УДК 550.388+537.874.4+551.501.815

ДВУХПОЗИЦИОННАЯ ЛОКАЦИЯ ВЫСОКОШИРОТНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕКАМЕТРОВОГО РАДАРА ЕКВ И РАДИОТЕЛЕСКОПА УТР-2: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

О. И. Бернгардт¹*, К. А. Кутелев¹, В. И. Куркин¹, К. В. Гркович¹, Ю. М. Ямпольский², А. С. Кащеев², С. Б. Кащеев², В. Г. Галушко², С. А. Григорьева³, О. А. Кусонский³

¹ Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия
 ² Радиоастрономический институт НАНУ, г. Харьков, Украина
 ³ Институт геофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

В работе представлены первые результаты совместных российско-украинских двухпозиционных экспериментов по регистрации сигналов радара ЕКВ Института солнечно-земной физики СО РАН (обсерватория «Арти» Института геофизики УрО РАН, Свердловская обл., Россия) на расстоянии свыше 1 600 км с использованием когерентного приёмного комплекса и остронаправленной фазированной антенной решётки радиотелескопа УТР-2 (Радиоастрономическая обсерватория им. С. Я. Брауде Радиоастрономического института НАНУ, Харьковская обл., Украина). В работе показано, что на приёмном пункте были зарегистрированы две импульсные последовательности, идентичные сигналу, излучаемому радаром ЕКВ, но приходящие с разными задержками. Последовательность, принимаемая первой, соответствовала распространению прямого сигнала по дуге большого круга. Вторая последовательность принималась с задержками, соответствующими трассе с длиной 2800÷3400 км, и являлась результатом рассеяния зондирующего сигнала радара на высокоширотных ионосферных неоднородностях. Доплеровское смещение частоты рассеянного сигнала зависело от дальности и варьировалось в пределах от -3 до +4 Гц, что соответствовало радиальной составляющей скорости движения ионосферных неоднородностей от -43 до 58 м/с. Для интерпретации результатов экспериментов проведено численное моделирование распространения сигналов с учётом реальных ионосферных условий в соответствующий момент времени. Характеристики ионосферы восстанавливались методом вертикального зондирования, ионозонд располагался в непосредственной близости от радара ЕКВ. Сопоставление результатов однопозиционной радарной диагностики с двухпозиционным зондированием показало хорошее соответствие восстанавливаемых параметров высокоширотных неоднородностей.

ВВЕДЕНИЕ

В полярных регионах Арктики и Антарктики взаимодействие магнитосферы, атмосферы и ионосферы проявляется наиболее сильно, поэтому именно в данной области образуется большая часть ионосферных неоднородностей с различными пространственно-временными масштабами [1]. В то же время, высокоширотные области являются по-прежнему малоосвоенными и труднодоступными, что ограничивает возможности создания и эксплуатации в этих регионах достаточно сложных и энергоёмких систем ионосферной диагностики. Поэтому при зондировании и мониторинге высокоширотной ионосферной плазмы предпочтение отдаётся дальнодействующим радарным системам, которые можно расположить на относительно освоенных среднеширотных и субавроральных территориях. К ним, прежде всего, относятся когерентные декаметровые загоризонтные радары SuperDARN [2], радиус действия которых достигает нескольких тысяч километров. Основным методом диагностики ионосферы в данном случае является анализ обратного рассеяния зондирующего сигнала на ионосферных неоднородностях, ориентированных

^{*} berng@iszf.irk.ru

вдоль магнитного поля, с характерными поперечными масштабами, составляющими десятки метров. Интенсивности таких неоднородностей и скорости их движения несут информацию о развитии плазменных неустойчивостей, скоростях дрейфа плазмы и, как следствие, о напряжённостях электрического поля в возмущённых областях высокоширотной ионосферы.

Большинство радаров для ионосферных исследований являются однопозиционными или моностатическими, т. е. их приёмная и передающая позиции совмещены. В настоящее время, в связи с возможностью использования глобальных навигационных систем (GPS/ГЛОНАСС) для временной синхронизации пространственно разнесённых пунктов, создание двухпозиционных (бистатических) радаров в принципе упрощается. Разнесение приёмных позиций открывает дополнительные возможности для диагностики ионосферы и позволяет избежать создания дорогостоящих передающих систем.

В настоящее время существуют системы радаров, являющиеся двухпозиционными в широком и в узком смысле [3]. Двухпозиционными в широком смысле являются радары, у которых удалённый приёмный пункт позволяет когерентно принимать сигналы передающего пункта. К таковым относятся, например, системы радаров EISCAT UHF [4], SAPPHIRE [5, 6] и пассивный ионозондпеленгатор с линейной частотной модуляцией [7, 8]. Удачным примером мощного в высокочастотном диапазоне бистатического локатора может служить двухпозиционный радар «Сура»—УТР-2, предназначенный для диагностики магнитосферных неоднородностей [9].

Сеть радаров SuperDARN является многопозиционной лишь в узком смысле: она позволяет проводить исследование одной области пространства несколькими однопозиционными радарами одновременно [10]. Несмотря на относительную плотность сети радаров SuperDARN (22 радара в северном полушарии, 11 — в южном на конец 2013 года), каждый из них функционирует в однопозиционном режиме, не принимая сигналов, которые излучаются передатчиками других локаторов. Таким образом, высокий исследовательский потенциал установок SuperDARN вследствие однопозиционного варианта их реализации остаётся использованным лишь частично. Применение бистатического зондирования позволяет расширить пространственную область диагностики динамики неоднородностей.

В данной статье продемонстрирована возможность создания макета бистатического радиолокатора на базе действующего однопозиционного радара EKB сети SuperDARN и приёмной высокочастотной системы Радиоастрономического института HAHУ с использованием остронаправленной фазированной антенной решётки радиотелескопа УТР-2, расположенной на расстоянии примерно 1 600 км от передающей позиции.

1. ПОСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ КАЛИБРОВОЧНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Рассмотрим схему проведения экспериментов, а также методику приёма и обработки зондирующих сигналов в одно- и двухпозиционном вариантах работы локатора. В соответствии с условиями Вульфа—Брэгга основной вклад в рассеяние в двухпозиционном случае вносят пространственные гармоники диэлектрической проницаемости, соответствующие в первом приближении разности волновых векторов падающей и рассеянной волн [11]. На рис. 1*a* схематично показана геометрия рассеяния для однопозиционного и двухпозиционного варианта радарной диагностики ионосферных неоднородностей. В однопозиционном случае обратного рассеяния волновое число неоднородностей равно удвоенному волновому числу зондирующей волны. В таком варианте регистрации эффектов рассеяния существующей сетью радаров SuperDARN одновременно измеряются характеристики неоднородностей при одинаковых волновых числах, но для разных направлений волнового вектора. В случае двухпозиционного эксперимента рассеяние от того же зондируемого объёма ионосферы происходит в других направлениях и на других масштабах неод-



Рис. 1. Стандартная однопозиционная схема измерения скорости и сечения рассеяния радарами SuperDARN (панель (a), сверху), схема двухпозиционной регистрации параметров рассеянных сигналов (панель (a), снизу) и схема эксперимента ЕКВ («Арти»)—РАО (панель (б)). Штриховая линия 1 соответствует прямой радиотрассе сигнала ЕКВ—РАО. Сплошная линия 2— радиотрассе сигнала, рассеянного на неоднородностях (ЕКВ—МОИН—РАО). Серыми секторами обозначены диаграмма направленности основного лепестка радиотелескопа УТР-2 и азимутальная область сканирования диаграммы направленности радара ЕКВ. Цифрами отмечены положения главного лепестка диаграммы направленности радара ЕКВ для различных номеров лучей

нородностей, которые определяются взаимным расположением приёмной и передающей позиций. Одновременная регистрация эффекта рассеяния на нескольких разнесённых позициях в гипотезе «замороженного переноса» позволяет оценивать вектор скорости движения и форму пространственного спектра неоднородностей.

Радар ЕКВ SuperDARN был приобретён и установлен Институтом солнечно-земной физики СО РАН на территории обсерватории «Арти» Института геофизики УрО РАН (56,43° с. ш., 58,56° в. д., Свердловская область, Россия) в 2012 году. Дополнительная позиция для регистрации эффектов ионосферного рассеяния была организована в Радиоастрономической обсерватории (РАО) им. С. Я. Брауде Радиоастрономического института (РИ) НАНУ (49,67° с. ш., 36,83° в. д) [12]; в качестве приёмной антенны использовалась остронаправленная фазированная антенная решётка декаметрового радиотелескопа УТР-2 [13]. Геометрия экспериментов приведена на рис. 16.

Первые российско-украинские пробные эксперименты были проведены 24–25 августа 2013 года. Их целью была отработка методики когерентной регистрации и обработки зондирующих сигналов радара на большом удалении приёмной позиции от передающей. Основным объектом исследования являлся сигнал на прямой радиотрассе ЕКВ—РАО, распространявшийся в ходе кампании на частоте ниже и выше максимальной применимой частоты. Геомагнитная обстановка в указанный период была невозмущённой, индекс K_p не превышал 2, что отвечает достаточно спокойным ионосферным условиям. В качестве приёмной антенны в РАО использовался несимметричный широкодиапазонный вертикальный диполь с изотропной диаграммой направленности

в горизонтальной плоскости. Регистрация сигналов осуществлялась специальным когерентным аналоговым приёмником, оснащённым цифровым устройством записи и системой компьютерной обработки [12].

Основными результатами пробных калибровочных экспериментов являлись обнаружение излучения ЕКВ радара, его когерентное декодирование, а также оценки флуктуации дальности до передатчика по сигналу «подсветки» (сигнал прямого прохождения по радиотрассе ЕКВ—РАО) на разных рабочих частотах в разное время суток. Режим излучения был заранее оговорен и известен на приёмной позиции. В штатном режиме радары SuperDARN излучают сигнал специальной формы, формируемый последовательным излучением идентичных мультиимпульсных последовательностей, каждая из которых состоит из 7 [2] или 8 [14] одиночных импульсов с одинаковыми длинами и амплитудами. Как правило, при работе радара излучаются зондирующие импульсы с длительностью 300 мкс, что позволяет получить разрешение по дальности 45 км.

Для обработки принятого сигнала применяется автокорреляционный анализ. Используемая на ЕКВ радаре последовательность из 7 импульсов позволяет получить 20 точек автокорреляционной функции. Для уменьшения некогерентной составляющей в значениях этой функции используется усреднение по сеансам излучения. Обычно применяемое усреднение по 40÷80 импульсным последовательностям позволяет уменьшить некогерентные составляющие почти в 10 раз. Таким образом, длительность полного цикла анализа одного направления, когда ориентация антенной системы радара зафиксирована на определённом азимуте, обычно составляет около 4÷8 с [2]. После этого радар, как правило, переключается на другой азимут. Обычно параметры рассеянного сигнала оцениваются вычислением характеристик автокорреляционной функции в предположении о её гауссовой или экспоненциальной форме. По фазовой структуре определяется доплеровское смещение частоты рассеянного сигнала и радиальная составляющая скорости дрейфа неоднородностей, а по форме автокорреляционной функции — амплитуда сигнала и его спектральная ширина [14, 15]. При достаточно надёжном обнаружении зондирующего излучения в ходе пробной серии экспериментов удавалось анализировать доплеровские спектры сигнала, оценивать их ширину и текущие доплеровские сдвиги частоты.

Для приёма сигналов радара ЕКВ приёмным комплексом в РАО в РИ НАНУ было разработано специализированное программно-аппаратное обеспечение с цифровым режимом стробирования и спектральной обработки. Основные характеристики приёмно-обрабатывающей системы были следующими. Согласованная с длительностью импульсов полоса фильтрации составляла 4 кГц. Отфильтрованный сигнал на промежуточной частоте поступал на вход аналого-цифрового преобразователя, частота оцифровки равнялась 20 кГц. Соответствующий темп регистрации составлял 50 мкс и был в целое число раз меньше длительности импульсов излучаемого сигнала (300 мкс) и минимального периода их повторения (2,4 мс). Стабильность фазово-частотной характеристики приёмника и частоты оцифровки обеспечивались локальным рубидиевым генератором с относительной нестабильностью 10⁻¹¹. Выбранные параметры оцифровки с применением соответствующей децимации позволяли оценивать спектр сигнала, приведённый к частоте 5 кГц в середине полосы спектрального анализа. Спектральные характеристики сигналов восстанавливались методом быстрого преобразования Фурье. Анализ текущего спектра мощности рассеянного сигнала позволял оценивать доплеровский сдвиг частоты и его характерную ширину. Цифровое стробирование и накопление сигнала для каждой дальности давали возможность анализировать дистанционно-частотные характеристики.

Поскольку во время калибровочной кампании передатчик ЕКВ радара не имел абсолютной временной привязки, расчёт дальности по измеренному сигналу не проводился. Вместо этого предполагалось, что максимум уровня в спектральной области соответствовал сигналу, распространявшемуся по прямой радиотрассе ЕКВ—РАО с протяжённостью вдоль поверхности Земли



Рис. 2. Мощность сигнала P радара ЕКВ, принятого РАО, как функция дальности R для нескольких сеансов измерений в период $10:03\div10:04$ UT 24.08.2013

1 600 км. Следует отметить, что такая упрощённая методика оценки дальности справедлива только для «односкачкового» механизма распространения зондирующего сигнала на прямой радиотрассе для спокойных дневных ионосферных условий, когда рабочая частота радара была ниже максимальной применимой частоты.

Как показали проведённые калибровочные измерения, прямой сигнал от радара EKB уверенно регистрировался на PAO. Примеры распределения уровня принятого сигнала в зависимости от оценочной дальности для различных моментов времени приведены на рис. 2.

На рис. За показаны расчётные диаграммы направленности радара ЕКВ и направление на РАО. Из рисунка видно, что взаимное расположение радаров ЕКВ и РАО было таково, что ориентация основного луча передающей антенны не совпадала с направлением на РАО, и сигнал на удалённой приёмной позиции принимался за счёт излучения в боковые лепестки диаграммы направленности. Максимальный уровень излучения на прямой трассе ЕКВ—РАО регистрировался, когда ориентация основного луча передающей антенны по азимуту, отсчитываемому от направления на север, соответствовала 33° (13-й луч). Зависимость среднего уровня сигналов радара ЕКВ, принятых на РАО, от азимутальной ориентации (номера луча) диаграммы направленности



Рис. 3. Расчётная диаграмма направленности антенны радара ЕКВ для различных лучей (панель (*a*), номера лучей указаны на рисунке). Стрелкой показано направление на РАО. Панель (*б*) — зависимость среднего уровня сигналов *A* радара ЕКВ, принятых на РАО, от азимутальной ориентации (номера луча) диаграммы направленности передатчика. Азимут отсчитывается от направления на север

передатчика приведена на рис. Зб.

Таким образом, пробные измерения сигналов радара SuperDARN на сильно удалённой приёмной позиции показали надёжность их обнаружения даже с использованием слабонаправленной антенны. В ходе измерений были апробированы пакеты прикладных программ декодирования и обработки зондирующих сигналов, а также проверена возможность временной синхронизации двухпозиционной системы по сигналу ионосферной «подсветки» на прямой радиотрассе EKB— PAO.

2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОСТРОНАПРАВЛЕННОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЁТКИ УТР-2

Основная измерительная кампания по бистатической локации высокоширотных неоднородностей проводилась вблизи весеннего равноденствия с 19 по 29 марта 2014 года. Гелио-геофизичес-

кая обстановка в это время была преимущественно спокойной либо слабо возмущённой (индекс $K_{\rm p}$ не превышал 3) за исключением 25 и 26 марта, когда индекс $K_{\rm p}$ достигал 4.

Основной целью этого эксперимента являлась проверка принципиальной возможности двухпозиционной регистрации сигналов стандартного радара SuperDARN, рассеянных на авроральных неоднородностях. Сигналы радара принимались как в точке излучения, так и в РАО. Таким образом, одновременно реализовывались моностатический и бистатический варианты когерентной ионосферной локации. Отличительной особенностью этой кампании являлось использование в качестве приёмной антенны в вынесенном пункте в РАО крупнейшей в мире фазированной антенной решётки декаметрового диапазона длин волн — радиотелескопа УТР-2 [13]. Электрически сканируемая диаграмма направленности УТР-2 позволяла проводить угловую селекцию, разделяя сигналы «подсветки» и рассеяния на высокопиротных неоднородностях. Регистрирующей системой служил когерентный многоканальный аналогово-цифровой приёмный комплекс высокочастотного диапазона [12].

При проведении экспериментов радар ЕКВ на фиксированной частоте (8 или 10 МГц) излучал стандартную 7-импульсную последовательность [2]. По сравнению с пробной серией измерений временная синхронизация между соседними излучаемыми импульсными последовательностями была программно улучшена до 1 мс. Абсолютная временная привязка моментов излучения попрежнему не осуществлялась, поэтому синхронизация позиций проводилась по сигналу ионосферной «подсветки» на прямой радиотрассе ЕКВ—РАО. В ходе кампании реализовывались три варианта направленности передающей системы: режим сканирования полярных неоднородностей (лучи 0–2); режим работы на фиксированном азимуте (луч 2); режим ориентации на прямое прохождение по трассе ЕКВ—РАО (лучи 13–15).

Временно́е разрешение радара для первого канала, использующегося для передачи и одновременно проводящему диагностику ионосферы, составляло 18 с. Для второго канала, применяемого для стандартного сканирования всего поля обзора радара, разрешение составляло 96 с. Время работы радара на фиксированном направлении было порядка 6 с. В описываемом эксперименте использовались данные только первого канала, наиболее подходящего для сопоставления с результатами двухпозиционного зондирования высокоширотных ионосферных неоднородностей. Синхронная диагностика ионосферы в точке расположения радара осуществлялась с помощью ионозонда «Арти».

Приёмная решётка радиотелескопа УТР-2 была ориентирована на область возможного рассеяния от полярных неоднородностей (азимут 28°), расположенных в северном направлении от передающей позиции радара ЕКВ. Ширина главного лепестка диаграммы направленности антенны по азимуту на частоте 10 МГц составляла 1,3°. В угломестной плоскости решётка ориентировалась под углом 10° к горизонту. Программа обработки сигнала, принятого с помощью остронаправленной антенны УТР-2, была аналогична использованной в пробной серии экспериментов. Сигнал «подсветки» ЕКВ-РАО принимался на УТР-2 боковыми лепестками диаграммы направленности, и излучался на ЕКВ также боковыми лепестками.

Приём и предварительная обработка всех данных двухпозиционной локации показали, что проявления рассеяния в заданном приполярном направлении наблюдались надёжно и устойчиво. Наиболее яркие и наглядные эффекты были зарегистрированы 29.03.2014. В этот же день устойчиво наблюдались сигналы ионосферной «подсветки» на прямой трассе ЕКВ—РАО, что давало возможность с достаточной точностью реализовать пространственно-временну́ю «привязку» рассеивающего приполярного объёма. Зондирование в этот день осуществлялось на частоте 10,4 МГц в режиме последовательного сканирования (лучи 0–2). Геометрия эксперимента приведена на рис. 1*б*.

Для оценки влияния ионосферы на распространение сигнала «подсветки» в реальных услови-



Рис. 4. Наблюдения рассеянного сигнала на радаре ЕКВ 29.03.2014, луч 2: мощность рассеянного сигнала (a) и доплеровская скорость дрейфа (b). Пунктирная чёрная линия 1 соответствует результату моделирования возвратно-наклонного зондирования на основе модели IRI-2012 без привлечения экспериментальных данных; сплошная чёрная линия 2 — результату моделирования с привлечением экспериментальных данных ионозонда «Арти». Сигналы возвратно-наклонного зондирования отмечены сплошными серыми линиями 3 и 4 (зона I), сигналы рассеяния на ионосферных неоднородностях — сплошными серыми линиями 5 и 6 (зона II). Дальность равна радиолокационной дальности, поделённой пополам, и соответствует длине трассы распространения сигнала возвратнонаклонного зондирования в одном направлении

ях проводилось численное моделирование в рамках модели IRI-2012. Грубая корректировка модели вдоль трассы проводилась по многоэтапной схеме, аналогичной использованной в работе [16], по данным ионозонда «Арти». Проведённое моделирование (см. рис. 4*a*, линия 2) показало, что регулярная погрешность модели распространения радиосигнала для расчёта радиолокационной задержки (дальности) по отношению к реальным измерениям составляет величину порядка 100÷200 км.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ НА РАДАРЕ ЕКВ

На рис. 4 приведены параметры рассеянного сигнала по данным наблюдений радара ЕКВ в однопозиционном режиме работы: мощность и доплеровское смещение частоты, рассчитываемые стандартными программами обработки сигналов SuperDARN [15]. Доплеровское смещение частоты традиционно рассчитывается в единицах эквивалентной радиальной скорости движения рассеивателей. Из рис. 4*a* видно, что в рассеянном сигнале присутствуют две различных моды: одна соответствует возвратно-наклонному зондированию, а вторая является результатом обратного рассеяния на ионосферных неоднородностях, ориентированных вдоль магнитного поля. Поведение сигнала возвратно-наклонного зондирования достаточно предсказуемо, и его динамика хорошо описывается в модельном приближении плавно неоднородной ионосферы (см. рис. 4*a*, линия *2*). Сравнение мощности сигнала возвратно-наклонного зондирования, полученной по радарным оценкам, с результатами её расчёта в модели IRI-2012 показывает следующее. Модель хорошо описывает динамику изменения длины трассы, но ночью систематически завышает её приблизительно на 100÷200 км по сравнению с экспериментальными значениями. Следует отметить, что калибровка «модельной» ионосферы проводилась с использованием текущих данных ионозонда

⁴⁴⁰

«Арти». Использование модели IRI-2012 без корректировки значительно хуже аппроксимирует экспериментальные данные (см. линию 1 на рис. 4*a*).

Вторая мода, обусловленная рассеянием на ионосферных неоднородностях, была слабее, хотя и наблюдалась на дальности примерно в 2 раза меньшей, чем сигнал возвратно-наклонного зондирования. Такое соотношение дальностей и мощностей для двух механизмов распространения зондирующего сигнала является типичным, поскольку сигнал возвратно-наклонного зондирования формируется на трассе за счёт отражения в ионосфере, последующего рассеяния от Земли и обратного распространения по указанной трассе, в то время как обратное рассеяние на неоднородностях формируется за счёт ионосферного рассеяния. Дополнительным подтверждением ионосферного характера обратного рассеяния являются фрагменты регистрации с 00:00 до 01:00 UT и с 22:00 до 24:00 UT, отличающиеся высокой скоростью движения рассеивателей с её квазипериодическим изменением во всей области. Такое поведение характерно, например, для рассеяния пробных радиоволн на ионосферных неоднородностях, возникновение которых стимулировано работой нагревных стендов, а дрейф обусловлен природными процессами [17, 18].

Следует отметить, что обратное рассеяние на неоднородностях устойчиво наблюдалось в вечернее и ночное время суток в интервале от 17:00 до 24:00 UT. Дальности варьировались от 500 до 1 400 км, с течением времени удаление рассеивающей области от радара росло. Аналогичное поведение длин трасс обратно рассеянного сигнала и сигнала возвратно-наклонного зондирования позволяет предположить, что изменение этих длин связано с рефракционными эффектами на фоне регулярного вечернего уменьшения электронной концентрации. Указанный эффект увеличения дальности со временем наиболее отчётливо проявляется, например, для сигнала возвратнонаклонного зондирования в период 14:00÷17:00 UT (см. рис. 4*a*, область I). Дополнительным нерегулярным механизмом вариаций дистанции до обратно рассеивающего объёма ионосферных неоднородностей может являться смещение границ полярного овала в зависимости от уровня геомагнитной активности.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ БИСТАТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ РАССЕЯНИЯ НА ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЯХ

Как показали проведённые оценки, при излучении зондирующего сигнала возможны флуктуации периода кодовых посылок в пределах ±1 мс, связанные с особенностями программноаппаратного обеспечения радара ЕКВ. Это приводит к тому, что в двухпозиционном варианте локации не удаётся заранее точно синхронизировать время приёма и реализовать последующее усреднение нескольких посылок, поэтому определение параметров принятого сигнала возможно лишь по отдельным фрагментам регистраций эффектов рассеяния при высоком соотношении сигнал/шум. Вследствие этого приведённые ниже результаты получены только по одиночным посылкам.

Как уже отмечалась ранее, остронаправленная приёмная фазированная антенная решётка ориентировалась на приполярную область, расположенную в северном направлении от ЕКВ радара. На рис. 5*a* приведён пример зависимости амплитуды сигнала, измеренного РАО, от дальности, полученной в вечернее время 29 марта при работе ЕКВ радара в направлениях азимутальной ориентации $-6^{\circ} \div 0^{\circ}$. Из рис. 5*a* видно, что в принятом сигнале можно выделить две различные области: сосредоточенную по дальности область максимальной амплитуды (на рис. 5*a* соответствует дистанции 1 500÷1 600 км) и распределённую по дальности составляющую с меньшей амплитудой (на рис. 5*a* соответствует дистанции 2 600÷3 300 км). Отражения с амплитудой ниже уровня 0,1 относительно максимальной амплитуды для дистанции 1 600 км можно считать шумами. При дальнейшем анализе результатов они не рассматриваются. Сигнал, соответствующий первому



Рис. 5. Пример зависимости характеристик сигналов, принятых РАО: амплитуда принятого сигнала (*a*) и значения радиальных скоростей (*б*) в фиксированный момент времени как функции дальности. На панели (*b*) показано временное поведение разности расстояний, соответствующих первому и второму максимумам уровней сигналов, принятых РАО

интервалу дальностей, формировался на прямой радиотрассе EKB—PAO и в дальнейшем, как и в серии пробных экспериментов, использовался для временной привязки приёмной и передающей позиций.

Для каждой дальности оценивался доплеровский сдвиг частоты (см. рис. 56). Из рисунка видно, что доплеровское смещение частоты прямого сигнала (диапазон дальностей 1500÷1600 км) близко к нулю. Для второго сигнала (диапазон дальностей 2600÷3300 км) смещение зависит от дистанции и меняется в пределах от -3 до 4 Гц, что соответствует радиальной составляю-

О. И. Бернгардт, К. А. Кутелев, В. И. Куркин и др.

2015

щей скорости от -43 до +58 м/с. Доплеровское смещение частоты шумовых сигналов меняется случайным образом в широких пределах от -100 до +100 Гц и физически значимым скоростям не соответствует. Таким образом, анализ (см. рис. 5a, δ) позволяет предположить, что сигнал с дальностей $2600 \div 3\,300$ км, принятый на РАО, рассеивается на полярных неоднородностях и приобретает более высокое доплеровское смещение частоты за счёт движения ионосферных неоднородностей, ориентированных вдоль магнитного поля (МОИН). Далее обозначим эту траекторию, как ЕКВ—МОИН—РАО.

Как уже указывалось, полная задержка на прямой трассе ЕКВ-РАО точно не определяется. Кроме того, она зависит от ионосферных условий и может меняться во времени в довольно широких пределах. Поэтому при анализе удобно пользоваться разностью радиолокационных дистанций между трассами ЕКВ-РАО и ЕКВ-МОИН-РАО. Это позволяет построить зависимость параметров пробного сигнала от дальности и времени суток, оценить полную протяжённость трассы передатчик-рассеивающая область-приёмник и приблизительно определить месторасположение и протяжённость рассеивающей области. На рис. 5 в приведена разность длин трасс рассеянного и прямого сигнала в период 17:50÷20:00 UT. Из рисунка виден достаточно значительный разброс величины разности дистанций, особенно в 19:20÷19:50 UT, что соответствует большой протяжённости рассеивающей области (до 1000 км) и изменению её характеристик со временем. Подобная динамика не может быть объяснена поведением сигнала возвратно-наклонного зондирования в практически невозмущённой ионосфере, что также свидетельствует о рассеянии зондирующего излучения от протяжённого объекта — области, содержащей ионосферные неоднородности. Следует также отметить, что большие доплеровские смещения частоты таких сигналов (от -3 до 4 Гц) не могут быть объяснены в рамках механизма возвратно-наклонного зондирования.

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для анализа обратно-рассеянных сигналов с экспериментально наблюдаемыми характеристиками проводилось численное моделирование распространения радиоволн как для трассы ЕКВ-РАО, так и для радиотрассы ЕКВ—МОИН—РАО с учётом реальных ионосферных условий. Расчёт характеристик сигналов проводился в приближении геометрической оптики для холодной изотропной плазменной среды. Для этого применялся известный метод, в котором используется система лучевых уравнений [19, 20]. При решении последней в качестве модели среды распространения была выбрана модель ионосферы IRI-2012 [21], скорректированная с учётом полученных на ионозонде «Арти» реальных значений электронной концентрации в максимуме F-слоя (N_{mF2}) за 29.03.2014. Коррекция модели среды проводилась в три этапа. На первом этапе для конкретного момента времени рассчитывалось значение концентрации $N_{\rm mF_2}$ над ионозондом по модели IRI-2012. Отношение измеренной и модельной концентраций $N_{{\rm m}F_2}$ (коэффициент коррекции) считалось фиксированным для каждого момента времени по всей трассе. На втором этапе из модельных профилей электронной концентрации вдоль всей радиотрассы вычислялся набор значений N_{mF2}, используемый далее для корректировки модели IRI-2012. Для этого полученные модельные значения максимальной электронной концентрации $N_{{
m m}F_2}$ умножались на корректирующий множитель, оценённый на первом этапе. На заключительной стадии расчётов скорректированные значения N_{mF2} использовались как входной параметр для формирования высотных профилей электронной концентрации по модели IRI-2012. Таким образом, в данной задаче использовался как внутренний механизм коррекции модели IRI-2012, так и результаты непосредственных ионосферных измерений.

Полученные путём сплайн-интерполяции IRI-профилей по широте и долготе характеристи-

ки среды распространения пробного излучения использовались для построения набора лучей с начальными условиями, соответствующими диаграмме направленности установки. Если луч попадал в интересующий объём зондирования (соответствующие дальность и высота), то его групповой путь интерпретировался как возможный для прохождения радиоволны. Применение такого метода расчёта к суточному объёму данных ионозонда обсерватории «Арти» позволило оценить ожидаемую динамику радиолокационных дальностей, с которых возможен приём рассеянных сигналов. Аналогичное моделирование было проведёно как для трассы ЕКВ—РАО, так и для трассы ЕКВ—МОИН—РАО.

Нами также было проведено моделирование зон ракурсного рассеяния в приложении к данному эксперименту. В случае обратного рассеяния (ЕКВ—МОИН—ЕКВ), эта задача эквивалентна поиску точек на геометрооптическом луче, в которых его волновой вектор ортогонален силовой линии геомагнитного поля [22]. В случае бистатической задачи (трасса ЕКВ—МОИН—РАО) это эквивалентно поиску точек, в которых силовая линия геомагнитного поля ортогональна волновому вектору неоднородностей, участвующих в рассеянии [23, 24]. Он определяется из условия Вульфа—Брэгга как разность волновых векторов падающего и рассеянного полей. В этом случае в коротковолновом диапазоне решение значительно усложняется, т. к. становится необходимо осуществить пристрелку в каждую точку исследуемого пространства геометрооптических лучей от двух источников (ЕКВ и РАО) и определить, какая из комбинаций геометрооптических лучей ЕКВ—МОИН и РАО—МОИН удовлетворяет условию ракурсного рассеяния.

Моделирование распространения луча в регулярной ионосфере, соответствующей условиям проведения эксперимента, проводилось в рамках того же метода, что и при анализе распространения прямого сигнала ЕКВ—РАО. Для получения пространственного распределения зон ракурсного рассеяния на траектории ЕКВ—МОИН диаграмма направленности радара ЕКВ в вертикальной плоскости разбивалась на набор лучей с шагом по углу места в 0,005°. При анализе распространения на траектории МОИН—РАО диаграмма направленности радиотелескопа УТР-2 в вертикальной плоскости считалась изотропной и разбивалась на лучи с тем же шагом по углу места. Как и при моделировании прямого сигнала, в качестве модели фоновой ионосферы использовалась модель IRI-2012, скорректированная на дату проведения эксперимента по результатам измерений ионозондом «Арти» описанным ранее методом. Магнитное поле Земли задавалось моделью IGRF-11 [25].

Данная задача характеризуется большой вычислительной сложностью, т. к. необходимо находить электронную концентрацию и геомагнитное поле в каждой точке большого числа траекторий (более 10 000 для одного направления и одного момента времени). Поэтому моделирование проводилось на 72 процессорах вычислительного кластера «Blackford» ИНЦ СО РАН [26]. Разделение задачи по процессам выполнялось с использованием технологии Message Passing Interface (MPI). Это позволило существенно сократить время работы программы.

На рис. 6*а* представлены результаты моделирования зон ракурсного рассеяния для 29.03.2014 в плоскости распространения сигнала ЕКВ—МОИН. На рис. 6*б* представлен профиль плазменной частоты в области рассеяния, использованный при моделировании.

При моделировании предполагалось, что азимут излучения радара ЕКВ направлен на север, а частота излучаемого сигнала составляла 10 МГц. Это соответствует условиям проведения эксперимента. Поскольку наиболее интенсивный рассеянный сигнал наблюдался в РАО в период 19:00÷20:00 UT, моделирование проводилось для этого промежутка времени.

На рис. 6*а* можно выделить три зоны ортогональности. Первая и вторая сосредоточены на высотах 100÷250 км, где происходит отражение большей части лучей от регулярной ионосферы. Таким образом, эти области примерно соответствуют серединам первого (до 500 км) и второго (свыше 1 500 км) скачка распространения волны. Третья зона ортогональности сосредоточена



Рис. 6. Положение зон ракурсного рассеяния ЕКВ—МОИН—РАО на плоскости зенит—ЕКВ—Северный полюс (a) и профиль плазменной частоты ионосферы $f_{\rm p}$ (б) в средней точке (60,5° с. ш., 58,2° в. д.) данной трассы в 19:00 UT 29.03.2014



Рис. 7. Динамика задержки между сигналами, распространяющимися по трассам EKB—PAO и EKB—-MOИН—PAO для точек с высотами рассеяния 100÷250 км (*a*) и 250÷400 км (*б*)

на высотах 250÷400 км и соответствует лучам, близким к лучу Педерсена. Рассеяние сигналов радаров SuperDARN, распространяющихся вблизи луча Педерсена, рассматривалось, например, в работе [27].

На рис. 7*a* приведена расчётная задержка радиосигнала (разница дальностей на трассах ЕКВ—МОИН—РАО и ЕКВ—РАО) для 1-ой и 2-ой областей, а на рис. 7*b* — для 3-ей области. Как показывает анализ дальностей (см. рис. 2), именно третья зона соответствует рассеянию, наблюдаемому в эксперименте. Из сравнения дальности до областей рассеяния на рис. 6*a* и удвоенной дальности до зоны II рис. 4, видно, что в обоих случаях сигнал приходит с дальностей 1 200÷1 600 км, что соответствует высотам рассеяния $340\div380$ км, и близким к высоте максимума слоя F_2 . Это позволяет предполагать, что на приёмниках ЕКВ и РАО в этом эксперименте мы наблюдаем одни и те же неоднородности с высот $340\div380$ км и моделирование проведено адекватно.

На рис. 8*a* приведена зависимость задержки радиосигнала для траектории EKB—PAO от времени. Серыми зонами обозначены области двухскачкового (зоны II) и односкачкового (зоны I) распространения. Из рисунка видно, что в сигнале возвратно-наклонного зондирования чаще наблюдаются две моды распространения с максимальной разницей по дальности до 600 км. В период $00:00\div02:00$ UT условия наблюдения сигнала на трассе EKB—PAO отсутствуют. В интервале наблюдений PAO сигнала с бо́льшими дальностями (17:50÷20:00 UT) сигнал, соответствующий прямой радиотрассе (1600 км), распространялся только одним «скачком» с отражением от *F*области ионосферы (с задержками, соответствующими 1700÷1800 км). Этот вывод подтверждает возможность использования такого сигнала в качестве «подсветки» для оценок дальностей рассеяния пробного излучения от полярных ионосферных неоднородностей, ориентированных вдоль магнитного поля.

На рис. 86 построены разности радиолокационных дальностей для сигнала, рассеянного на неоднородностях в области пересечения диаграмм направленности антенн ЕКВ и УТР-2, и прямого сигнала (трасса ЕКВ—РАО). Времена задержек радиосигнала для траектории ЕКВ—МОИН— РАО рассчитаны для высоты рассеяния 360 км, полученной в результате проведённого моделирования областей ракурсного рассеяния. Из рисунка видно, что основное рассеяние на данных высотах могло наблюдаться в утреннее (00:00÷01:00 UT) и ночное (19:00÷20:00 UT) время. Необходимо заметить, что, поскольку наиболее интенсивное рассеяние в РАО наблюдалось также в период 19:00÷20:00 UT, полученные результаты являются дополнительным косвенным подтверждением верности проведённого моделирования.

На рис. 9 показано сравнение параметров рассеянного сигнала, измеренных в РАО, с результатами моделирования и с аналогичными характеристиками, полученными при одновременных наблюдениях рассеяния на ионосферных неоднородностях в однопозиционном варианте.

Из рис. 9*a* видно, что верхняя граница области рассеяния 1 400 км в период 19:00÷20:00 UT хорошо совпадает с экспериментальными измерениями, в то время как нижняя граница по экспериментальным данным меньше на 100÷150 км, чем предсказывают результаты моделирования (1 250 км). Заметим, что из рис. 4*a* следует, что модельные расчёты в ночное время систематически завышают дальность на 100÷200 км, поэтому наблюдаемые отличия могут быть объяснены, в том числе, и систематической ошибкой модели распространения сигнала.

Для дополнительной верификации предположения о формировании сигнала за счёт рассеяния на авроральных неоднородностях было проведено сравнение скоростей, измеренных в предполагаемой области рассеяния по данным радара ЕКВ и по данным РАО. Результаты сравнения приведены на рис. 96. Из рисунка видно, что скорости неоднородностей, измеренные РАО, имеют тот же порядок, что и скорости, измеренные на радаре ЕКВ, и характерны для полярных неоднородностей.



Рис. 8. Результаты моделирования прохождения радиосигналов в рамках скорректированной модели IRI-2012. На панели (*a*) представлена суточная зависимость протяжённости радиотрассы EKB—PAO на частоте 10 МГц в односкачковом (I) и двухскачковом (II) режимах распространения сигнала. На панели (*б*) представлена разница в длине траекторий прямого (трасса EKB—PAO) и рассеянного (трасса EKB—MOИН—PAO) сигнала, рассчитанная по области пересечения диаграмм направленности в предположении рассеяния на неоднородностях на высоте 360 км

Одновременные измерения проекций вектора скорости на два направления позволяют решать задачу о восстановлении вектора скорости неоднородностей в плоскости, перпендикулярной магнитному полю Земли в точке рассеяния (далее мы будем называть его полным вектором скорости, в соответствии с общепринятым подходом к восстановлению вектора скоростей на радарах SuperDARN [2]). Эта стандартная радиолокационная задача решалась нами из геометрических соображений. Проекция скорости V_i (i = 1 для измерений на радаре EKB, i = 2 для измерений в PAO) определялась по волновому числу неоднородностей, участвующих в рассеянии, и наблюдаемому доплеровскому смещению частоты Δf_i по формуле

$$V_i = \frac{\Delta f_i}{|\mathbf{k}_i|} \tag{1}$$

Здесь $\mathbf{k}_1 = 2\mathbf{k}_t$, $\mathbf{k}_2 = \mathbf{k}_t - \mathbf{k}_r$ (см. рис. 1*a*, нижняя панель), \mathbf{k}_t и \mathbf{k}_r — волновые вектора падающей и рассеянной радиоволны соответственно, $|\mathbf{x}|$ — длина вектора \mathbf{x} . Модуль полного вектора скорости определялся следующим образом:

$$V = \frac{\sqrt{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos \alpha}}{\sin \alpha},$$
 (2)



Рис. 9. Сравнение параметров рассеянного сигнала, измеренного в РАО, с результатами моделирования и данными радара ЕКВ по наблюдению неоднородностей. На панели (*a*) показана разница в длине траекторий ЕКВ—РАО и ЕКВ—МОИН—РАО по данным моделирования (сплошная область) и по разнице задержек первого и второго максимумов сигнала в РАО (ломаная линия). На панели (*б*) — доплеровская скорость неоднородностей по данным ЕКВ (точки) и по данным РАО (сплошная линия). На панели (*в*) — мощность сигнала, рассеянного на неоднородностях, по данным ЕКВ (точки) и по данным РАО (сплошная линия)

где α — угол между проекциями V_1 и V_2 . Азимут β полного вектора скорости находился с помощью формулы

 $\beta = -\arccos(V_1/V) + (1 - \operatorname{sign} V_2)\pi.$ (3)

Угол между скоростями α соответствовал углу между волновыми векторами неоднородностей, вносящими основной вклад в рассеяние согласно условиям Вульфа—Брэгга. Он составлял 22° и определялся направлением луча ЕКВ и биссектрисой угла ЕКВ—МОИН—РАО.

На рис. 10 показана зависимость модуля и азимута полного вектора скорости движения ионосферных неоднородностей в интервале 19:15÷19:48 UT. Оценка скорости проводилась с усреднением по 30-ти секундному интервалу, что, вследствие большой дисперсии измеренных скоростей, существенно уменьшает среднюю скорость по сравнению с её мгновенными значениями. Из рис. 10 видно, что расчётная скорость движения неоднородностей ориентирована в широтном направлении, что не является характерным для данного времени суток (23:10÷23:45 UT).

Средняя скорость неоднородностей для ЕКВ составляла 4 м/с, на приёмной станции в РАО была зарегистрирована средняя скорость –4 м/с. Оценка полного вектора скорости по усред-

О. И. Бернгардт, К. А. Кутелев, В. И. Куркин и др.



Рис. 10. Временно́й ход азимута (точки) и модуля скорости движения неоднородностей (сплошная линия), вычисленных по двум проекциям скорости, измеряемым в эксперименте 29.03.2014, в интервале времени 19:15÷19:48 UT

нённым данным даёт для её модуля значение 22 м/c, а для азимута — около $\pm 90^{\circ}$. На рис. 11a показано распределение скоростей неоднородностей по модулю и азимуту. На графике видны области сосредоточения скоростей по азимуту около указанных значений.

Для оценки влияния погрешностей определения скоростей по измерениям ЕКВ и РАО на результат расчёта полного вектора скорости было рассмотрено распределение рассчитываемых скоростей по азимутам и модулям в следующей модели, имитирующей эксперимент. Модельные скорости, для радара ЕКВ и РАО получались из соответствующих экспериментальных данных, усреднённых за 35 мин, при добавлении к ним дополнительной знакопеременной случайной величины со среднеквадратичным отклонением 20 м/с. Последняя по порядку величины соответствует точности получения экспериментальных данных. Полученные ряды обрабатывались по изложенной выше методике для оценки полного вектора скорости.

Результат моделирования представлен на рис. 11*6*. Полученное распределение похоже на распределение, рассчитанное по экспериментальным данным (рис. 11*a*). Это позволяет заключить, что значительная погрешность в измерении проекций скорости перемещения неоднородностей может приводить к наблюдаемому разбросу скоростей. Поэтому рассчитанные по экспериментальным данным направления движения неоднородностей связаны с малыми измеряемыми продольными скоростями, малым углом между измеряемыми проекциями скоростей и высокой погрешностью измерений в сравнении с абсолютным значением скорости. Таким образом, нехарактерное



Рис. 11. Распределение скорости ионосферных неоднородностей по модулю и азимуту для интервала времени 19:15÷19:48 UT, полученное по двум проекциям скорости, измеряемым в эксперименте (*a*) и вычисленным в результате моделирования (б)

для времени наблюдений направление движения неоднородностей вдоль линии запад—восток, определённое по данным эксперимента (рис. 10), может быть объяснено высокими ошибками измерений скорости на радарах и особенностями геометрии эксперимента.

Сравнение уровней рассеянного сигнала на приёмниках ЕКВ и РАО, приведённое на рис. 96, показывает большую изменчивость амплитуды рассеянного сигнала, принятого РАО, по сравнению с амплитудой сигнала от ионосферных неоднородностей на радаре ЕКВ, выражающуюся, например, в резком уменьшении первой на 15 дБ в 19:37 UT. Объяснение этого эффекта в настоящее время отсутствует. Возможно, он связан с особенностями ионосферного распространения

О. И. Бернгардт, К. А. Кутелев, В. И. Куркин и др.

на участке трассы МОИН-РАО.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены первые результаты совместных российско-украинских экспериментов по регистрации сигналов радара ЕКВ (Свердловская область, Россия) пассивными радиосредствами на расстоянии свыше 1600 км (Харьковская область, Украина) с использованием остронаправленной антенны радиотелескопа УТР-2. Эксперименты были проведены в марте 2014 года.

В работе показано, что кроме прямого сигнала ЕКВ—РАО надёжно регистрируется сигнал с существенным разбросом по задержкам, в среднем соответствующим дальности порядка 3000 км. Этот сигнал может быть сформирован рассеянием пробных сигналов на плазменных неоднородностях высокоширотной ионосферы, ориентированных вдоль магнитного поля.

Наиболее отчётливо данный эффект проявлялся 29.03.2014 в вечернее время. Доплеровское смещение частоты рассеянного сигнала зависело от дистанции и менялось в пределах $-3 \div + 4$ Гц, что соответствует радиальной составляющей скорости ионосферных неоднородностей от -43 до +58 м/с. Возникновение такого сигнала невозможно объяснить при рассмотрении распространения по траектории ЕКВ—РАО без дополнительных областей рассеяния, расположенных на больши́х отклонениях от прямой траектории.

Сопоставление данных однопозиционных и двухпозиционных наблюдений эффектов ионосферного рассеяния в высокоширотной ионосфере показало их непротиворечивость. Можно утверждать, что рассеянный сигнал, зарегистрированный одновременно на приёмных позициях ЕКВ и РАО, формируется в одних и тех же высокоширотных регионах. Области рассеяния, оцениваемые по экспериментальным данным, хорошо соответствуют результатам численного моделирования.

Корректность такого объяснения подтверждается сравнением дальностей до ионосферных неоднородностей, наблюдаемых РАО и радаром ЕКВ; сравнением наблюдаемых скоростей в обоих пунктах приёма; сравнением наблюдаемых дальностей с результатами проведённого численного моделирования прохождения радиосигналов по трассам ЕКВ—РАО и ЕКВ— МОИН—РАО.

В качестве модели ионосферы использовалась модель IRI-2012 с корректировкой по данным ионозонда «Арти», в качестве модели магнитного поля Земли — модель IGRF-11.

В целом, первый опыт по реализации двухпозиционной схемы когерентного высокочастотного локатора на базе технологии SuperDARN для исследования эффектов рассеяния на высокоппиротных ионосферных неоднородностях оказался успешным и может быть рекомендован к использованию для других радаров SuperDARN. Как продемонстрировал проведённый эксперимент, в отличие от двухпозиционного зондирования в более высокочастотном диапазоне, например радарами EISCAT, при выполнении регулярных двухпозиционных измерений на радарах SuperDARN необходимо следующее. Во-первых, необходимо обеспечить дополнительные измерения вертикального профиля электронной концентрации для корректного учёта рефракции радиосигнала в ионосфере. Во-вторых, необходимо развить более сложное и ресурсоёмкое программное обеспечение для интерпретации экспериментальных данных.

Авторы предполагают продолжение исследований в этом направлении. Очевидным экспериментальным развитием двухпозиционной системы является временная синхронизация режимов излучения EKB SuperDARN радара по сигналам GPS/ГЛОНАСС.

Авторы выражают благодарность научным руководителям совместного российско-украинского проекта ИСЗФ СО РАН—РИ НАНУ «Многопозиционные радарные исследования ионо-

О. И. Бернгардт, К. А. Кутелев, В. И. Куркин и др.

сферных неоднородностей в средних и высоких широтах над Евро-азиатским регионом» акад. Г. А. Жеребцову и акад. Л. Н. Литвиненко за постоянное внимание к работе, полезные советы и помощь в организации сложных экспериментов.

В ИСЗФ СО РАН работа выполнялась при финансовой поддержке Проекта 14 СО РАН совместно с НАН Украины. В РИ НАНУ работы финансировались в рамках конкурсной украинскороссийской НИР «Сизиф-2013» (номер госрегистрации 0113U000703) при частичной поддержке из бюджета ведомственной НИР «Ятаган-2» (номер госрегистрации 0111U000063).

Авторы благодарны Иркутскому суперкомпьютерному центру СО РАН (http://hpc.icc.ru) за предоставление вычислительного кластера «Blackford» для проведения расчётов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Hunsucker R. D., Hargreaves J. K. The high-latitude ionosphere and its effects on radio propagation. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 618 p.
- 2. Chisham G., Lester M., Milan S. E., et al. // Surveys Geophys. 2007. V. 28, No. 1. P. 33.
- Moccia A., D'Errico M., Moreira A., et al. Bistatic Radar: Emerging Technology Chichester: John Wiley and Sons Ltd, 2008. 406 p.
- Westman A., Leyser T. B., Wannberg G., Rietveld M. T. // J. Geophys. Res. 1995. V. 100, No. A6. P. 9717.
- Kustov A. V., Koehler J. A., Sofko G. J., Danskin D. W. // J Geophys. Res. 1996. V. 101, No. A4. P. 7 973.
- 6. Koehler J. A., Sofko G. J., Andre D., et al. // Can. J. Phys. 1995. V. 73, No. 3-4. P. 211.
- Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградов В. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 5. С. 287.
- Урядов В. П., Вертоградов Г. Г., Вертоградов В. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 4. С. 267.
- 9. Hysell D. L., Kelley M. C., Gurevich A. V., et al. // J. Geophys. Res. 1997. V. 102, No. A3. P. 4865.
- 10. Wright D. M., Yeoman T. K. // Geophys. Res. Lett. 1999. V. 26, No. 18. P. 2825.
- Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2. М.: Наука, 1978. 463 с.
- Кащеев С.Б., Галушко В.Г., Колосков А.В. и др. // Сб. тез. докл. Первой украинской конференции «Электромагнитные методы исследования окружающего пространства», 25–27 сентября 2012 года, г. Харьков, 2012. С. 308.
- 13. Брауде С. Я., Мень А. В., Содин Л. Г. // Антенны. 1978. Вып. 26. С. 3.
- 14. Ribeiro A. J., Ruohoniemi J. M., Ponomarenko P. V., et al. // Radio Sci. 2013. V. 48. P. 1.
- 15. Ponomarenko P. V., Waters C. L. // Ann. Geophys. 2006. V. 24. P. 115.
- 16. Кутелев К. А., Бернгардт О. И. // Солнечно-земная физика. 2013. Вып. 24 (137). С. 15.
- 17. Yampolski Y. M., Beley V. S., Kascheev S. B., et al. // J. Geophys. Res. A. 1997. V. 102, No. 4. P. 7461.
- Yeoman T. K., James M., Mager P. N., Klimushkin D. Y. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2012. V. 117. Art. no. A06231.
- Лучевое приближение и вопросы распространения радиоволн / Под ред. М. П. Кияновского. М.: Наука, 1971. 311 с.
- 20. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980. 304 с.
- Bilitza D., McKinnel L.-A., Reinisch B. W., Fuller-Rowell T. // J. Geodesy. 2011. V. 85, No. 12. P. 909.

О. И. Бернгардт, К. А. Кутелев, В. И. Куркин и др.

- Larquier S., Ponomarenko P., Ribeiro A. J., et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2013. V. 118, No. 8. P. 5 244.
- 23. Урядов В. П., Вертоградов Г. Г., Вертоградов В. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 8. С. 669.
- 24. Борисова Т. Д., Благовещенская Н. Ф., Корниенко В. А., и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 2009. Т. 49, № 4. С. 55.
- 25. Finlay C. C., Maus S., Beggan C. D., et al. // Geophys. J. Int. 2010. V. 183, № 3. P. 1216.
- 26. http://hpc.icc.ru.
- 27. Ponomarenko P. V., Koustov A. V., St-Maurice J.-P., Wild J. // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. Art. no. L21102.

Поступила в редакцию 11 августа 2014 г.; принята в печать 29 апреля 2015 г.

BISTATIC SOUNDING OF HIGH-LATITUDE IONOSPHERIC IRREGULARITIES USING A DECAMETER EKB RADAR AND AN UTR-2 RADIO TELESCOPE: FIRST RESULTS

O. I. Berngardt, K. A. Kutelev, V. I. Kurkin, K. V. Grkovich, Yu. M. Yampolsky, A. S. Kashcheyev, S. B. Kashcheyev, V. G. Galushko, S. A. Grigorieva, and O. A. Kusonsky

We present the first results of the joint Russian–Ukrainian experiments for recording of signals from the EKB radar of the Institute of Solar–Terrestrial Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Arti observatory of the Institute of Geophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Sverdlovsk region, Russia) at a distance of over 1600 km by using a coherent receiving system and a high-gain phased array of the UTR-2 radio telescope (S. Braude Radioastronomical Observatory of the Institute of Radio Astronomy of the Ukrainian National Academy of Sciences, Kharkov region, Ukraine). It is shown that two pulse sequences that are identical to the transmitted EKB radar signal, but arrive with different delays were observed at the reception point. The sequence which was received first corresponded to the direct-signal propagation along the great-circle arc. The second sequence was received with delays corresponding to a path length of 2800 to 3400 km and was the result of scattering of the transmitted radar signal by high-latitude ionospheric irregularities. The Doppler frequency shift of the scattered signal was range dependent and varied from -3 to +4 Hz, which corresponded to the radial component of the ionospheric irregularity velocity from -43 to ++58 m/s. To interpret the results of the experiments, we numerically simulated the signal propagation based on the actual ionospheric conditions at an appropriate time. Ionospheric characteristics were retrieved by the vertical ionospheric sounding technique, with the ionosonde located in close proximity to the EKB radar. Comparison between monostatic radar diagnostic results and bistatic sounding results has shown a good agreement of the retrieved parameters of the high-latitude ionospheric irregularities.