

Перспективы развития стенда “Сура” Магнитосферный радар

А. В. Гуревич
ФИАН, Москва, Россия

С. В. Поляков, А. Н. Караштин, Я. Ф. Белов,
В. О. Рапопорт, Д. С. Котик, В. В. Бычков
НИРФИ, Н. Новгород, Россия

Л. Н. Литвиненко, Ю. М. Ямпольский, В. Г. Синицян, В. Г. Безродный
РИАН, Харьков, Украина

П р е п р и н т № 347

Подписано в печать 26.05.92 г. Формат 60 x 84/16.
Бумага писчая. Печать офсетная. Объем 0,95 усл.п.л.
Заказ 5255. Тираж 50.

Отпечатано на ротапринтере НИРФИ

Содержание

1	Введение	2
2	Моностатический радар “Сура”	4
2.1	Краткая характеристика стенда “Сура”	4
2.2	Цели модернизации стенда	4
2.3	Возможные пути реализации	9
2.4	Дополнительные возможности использования радара	11
3	Бистатический радар “Сура—УТР-2”	11
3.1	Радиотелескоп УТР-2	11
3.2	Физические задачи	12
3.3	Пути реализации	12
3.4	Возможности развития	12
	Литература	13

Список таблиц

1	Параметры стенда “Сура”	6
---	-------------------------	---

Список рисунков

1	Схема эксперимента по зондированию магнитосферы	5
2	Пример спектров сигналов, рассеянных магнитосферой	8
3	Возможные положения луча радара	10

1 Введение

Хорошо известно, что исследования ионосферы давно и с успехом проводятся радиолокационным методом некогерентного рассеяния в метровом и дециметровом диапазонах длин волн и приносят исключительно богатую информацию о физических свойствах среды. Несомненный интерес представляют данные такого рода и о магнитосфере. Однако существующие установки некогерентного рассеяния не позволяют получать информацию о магнитосферной плазме ввиду недостаточной интенсивности ожидаемого рассеянного сигнала, что обусловлено двумя основными причинами. Во-первых, интенсивность тепловых флуктуаций, за счет которых и происходит рассеяние, пропорциональна плотности плазмы и уменьшается с увеличением высоты выше максимума F-слоя ионосферы (300–400 км); кроме того, рассеянный сигнал уменьшается пропорционально квадрату расстояния до рассеивающего объема. Во-вторых, поскольку рассеяние происходит на резонансных флуктуациях плотности плазмы, масштабы которых определяются длиной зондирующей волны, а на высотах магнитосферы эти масштабы становятся сравнимыми с дебаевским радиусом, интенсивность рассеянного сигнала существенно уменьшается ввиду драматического уменьшения интенсивности флуктуаций плазмы с резонансными масштабами. Таким образом, для зондирования магнитосферы следует использовать более низкочастотный диапазон длин волн.

Частота зондирующей волны, используемой в магнитосферном радаре, должна определяться в результате компромисса между двумя противоположными требованиями. Прежде всего, она должна быть достаточно низкой, такой, чтобы длина волны существенно превышала дебаевский радиус плазмы. Оценки показывают, что значение дебаевского радиуса составляет

$r_D \approx 35$ см на высоте 3000 км и $r_D \approx 1.4$ м на высоте 5000 км. Согласно теоретическим представлениям [1] характерные масштабы флуктуаций должны быть $\geq 5r_D$ из-за сильного бесстолкновительного затухания флуктуаций меньших масштабов. В соответствии с этим частота зондирования не должна превышать 85 МГц для высоты 3000 км и 20 МГц для высоты 5000 км. Использование более низких частот повышает вероятность регистрации рассеянных сигналов, поскольку при этом рассеяние происходит на спектральной компоненте флуктуаций плотности плазмы большей интенсивности. С другой стороны, следует учитывать, что зондирующая волна должна проходить через ионосферу, что сразу ограничивает частоту снизу. Таким образом, зондирование магнитосферы может быть проведено лишь в декаметровом диапазоне длин волн. Следует отметить, что помехи, связанные с работой радиостанций, а также сигналы возвратно-наклонного зондирования (ВНЗ), обусловленные рассеянием на наклонных трассах вне диаграммы направленности радара, уменьшаются с увеличением частоты. Уровень космического фона с ростом частоты также падает. Все это приводит к выводу, что оптимальным для радиозондирования магнитосферы является диапазон частот 15–25 МГц.

Как показали наблюдения на спутниках *S3-3* [2] и *Viking* [3], в авроральной области магнитосферы в широком интервале высот от 1000 до 13,000 км плазма сильно турбулизована. Интенсивность флуктуаций плотности плазмы в этой области существенно превышает тепловой уровень и может быть достаточна для наблюдения рассеянных сигналов с поверхности Земли. Предлагаемый новый метод исследования авроральной магнитосферы—когерентное радиозондирование—в отличие и в дополнение к исследованиям на спутниках, дающим лишь мгновенную картину вдоль тра-

ектории движения, позволит определять динамические характеристики турбулентности и ее распределение в пространстве.

В настоящее время в декаметровом диапазоне длин волн работает ряд мощных исследовательских установок, ориентированных на изучение процессов модификации ионосферы мощным радиоизлучением. Их рабочие частоты выбираются ниже критической частоты дневной ионосферы. В ночное время эти частоты могут оказываться заметно ниже критической, и такие установки вполне пригодны для зондирования магнитосферы, хотя их частоты и не являются оптимальными. Это открывает новые возможности использования существующих нагревных стенок.

Одной из таких установок является стенд "Сура" Научно-исследовательского радиофизического института (Н. Новгород). Способность стенда "Сура" работать в радиолокационном режиме уже сейчас делает возможным его использование в качестве магнитосферного радара в диапазоне частот 4.5-9 МГц. Передатчики стенда "Сура" могут работать во всем декаметровом диапазоне вплоть до частоты 26 МГц, что позволяет сравнительно малыми средствами путем создания только антенной системы на диапазон частот 15-25 МГц получить на его базе магнитосферный радар с оптимальными характеристиками. В настоящее время такая возможность является уникальной.

Возможность использования дополнительной приемной установки на базе радиотелескопа УТР-2 Радиоастрономического института АН Украины (Харьков) позволит наряду с моностатической реализовать бистатическую схему радара. Уникальные свойства коротковолнового радиотелескопа УТР-2 позволят значительно улучшить угловое разрешение радара для определения детального пространственного распределения магнитосферной турбулентности.

Географическое положение установки

зондирования магнитосферы имеет важное значение. На первый взгляд кажется наиболее целесообразным расположить ее в высоких широтах в районе аврорального овала. Однако, следует учитывать, что в магнитовозмущенных условиях авроральные области характеризуются очень сильным поглощением радиоволн КВ диапазона в нижней ионосфере. Это существенно понизило бы потенциал установки размещенной в высоких широтах, если не сделало бы зондирование вообще невозможным в возмущенных условиях. Оптимальным с нашей точки зрения является расположение магнитосферного радара в средних широтах сравнительно недалеко от авроральной области, что позволит избежать сильного поглощения в нижней ионосфере. Стенд "Сура" занимает как раз подходящее положение.

Существенное значение для интерпретации данных магнитосферного зондирования имеет возможность проведения комплексных исследований с использованием дополнительных средств диагностики, включая бортовые на спутниках Богатый комплекс наземных средств диагностики авроральных явлений в настоящее время ориентирован на район северной Скандинавии. В этом же районе имеется также и станция съема данных со спутников. Поэтому представляется целесообразным направить новую проектируемую антенную систему стенда "Сура" диапазона 15-25 МГц на область магнитосферы, проектирующуюся на район северной Скандинавии.

Радиолокационные исследования авроральной магнитосферы на стенде "Сура" позволят проводить измерения характеристик ионно-звуковой турбулентности и погруженных в нее двойных слоев на больших высотах. Наблюдение усиленной плазменной линии в турбулентной области позволят также получать профили плотности плазмы в магнитосфере, что в настоящее время недоступно наземным сред-

ствам. Кроме того, появится возможность определения продольных (вдоль магнитного поля) скоростей плазмы как целого и поперечных электрических полей, включая долгопериодные геомагнитные пульсации. Предварительные эксперименты, проведенные на стенде "Сура" на частоте около 9 МГц [4], показали принципиальную возможность регистрации рассеянных магнитосферной турбулентностью сигналов. Создание новой антенной системы на диапазон частот 15–25 МГц существенно расширяет возможности стенда как магнитосферного радара.

Отметим, что новая антенная система может быть также использована и для других приложений. В частности, стенд "Сура" при этом может служить в качестве MST-радара и радара установки радиоакустического зондирования для диагностики атмосферы, для радиолокационных исследований объектов ближнего космоса—Солнца, Луны, солнечного ветра. Другой возможной областью применения антенной системы является проведение радиоастрономических наблюдений.

2 Моностатический радар "Сура"

2.1 Краткая характеристика стенда "Сура"

Подходящей базой для создания магнитосферного радара является стенд Научно-исследовательского радиофизического института (НИРФИ) "Сура". Он расположен вблизи р/п Васильсурск Нижегородской области (56.13° с. ш., 46.10° в. д.). Его географическое положение относительно авроральных областей магнитосферы показано на рисунке 1. Стенд имеет необходимую энергетику, производственные и жилые площади, мощные передающие устройства и ряд антенных систем.

Стенд "Сура" был введен в строй в

1980 г. Основной целью создания стенда было исследование процессов воздействия мощным радиоизлучением на ионосферную плазму, что и определило выбор его параметров, которые приведены в левой графе таблицы 1. Стенд имеет довольно высокий энергетический потенциал, однако системы управления, сбора и обработки данных не развиты, не имеется также и современной приемной техники.

Стенд "Сура" допускает работу в режиме радара в диапазоне частот 4.5–9 МГц с использованием только одного из передатчиков и отдельных подрешеток антенны на передачу и прием, что связано с конструкцией антенной системы. Такой режим работы не использует всех возможностей стенда, поэтому в настоящее время проводится модернизация антенной системы 4.5–9 МГц с целью повышения потенциала стенда при работе в качестве радара. Эта модернизация предполагает обеспечение возможности работы всех трех передатчиков и использования всей антенной решетки как на передачу, так и на прием, что позволит увеличить энергетический потенциал стенда в режиме радара примерно в 30 раз.

Вместе с тем используемый в настоящее время диапазон частот 4.5–9 МГц не является оптимальным для магнитосферного зондирования. Вследствие того, что передатчики стенда могут работать до частоты 26 МГц, переход на новый диапазон частот 15–25 МГц потребует только строительства новой антенной системы. Для эффективной работы радара необходимо также развитие средств управления, а также сбора и обработки данных.

2.2 Цели модернизации стенда

Целью предлагаемой модернизации является создание на базе стенда НИРФИ "Сура" радиолокатора на диапазон частот 15–25 МГц для исследования авроральных

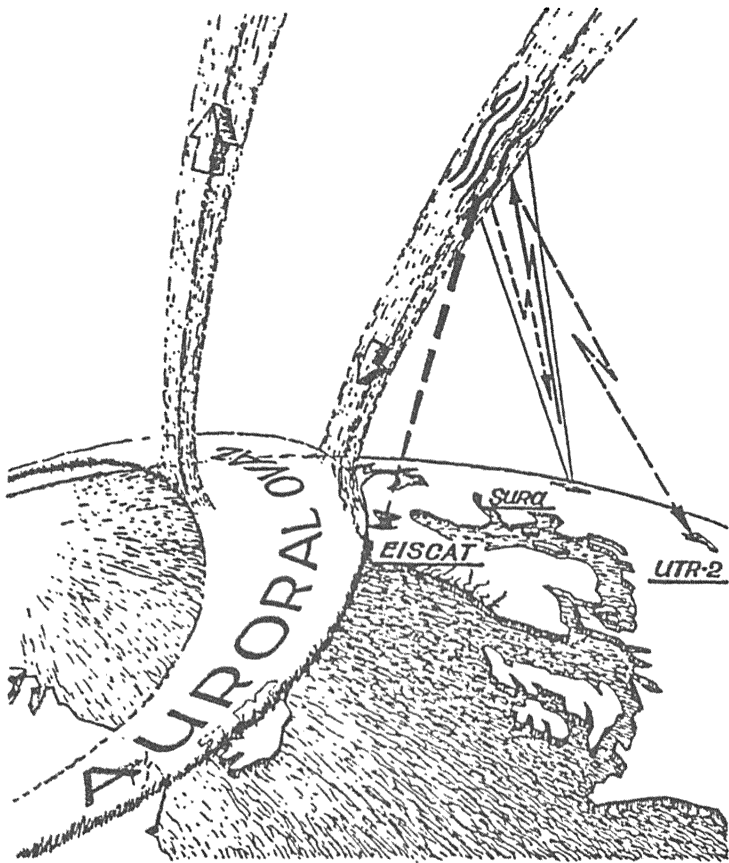


Рисунок 1: Схема эксперимента по зондированию магнитосферы. Показано расположение радиодействующих в эксперименте установок относительно авроральной турбулентной области, связанной с продольными токами.

Таблица 1: Параметры стенда "Сура"

Наименование	Существующая	Проект
Передатчик		
Диапазон частот	4-26 МГц	
Мощность	3 × 250 кВт	
Режим работы	непрерывный, импульсный	
Минимальная длительность импульса	40 мкс (4.5 МГц)	10 мкс (20 МГц)
Антенная система		
Тип антенны	плоская горизонтальная фазированная решетка	
Диапазон частот	4.5-9 МГц	15-25 МГц
Тип вибраторов	скрещенные диполи	широкополосные шунтового типа
	Надененко	шунтового типа
Число вибраторов	12 × 12	24 × 24
Число подрешеток	3	3
Общая площадь	300 × 300 м ²	173 × 173 м ²
Коэффициент усиления	400 (6.6 МГц)	1000 (20 МГц)
Эффективная мощность	300 МВт (6.6 МГц)	800 МВт (20 МГц)
Ширина луча (зенит)	8° × 8° (6.6 МГц)	4.5° × 4.5° (20 МГц)
Поляризация	круговая "O", "X"	линейная
Диапазон сканирования	±40° N-S	±45° NW-SE ±25° NE-SW
Время переключения луча	~ 15мин (ручное)	< 1мс (электронное) < 1с (механическое)
Акустическая система		
Местоположение	Зименки	Васильсурск
Диапазон частот	38-43 Гц	45-60 Гц
Число модулей	9	52
Акустическая мощность	0.45 кВт	10 кВт
Режим работы	импульсный	
Длительность импульса	1-5 с	0.5-10 с
Скважность	10	10
Ширина луча	40° × 40°	15° × 15°
Диапазон сканирования	—	±50°

областей магнитосферы на высотах в несколько тысяч километров. Данный радиолокатор должен использовать имеющиеся передатчики стенда. В результате модернизации предполагается

- создание новой прямо-передающей антенной системы на диапазон частот 15–25 МГц;
- создание современного радиоприемного устройства, оснащенного квадратичным детектором;
- создание систем управления, сбора и обработки данных радиолокационных исследований, достаточно гибких для проведения исследований различных объектов от атмосферы Земли до короны Солнца, и открытых для совместной работы по единой программе с другими приборами и установками.

Модернизация стенда должна обеспечить проведение радиолокационных исследований динамики наиболее активной околоземной части магнитосферы—ее авральной области. Использование нового частотного диапазона 15–25 МГц позво-

- работать на частотах выше МПЧ (максимально применимых частот), что должно существенно ослабить мешающее влияние сигналов, рассеянных землей и ионосферой, а также помех от радиостанций,
- проводить измерения в дневное время, что расширит временной интервал наблюдений авральной магнитосферы вплоть до круглосуточных и позволит поставить задачи исследования других магнитосферных объектов, таких как дневная магнитопауза, отошедшая ударная волна, радиационные пояса и т. п.,

- в сочетании с работой имеющегося радиолокатора диапазона частот 4.5–9 МГц изучать спектральные характеристики магнитосферной турбулентности.

Уверенность в возможности решения поставленных физических задач основана на теоретических оценках интенсивности рассеянного ионо-звуковой турбулентностью сигнала, сделанных в соответствии с [5]. В случае стенда “Сура”, работающего в диапазоне частот 15–25 МГц, оценка потока мощности рассеянного сигнала на поверхности земли составляет $5 \cdot 10^{-19}$ Вт/м² при концентрации плазмы в рассеивающей области $4 \cdot 10^2$ см⁻³ и расстоянии до нее 4000 км. Это соответствует уровню сигнала на входе приемника 1 мкВ в пренебрежении потерями в антенне. Данный уровень сигнала вполне достаточен для уверенной регистрации, и при использовании современной техники кодирования и обработки сигналов позволит получить детальную информацию о рассеивающей среде.

С целью проверки принципиальной возможности регистрации рассеянных турбулентными областями авральной магнитосферы сигналов на стенде “Сура” были проведены пробные эксперименты на частоте около 9 МГц в ночное время [4]. Теоретические оценки отношения сигнал/шум в этих экспериментах дали значение порядка 0.3 по отношению к космическому фону и порядка $(1-3) \cdot 10^{-3}$ по отношению к усредненному шуму от радиостанций (в области минимальных помех) в полосе частот 4 кГц для расстояния до рассеивающего объема 4000 км. В эксперименте использовалась техника бифазового кодирования зондирующих импульсов [6] с последующим усреднением спектров, что позволило улучшить отношение сигнал/шум примерно в 300 раз. Пример усредненных спектров сигналов, рассеянных от различных дальностей, приведены на рисунке 2.

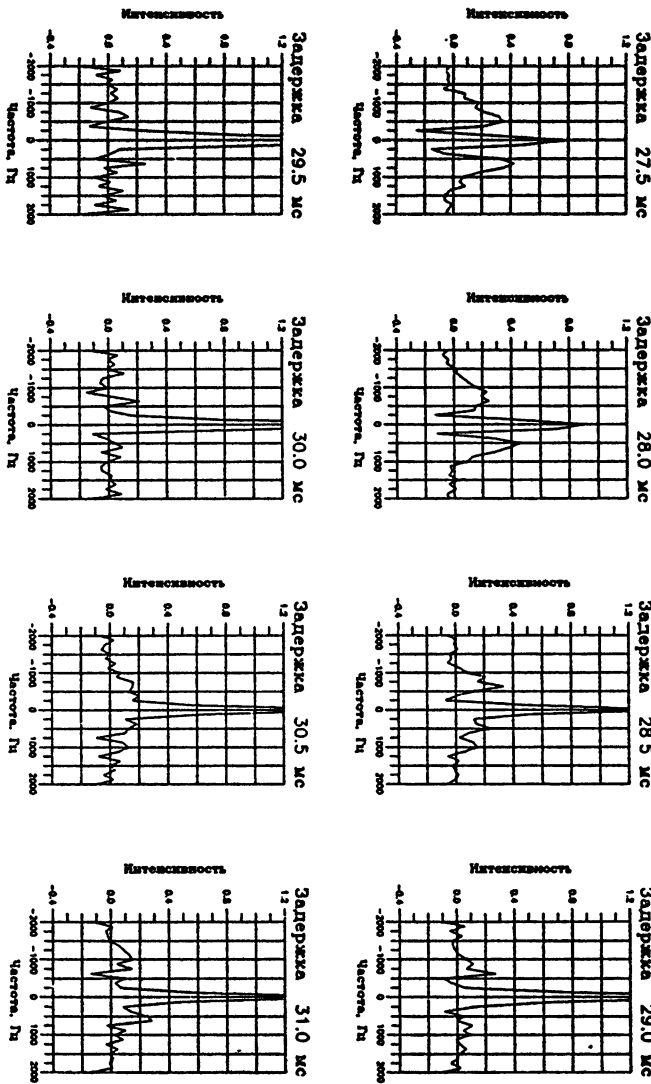


Рисунок 2: Пример спектров сигналов, рассеянных магнитосферой, для различных времен задержки. Каждый спектр усреднен по 85 реализациям. Исключен шумовой уровень, полученный при выключенном передатчике.

2.3 Возможные пути реализации

Основные параметры предлагаемой антенной системы магнитосферного радара в диапазоне частот 15–25 МГц приведены в правой колонке таблицы 1.

Выбор технического решения для антенной системы радиолокатора основывался на необходимости обеспечения компромисса между необходимостью наклона луча на угол не менее 40° от вертикали в северо-западном направлении (на район северной Скандинавии с целью обеспечить совместную работу с имеющимися там средствами) для зондирования авроральных областей магнитосферы и на примерно такой же угол в южном направлении для исследования дневной магнитоплазмы, отошедшей ударной волны и, возможно, объектов ближнего космоса (Солнце, Луна, солнечный ветер). Весьма желательным является также обеспечение возможности совместной работы радиолокаторов диапазонов 4.5–9 МГц и 15–25 МГц с наклоном в одном направлении, т. е. в направлении север–юг.

Разумеется, антенна, способная сканировать луч в любом направлении (полноповоротная), удовлетворяет этим требованиям. Однако, такая антенна должна иметь очень сложную конструкцию для работы с передатчиками стелса “Сура” и будет иметь очень высокую стоимость. Поиск альтернативных вариантов привел к решению использовать в проектируемой антенне двухступенчатую систему наклона луча—электронную на 15 положений луча 0° , $\pm 6.5^\circ$ в направлении NW–SE и 0° , $\pm 12.5^\circ$, $\pm 25^\circ$ в направлении NE–SW относительно центрального положения, задаваемого механической на 5 положений луча 0° , $\pm 19.5^\circ$, $\pm 39^\circ$ в направлении NW–SE. Допустимые положения луча радара показаны на рисунке 3. Такое решение удовлетворяет всем требованиям, приведенным выше, причем стоимость сооруже-

ния оказывается существенно ниже, чем у полноповоротной антенны.

Важной составной частью радиолокатора должны быть системы управления, сбора и обработки информации.

Система управления работой радиолокатора должна обеспечивать раздельное управление всеми тремя передатчиками с возможностью амплитудной и фазовой манипуляции в передающем режиме, а также формирование и быстрое переключение одного или нескольких лучей в приемном режиме. Эти задачи могут быть решены с использованием ЭВМ класса HP9000/340 в качестве центральной управляющей и микропроцессорной техники в качестве исполняющей для реализации максимальных скоростей управления. Стыковка и синхронизация их работы может производиться через крейт КАМАК или аналогичное устройство.

Для сбора и обработки информации представляется нежелательным применение каких-либо жестких систем предварительного накопления или обработки данных типа корреляторов, устройств усреднения данных, накопления спектров и т. п., поскольку они накладывают ограничения на характер и вид получаемой информации и, следовательно, ограничивают возможности развития системы. Все операции обработки информации желательно производить на программном уровне. Для реализации такого подхода необходима достаточно быстрая система сбора данных, обладающая к тому же большой емкостью носителя информации, и мощная высокопроизводительная система обработки. Базовой ЭВМ для решения этих задач может служить ЭВМ класса HP9000/380, связанная с физическими устройствами через крейт КАМАК или собственные интерфейсы.

Кроме того, в состав радиолокатора должно входить современное многоканальное приемное устройство, оснащенное квадратичным детектором и быстродействи-

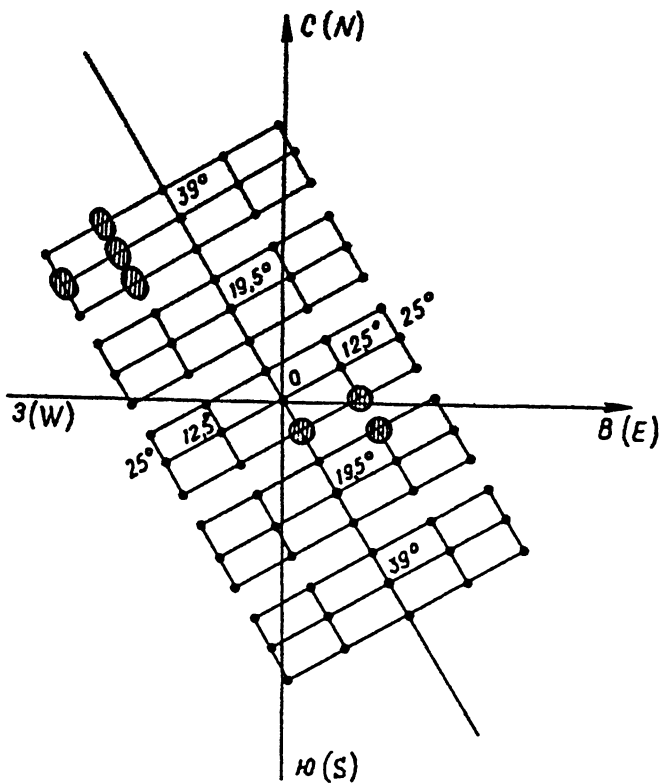


Рисунок 3: Возможные положения луча радара, обеспечиваемые предлагаемыми системами переключения. Переключение внутри каждого прямоугольника обеспечивается олектронной системой, в то время как переключение между прямоугольниками—механической.

ющим АЦП для съема данных.

2.4 Дополнительные возможности использования радара

Предлагаемый радиолокатор может быть использован не только в целях зондирования магнитосферы. Другими областями его применения могут быть

- Исследование атмосферы, а именно, радио-электро-акустическое зондирование для изучения динамики атмосферных активных зон в области высот 2–30 км, которая содержит основную часть энергии атмосферы. В этом случае стенд “Сура” может использоваться в качестве

1. MST-радара для определения профиля скорости ветра, параметров атмосферной турбулентности включая ее спектральные характеристики, исследования волновых движений в атмосфере;

2. радара установки радиоакустического зондирования, поскольку диапазон частот 15–25 МГц в этом случае представляется предпочтительным ввиду относительно низкого уровня помех с одной стороны и достаточно низкой частоты соответствующего акустического излучателя (40–50 Гц) для зондирования всей толщи тропосферы и стратосферы до высот 30–40 км с другой.

- Радиолокационные исследования объектов ближнего космоса—Солнца, Луны, солнечного ветра—при отклонении луча радара в южном направлении. При этом

1. диапазон частот 15–25 МГц является оптимальным для наземного радиозондирования короны Сол-

нца, поскольку эффективная площадь рассеяния растет с понижением частоты, а ионосфера еще “прозрачна”;

2. возможно исследование глубинной структуры коры Луны в двухпозиционной схеме облучения Луны стендом “Сура” при приеме отраженных сигналов орбитальным спутником Луны;

3. возможна радиолокация турбулентности солнечного ветра и отошедшей ударной волны методом моностатической радиолокации Луны.

- Антенная система диапазона частот 15–25 МГц может быть использована для проведения радиоастрономических наблюдений.

3 Бистатический радар “Сура—УТР-2”

3.1 Радиотелескоп УТР-2

В качестве одной из приемных позиций магнитосферного радара предполагается использовать радиотелескоп УТР-2. Этот инструмент разработан и успешно эксплуатируется в Радиоастрономическом институте Академии наук Украины (г. Харьков). Рабочий частотный диапазон телескопа: 10–25 МГц. Антенная система УТР-2 представляет собой фазированную решетку, состоящую из 2040 горизонтальных диполей. Система фазирования позволяет формировать пятилепестковую диаграмму направленности, электрически управляемую с помощью ЭВМ по двум угловым координатам. Диапазон изменения ориентации антенны составляет по углу места $\pm 80^\circ$ относительно зенита и $\pm 180^\circ$ по азимуту относительно меридиана. Эффективная площадь двух линейных шестирядных ФАР, формирующих Т-

образную конфигурацию радиотелескопа, составляет 150,000 м². Шумовая чувствительность УТР-2 на частоте 25 МГц оценена 4 и 10 Дж для "холодных" и "горячих" участков неба соответственно. Угловое разрешение на этой же частоте в направлении, близком к зенитному, составляет 0.3°–0.7°. В настоящее время основными приемными устройствами радиотелескопа являются 30-ти канальный радиометр и 8-ми канальный когерентный доплеровский регистратор. Радиотелескоп УТР-2 на сегодня является крупнейшим исследовательским инструментом в мире. Радиоастрономическая обсерватория расположена на юго-западе от Харькова в поселке Граково (49°39' с. ш., 36°56' в. д.), имеет территорию около 120 га, обслуживающий персонал насчитывает более 30 инженерно-технических и вспомогательных сотрудников.

3.2 Физические задачи

Основными научными задачами проекта по созданию двухпозиционного радара с использованием ФАР УТР-2 могут являться:

- Исследование пространственно-временного распределения электронной концентрации внешней среднеширотной ионосферы в северном полушарии в интервале высот от 1000 км до 20,000 км.
- Исследование эффектов рассеяния КВ в авроральных широтах на границе плазмопаузы, в областях радиационных поясов и кольцевого тока.
- Исследования эффектов рассеяния дециметровых радиоволн искусственной ионосферной турбулентностью, стимулируемой нагревным стендом "Сура" на ионосферных высотах, с использованием многопозиционного облучения сигналами пробных КВ станций.

3.3 Пути реализации

Реализация перечисленных задач потребует следующих усовершенствований приемно-регистралирующих и обрабатывающих систем:

- Создания многоканального приемника для регистрации радиолокационных сигналов со сложными видами модуляции.
- Создания автономной системы синхронизации приемного и передающего пунктов ("Сура" – УТР-2).
- Создания аналого-цифрового информационного комплекса.
- Создания канала связи типа электронной почты между обсерваториями ННРФИ – РИАН Украины.

3.4 Возможности развития

Дальнейшим развитием многопозиционной системы приема и обработки радиолокационных данных может являться использование в качестве системы приемных пунктов антенн радиоинтерферометра УРАН. Многопунктовый радиоинтерферометр со сверхдлинными базами Радиоастрономического института АН Украины кроме радиотелескопа УТР-2 включает антенны: УРАН-1 (г. Змиев, 42 км от Харькова), УРАН-2 (г. Полтава, 150 км), УРАН-3 (г. Львов, 900 км), УРАН-4 (г. Одесса, 600 км). Антенные системы в этих пунктах выполнены по типовому проекту и представляют собой ФАР с эффективными площадями порядка 10,000 м².

В дальнейшем многопозиционный магнитосферный радар может быть использован для задач радиолокации Луны и короны Солнца.

Литература

1. Гивзбург, В. Л., А. А. Рухадзе, *Волны в магнитоактивной плазме*, М., "Наука", 1975.
2. Mozer, F. S., C. A. Cattell, M. Temerin, R. B. Torbert, S. von Glinski, M. Woldorff, and J. Wygant, The dc and ac electric field, plasma density, plasma temperature, and field-aligned current experiments on the S3-3 satellite, *J. Geophys. Res.*, *84*, 5875-5884, 1979.
3. Block, L. P., Electric field measurements on Viking: First results, *Geophys. Res. Lett.*, *14*, 435-438, 1987.
4. Бабиченко, А. М., А. В. Гуревич, А. Н. Караштня, В. О. Рапопорт, Радиолокация магнитосферной турбулентности, *Письма в ЖЭТФ*, *53*, 139-143, 1991.
5. *Электродинамика плазмы*, ред. А. И. Ахиезер, М., "Наука", 1974.
6. Lehtinen, M. S., and I. Häggström, A new modulation principle for incoherent scatter measurements, *Radio Sci.*, *22*, 625-634.