

УДК 550.388.2+533.951+537.868

ИОНОЗОНД-РАДИОПЕЛЕНГАТОР С ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ СИГНАЛА — НОВЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ИОНОСФЕРЫ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН

Г. Г. Вертоградов¹, В. П. Урядов², В. Г. Вертоградов¹, Е. Г. Вертоградова¹,
С. В. Кубатко¹

¹ Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону;

² Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород, Россия

Дано краткое описание аппаратной реализации многоканального сигнала ионозонда-радиопеленгатора с линейной частотной модуляцией, способного наряду с традиционными параметрами измерять угловые частотные характеристики на трассах наклонного зондирования ионосферы. Приведены результаты экспериментальных исследований распространения радиоволн на трассах с различной протяжённостью и направлением в естественной и искусственно возмущённой ионосфере. Продемонстрированы возможности ионозонда-радиопеленгатора для загоризонтной коротковолновой радиолокации ионосферы Земли в планетарном масштабе.

ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения эффективного функционирования систем радиосвязи, радионавигации, радиопеленгации и радиолокации в условиях нестационарности ионосферного канала, подверженного воздействию различного рода возмущений естественного и искусственного происхождения, необходимо постоянно осуществлять мониторинг ионосферы с целью использования результатов зондирования для адаптации радиоэлектронных систем к условиям распространения радиоволн.

В последние несколько десятилетий для диагностики ионосферного канала используются маломощные системы наклонного зондирования с непрерывным излучением сигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) [1, 2]. Такие системы имеют высокую помехозащищённость, достигаемую за счёт большой базы ЛЧМ-сигнала. Испытания систем коротковолновой радиосвязи как у нас в стране [3], так и за рубежом [4] с назначением рабочих частот связи по данным наклонного ЛЧМ-зондирования в реальном времени показали возможность повышения надёжности коротковолновой связи до уровня спутниковых систем.

В то же время, при решении задач радиолокации, радионавигации и радиопеленгации возникает проблема позиционирования источника радиоизлучения (рассеяния). Для определения месторасположения источника радиоизлучения (рассеяния) необходимо по результатам измерений характеристик принятого радиосигнала выполнить имитационное моделирование распространения радиоволн в неоднородной магнитоактивной ионосфере с реальным распределением электронной концентрации N_e на трассе зондирования. При этом знания только дистанционно-частотной характеристики (ДЧХ), определяемой с помощью обычного ЛЧМ-ионозонда, часто оказывается недостаточно для решения обратной задачи определения параметров ионосферы и позиционирования источника радиоизлучения (рассеяния) с требуемой точностью. Повышение точности определения пространственно-временного распределения электронной концентрации и решение проблемы позиционирования источника радиоизлучения (рассеяния) может быть достигнуто в том случае, когда одновременно с дистанционно-частотной измеряется угловая частотная характеристика (УЧХ) трассы [5].

Инструментом, позволяющим измерять полный набор характеристик ионосферного радиоканала (дистанционно-частотные, амплитудно-частотные и угловые частотные характеристики), является созданный авторами ионозонд-радиопеленгатор с ЛЧМ-сигналом [6]. Как показали наши исследования [7–9], этот ионозонд-радиопеленгатор является незаменимым инструментом при интерпретации данных зондирования, особенно на трассах с большой протяжённостью, где реализуются различные механизмы распространения коротких волн, включая волноводное распространение.

В данной статье дано краткое описание аппаратуры, используемой для измерения угловых частотных характеристик на трассах наклонного ЛЧМ-зондирования. Также приведены новые результаты экспериментальных исследований ионосферного распространения коротких волн на трассах с различной протяжённостью и направлением, когда ионозонд-радиопеленгатор с ЛЧМ-сигналом использовался и как загоризонтный широкополосный радар бистатической конфигурации, и как ионозонд, способный измерять угловое распределение мощности различных мод принимаемых сигналов.

1. ОПИСАНИЕ АППАРАТУРЫ

Математическое обоснование работы ионозонда-радиопеленгатора с ЛЧМ-сигналом дано в [7, 10]. Здесь мы кратко опишем аппаратную реализацию многоканального ионозонда-радиопеленгатора.

Основными компонентами макета многоканального ионозонда-радиопеленгатора, предназначенного для измерения угловых частотных характеристик, являются:

- 1) антенная решётка, состоящая из 16 ненаправленных антенных элементов, расположенных на поверхности Земли (использованы активные антенны, размещённые на площадке с площадью 80×80 м);
- 2) 16-канальное когерентное широкополосное радиоприёмное устройство (РПУ) с промежуточной частотой 70 МГц и полосой по промежуточной частоте до 1 МГц;
- 3) 16-канальный модуль цифровой обработки сигналов с первичной частотой оцифровки 16 МГц;
- 4) синтезатор и разветвитель тактовой частоты с возможностью внешнего запуска преобразования, обеспечивающий когерентность 16-канального аналого-цифрового преобразователя;
- 5) приёмник GPS для временной синхронизации комплекса и запуска модуля цифровой обработки сигналов измерительного комплекса по секундной метке;
- 6) многопроцессорный промышленный компьютер.

Основу аппаратной части разработанного макета ионозонда-радиопеленгатора составляет модуль цифровой обработки сигналов, для которого разработан программируемый ЛЧМ-фильтр, позволяющий непрерывно перестраивать цифровой фильтр с узкой полосой 10 кГц вторичного канала в полосе радиоприёмного устройства 1 МГц. Как следствие, на выходе каждого из 16 вторичных каналов получаются квадратурные компоненты разностного сигнала. Выходной вторичный цифровой поток квадратурных компонент дискретизован с частотой $f_d = 20\,000$ Гц. При переходе частоты зондирующего ЛЧМ-сигнала через границу текущей полосы настройки 16-канального радиоприёмного устройства приёмник программно перестраивается на новую полосу с шириной 1 МГц; процесс получения квадратурных компонент разностного сигнала и квадратурной дискретизации продолжается непрерывно. Модуль цифровой обработки сигналов обеспечивает первичную оцифровку сигнала на промежуточной частоте (частота оцифровки 16 МГц) и предварительную обработку цифрового сигнала, состоящую в его фильтрации, понижении частоты дискретизации до 20 кГц, перестройке узкополосного цифрового фильтра с полосой 10 кГц

с заданной скоростью (до 1 000 кГц/с).

Сигнал секундной метки GPS подаётся на вход синтезатора тактовой частоты. Для обеспечения жёсткой временной привязки ионозонда-радиопеленгатора к сигналам наклонного ЛЧМ-зондирования для данного модуля разработан внутренний цифровой таймер, синхронизуемый по секундной метке GPS.

Сигнал промежуточной частоты каждого канала радиоприёмного устройства подаётся на соответствующие входы многоканального модуля цифровой обработки сигналов.

Управление радиоприёмным устройством и цифровой обработкой сигналов, а также цифровая обработка сигнала с целью извлечения информационных параметров осуществляется с помощью компьютера.

Оценка обеих угловых координат прихода каждого обнаруженного луча выполняется по векторам взаимной спектральной плотности мощности $\mathbf{S} = \{S_{n0}\}$ для опорного канала с номером 0 и всех антенных элементов $S_{n0} = s_{nm}s_{0m}^*$, где $n = 0, 1, \dots, N-1$, $m = 0, 1, \dots, M-1$, на основе численного построения диаграммы направленности антенной решётки [7, 10]:

$$D_{jl}(\alpha, \Delta) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \exp \left\{ i \left[\Phi_{jnl} - \frac{2\pi}{c} f_{nl} \cos(\Delta) \cos(\alpha - \alpha_n) \right] \right\}. \quad (1)$$

Здесь Φ_{jnl} — измеренная фаза ЛЧМ-сигнала для j -го луча на n -м антенном элементе, $l = 0, 1, \dots, L-1$ — номер дискретной частоты f_{nl} , на которой оцениваются углы прихода, α и Δ — азимут и угол места соответственно.

Когда углы α и Δ совпадают с углами прихода j -го луча α_j и Δ_j , функции $|D_{jl}(\alpha, \Delta)|$ и $\operatorname{Re} D_{jl}(\alpha, \Delta)$ одновременно достигают максимального значения, равного единице, а мнимая часть $\operatorname{Im} D_{jl}(\alpha, \Delta)$ обращается в ноль. Как следствие, алгоритм определения двумерного направления прихода j -го луча по измеренным разностям фаз Φ_{jnl} на дискретной частоте f_l сводится к отысканию глобального максимума функций $|D_{jl}(\alpha, \Delta)|$ или $\operatorname{Re} D_{jl}(\alpha, \Delta)$ [11, 12].

Обратим внимание на отличия в процедурах максимизации функций $|D_{jl}(\alpha, \Delta)|$ и $\operatorname{Re} D_{jl}(\alpha, \Delta)$. Функция $|D_{jl}(\alpha, \Delta)|$ не зависит от фазового множителя типа $\exp(i\varphi)$. В этом случае начало координат антенной решётки может быть выбрано произвольно. При этом максимизация функции $\operatorname{Re} D_{jl}(\alpha, \Delta)$ обладает двумя преимуществами: отсутствуют боковые лепестки синтезированной диаграммы направленности, обусловленные мнимой частью $\operatorname{Im} D_{jl}(\alpha, \Delta)$, а ширина главного лепестка $\operatorname{Re} D_{jl}(\alpha, \Delta)$ меньше.

Оценка достоверности найденных углов прихода сигнала осуществляется по значению кругового стандартного отклонения [12]:

$$\sigma_{jl} = \sqrt{-2 \ln |D_{jl}|}, \quad (2)$$

которое имеет смысл среднеквадратичного отклонения измеренных фаз Φ_{jnl} от теоретических фаз Ψ_{jnl} . Для плоского волнового фронта величина σ_{jl} обращается в ноль и характеризует степень совпадения фронта падающей волны для выделенного j -го луча с плоским. Малость величины σ_{jl} является необходимым условием достоверности найденных углов прихода.

Как следствие, в процессе зондирования с помощью многоканального ионозонда-радиопеленгатора с ЛЧМ-сигналом характеристики распространения определяются квазинепрерывно по частоте. При этом минимальный шаг по частоте ограничен снизу величиной $\mu_0 \Delta t$, где μ_0 — скорость перестройки частоты, а сверху — величиной $\mu_0 \Delta t M$, где $\Delta t M$ — ширина временного окна. Конкретное значение шага по частоте определяется производительностью вычислительной системы комплекса ионозонда-радиопеленгатора. При этом определяются следующие информационные характеристики:

1) дистанционно-частотные и амплитудно-частотные характеристики, количество мод и лучей распространения, наименьшая и максимальная наблюдаемая частоты каждой моды распространения, интервалы многолучёвости, полоса когерентности на контролируемых частотах, вероятность ошибки и надёжность связи по методике, описанной в работе [13];

2) количество обнаруженных лучей распространения O' на каждой дискретной частоте f_i , их средние амплитуды a_{oi} , азимуты α_{oi} , углы места Δ_{oi} и задержки τ_{oi} , где $o = 0, 1, \dots, O' - 1$.

Особенностью многоканального ионозонда-радиопеленгатора является также то, что при условии измерения угловых частотных характеристик автоматически достигается очистка результатов зондирования от шумов естественного происхождения и станционных помех, характерных для одноканальных ЛЧМ-ионозондов.

Оценка географических координат источника радиоизлучения/рассеяния, географического азимута и дальности до источника осуществляется на основе расчётов траекторий [14] в ионосфере, описываемой моделью IRI-2012. Отметим, что процедура однопозиционного местоопределения источника радиоизлучения/рассеяния [14], включённая в алгоритм обработки результатов зондирования, преследует две цели. Первая состоит в том, чтобы достоверно определить координаты источника радиоизлучения/рассеяния. Вторая — в том, чтобы автоматически идентифицировать моды и лучи распространения на исследуемой трассе наклонного зондирования ионосферы.

2. ДИАГНОСТИКА НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЫ ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЫ МЕТОДОМ ЗАГОРИЗОНТНОЙ КОРОТКОВОЛНОВОЙ РАДИОЛОКАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ИОНОЗОНДА-РАДИОПЕЛЕНГАТОРА

В ионосферных исследованиях большое внимание уделяется изучению особенностей образования и существования экваториального F -рассеяния. Экваториальное F -рассеяние — сложное явление ночной экваториальной ионосферы со своей иерархией плазменных неустойчивостей, приводящих при благоприятных ионосферных и термосферных условиях к генерации неоднородностей электронной концентрации с широким спектром пространственных масштабов. Неоднородности экваториальной ионосферы оказывают существенное влияние на работу навигационных систем и систем связи, вызывая амплитудные и фазовые флуктуации радиосигналов.

Для изучения пространственно-временных характеристик неоднородностей верхней ионосферы, ответственных за F -рассеяние, используются мерцания радиозвёзд, трансэкваториальное распространение, мерцания радиосигналов искусственных спутников Земли, обратное рассеяние когерентных и некогерентных радаров, ракетные и зондовые измерения, свечение, а также измерения полного электронного содержания на основе трансionoсферного приёма радиосигналов спутников (см., например, [15] и цитируемую там литературу).

Ценные наблюдения представлены в [16]: на трансэкваториальной трассе между Цумб (Намибия, Южная Африка, $19,25^\circ$ ю. ш., $17,7^\circ$ в. д.) и Линдау (Германия, $51,6^\circ$ с. ш., $10,1^\circ$ в. д.) при зондировании на частоте $18,2$ МГц кроме сигнала, принятого по дуге большого круга между передатчиком и приёмником, были приняты дополнительные сигналы с задержками, составляющими периодическую структуру. Эти дополнительные сигналы были интерпретированы как сигналы, рассеянные от дискретных областей F -слоя с неоднородностями, расположенными к западу и востоку от направления дуги большого круга между передатчиком и приёмником. Обнаружение периодичности задержек рассеянных сигналов инициировало много теоретических работ, включая исследование роли акустико-гравитационных волн и их связи с экваториальным F -рассеянием в качестве затравочного источника развития плазменных неустойчивостей (см., например, [17] и цитируемую там литературу).

Несмотря на значительные достижения в исследовании F -рассеяния, многие вопросы ещё

ждут своего решения. В частности, это относится к необходимости более полного и детального исследования спусковых механизмов плазменных неустойчивостей, стабилизирующих и дестабилизирующих факторов развития неоднородностей с различными масштабами (вплоть до метровых) и их пространственно-временных вариаций в различных гео- и ионосферных условиях.

В связи с этим значительный интерес представляет использование новой техники широкополосного наклонного ЛЧМ-зондирования для исследования особенностей экваториальной ионосферы.

В работе представлены результаты экспериментов по исследованию неоднородной структуры экваториальной ионосферы на трассе Лейвертон (Австралия)—Ростов-на-Дону с протяжённостью 11 790 км с помощью нового, не имеющего мировых аналогов инструмента — ионозонда-радиопеленгатора с ЛЧМ-сигналом. В эксперименте наш инструмент используется как горизонтный коротковолновый ЛЧМ-радар с бистатической конфигурацией. Фактически, это развитие пионерской работы [16] на современном техническом уровне.

Впервые эксперимент по сверхдальному зондированию ионосферы с помощью ионозонда-радиопеленгатора проводился в декабре 2009—январе 2010 годов на трансэкваториальной трассе Лейвертон ($28,6^\circ$ ю. ш., $122,4^\circ$ в. д.)—Ростов-на-Дону. В ходе этого эксперимента были обнаружены аномальные сигналы и дана их интерпретация [8]. Было установлено, что часть аномальных сигналов обусловлена рассеянием радиоволн от Иранского нагорья и горного массива Гималаи. В вечернее и ночное время наблюдались аномальные сигналы с азимутов $15^\circ \div 20^\circ$ с задержкой примерно $10 \div 12$ мс относительно прямого сигнала. На основе сопоставления экспериментальных и расчётных данных было установлено, что такие аномальные сигналы связаны с рассеянием рикошетирующих и волноводных мод на ионосферных неоднородностях, расположенных в области диффузного высыпания заряженных частиц на северной стенке главного ионосферного провала ионизации, примыкающей к южной границе аврорального овала.

Эксперименты на трассе Лейвертон—Ростов-на-Дону с использованием ионозонда-радиопеленгатора были продолжены в 2010—2013 годах в условиях более высокой солнечной активности; тогда были обнаружены аномальные сигналы, природа которых связана с рассеянием радиоволн на экваториальных неоднородностях. ЛЧМ-передатчик в г. Лейвертон работает в диапазоне частот $5 \div 30$ МГц, скорость перестройки частоты составляет 125 кГц/с, излучение осуществляется каждые 4 минуты. В Ростове-на-Дону приём осуществляется на описанную выше антенную решётку, состоящую из 16 вертикальных девятиметровых штырей. Подробное описание работы ионозонда-радиопеленгатора изложено в [6, 18].

Характерные примеры ионограмм на трассе Лейвертон—Ростов-на-Дону в вечернее время с регистрацией аномальных сигналов показаны на рис. 1, 3, 5.

На рис. 1 показана ионограмма для 15:27 UT 01.10.2010 с регистрацией аномальных (рассеянных) сигналов РС1, РС2 и РС3. Сигнал РС2 занимает диапазон частот $5,2 \div 11,5$ МГц, имеет большой разброс по задержкам (от 42,5 до 56 мс) и по азимутам (от 126° до 208°). Сигнал РС3 занимает диапазон частот $7,8 \div 11,3$ МГц и также имеет большой разброс: от 42 до 57 мс по задержкам и от 215° до 331° по азимутальным углам прихода. Сигнал РС1 в виде трёх треков наблюдался на частотах выше максимальной наблюдаемой частоты прямого сигнала (13,6 МГц) и занимал интервал частот $9,8 \div 15,1$ МГц. Хотя сигналы РС1 содержат диффузную составляющую, в основном эти сигналы локализованы как по задержкам ($42,6 \div 43,8$; $44,0 \div 45,2$ и $46,8 \div 48,0$ мс), так и по азимутальным углам прихода ($85^\circ \div 91^\circ$; $81,0^\circ \div 84,7^\circ$ и $72^\circ \div 79^\circ$ соответственно). Азимут прихода прямого сигнала на трассе Лейвертон—Ростов-на-Дону составляет 115° .

Для позиционирования областей, ответственных за появление рассеянных сигналов, проводилось моделирование распространения радиоволн с учётом измерений дистанционно-частотной и угловой частотной характеристик. Результаты позиционирования нанесены на физическую

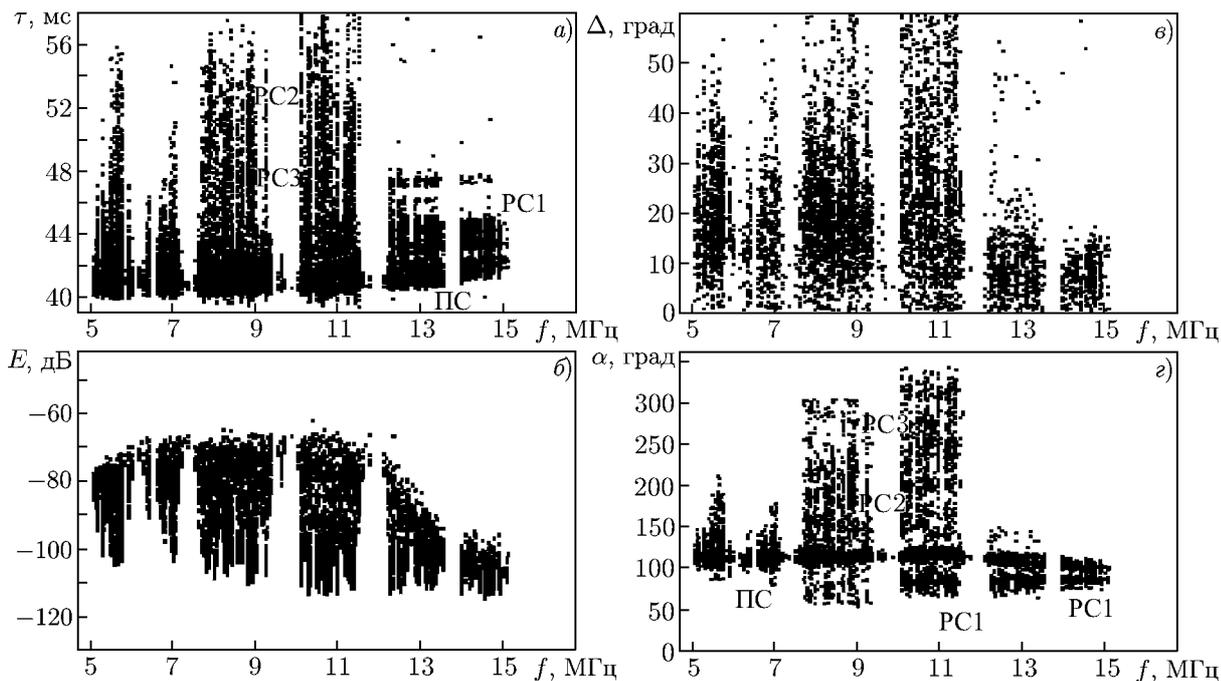


Рис. 1. Характеристики ионосферного канала на трассе ЛЧМ-зондирования Лейвертон (Австралия)—Ростов-на-Дону в 15:27 UT 01.10.2010: дистанционно-частотная характеристика (а), амплитудно-частотная характеристика (б), угловая частотная характеристика (угол места (в), азимут (г)), ПС — прямой сигнал, РС1–РС3 — рассеянные сигналы

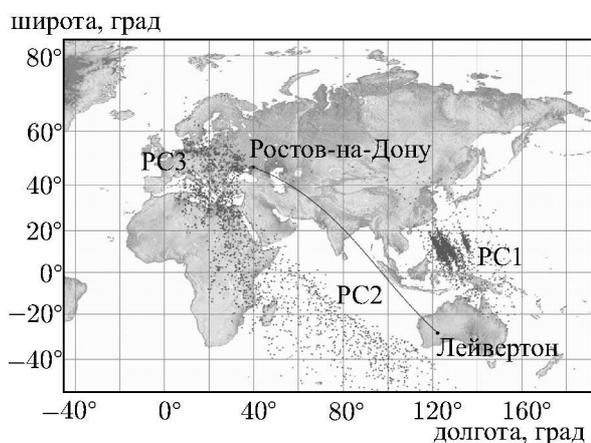


Рис. 2. Положение областей, ответственных за рассеянные сигналы РС1–РС3 на трассе ЛЧМ-зондирования Лейвертон (Австралия)—Ростов-на-Дону в 15:27 UT 01.10.2010

вносит рассеяние радиоволн от земной поверхности, где в указанных регионах имеются горные возвышенности, способствующие более эффективному формированию поля рассеянных радиосигналов.

Новый интересный результат связан с регистрацией в вечернее и ночное время сигналов РС1, зона образования которых имеет вид квазипериодической структуры, вытянутой приблизительно вдоль линии север–юг с пространственным квазипериодом между гребнями примерно 400÷

карту и показаны на рис. 2.

Как видно из рис. 2 (этому рисунку соответствует ионограмма, приведённая на рис. 1) сигналу РС2 соответствует обширная область, простирающаяся через Индийский океан от Австралии до Африки. Возможно, что сигнал РС2 связан с рассеянием радиоволн от неоднородностей приэкваториальной ионосферы и/или с рассеянием от взволнованной поверхности океана. Для более определённых выводов о природе сигналов РС2 необходимы дополнительные исследования в различных геосферных, ионосферных и метеорологических условиях.

Из рис. 2 видно, что область формирования сигналов РС3 приходится в основном на север Африки, Турцию, Балканы, Карпаты и Альпы. Мы полагаем, что основной вклад в сигналы РС3

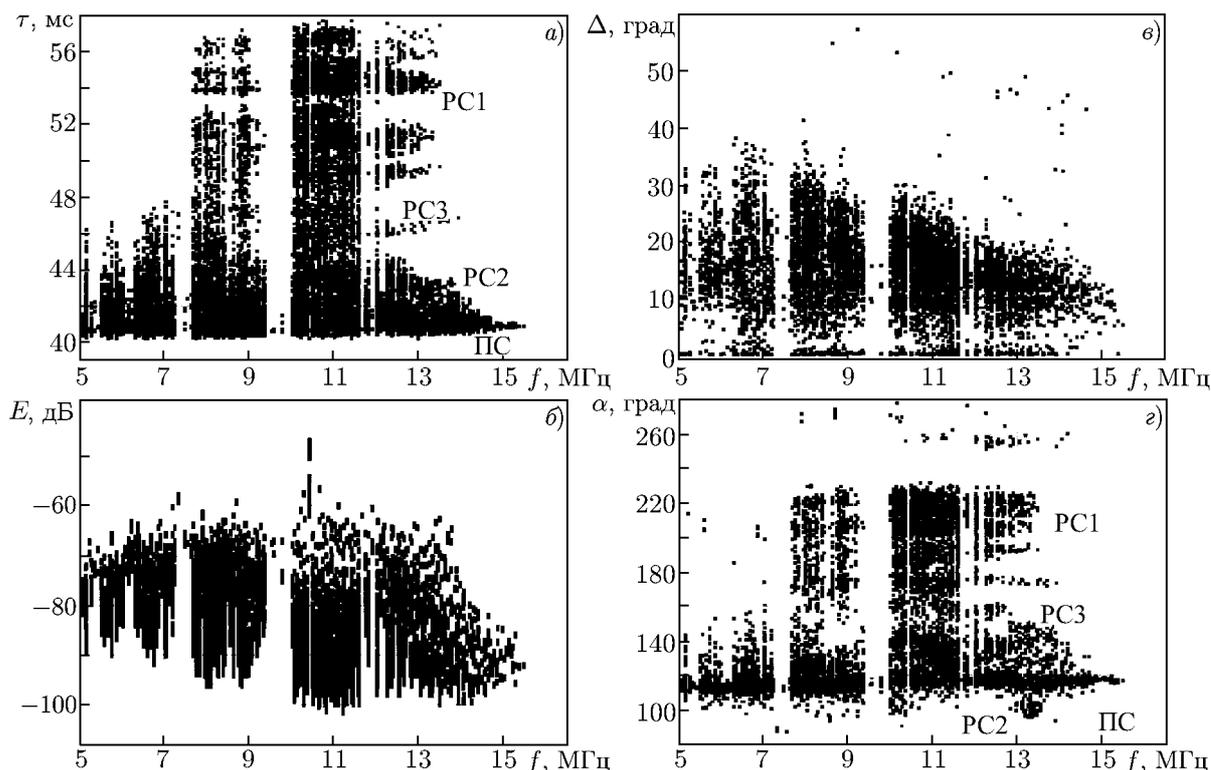


Рис. 3. Характеристики ионосферного канала на трассе ЛЧМ-зондирования Лейвертон (Австралия)—Ростов-на-Дону в 22:19 UT 04.04.2013: дистанционно-частотная характеристика (а), амплитудно-частотная характеристика (б), угловая частотная характеристика (угол места (в), азимут (г)), РС — прямой сигнал, РС1–РС3 — рассеянные сигналы

÷700 км (см. рис. 2). Эта область приходится на район в окрестности геомагнитного экватора. Мы полагаем, что природа сигналов РС1 связана с рассеянием/отражением радиоволн от перемещающихся ионосферных возмущений, являющихся ионосферным откликом на акустико-гравитационные волны. Как уже отмечалось выше, сигналы такого типа наблюдались на трансэкваториальной трассе наклонного зондирования между Цумб (Намибия) и Линдау (Германия) [16].

В работе [19] рассматривается механизм формирования в экваториальной ионосфере квазипериодических структур, связанный с пространственным резонансом, когда фазовая скорость перемещающихся ионосферных возмущений совпадает со скоростью дрейфа плазмы $[\mathbf{E} \times \mathbf{B}]$ в скрещённых зональном электрическом и магнитном полях. В этом случае происходит усиление волнового возмущения с последующим переходом в нелинейный режим, развитием неустойчивости и разрушением перемещающихся ионосферных возмущений. При этом области интенсивного рассеяния/отражения радиоволн в ионосфере соответствуют перемещающемуся ионосферному возмущению.

Интересные результаты с обнаружением квазипериодических структур были получены в 2013 году. На рис. 3 показана ионограмма для 22:19 UT 04.04.2013 с регистрацией аномальных (рассеянных) сигналов РС1, РС2, РС3. Сигнал РС2 занимает диапазон частот 7,7÷13,6 МГц, имеет небольшой разброс по задержкам (от 41,2 до 43,6 мс) и по азимутам (от 96° до 110,7°). Сигнал РС3 занимает диапазон частот 5,5÷14,6 МГц, имеет разброс по задержкам от 41,8 до 49,3 мс по азимутальным углам прихода — от 127° до 161°. Сигнал РС1 в виде отдельных треков наблюдался на частотах 7,7÷13,5 МГц. В основном сигналы РС1 локализованы по задержкам: 50,7÷53,2;

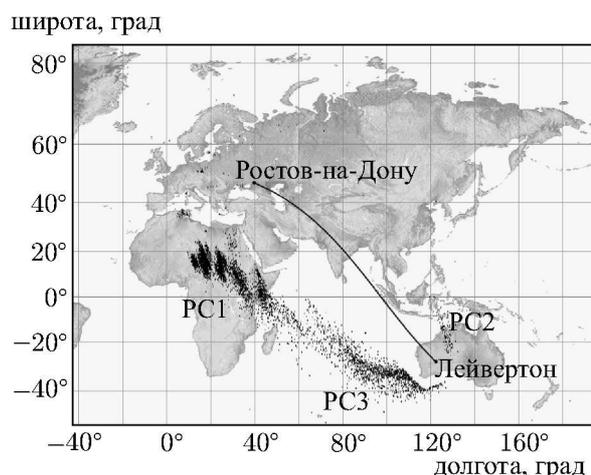


Рис. 4. Расположение областей, ответственных за рассеянные сигналы PC1–PC3 на трассе ЛЧМ-зондирования Лейвертон (Австралия)—Ростов-на-Дону в 22:19 UT 04.04.2013

4, можно сделать вывод, что квазипериодические структуры наблюдаются в окрестности геомагнитного экватора в вечерние и ночные часы местного времени по обе стороны от дуги большого круга между Лейвертоном и Ростовом-на-Дону к востоку и западу от этой трассы.

Таким образом, аномальные сигналы проявляют себя как сигналы, рассеянные/отражённые от квазипериодических структур электронной концентрации, расположенных в окрестности геомагнитного экватора. Такие квазипериодические структуры являются ионосферным откликом на атмосферные гравитационные волны. На существенную роль этих волн в инициировании экваториальных неоднородностей, сопровождающих явление экваториального F -рассеяния, указывают результаты многих экспериментальных и теоретических работ (см., например, [20–22] и цитируемую там литературу), где отмечается, что наличие градиента электронной концентрации при её модуляции волновым возмущением снижает порог развития плазменной неустойчивости Рэлея—Тейлора и приводит к образованию экваториальных неоднородностей.

Следует отметить, что важным преимуществом метода загоризонтной коротковолновой радиолокации квазипериодических структур электронной концентрации экваториальной ионосферы является фактически непосредственное определение пространственной ориентации и квазипериода таких возмущений. Другим важным преимуществом данного метода является планетарный характер зондирования, недоступный другим методам, в том числе и спутниковым, когда за короткое время порядка 2–3 мин осуществляется практически одновременное зондирование различных областей ионосферы Земли.

Возможности ионозонда-радиопеленгатора с ЛЧМ-сигналом для загоризонтной коротковолновой радиолокации ионосферы Земли в планетарном масштабе проиллюстрированы результатами зондирования на протяжённой трансэкваториальной трассе Лейвертон (Австралия)—Ростов-на-Дону, когда одновременно наблюдались аномальные сигналы, рассеянные от экваториальной и высокоширотной ионосферы. Пример ионограммы на трассе Лейвертон—Ростов-на-Дону в вечернее время 21:51 UT 15.09.2010 с регистрацией аномальных сигналов PC1–PC4 показан на рис. 5. На рис. 6 на физической карте указаны области, ответственные за появление этих аномальных сигналов.

53,8–55,7 и 55,8–57,8 мс — интервалы азимутальных углов прихода $198,3^\circ \div 225,5^\circ$; $206,5^\circ \div 231,8^\circ$ и $209,6^\circ \div 231,1^\circ$ соответственно. Амплитуды сигналов PC1, PC2 и PC3 были меньше амплитуды прямого сигнала на 15–35; 10–25 и 10–30 дБ соответственно.

На рис. 4 приведены результаты позиционирования областей, ответственных за появление рассеянных сигналов PC1–PC3, зарегистрированных на ионограмме, показанной на рис. 3. Обращает на себя внимание ярко выраженная квазипериодическая структура, связанная с сигналами PC1. Расчёт и анализ данных показывает, что сигналу PC1 соответствует квазипериодическая структура над центральной Африкой в окрестности геомагнитного экватора с пространственным квазипериодом между гребнями примерно 500–700 км (см. рис. 4). Сравнивая рис. 2 и

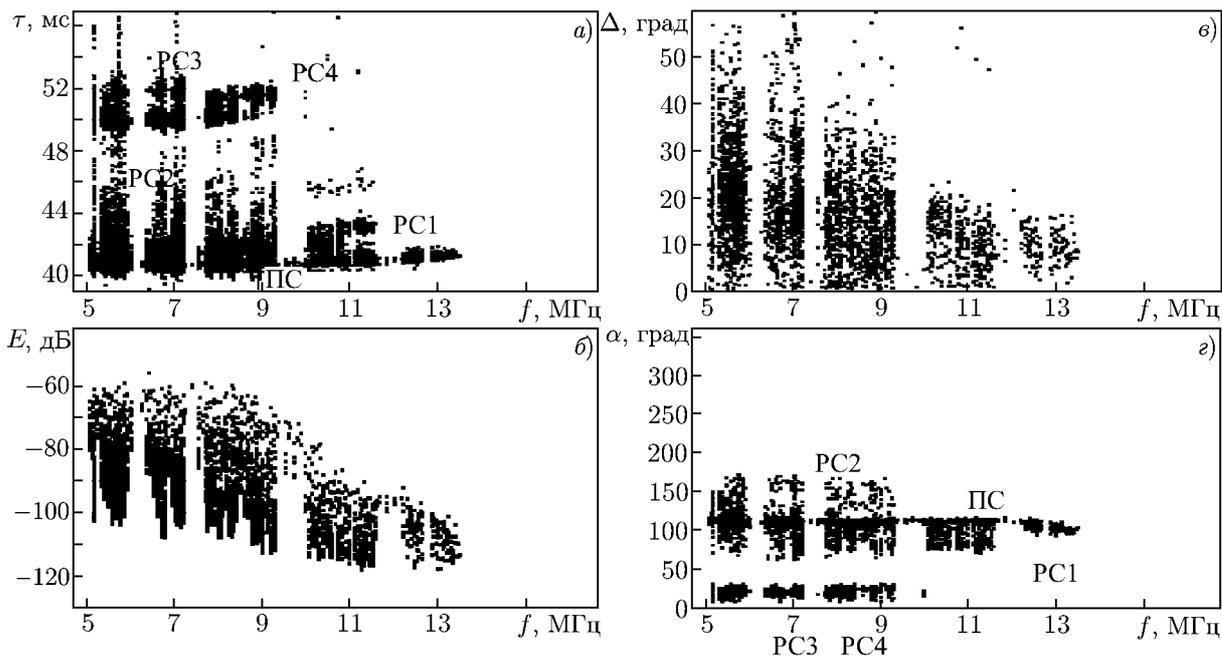


Рис. 5. Характеристики ионосферного канала на трассе ЛЧМ-зондирования Лейвертон (Австралия)—Ростов-на-Дону в 21:51 UT 15.09.2010: дистанционно-частотная характеристика (а), амплитудно-частотная характеристика (б), угловая частотная характеристика (угол места (в), азимут (г)), ПС — прямой сигнал, PC1–PC4 — рассеянные сигналы

Как видно из рис. 6, за сигналы PC2 ответственно протяжённая область в районе Индийского океана. Возможно, что природа сигналов PC2 связана с рассеянием от водной поверхности; этот вопрос требует дальнейших исследований.

Квазипериодическую структуру в окрестности геомагнитного экватора, ответственную за сигналы PC1, мы связываем с рассеянием/отражением радиоволн от перемещающихся ионосферных возмущений на стадии развития возмущения и его разрушения.

Положение областей, ответственных за сигналы PC3 и PC4, мы связываем с высокоширотными неоднородностями, существующими в вечерние и ночные часы местного времени в окрестности северной стенки ионосферного провала. Рассеяние на этих неоднородностях, как было показано в [8], ответственно за аномальные сигналы, приходящие с северо-восточного направления с азимутов порядка $15^\circ \div 20^\circ$.

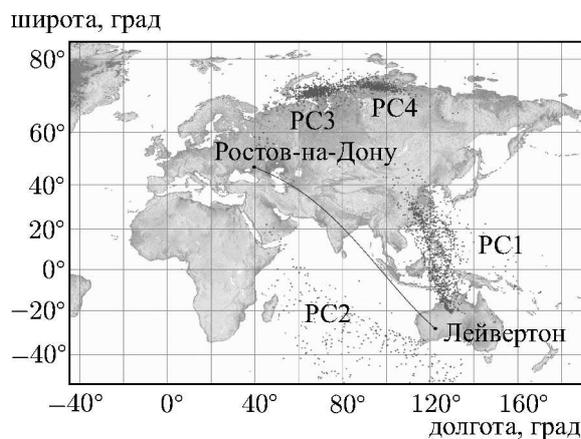


Рис. 6. Расположение областей, ответственных за рассеянные сигналы PC1–PC4 на трассе ЛЧМ-зондирования Лейвертон (Австралия)—Ростов-на-Дону в 21:51 UT 15.09.2010

с северо-восточного направления с азимутов порядка $15^\circ \div 20^\circ$.

3. УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ НА ТРАССЕ КИПР—РОСТОВ-НА-ДОНУ С ПОМОЩЬЮ ИОНОЗОНДА-РАДИОПЕЛЕНГАТОРА С ЛЧМ-СИГНАЛОМ

Традиционно результатом наклонного ЛЧМ-зондирования ионосферы является измерение дистанционно-частотной и амплитудно-частотной характеристик ионосферного канала [23]. Однако диагностические возможности комплекса наклонного ЛЧМ-зондирования могут быть существенно расширены при использовании на приёмной стороне двух- или многоканальных ЛЧМ-приёмников. В этом случае дополнительно могут измеряться двумерные угловые частотные характеристики: зависимости азимута и угла места прихода различных мод распространения от частоты.

Угловые частотные характеристики чувствительны к локальным неоднородным структурам ионосферной плазмы и несут дополнительную информацию, анализ которой позволяет сделать определённые выводы о динамике пространственно-временных структур в ионосферной плазме естественного и искусственного происхождения. Например, для решения задач позиционирования неоднородностей, ответственных за рассеяние/отражение радиоволн в ионосфере, традиционно используется триангуляционный метод, который требует наличия нескольких пространственно-разнесённых пунктов приёма ионограмм наклонного зондирования. Использование многоканальных ЛЧМ-ионозондов позволяет решить эту задачу с помощью одной приёмной точки. С другой

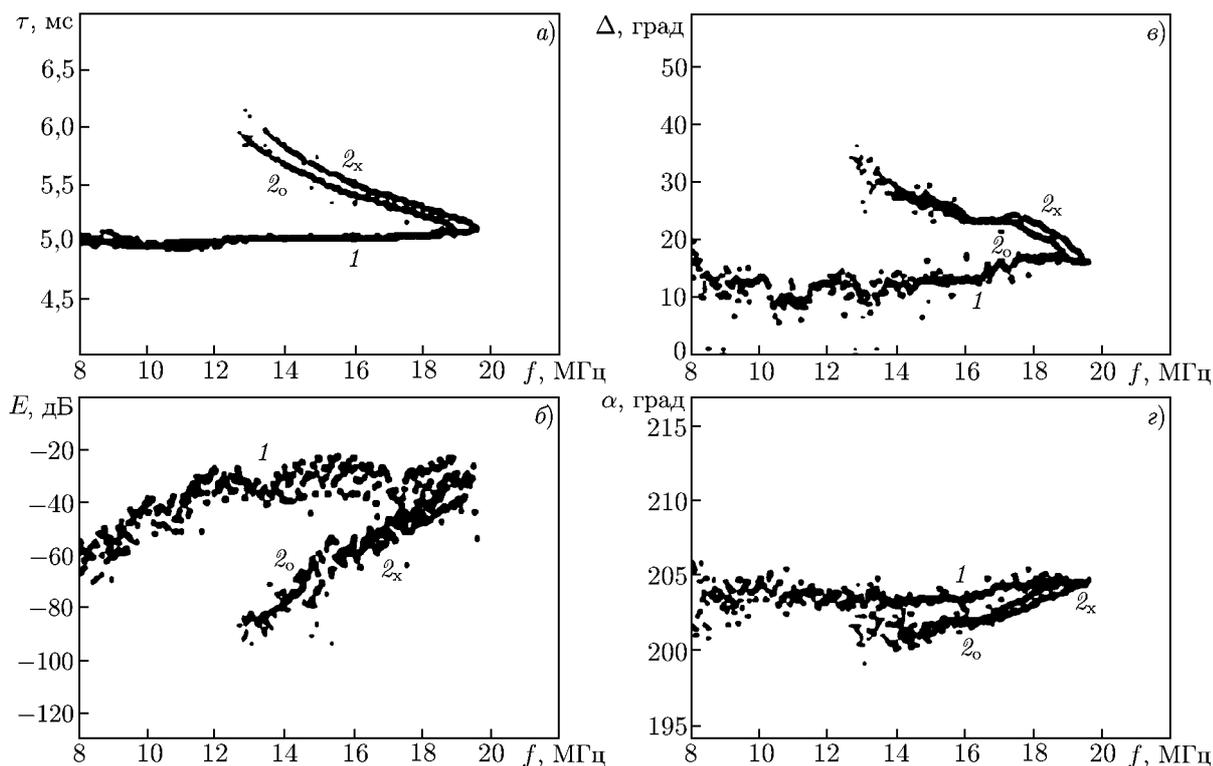


Рис. 7. Характеристики ионосферного канала на трассе Кипр—Ростов-на-Дону в 07:15 UT 22.01.2013: дистанционно-частотная характеристика (а), амплитудно-частотная характеристика (б), угловая частотная характеристика (угол места (в), азимут (г)). Цифрой 1 обозначен нижний луч, 2_o и 2_x — верхние лучи (моды Педерсена) для обыкновенной и необыкновенной магнитоионных компонент соответственно

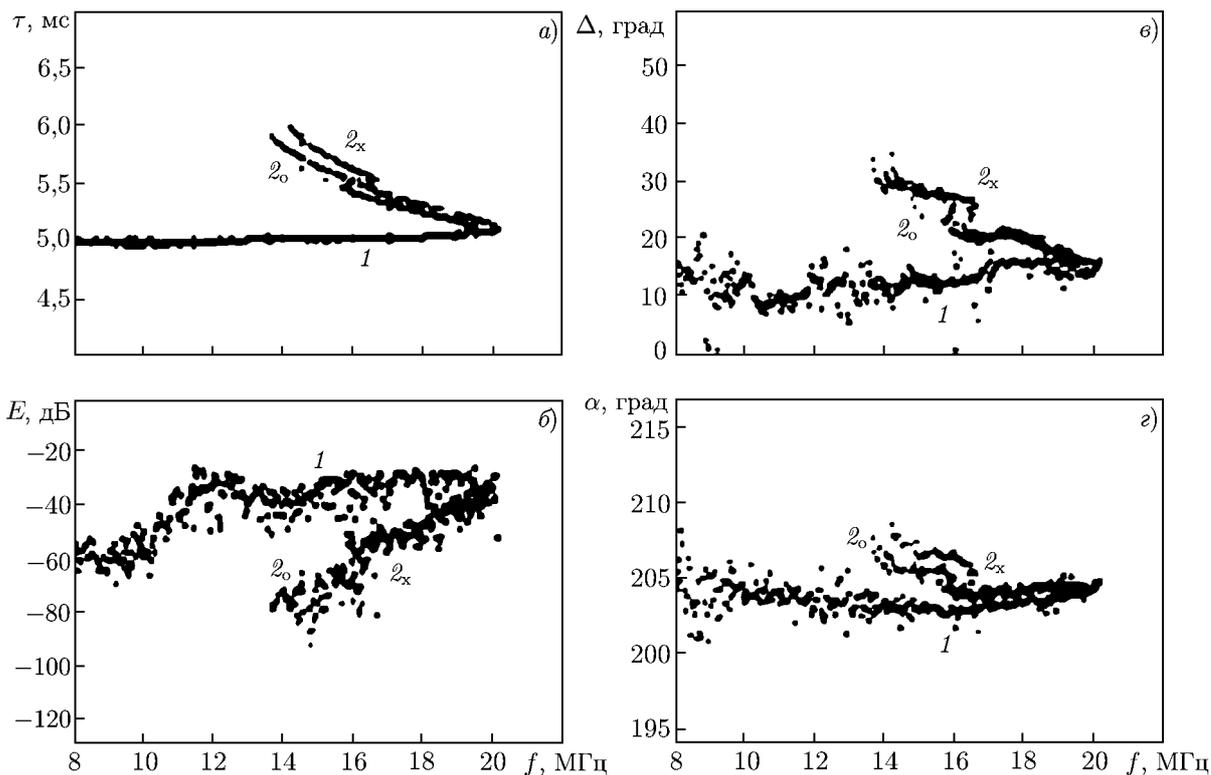


Рис. 8. То же, что и на рис. 7, для 07:45 UT 22.01.2013

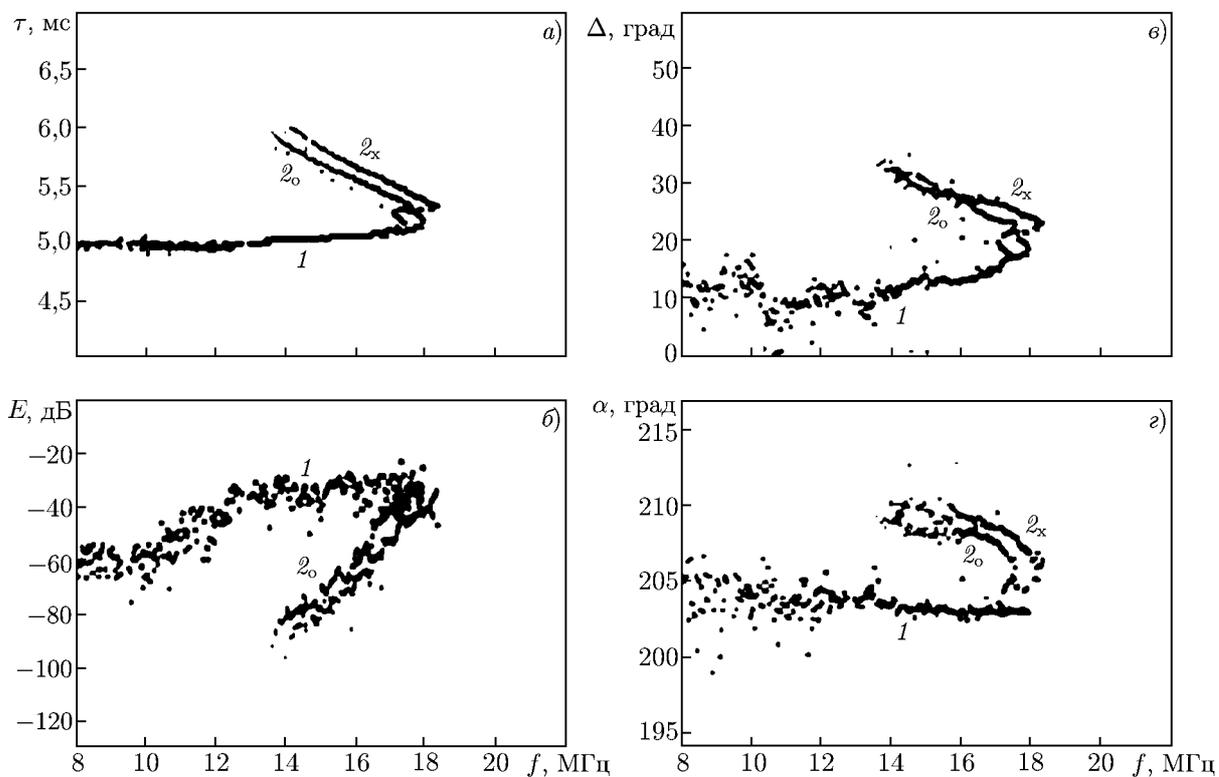


Рис. 9. То же, что и на рис. 7, для 08:30 UT 22.01.2013

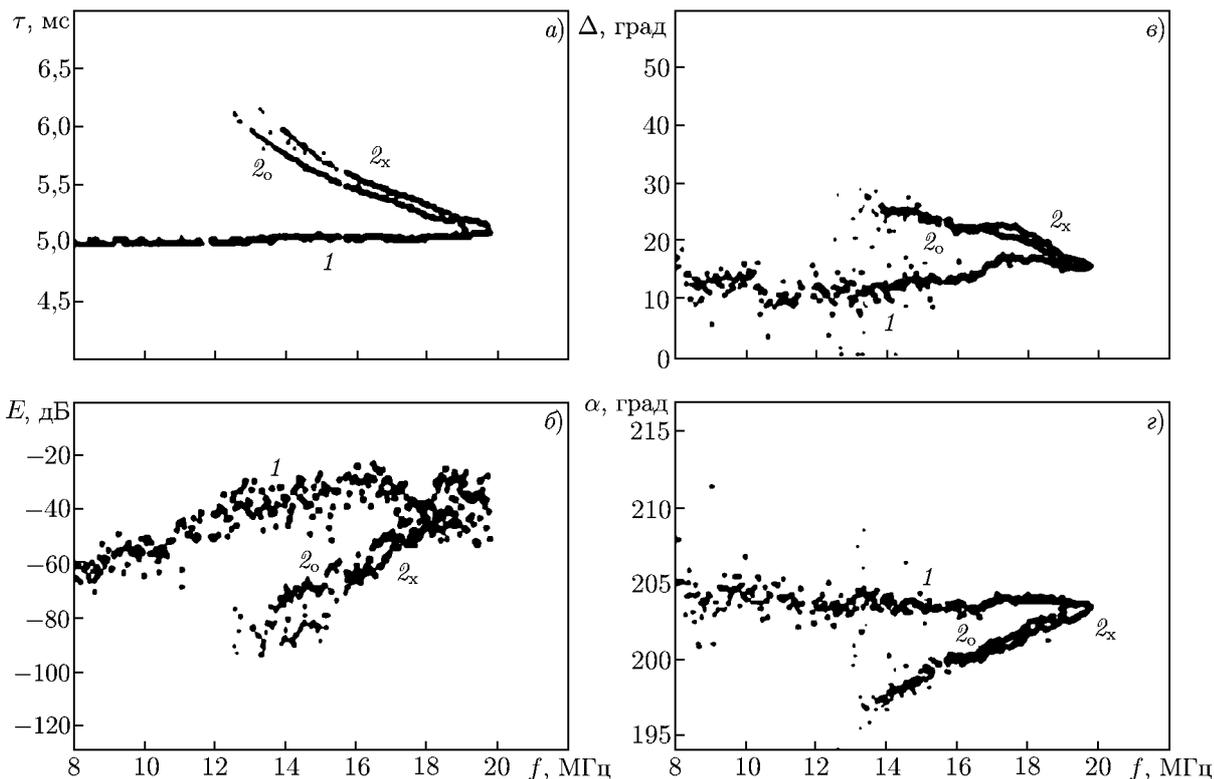


Рис. 10. То же, что и на рис. 7, для 09:00 UT 22.01.2013

стороны, измерения угловой частотной характеристики необходимы для решения прикладных задач калибровки угломерно-дальномерных комплексов коротковолнового диапазона, размещённых стационарно и на подвижных носителях [24].

Рисунки 7–10 иллюстрируют динамику изменения ключевых характеристик ионосферного канала (дистанционно-частотные, амплитудно-частотные и угловые частотные характеристики) для различных мод распространения на меридиональной среднеширотной трассе Кипр–Ростов-на-Дону с протяжённостью 1460 км при переходе от невозмущённых к возмущённым условиям и обратно (прохождению перемещающихся ионосферных возмущений).

На рис. 7 показано типичное поведение дистанционно-частотной, амплитудно-частотной и угловой частотной характеристик для условий невозмущённой ионосферы. Представляет интерес сравнить характеристики нижнего и верхнего лучей, поскольку известно, что верхний луч весьма чувствителен к вариациям пространственно-временной структуры ионосферной плазмы. Как видно из рис. 7б, на частотах вдали от максимальной наблюдаемой частоты, равной 19,6 МГц, амплитуда верхнего луча примерно на 30÷40 дБ меньше амплитуды нижнего луча. Вертикальные углы прихода верхнего луча вдали от максимальной наблюдаемой частоты превышают примерно на 10°÷20° углы прихода нижнего луча (см. рис. 7в), что соответствует общепринятым представлениям о механизмах их распространения [25]. Обращает на себя внимание тот факт, что азимут угла прихода верхнего луча меньше азимута угла прихода нижнего луча, т. е. для данной схемы эксперимента верхний луч смещён к востоку относительно нижнего луча, азимут которого совпадает с азимутом 203° на передающий пункт (Кипр). Этот эффект, по-видимому, связан с влиянием регулярного горизонтального градиента электронной концентрации в окрестности максимума F-слоя (области распространения верхнего луча), когда в дополуденные часы имеет место суточный рост электронной концентрации в восточном направлении.

Интересно отметить, что в следующем сеансе через 30 мин (см. рис. 8) с появлением перемещающихся ионосферных возмущений в виде z -образных треков на верхнем луче (см. рис. 8а) заметно искажаются угловые частотные характеристики. При этом азимут прихода верхнего луча становится больше азимута прихода нижнего луча, т. е. верхний луч смещается в западном направлении. Это может указывать на движение возмущения из западного в восточный сектор (относительно линии трассы), когда за счёт модуляции возмущением регулярного градиента ионизации может измениться направление локального градиента в области прохождения возмущения на трассе зондирования.

В следующем сеансе в 08:30 UT (см. рис. 9), когда перемещающееся ионосферное возмущение сместилось в верх по частоте и наблюдалось в окрестности максимальной наблюдаемой частоты, отличие азимутов прихода верхнего и нижнего лучей достигает $6^\circ \div 8^\circ$, причём верхний луч смещён к западу, как и в предыдущем сеансе.

В сеансе в 09:00 UT (см. рис. 10) после прохождения возмущения угловые частотные характеристики принимают вид, наблюдавшийся до начала прохождения возмущения на трассе зондирования (см. рис. 7), когда направление прихода верхнего луча отклоняется к востоку относительно направления прихода нижнего луча.

Полученные результаты указывают на высокую чувствительность верхнего луча к вариациям электронной концентрации, что может быть использовано для оценки локальных горизонтальных градиентов ионизации в окрестности максимума F -слоя по данным измерений дистанционно-частотной, амплитудно-частотной и угловой частотной характеристик с помощью ионозонда-радиопеленгатора с ЛЧМ-сигналом.

4. ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПО ДАННЫМ РАДАРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В данном разделе представлены результаты исследования тонкой структуры искусственной ионосферной турбулентности, полученные радарным методом с помощью ионозонда-радиопеленгатора с ЛЧМ-сигналом. Обнаружено расслоение трека рассеянного сигнала на несколько следов со своими задержками. Проведено моделирование распространения и рассеяния радиоволн в искусственно возмущённой ионосфере. Показано, что область рассеяния с мелкомасштабными ориентированными вдоль магнитного поля неоднородностями, формируемая в пределах диаграммы направленности антенны нагревного передатчика, не является однородной, а пространственно структурирована.

Эксперимент проводился 27–30 августа 2012 года с 15:00 до 24:00 MSK. Для создания искусственных ионосферных неоднородностей использовался нагревный стенд «Сура» ($56,1^\circ$ с. ш., $46,1^\circ$ в. д.). Три передатчика стенда работали в синфазном режиме на частотах 4785 или 5828 кГц с эффективной мощностью $PG \approx 100$ МВт. Излучалась волна с обыкновенной поляризацией в режимах 10 мин нагрев, 10 мин пауза, 15 мин нагрев, 15 мин пауза и 20 мин нагрев, 20 мин пауза. Излучение осуществлялось под углом 12° от вертикали на юг вдоль магнитного меридиана.

Для диагностики искусственных неоднородностей осуществлялось ЛЧМ-зондирование на трассе ИЗМИРАН ($55,28^\circ$ с. ш., $37,22^\circ$ в. д.)—«Сура»—Ростов-на-Дону ($47,24^\circ$ с. ш., $39,64^\circ$ в. д.). ЛЧМ-передатчик работал в диапазоне частот $2 \div 25$ МГц, скорость перестройки частоты составляла 100 кГц/с, мощность излучения 400 Вт. ЛЧМ-сигналы излучались вертикальным полуромбом в 1, 6, 11, 16, ..., 51 и 56-ю минуты каждого часа. Состояние ионосферы контролировалось двумя станциями вертикального зондирования: DSP-4 в ИЗМИРАН и «Базис» в месте размещения нагревного стенда. ЛЧМ-сигналы принимались в г. Ростов-на-Дону с помощью ионозонда-

радиопеленгатора.

Во время проведения эксперимента геомагнитная обстановка была спокойная, магнитный индекс K_p составлял $1 \div 2$.

Во время работы нагревного стенда «Сура» на ионограммах наклонного ЛЧМ-зондирования наблюдался рассеянный сигнал в виде моды, задержанной относительно моды прямого сигнала. В вечернее время после прохождения терминатора в окрестности нагревного стенда рассеянные сигналы носили диффузный характер, и в ряде случаев наблюдалось их расслоение.

Для интерпретации экспериментальных данных проводилось моделирование прямых и рассеянных сигналов. С помощью моделирования распространения прямого сигнала на трассе Москва—Ростов-на-Дону для условий эксперимента были откорректированы две модели ионосферы: параболическая и IRI-2012. По результатам моделирования лучше подошла параболическая модель.

После коррекции регулярной ионосферной модели имитировалось распространение сигнала при брэгговском рассеянии на ориентированных вдоль магнитного поля мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностях. При моделировании учитывались обыкновенные и необыкновенные моды распространения и варьировалось положение точки рассеяния по высоте и в горизонтальном направлении. Изменение точки рассеяния по высоте позволило по результатам моделирования для трассы Москва—«Сура»—Ростов-на-Дону оценить вертикальный размер области рассеяния на различных частотах, а, следовательно, для различных пространственных масштабов искусственных неоднородностей.

В процессе моделирования точка рассеяния смещалась и в горизонтальном направлении вдоль трассы «Сура»—Ростов-на-Дону. Такой характер смещения точки рассеяния обусловлен тем, что каких-либо регулярных отклонений направления прихода рассеянного сигнала от дуги «Сура»—Ростов-на-Дону в ходе эксперимента не наблюдалось. Отметим, что дуга большого круга «Сура»—Ростов-на-Дону близка к плоскости магнитного меридиана, азимут из Ростова-на-Дону на нагревный стенд «Сура» составляет $21,9^\circ$.

Смещение точки рассеяния позволило оценить географические координаты области, заполненной неоднородностями.

Поперечный масштаб l_\perp вытянутых вдоль магнитного поля неоднородностей оценивался из условия Брэгга—Вульфа по длине волны рассеянного диагностического излучения с учётом угла рассеяния, который определялся в процессе моделирования.

Как следствие, моделирование эффектов брэгговского рассеяния двух магнитоионных компонент рассеянного сигнала в условиях, максимально соответствующих условиям эксперимента, и согласование результатов моделирования с экспериментальными данными позволило оценить не только пространственные размеры области, заполненной неоднородностями, но и определить её географические координаты, причём для неоднородностей с различными поперечными масштабами l_\perp .

Результаты моделирования показаны на рис. 11 и обсуждаются ниже. Параметры параболической модели ионосферного слоя, используемой в расчётах, приведены в подписи к рис. 11.

Серыми точками на рис. 11 показаны экспериментальные данные, полученные с помощью ионозонда-радиопеленгатора: групповая задержка τ , угол места Δ (угол прихода луча относительно плоскости горизонта) и азимут α прихода луча относительно направления на географический север. Чёрными треугольниками показаны результаты моделирования распространения обыкновенных и необыкновенных лучей на прямой трассе Москва—Ростов-на-Дону. По этим данным можно судить о степени соответствия уточнённой параболической модели экспериментальным данным наклонного зондирования (дистанционно-частотной и угловой частотной характеристикам). Кружками и крестиками показаны результаты моделирования рассеянного по азимуту

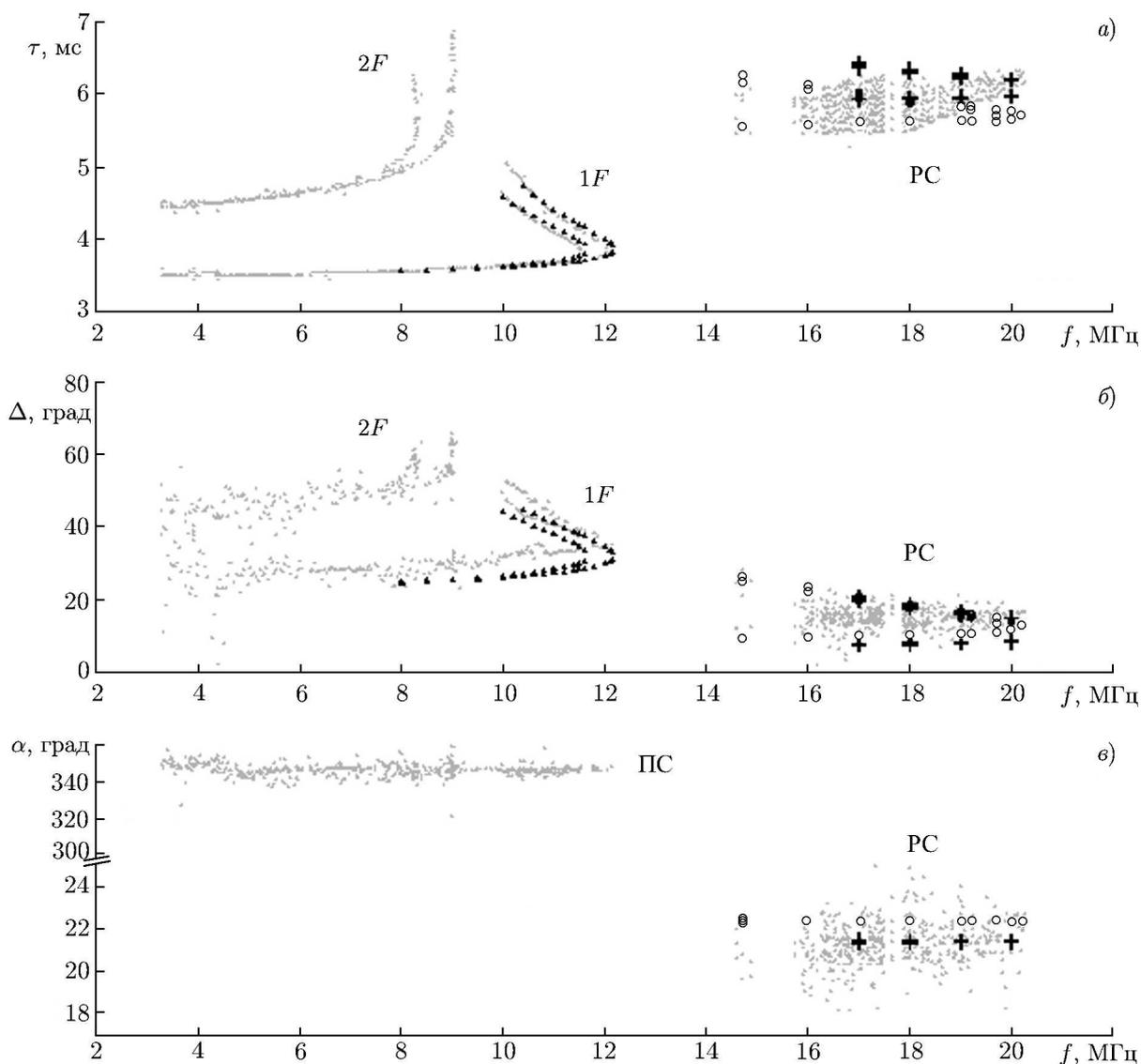


Рис. 11. Характеристики ионосферного канала: дистанционно-частотная характеристика (а), угловая частотная характеристика (угол места (б), азимут (в)) на трассе Москва—Ростов-на-Дону в 16:50 UT 29.08.2012. Серыми точками на рисунке обозначены экспериментальные данные, ПС — прямой сигнал, РС — рассеянный сигнал. Параметры параболической модели для слоя F следующие: критическая частота $f_{кр} = 7,4$ МГц, высота максимума $h_{mF2} = 285$ км, толщина $y_{F2} = 65$ км. Для данного профиля ионизации получены точки, удовлетворяющие условию брэгговского рассеяния на искусственных мелкомасштабных неоднородностях при работе нагревного стенда «Сура»: кружки — для расположения центра рассеивающей области в точке отражения от ионосферы нагревной волны ($55,6^\circ$ с. ш., $45,9^\circ$ в. д.); крестики — для области, смещённой от последней вдоль поверхности Земли на 86 км и от нагревного стенда на 30 км ($56,4^\circ$ с. ш., $46,2^\circ$ в. д.). Размеры области в поперечном направлении (42,9 км) оценены по результатам измерения азимута прихода рассеянного сигнала. Размеры области рассеяния по высоте (61,8 км) оценены по результатам моделирования распространения рассеянного сигнала

сигнала для двух мест расположения геометрического центра рассеяния. Кружки соответствуют расположению геометрического центра рассеяния на линии, проходящей вертикально через точку отражения волны накачки. Крестики соответствуют расположению геометрического центра рас-

сеяния на вертикальной линии, смещённой вдоль дуги большого круга «Сура»—Ростов-на-Дону к северу от первой точки на 86 км.

Из результатов моделирования следует, что мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности занимают протяжённую область (до 90 км) в направлении трассы «Сура»—Ростов-на-Дону, которая ориентирована почти вдоль магнитного меридиана. Во всей этой области в диапазоне частот $14,4 \div 20,3$ МГц выполняются условия брэгговского рассеяния.

Однако наблюдается интересная закономерность. На частотах от 17 до 19 МГц рассеяние наблюдается во всей области задержек. Следовательно, для этих частот неоднородности заполняют всю область с протяжённостью около 90 км вдоль магнитного меридиана (вдоль трассы), которая располагается севернее точки отражения волны накачки. Как видно из рис. 11, для частот ниже 17 МГц и выше 19 МГц условие ракурсного рассеяния выполняется во всей указанной пространственной области. Однако в эксперименте рассеяние на частоте ниже 17 МГц наблюдается только для области с центром в точке отражения волны накачки, а выше 19 МГц рассеяние наблюдается только при максимальных задержках (т. е. при смещении заполненной неоднородностями области к северу).

Это означает, что на частотах ниже 17 МГц рассеяние происходит в области с центром в точке отражения волны накачки, а на частотах выше 19 МГц — в основном в области, смещённой к северу от точки отражения волны накачки. Можно предположить, что неоднородности с поперечными размерами от 9 до 10,5 м занимают весь объём рассеяния с протяжённостью до 90 км вдоль магнитного меридиана: порядка 61,8 км по высоте и 42,9 км в поперечном направлении. При повышении частоты диагностического излучения характерный размер искусственных неоднородностей уменьшается до 8,5 м. При этом для меньших размеров неоднородностей область, заполненная этими неоднородностями, сужается в продольном направлении и смещается к северу. Таким образом, мелкомасштабные неоднородности занимают меньший пространственный объём, и этот объём смещён к северу от точки отражения волны накачки. В свою очередь, неоднородности с масштабом от 10,5 до 12,2 м также занимают меньший пространственный объём и расположены вблизи точки отражения волны накачки.

Наблюдавшаяся в эксперименте слоистая структура дистанционно-частотных характеристик рассеянных по азимуту сигналов может быть объяснена двумя факторами: с одной стороны, она обусловлена распространением обыкновенных и необыкновенных мод верхних и нижних лучей, а с другой стороны — пространственной структурированностью области, заполненной неоднородностями, в зависимости от их поперечного размера l_{\perp} .

По результатам проведённых исследований искусственной ионосферной турбулентности с помощью ионозонда-радиопеленгатора можно сделать следующие выводы:

- 1) при нагреве ионосферной плазмы волной с обыкновенной поляризацией в направлении магнитного зенита область, заполненная искусственными неоднородностями, смещена вдоль магнитного меридиана к северу от точки отражения волны нагрева и пространственно структурирована;
- 2) неоднородности с промежуточными масштабами от 9 до 11 м занимают объём с размерами до 90 км вдоль магнитного меридиана от точки отражения волны накачки, до $60 \div 70$ км по высоте и до $40 \div 50$ км в поперечном направлении;
- 3) неоднородности с большими поперечными масштабами $l_{\perp} \approx 11 \div 12$ м локализованы в пространственной области с меньшей продольной протяжённостью с центром около точки отражения волны накачки;
- 4) неоднородности с меньшими поперечными масштабами $l_{\perp} \approx 8 \div 9$ м занимают объём с существенно меньшими продольными размерами, и этот объём смещён к северу от точки отражения волны накачки.

Чтобы выявить возможное влияние искусственного крупномасштабного возмущения, форми-

руемого в пределах диаграммы антенны нагревного передатчика, на характеристики рассеянных по азимуту сигналов, было проведено моделирование распространения и рассеяния радиоволн с учётом локальной крупномасштабной ионосферной неоднородности. Распределение концентрации в неоднородности было выбрано в следующем виде:

$$N(r, \varphi, \theta) = N_0(r, \varphi, \theta) \left[1 + \delta \exp\left(-\frac{x'^2}{a_x^2} - \frac{y'^2}{a_y^2} - \frac{z'^2}{a_z^2}\right) \right], \quad (3)$$

где $N_0(r, \varphi, \theta)$ — распределение электронной концентрации в невозмущённой ионосфере, соответствующее модели IRI-2012, δ — относительная амплитуда возмущения (относительное уменьшение электронной концентрации, если δ задаётся отрицательным), a_x, a_y, a_z — масштабы области возмущения в трёх взаимно ортогональных направлениях. Координаты точки x', y', z' в модели (3) определяются относительно локальной системы координат, связанной с главными осями эллипсоида.

При моделировании центр эллипсоида помещался в точку, где отражается волна накачки. При этом были выбраны следующие параметры модели (3): $\delta = -0,15$; $a_x = a_y = 40$ км; $a_z = 70$ км. Большая ось эллипсоида была ориентирована вдоль геомагнитного поля в области отражения волны накачки.

Как показали расчёты, для взятого отрицательного значения крупномасштабного возмущения электронной концентрации $\delta = -15\%$ результаты моделирования мало отличаются от случая без учёта понижения электронной концентрации в области возмущения, представленного на рис. 11. Поэтому все выводы, которые были сделаны ранее, остаются без изменений.

Вместе с тем, согласно нашим расчётам, возможное влияние отрицательного крупномасштабного возмущения электронной концентрации на характеристики рассеянного по азимуту сигнала можно ожидать для значений $|\delta| > 20\%$, но в этом случае для детального сопоставления экспериментальных и расчётных данных необходимо корректно задавать саму регулярную модель распределения электронной концентрации на трассе зондирования.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены экспериментальные данные, иллюстрирующие возможности нового инструмента — ионозонда-радиопеленгатора с ЛЧМ-сигналом — для решения научных и прикладных задач ионосферного распространения коротких волн.

При зондировании на трансэкваториальной трассе Лейвертон (Австралия)—Ростов-на-Дону с протяжённостью 11 790 км показана перспективность метода загоризонтной коротковолновой радиолокации с помощью ионозонда-радиопеленгатора для диагностики неоднородной структуры экваториальной ионосферы. Со времени первой работы [16] до настоящего времени выполнено очень мало исследований трансэкваториального распространения коротких волн с использованием техники угловых измерений. К их числу можно отнести лишь кратковременную кампанию в южноамериканском секторе [26] и измерения на трассе Шепартон (Австралия)—Оараи (Япония) с использованием радиосигналов вещательных станций [27]. В эксперименте [27] наблюдались дополнительные треки с отклонением направления прихода радиосигналов к западу от дуги большого круга между передатчиком и приёмником, которые авторы интерпретировали как сигналы, отражённые от крупномасштабных неоднородностей в окрестности географического экватора. Однако фиксированный набор частот и отсутствие измерений времени задержки дополнительных радиосигналов заметно ограничивают возможности данного метода диагностики ионосферной плазмы.

Перспективность загоризонтного широкополосного коротковолнового зондирования ионосферы в планетарном масштабе не вызывает сомнений и имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с другими методами диагностики. Однако отсутствие до настоящего времени инструмента, позволяющего наряду с измерением традиционных характеристик ионосферного канала (дистанционно-частотной и амплитудно-частотной характеристик) одновременно проводить измерения угловой частотной характеристики во всём диапазоне частот, в значительной мере сдерживало развитие как экспериментальных, так и теоретических исследований в области физики плазменных образований и особенностей дальнего распространения радиоволн. Создание нового, не имеющего мировых аналогов инструмента — ионозонда-радиопеленгатора с ЛЧМ-сигналом — восполняет этот пробел и позволяет проводить загоризонтную коротковолновую радиолокацию ионосферы на современном техническом уровне, о чём свидетельствуют полученные нами результаты по диагностике неоднородной структуры трансэкваториальной и высокоширотной ионосферы.

Как показывают наши исследования, ионозонд-радиопеленгатор может быть перспективным инструментом для оценки локальных горизонтальных градиентов ионизации на основе измерений угловых характеристик моды Педерсена (верхнего луча), чувствительной к различного рода возмущениям. На наш взгляд, это достаточно убедительно продемонстрировано на меридиональной среднеширотной трассе Кипр—Ростов-на-Дону с протяжённостью 1460 км в условиях прохождения перемещающегося ионосферного возмущения на трассе зондирования, когда наблюдались значительные азимутальные вариации (до $6^\circ \div 8^\circ$) верхнего луча, вызванные модуляцией градиента регулярной ионизации возмущением в области ионосферного распространения радиоволны.

Следует отметить, что ионозонд-радиопеленгатор с успехом использовался на трассе Кипр—Ростов-на-Дону как загоризонтный широкополосный коротковолновый радар бистатической конфигурации в исследованиях такого сложного явления как F -рассеяние в среднеширотной ионосфере [28]. В работе [28] было определено пространственное распределение ответственных за рассеяние мелкомасштабных естественных неоднородностей с масштабами около $8 \div 10$ м, занимавших обширную область с протяжённостью 500 и 1000 км по широте и долготе соответственно, на высотах $250 \div 450$ км (как ниже, так и выше максимума F -слоя). На основе полученных данных была сделана оценка относительных флуктуаций электронной концентрации $\delta N \approx 7,8 \cdot 10^{-3}$, что примерно в $3 \div 5$ раз превышает значение δN естественных флуктуаций электронной концентрации для обычных условий в F -области среднеширотной ионосферы.

Использование ионозонда-радиопеленгатора в исследованиях искусственной ионосферной турбулентности позволило определить пространственное распределение мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей, ответственных за брэгговское рассеяние радиоволн, для различных условий взаимодействия мощного радиоизлучения с ионосферной плазмой.

В заключение заметим, что ионозонд-радиопеленгатор может быть использован для решения научных и прикладных задач в области радиосвязи, радиопеленгации, радиолокации и радионавигации для диагностики ионосферного канала на трассах с различной протяжённостью и направлением в различных геофизических условиях, а также для адаптации радиоэлектронных систем к условиям распространения радиоволн по результатам зондирования. Это особенно актуально для России с её обширными территориями, прилегающими к районам Крайнего Севера, подверженных магнитно-ионосферным возмущениям.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 12-02-00177-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fenwick R. V. Oblique chirpsounders: HF communications test set. Tech. Note 2. Barry Research Corp., 1973.
2. Иванов В. А., Куркин В. И., Носов В. Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 11. С. 919.
3. Иванов В. А., Рябова Н. В., Урядов В. П., Шумаев В. В. // Электросвязь. 1995. № 11. С. 30.
4. Goodman J. M. HF communication, sciences and technology. New York, 1992.
5. Салтыков Е. Г. // Численные методы решения обратных задач математической физики: Сб. трудов МГУ. М.: МГУ, 1988.
6. Пат. № 2399062 РФ С1. Ионосферный зонд-радиопеленгатор / Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов, В. Г. Вертоградов, С. В. Кубатко. Оpubл. 10.09.2010. Бюл. № 25.
7. Урядов В. П., Вертоградов Г. Г., Вертоградов В. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 4. С. 267.
8. Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградова Е. Г., Понятов А. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 3. С. 176.
9. Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградов В. Г. и др. // Журн. радиоэлектроники. 2010. № 12. Электронный журнал <http://www.jre.cplire.ru/jre>.
10. Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградов В. Г., Шевченко В. Н. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2007. Т. 12, № 5. С. 25.
11. Пат. № 2207583 РФ 7G01S 3/00, 3/14, 3/74. Способ пеленгации множества источников радиоизлучения, одновременно попадающих в полосу приёма / В. Н. Шевченко, Г. Г. Вертоградов, Н. М. Иванов, Е. В. Берсенев. Заявл. 29.11.2001; опубл. 27.06.2003. Бюл. № 18. 12 с.
12. Пат. № 2190236 РФ 7G01S 5/04. Способ обнаружения и определения двухмерного пеленга и частоты источников радиоизлучения / В. Н. Шевченко, Г. С. Емельянов, Г. Г. Вертоградов. Заявл. 13.09.2000; опубл. 27.09.2002. Бюл. № 27. 8 с.
13. Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградова Е. Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 1. С. 10.
14. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2001611514 РФ. Программное обеспечение многоканального пеленгатора-дальномера КВ-диапазона / Г. Г. Вертоградов, Е. В. Кондаков, В. Н. Шевченко. Заявл. 13.09.2001; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 12.11.2001.
15. Woodman R. F. // Ann. Geophys. 2009. V. 27. P. 1915.
16. Rottger J. // J. Atmos. Terr. Phys. 1973. V. 35. P. 1195.
17. Kelley M. C., Larsen M. F., La Hoz C. // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. P. 9087.
18. Валов В. А., Вертоградов Г. Г., Урядов В. П. и др. // Физические основы приборостроения. 2012. Т. 1, № 4. С. 24.
19. Rottger J. // J. Atmos. Terr. Phys. 1976. V. 38. P. 97.
20. Nyssel D. L., Kelley M. C., Swartz W. E., Woodman R. F. // J. Geophys. Res. 1990. V. 95. P. 17253.
21. Kudeki E., Akgiray A., Milla M. A., et al. // J. Atmos. Terr. Phys. 2007. V. 69. P. 215.
22. Fritts D. C., Vadas S. L., Riggin D. M., et al. // Ann. Geophys. 2008. V. 26. P. 3235.
23. Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградова Е. Г. // Труды XIII Международной научно-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь», Воронеж, 17–19 апреля 2007 года. Т. 2. С. 1203.
24. Пат. № 2284043 РФ. Способ калибровки компьютерно-интерферометрических систем на подвижных платформах / В. Н. Шевченко, Г. Г. Вертоградов, С. В. Бессонов, Д. А. Минеев. Заявл. 20.09.2006.
25. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 1973. 502 с.

26. Flaherty J.P., Kelley M.C., Seyler C.E., Fitzgerald T.J. // J. Geophys. Res. 1996. V.101. P.26 811.
27. Maruyama T., Kawamura M. // Ann. Geophys. 2006. V.24. P.1 401.
28. Урядов В.П., Вертоградов Г.Г., Вертоградова Е.Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 1. С. 1.

Поступила в редакцию 26 апреля 2013 г.; принята в печать 30 мая 2013 г.

CHIRPED IONOSONDE–RADIODIRECTION FINDER AS A NEW TOOL FOR STUDYING THE IONOSPHERE AND RADIO-WAVE PROPAGATION

G. G. Vertogradov, V. P. Uryadov, E. G. Vertogradova, V. G. Vertogradov, and S. V. Kubatko

Hardware of the chirped ionosonde–radiodirection finder, which, along with the conventional parameters, measures angular frequency characteristics on oblique ionospheric sounding paths, is briefly described. The results of experimental studies of propagation of radio waves on paths of different length and orientation in the natural and artificially disturbed ionosphere are presented. Capabilities of the ionosonde–radiodirection finder for over-the-horizon HF radar of the Earth’s ionosphere on a planetary scale are shown.