \text{ м/с}$ и $0 \dots 7^\circ$ соответственно. Сделаны оценки среднеквадратичной величины флуктуаций электронной концентрации неоднородностей, ответственных за обратное рассеяние КВ сигналов. Показано, что для неоднородностей с масштабами $l_1 = 7,5 \text{ м}$ $\delta N \approx 1,7 \cdot 10^{-3}$.

Получено, что при КВ локации среднеширотной ионосферы, модифицированной мощным декаметровым радиозлучением, доплеровский сдвиг частоты сигналов, обратно-рассеянных искусственными мелкомасштабными неоднородностями составляет величину $\sim 2 \dots 3 \text{ Гц}$ и носит периодический характер, связанный с колебательными процессами в области возмущения. Средняя скорость юго-западной компоненты дрейфа искусственных неоднородностей в ночные часы на высотах F слоя составляет величину $\sim 15 \dots 22 \text{ м/с}$.

В дальнейшем для решения прямой и обратной задач НЗи ВЗЗ естественной и модифицированной ионосферы предполагается проводить комплексные радиофизические исследования на базе автоматизированного ДЧМ ионозонда с использованием техники доплеровских, угловых измерений КВ сигналов. При этом наряду с решением задач прогнозирования параметров ионосферного КВ радиоканала в реальном времени на трассах различной протяженности и ориентации (Йошкар-Ола - Дымер, Хабаровск - Дымер, Душанбе - Дымер и др.), значительное внимание будет уделяться изучению влияния искусственно-возмущенной области на распространение КВ сигналов в ИВК на частотах превышающих МПЧ стандартного скачкового распространения.

Результаты исследований параметров ионосферной плазмы будут использоваться при оценке влияния неоднородной структуры ионосферы на радиоастрономические измерения.

Литература

1. Poole A.W.V. Advanced sounding 1. The FMCW alternative Radio Sci., 1985, т. 20, № 6, p. 1609-1616.
2. Poole A.W.V., Evans G.P. Advanced sounding 2. First results from an advanced chirp ionosonde. Radio Sci., 1985, т. 20, № 6, p. 1617-1625.
3. Брухимов И.М., Иванов В.А., Митяков Н.А. и др. ЛЧМ-метод диагностики ионосферного канала КВ-связи // Магнийский политех. инст Иолкар-Ола, 1986-Учс.-Деп. в ВИНИТИ № 9027-В86.
4. Брухимов И.М., Иванов В.А., Митяков Н.А. и др. Исследование частотных характеристик декаметровых радиоволн при зондировании ионосферы, возмущенной молнией радиоизлучением. // Препринт № 236 НИРФИ, Горький, 1987.
5. Иванов В.А., Урядов В.П., Фролов В.А., Лумазев В.В. Наклонное зондирование ионосферы непрерывными ЛЧМ сигналами. // Геомагн. и аэронавиг.-1990.-Т. 30, № 1.
6. Брынько И.Г., Галкин И.А., Грозов В.П. и др. Ионозонд с непрерывным линейно-частотно-модулированным радиосигналом. // Препринт № 13-86 СибИЗМИР Иркутск.
7. Прэтт у. Цифровая обработка изображений. М: Мир, 1982, т. 2, с. 790
8. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения ч. 2, М: Мир, 1982, с. 287.
9. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов М: Мир, 1974, с. 464.
10. Автоматическая обработка данных с пузырьковых и искровых камер // Под. ред. Розова Б.С., М: АТОМиздат, 1971, с. 240.
11. Маглеванин Н.П. Применение авторегрессий для моделирования динамики ионосферных параметров. // Радиофизика и физ. осн. электрон.-1989.-№ 1. С. 12.
12. Благовещенский Д.В. Распространение декаметровых радиоволн в высоких широтах. М: Наука, 1981, с. 180.
13. Унучков В.Е. Результаты измерений угловых характеристик при сверхдальнем распространении коротковолновых сигналов. В сб. Исследования по геомагнетизму, аэронавигации и физике Солнца. М: Наука, 1977, вып. 41, с. 167-170.

14. Fialer P.A. Field-aligned scattering from a heated region of the ionosphere - observations at HF and VHF. // *Radio Sci.*, 1974, т. 9, № 11, p. 923 -
15. Алимов В.А., Коровин А.В., Насыров А.М. и др. Зависимость сечения ракурсного рассеяния УКВ на мелкомасштабных искусственных неоднородностях от состояния ионосферы // *Изв. вузов Радиофизика*. - 1986. - т. 29, № 1, с. 115-117.
16. Haloupis S., Hoeg P., Nielsen E. Doppler spectrum anisotropy observed in 1-m irregularity auroral backscatter. // *Radio Sci.*, 1985, т. 20, № 4, p. 676-678.
17. Greenwald R.A., Baker K.B., Hutchins R.A., Hanuise C. An HF phased array radar for studying small-scale structure in the high-latitude ionosphere. // *Radio Sci.*, 1985, т. 20, № 1, p. 63-79.
18. Bouzdillon A. Spectral characteristics of high frequency waves backscattered by small-scale F-region irregularities. evidence of strong sub-auroral ion flow. // *J. Atm. Terr. Phys.* 1976, т. 48, № 8, p. 703-714.
19. Богута Н.М., Максименко О.И., Урядов В.П., Цыганаш И.П. Обратное рассеяние волн декаметрового диапазона неоднородностями F слоя субполярной ионосферы. // *Изв. вузов Радиофизика* - 1987. - т. 30, № 2, с. 1399-1401.
20. Богута Н.М., Нога Ю.В., Урядов В.П. Спектральные характеристики КВ сигналов, рассеянных неоднородностями F слоя субполярной ионосферы. // *Геомагнетизм и аэронавтика*. - 1989. - т. 29, № 3, с. 678-680.
21. Исигаму А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. - М: Мир, 1981, т. 2, с. 318.
22. Miller N.J. The main electron trough during the Rising Solar Cycle. // *J. Geoph. Res.* 1970, т. 75, № 34, p. 7175-7181.
23. Гершман Б.Н., Ерухимов Л.М., Яшин Ю.Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. - М: Наука, 1984, с. 392.
24. Nielsen E., Schlegel K.A. first comparison of STARE and EISCAT electron drift velocity measurements // *J. Geoph. Res.*, 1983, т. 88, № 7, p. 5745-5750.
25. Бочкарев Г.С., Урядов В.П., Форм Р.В. Методика расчета геометрии ракурсного рассеяния радиоволн на магнитоориентированных ионосферных неоднородностях. // В сб. *Распространение радиоволн в ионосфере*. - М: ИЗМИРАН, 1989, с. 43-46
26. Айзенберг Г.З., Белоусов С.П., Лурбенко Э.М. и др. Коротковолновые антенны. М: Радио и связь, 1986, с. 536

СО Д Е Р Ж А Н И Е

	стр.
В в е д е н и е.....	3
I. Аппаратурное и программное обеспечение приемно- передающего комплекса "Дымер".....	4
I.1. Антенны и аппаратура для ВНЗ ионосферы.....	4
I.2. Аппаратура для измерения доплеровского сдвига частоты.....	6
I.3. Структура приемного комплекса ЛВМ зондирова - ния ионосферы.....	9
I.4. Методы цифровой обработки и анализа ионограмм наклонного ЛЧМ зондирования на базе ПЭВМ "Нейрон".....	10
I.5. I.4.1. Первичная обработка данных ЛЧМ НЗ ионосферы.....	17
I.4.2. Определение заданных параметров по результатам первичной обработки.....	26
2. Результаты исследований кругосветных сигналов.....	29
2.1. Статистические и угловые характеристики КС.....	29
2.2. Результаты спектральных измерений КС.....	35
3. Обратное рассеяние коротких радиоволн мелкомасштаб- ными неоднородностями субполярной и модифицированной среднеширотной ионосферы.....	41
3.1. Обратное рассеяние КВ неоднородностями F-слоя субполярной ионосферы.....	41
3.2. Спектральные характеристики КВ сигналов, рас- сеянных субполярной ионосферой.....	47
3.3. Результаты измерений доплеровского смещения частоты КВ сигналов, обратно-рассеянных мелко- масштабными неоднородностями модифицированной среднеширотной ионосферы.....	50
З а к л ю ч е н и е.....	55
Л и т е р а т у р а.....	57