

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Ордена Трудового Красного Знамени
Институт солнечно-земной физики
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи
УДК 53.08, 529.9-7, 551.510.5

Сетов Артём Геннадьевич

**Разработка методов калибровки и оценки чувствительности радаров некогерентного
рассеяния**

Специальность 1.3.4 «Радиофизика»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

Доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН

Медведев Андрей Всеволодович

Иркутск — 2025

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Абсолютная калибровка приемо-передающего тракта Иркутского радара некогерентного рассеяния	9
1.1 Общие сведения о калибровке приемо-передающих устройств	11
1.1.1 Шумовые характеристики приемных устройств	11
1.1.2 Чувствительность	14
1.1.3 Калибровка приемо-передающих устройств	15
1.1.4 Калибровка диаграммы направленности антенн	20
1.2 Иркутский радар некогерентного рассеяния	21
1.2.1 Описание инструмента	21
1.2.2 Режимы работы	24
1.3 Обработка данных радиоастрономических наблюдений	30
1.3.1 Виды данных пассивных наблюдений	30
1.3.2. Температурная коррекция (коррекция положения трека)	34
1.3.3. Фильтрация помех	35
1.4 Модель шумовой температуры антенны	38
1.5 Калибровка приемного тракта	40
1.6 Результаты калибровки	44
1.7 Калибровка передающего тракта	49
Глава 2. Абсолютные измерения потока солнечного излучения	53
2.1 Наблюдение Солнца на ИРНР	54
2.2 Методы оценки потока солнечного излучения	57
2.3 Модель солнечного трека	61
2.4 Результаты измерений потока солнечного излучения	63
2.5 Ошибки измерений	64
2.6 Сравнительный корреляционный анализ потока солнечного излучения на частоте 161 МГц по данным ИРНР и 245 МГц по данным станции Лермонт	66
2.7 Наблюдение радиовсплесков	73
Глава 3. Метод оценки диагностического потенциала радаров некогерентного рассеяния (НР) и мезосферно-стратосферно-тропосферных (МСТ) радаров	76
3.1 Принципы работы НР- и МСТ-радаров	77

3.1.1 НР-измерения	78
3.1.2 МСТ-измерения	80
3.2 Метод оценки диагностического потенциала	83
3.3 Диагностический потенциал ИРНР и перспективного радара НР-МСТ	87
3.4 Рекомендации по разработке НР- и МСТ-радаров	93
Заключение	96
Благодарности	97
Публикации по теме диссертации	98
Список сокращений	99
Список литературы	100

Введение

Актуальность темы исследования

Задачи исследования солнечно-земных связей требуют широкого спектра радиофизических инструментов, позволяющих изучать процессы, происходящие на Солнце, в межпланетном пространстве и околоземном космическом пространстве. Антенны радиометров, радиотелескопов, риометров, ионозондов, радаров и прочих инструментов, несмотря на разницу в назначении, обладают схожими принципами работы. Благодаря этому некоторые инструменты могут использоваться для решения широкого круга задач. Так, радары некогерентного рассеяния (НР), основное назначение которых состоит в исследовании ионосферы, как правило, обладают большой антенной, высокой мощностью излучения и чувствительностью к слабым сигналам, что позволяет использовать их для отслеживания космических объектов, радиозондирования поверхностей небесных тел, радиоастрономических наблюдений за мощными радиоисточниками, а также для изучения нижней и средней атмосферы методами мезосферно-стратосферно-тропосферных радаров (МСТ). В [McCrea et al., 2015] например, детально расписано множество научных задач, не ограниченное ионосферой, для радара EISCAT-3D — нового радара НР, завершение строительства которого ожидается в 2025 г. В рамках создания Национального гелиогеофизического комплекса (НГК) [Жеребцов, 2020] планируется строительство российского радара НР-МСТ, возможности которого также охватывают весь спектр перечисленных исследований.

Для получения достоверных измерений и исследования физических процессов необходимо иметь четкое понимание того, как радары взаимодействуют со средой, какую погрешность вносят и каковы предельные значения измеряемых параметров, т. е. нужна модель передаваемых и принимаемых сигналов. В составлении подобной модели важным шагом является калибровка, которой, на примере Иркутского радара некогерентного рассеяния (ИРНР) [Medvedev, Potekhin, 2019], во многом и посвящена диссертация. Калибровкой называют комплекс мер для определения соответствия между показаниями измерительного прибора и истинными значениями измеряемой величины. Для радаров НР — системы передатчиков, приемников и антенно-фидерных устройств — калибровка является широким понятием и может затрагивать калибровку интенсивности сигнала, фазочастотной характеристики, диаграммы направленности (ДН) [Лебедев, 2015; Renkwitz et al., 2012]. Здесь рассматриваются абсолютная калибровка и абсолютные измерения, т. е. получение значений некоторой физической величины, (принятой мощности, плотности потока мощности излучения) в физических единицах [Вт, Ян]. Для этого определяются характеристики приемо-передающей системы путем сравнения сигналов, полу-

ченных от эталонных источников. В ходе абсолютной калибровки принятой мощности определяется уровень шума в приемном тракте, что важно для понимания природы принятых сигналов. Информация о мощности принятого сигнала открывает для радара дополнительные возможности измерения физических параметров. Примерами служат методы оценки электронной концентрации [Evans, 1969], эффективной площади рассеяния (ЭПР) космических объектов [Wang et al., 2022] и турбулентных слоев [Swarnalingam et al., 2009], скорости диссипации турбулентной энергии [Hocking, 1985], потока излучения радиоисточников [Baars, 2014] и солнечного потока [Tanaka et al., 1973].

Иркутский радар некогерентного рассеяния имеет относительно редкий частотный диапазон 154–163 МГц, представляющий интерес не только для ионосферных наблюдений, но и радиоастрономических наблюдений Солнца. Солнечное излучение в метровом диапазоне длин волн приходит из короны и в качестве инструментов для его изучения используются спектрополяриметры, а также малочисленные радиотелескопы и радиоспектрографы. Хотя ИРНР и не охватывает такой же широкий частотный диапазон, как спектрополяриметры, он обладает высокой чувствительностью благодаря крупной антенне и большим динамическим диапазоном, что дает возможность оценки солнечного потока с высоким временным разрешением. Это позволяет исследовать тонкую структуру радиовсплесков — усилений интенсивности радиоизлучения, которые генерируются в активных областях на Солнце. Кроме того, получение калиброванного солнечного потока позволяет проводить сравнение с измерениями на других инструментах для изучения солнечного радиоизлучения в широком спектре.

С абсолютной калибровкой и шумом близко связана и другая характеристика приемника — чувствительность, определяемая как минимальный уровень мощности сигнала, необходимый для проведения измерения с достаточной статистической точностью. Чувствительность часто используется как сравнительная метрика эффективности приемных антенных устройств, таких как радиотелескопы. Для сравнения радаров, однако, нужна метрика, которая учитывает излучающие возможности инструмента, поэтому дополнительно применяется понятие энергетического потенциала как произведения импульсной мощности на площадь антенны. Как чувствительность, так и энергетический потенциал — это простые, грубые оценки эффективности, иногда недостаточные для описания и проектирования исследовательских установок. С другой стороны, существуют обобщенные методы анализа [Lehtinen, 1986; Van Trees, 2013], основанные на статистической теории оценки параметров сигнала на фоне шума. В диссертации представлен более практичный метод оценки диагностического потенциала радаров НР и МСТ. Эта задача возникла во время проектирования радара НР-МСТ и обусловлена отсутствием устоявшихся методов. Создание подобных инструментов требует грамотного формулирования научных и

технических задач, а также поиска компромиссных решений между стоимостью и предполагаемыми диагностическими возможностями.

Настоящая работа затрагивает некоторые аспекты калибровки, анализа шумовой обстановки, оценки физических параметров и диагностического потенциала радаров, применяемых для современных исследований в солнечно-земной физике.

Цель работы

Целью работы является разработка методов калибровки, проведения абсолютных измерений и оценки чувствительности радаров, используемых для решения задач солнечно-земной физики, на основе данных Иркутского радара некогерентного рассеяния.

Для достижения поставленной цели в диссертации решались следующие задачи.

- Калибровка приемного тракта ИРНР, охватывающая измерения с 2011 г., с помощью разработанной модели шумовой температуры антенны. Калибровка передающего тракта по измерениям электронной концентрации.
- Проведение абсолютных измерений полного солнечного потока на частоте 161 МГц по данным радиоастрономических наблюдений ИРНР с учетом особенностей антенны. Проведение статистического анализа и анализа солнечного события по полученным измерениям потока.
- Разработка метода оценки чувствительности и диагностического потенциала радаров НР и МСТ. Сравнение потенциала действующего радара ИРНР и перспективного радара НР-МСТ в задачах исследования атмосферы.

Научная новизна

Впервые была разработана модель шумовой температуры антенны ИРНР и проведена абсолютная калибровка приемо-передающего тракта, охватывающая весь диапазон рабочих частот. Определены шумы приемной системы и чувствительность ИРНР.

Впервые получены абсолютные измерения солнечного потока на частоте 161 МГц за один солнечный цикл по данным радиоастрономических наблюдений ИРНР. При разработке метода оценки потока найдены поправки к модели диаграммы направленности ИРНР на частотах наблюдения Солнца.

Впервые разработан единый метод оценки диагностического потенциала радаров при исследовании атмосферы как методом НР, так и методами МСТ-радаров.

Научная и практическая значимость

Программный комплекс для получения шумовой температуры антенны ИРНР позволяет определять мощность шума неба на входе приемника для любой антенны с заданной диаграммой направленности и географическим положением. Модель шумовой температуры антенны

ИРНР используется другими исследователями для определения источников и интенсивности шума. Абсолютная калибровка служит средством валидации других методов обработки экспериментальных данных ИРНР.

Методы калибровки и измерения солнечного потока разработаны с учетом разнообразия режимов проведения радиоастрономических наблюдений ИРНР. Это позволило обработать архивные данные, усовершенствовать методы сбора данных и грамотно спроектировать новые режимы, используемые на радаре в настоящее время. Кроме того, калиброванные измерения фонового шума использованы при тестировании нового приемного тракта, который был введен в эксплуатацию в 2021 г.

Метод оценки диагностического потенциала использовался для определения требований к характеристикам перспективного НР-МСТ радара, проектируемого в рамках НГК.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработаны метод и программный комплекс для абсолютной калибровки приемопередающего тракта Иркутского радара некогерентного рассеяния, охватывающей весь частотный диапазон радара и применимой как к современным, так и архивным данным радиоастрономических и активных экспериментов. По результатам калибровки чувствительность радара по потоку составила 0.6 кЯн.

2. По абсолютным измерениям солнечного потока на ИРНР за период с 2011 по 2022 г. показано, что поток спокойного Солнца на частоте 161 МГц за один солнечный цикл составляет 5.5 с.е.п. Разработанный метод измерений позволяет исследовать как долгопериодные процессы, так и быстрые события в солнечной атмосфере.

3. Разработан метод оценки диагностического потенциала НР- и МСТ-радаров. Показано, что радар НР-МСТ позволит оценивать атмосферные параметры в ионосфере на высотах 100–1300 км, в стратосфере и тропосфере — на высотах до 25 км, и наблюдать мезосферные эха, что существенно превышает исследовательские возможности ИРНР.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов, представленных в данной работе, обусловлена применением разных подходов к калибровке и современных методов цифровой обработки сигналов, а также соответствием полученных измерений общепринятым физическим моделям. Результаты калибровки согласуются с предыдущими научными и техническими работами, проводимыми по данным ИРНР, и были протестированы другими исследователями.

Личный вклад автора

Основные результаты работы получены лично автором диссертации либо при его непосредственном участии. Методы калибровки, определения шумовой температуры антенны, изме-

рения солнечного потока и оценки диагностического потенциала были предложены, разработаны и реализованы автором данной работы. Автором разработан программный комплекс для обработки принятых сигналов ИРНР и реализации перечисленных методов. Автор принимал активное участие в сборе данных, модернизации оборудования и проведении наблюдений на ИРНР. Оценка диагностического потенциала радара НР-МСТ и статистический анализ измерений солнечного потока проводились при определяющем участии автора.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на: 14-й, 15-й, 16-й конференциях молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом» (Байкальская международная молодежная научная школа по фундаментальной физике) (Иркутск, 2015, 2017, 2019), 14-й и 15-й Всероссийских открытых конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2016, 2017), 2nd VarSITI General Symposium (Иркутск, 2017), 23-м Международном симпозиуме «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Иркутск, 2017), 26-й и 28-й Всероссийских открытых научных конференциях «Распространение радиоволн» (Казань, 2019; Йошкар-Ола, 2023).

Соответствие паспорту специальности

Задача диссертационной работы и полученные результаты соответствуют областям исследований специальности 1.3.4 «Радиофизика» в части пунктов 3–5.

Публикации

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 8 статьях в рецензируемых научных изданиях, из которых 6 включены в список ВАК или входят в международные реферативные базы данных Scopus и Web of Science.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 113 страниц, включая 2 таблицы и 55 рисунков. Список использованной литературы состоит из 180 наименований.

ГЛАВА 1. Абсолютная калибровка приемо-передающего тракта Иркутского радара некогерентного рассеяния

Понятия абсолютной калибровки и абсолютных измерений в разных областях науки и техники могут пониматься по-разному и даже в пределах одной области может иметь место различное трактование этого термина. Например, в радиоастрономии под абсолютными измерениями иногда подразумевают измерения, проводимые на инструментах с известными характеристиками антенны и приемника, полученными на этапе проектирования и строительства по спецификациям радиотехнических элементов и результатам моделирования. При этом регулярной калибровки этих характеристик не проводится. В данной работе под абсолютными измерениями понимается определение физической величины в её физических единицах, а комплекс мер, необходимых для проведения этих измерений, называется абсолютной калибровкой. Такой подход распространен как в радиоастрономии, так и радарных исследованиях [Hocking, 2011; Latteck et al., 2007; Tanaka et al., 1973]. Большинство методов абсолютной калибровки антенно-фидерных устройств (АФУ) и приемо-передающих устройств основано на сравнении наблюдаемого сигнала с некоторым эталонным сигналом, в качестве которого могут выступать радиоисточники с известным значением потока излучения, генераторы шума и специальные излучающие антенны, стоящие на удалении от объекта калибровки.

Абсолютная калибровка и измерения открывают ряд возможностей для научного инструмента. Они необходимы для составления всеохватывающей модели излучаемых и принимаемых сигналов. Результаты таких измерений можно сравнивать с измерениями, проводимыми на других инструментах, и тем самым осуществлять проверку корректности измеренных параметров. Абсолютные измерения принятой мощности требуются для многих методов определения физических параметров. Поток излучения радиоисточников и, в частности, поток излучения Солнца может быть получен только вычислением по измеренной принятой мощности [Baars, 2014]. Калибровка в этом случае должна охватывать как определение характеристик приемника, так и антенны. Измерения принятой мощности требуются в одном из методов определения электронной концентрации ионосферы, используемых в радарх НР [Bowles et al., 1962]. МСТ-радары, принцип работы которых основан на рассеянии на турбулентных флуктуациях в нейтральной атмосфере, также используют принятую мощность при определении структурных функций турбулентных потоков

[Gage et al., 1980; Gage, Gossard, 2003] и скорости диссипации турбулентной энергии [Bertin et al., 1997] в тропосфере и стратосфере. В мезосфере измеряют ЭПР полярных эхо [Swarnalingam et al., 2009b, 2009a], возникающих в летнее и зимнее время, что позволяет сравнивать интенсивности турбулентностей в разных географических регионах и исследовать природу этих явлений [Lubken et al., 2007b; Strelnikova, Rapp, 2010]. Интерес представляет измерение ЭПР метеоров, сгорающих в мезосфере и нижней термосфере [Janches et al., 2008; Brown et al., 2017], и при некоторых допущениях возможно измерение массы метеоров [Stober et al., 2011a]. Всестороннее наблюдение космических объектов — искусственных спутников и космического мусора — включает в себя абсолютные измерения ЭПР [Sato et al., 1991; Lambour et al., 2004; Wang et al., 2022], которая пропорциональна размеру объекта, но также в значительной мере зависит от формы объекта и поляризационных характеристик материала, из которого он изготовлен. В связи с значительным ростом числа космических объектов в последнее время, измерение ЭПР становится все более актуальной задачей.

Решение задачи абсолютной калибровки, несмотря на кажущуюся простоту, может быть довольно длительным, нетривиальным и подверженным ошибкам процессом, требующим учета особенностей конкретного инструмента. Показательной является история калибровки микроволновых радиотелескопов, описанная в [Tanaka et al., 1973]. С начала 50-х годов стали появляться новые инструменты для регулярных измерений потока солнечного излучения, научные группы пытались проводить их калибровку разными методами и сравнивали результаты между собой. Было обнаружено значительное расхождение результатов измерений, получаемых на разных станциях, и была создана специальная рабочая группа для выяснения причин расхождения и поиска оптимального метода калибровки, которым в итоге оказалась калибровка с помощью пирамидального рупора. Обнаружение и решение проблемы заняло около 20 лет. В настоящее время калибровка упростилась благодаря совершенствованию оборудования приемников и методов хранения, а также появлению цифровой обработки данных. Однако остается фундаментальной проблема проверки корректности калиброванных измерений из-за плохого покрытия радиодиапазона прецизионными научными инструментами, особенно в метровом диапазоне длин волн. Старые инструменты устаревают и выходят из строя, а новых инструментов появляется не так много. Радарные абсолютные измерения связаны с дополнительными сложностями по сравнению с радиоастрономическими. Радиолокационные уравнения, связывающие физические параметры объекта наблюдения с принятой мощностью, кроме характеристик приемника и антенны включают мощность излучения и потери в передающем тракте. Эти характеристики бывает сложно точно определить аналитически, и поэтому для них также нужна калибровка.

Иркутский радар некогерентного радар рассеяния функционирует как научный инструмент с 90-х годов, но до проведения этой работы были лишь единичные попытки его абсолютной калибровки и потребовался более содержательный подход, учитывающий особенности антенны и применимый к разным режимам работы.

1.1 Общие сведения о калибровке приемно-передающих устройств

Радиотехнические системы научного и практического назначения, осуществляющие дистанционное зондирование околоземного космического пространства и объектов солнечной системы, а также прием радиоастрономических сигналов, обладают схожей конфигурацией, включающей АФУ, приемные устройства и, если осуществляется излучение радиоволн, передающие устройства. Радиометры, радиотелескопы, радары, системы связи описываются при помощи единых характеристик и могут быть откалиброваны похожими методами.

1.1.1 Шумовые характеристики приемных устройств

Приемное устройство, также называемое здесь приемным трактом или просто приемником, предназначено для извлечения полезной информации из радиоволн, падающих на антенну. Помимо полезного сигнала на вход приемника от антенны попадают шумы, возникающие из-за естественных и искусственных причин [Есепкина и др., 1973] и ограничивающие чувствительность приемника. Радиоизлучение далеких космических объектов, включающих как мощные дискретные радиоисточники, так и распределенные источники, в основном сконцентрированные вдоль галактического диска, неизбежно попадает в основные и боковые лепестки ДН антенны. Это радиоизлучение, называемое космическим шумом или шумом неба, имеет значительную частотную зависимость и в целом определяет минимальный уровень шумов приемников, работающих на частотах ниже 1 ГГц. В микроволновом диапазоне значимое тепловое излучение генерируется самой атмосферой Земли. Кроме того, она поглощает часть полезного сигнала, причем на некоторых длинах волн, соответствующих поглощению кислородом и водяным паром, прием сигналов становится невозможен. Поверхность Земли также излучает, причем интенсивность излучения зависит от высоты неровностей и характеристик приповерхностного слоя. Дождь или образование снежного покрова приводит к изменению характеристик антенны и, соответственно, уровня шумов. В отличие от шумов неба и атмосферных шумов, вклад которых в основном зависит от ориентации основного лепестка ДН, вклад излучения Земли определяется боковыми лепестками ДН и конструктивными особенностями антенны.

Искусственные помехи возникают вследствие функционирования известных и неизвестных радиотехнических систем в полосе приемника, а также искровых разрядов, генерирующих широкополосное излучение и возникающих из-за некоторых процессов, механизмов и устройств (сварка, генераторы), например, в ходе строительных работ. В настоящее время такие помехи практически неизбежно наблюдаются любыми достаточно чувствительными широкополосными приемниками [Benz et al., 2005; Iwai et al., 2012], особенно в метровом диапазоне. В отличие от приемных систем, радары и системы связи обязаны получить специальное разрешение на работу в выбранном диапазоне частот, которое в Российской Федерации выдает Главный Радиочастотный Центр (ГРЧЦ). Тем не менее, даже несмотря на контроль фона радиоизлучения со стороны государства, временные помехи эпизодически наблюдаются и на ИРНР.

Радиотехнические элементы приемника также вносят шумы, называемые собственными шумами. Для удобства описания собственных шумов, источники которых распределены по всей схеме приемника, считают, что шумы приходят на вход приемника, вместе со внешними шумами. Тогда внутренние и внешние шумы можно охарактеризовать посредством простой модели резистивной нагрузки, согласованно подключенной ко входу приемника (рис. 1.1, *a*). Мощность шума в этом случае определяется тепловыми флуктуациями электронов в нагрузке [Nyquist, 1928]:

$$P = kTB, \quad (1.1)$$

где k — постоянная Больцмана, B — полоса приемника. Для случая применимости приближения Рэлея-Джинса, т. е. практически для всего радиодиапазона, температура T в формуле (1.1) является физической температурой эквивалентной резистивной нагрузки. В общем случае T — эффективная температура излучения нагрузки, которая выводится из формулы Планка для абсолютно черного тела [Thompson et al., 2017]. Таким образом, мощность шума внешних источников можно охарактеризовать с помощью так называемой шумовой температуры антенны T_A , а мощность шума внутренних источников с помощью шумовой температуры приемника T_n . Суммарную шумовую температуру называют шумовой температурой системы T_c :

$$P_{ш} = k(T_A + T_n)B = kT_c B. \quad (1.2)$$

Шумовая температура является удобной характеристикой шума приемника, поскольку не зависит от ширины полосы и дает интуитивное понимание о соответствующей эквивалентной нагрузке. Поскольку мощность шума возрастает с расширением полосы приемника, в реальных приложениях стараются подобрать минимальную полосу, необходимую для прохождения

полезного сигнала без искажений. Для радиоастрономических инструментов это не имеет большого значения, так как полосы сигнала и шума совпадают, но важно для радаров.

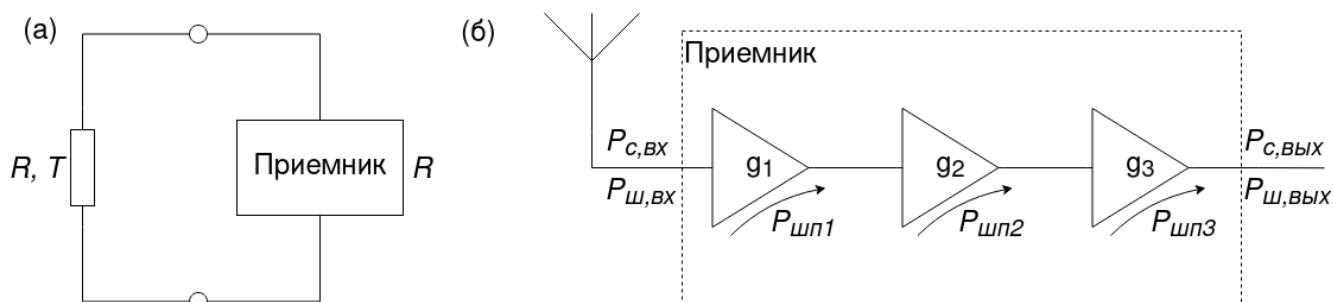


Рисунок 1.1. (а) Эквивалентная резистивная нагрузка с температурой T , согласованно подключенная ко входу приемника. (б) Схема приемника, состоящего из нескольких элементов, усиливающих сигнал и вносящих дополнительные шумы.

Современные цифровые приемники преобразуют аналоговое напряжение в цифровое представление, после чего работа с принятыми сигналами производится программными средствами, предоставляя широкие возможности по обработке. Тем не менее даже цифровые приемники включают в себя аналоговую часть: входной малошумящий усилитель, полосовой фильтр, дополнительные цепи усиления и фильтрации, кабели и радиотехнические цепи, подводящие сигнал ко входу аналого-цифрового преобразователя. Каждый элемент цепи ослабляет или усиливает сигнал и характеризуется коэффициентом усиления по мощности g и собственными шумами, ухудшающими отношение сигнал/шум (ОСШ). Характеристикой элемента радиотехнической цепи, описывающей деградацию ОСШ, является коэффициент шума F , определяемый как отношение входного и выходного ОСШ:

$$F = \frac{\text{ОСШ}_{\text{вх}}}{\text{ОСШ}_{\text{вых}}}. \quad (1.3)$$

Пусть приемник состоит из радиотехнического элемента, вносящего дополнительный шум $P_{\text{шп}}$. Тогда, если $P_{\text{с,вх}}$ — мощность входного сигнала, а $P_{\text{ш,вх}}$ — мощность входного шума:

$$F = \frac{\text{ОСШ}_{\text{вх}}}{\text{ОСШ}_{\text{вых}}} = \frac{P_{\text{с,вх}}(P_{\text{ш,вх}} + P_{\text{шп}})}{P_{\text{ш,вх}}P_{\text{с,вх}}} = 1 + \frac{P_{\text{шп}}}{P_{\text{ш,вх}}}. \quad (1.4)$$

В формуле (1.4) коэффициент шума зависит от уровня входных шумов, поэтому считают, что мощность входного шума $P_{\text{ш,вх}} = kT_0B$ соответствует резистивной нагрузке при стандартной температуре $T_0 = 290 \text{ K}$ и формулы (1.3), (1.4) имеют смысл только при этом условии. Тогда коэффициент шума выражается через шумовую температуру приемника $T_{\text{п}}$:

$$F = 1 + \frac{T_{\text{п}}}{T_0}. \quad (1.5)$$

Коэффициент шума F — это безразмерная величина, однако часто при описании радиотехнических элементов используется представление в децибелах (дБ) и в этом случае коэффициент шума обозначается как NF . Диапазон значений коэффициента шума входных малошумящих усилителей, работающих в метровом и микроволновом диапазонах при комнатной температуре, составляет $NF = 0.3\text{--}3$ дБ, что эквивалентно шумовой температуре 20–290 К. Более низкие значения достижимы при использовании жидкостного охлаждения усилителей до низких температур [Penzias, Wilson, 1965].

Если в цепи присутствует несколько элементов с коэффициентами шума $F_1, F_2, \dots, F_n$ и коэффициентами усиления $g_1, g_2, \dots, g_n$ (рис. 1.1, б), то общий коэффициент шума приемного тракта F определяется по формуле Фрииса [Friis, 1944]:

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{g_1} + \frac{F_3 - 1}{g_1 g_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{g_1 g_2 \dots g_n}. \quad (1.6)$$

Из формулы (1.6) следует, что шумы, вносимые каждым последующим каскадом, ослабляются в зависимости от коэффициента усиления предыдущего каскада. Наиболее определяющее влияние в шумы вносят первые радиотехнические элементы тракта, поэтому при проектировании чувствительных радиоприемников в качестве первых элементов используют малошумящие усилители, ключи и фильтры.

1.1.2 Чувствительность

Поскольку в задачах солнечно-земной физики исследуются слабые сигналы, определяющей характеристикой системы антенна-приемник как радиометра является чувствительность. Она задает минимальный уровень измеряемого сигнала и ограничивается шумами. В качестве характеристики чувствительности в радиоастрономии используется плотность потока эквивалентная шуму приемника (SEFD — System Equivalent Flux Density), зависящая от шумовой температуры и эффективной площади антенны $A_{\text{эфф}}$:

$$SEFD = \frac{2kT_c}{A_{\text{эфф}}}. \quad (1.7)$$

Множитель 2 в числителе в формуле соответствует приему сигнала одной поляризации в предположении, что полезный сигнал обладает случайной поляризацией.

Более сложные определения чувствительности учитывают накопление принятого сигнала. Космический шум и собственные шумы приемника — это случайные процессы, описываемые моделью аддитивного белого гауссового шума [Van Trees, 2013]. Последовательные измерения такого шума являются независимыми одинаково распределенными случайными величинами из нормального распределения с нулевым средним,

а спектральная плотность мощности шума одинакова во всем диапазоне частот. Тогда, согласно центральной предельной теореме, усреднение мощности шума будет приводить к уменьшению дисперсии пропорционально корню из числа отсчетов (элементов выборки) [Papoulis, Pillai, 2002]. Минимальная мощность детектируемого полезного сигнала, выраженная через единицы антенной температуры, имеет вид [Есепкина и др., 1973]

$$\Delta T = M \frac{T_c}{\sqrt{2B\tau}} = M \frac{T_c}{\sqrt{N}}, \quad (1.8)$$

где τ — длительность накопления, B — полоса частот, M — фактор, зависящий от схемы детектора сигнала ($M=1$ для идеального приемника), N — число отсчетов при цифровой дискретизации. Чувствительность можно определить как значение, кратное минимальному сигналу ΔT . Например, в [Christiansen, Hogbom, 1969] предлагается использовать $\Delta T_{\min} = 5\Delta T$, так как вероятность такой флуктуации составляет всего $6 \cdot 10^{-7}$. Соотношение ΔT и $\Delta T_{\min}$ не стандартизировано, чаще его принимают равным 1, как же как и коэффициент M для современных цифровых приемников. Тогда чувствительность по плотности потока от точечного радиоисточника будет иметь вид

$$\Delta S_{\min} = \frac{2kT_c}{\sqrt{N}A_{\text{эфф}}} = \frac{SEFD}{\sqrt{N}}. \quad (1.9)$$

Плотность потока, и соответствующая чувствительность, измеряется в [Вт / м² Гц] или в Янских, 1 Ян = 10⁻²⁶ Вт / м² Гц. Для сравнения разных инструментов при расчете фиксируют длительность накопления и в некоторых случаях полосу. Тогда в качестве единицы измерения используется [Ян·ч^{1/2}]. Само собой, в формулах (1.8) и (1.9) предполагается, что минимальный сигнал будет присутствовать в течение всего времени накопления. Более сложные формулы чувствительности учитывают потери, особенности метода обработки и эффективное время обзора объекта наблюдения [Bregman, 2004].

1.1.3 Калибровка приемо-передающих устройств

Основной задачей калибровки приемных устройств, необходимой для точного измерения принятой мощности, является определение шумов T_c и усиления g приемника. Как правило, считается, что приемник линейный, т. е. мощность сигнала на выходе приемника $P_{\text{вых}}$ связана с мощностью сигнала на входе приемника P_c следующей линейной зависимостью (рис. 1.2):

$$P_{\text{вых}} = gP_c + P_{\text{ш}} = g(P_c + kT_cB) = g(P_c + k(T_A + T_{\text{п}})B). \quad (1.10)$$

Мощность шумов $P_{\text{ш}}$ зависит от g , поскольку шум, внешний и внутренний, также как и сигнал усиливается при прохождении приемного тракта. Производители радиотехнических элементов стремятся к тому, чтобы их продукция обладала линейностью в диапазоне рабочих

частот, в связи с чем формула (1.10) применима на практике. Тем не менее, g и T_c обладают значительной частотной зависимостью, поэтому и калибровку нужно проводить во всем рабочем диапазоне.

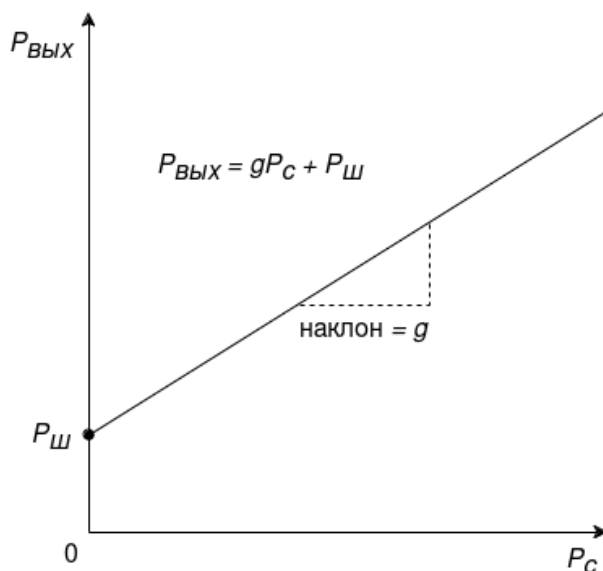


Рисунок 1.2. Линейная модель мощности на выходе приемника

Шумы антенны T_A зависят от месторасположения приемного устройства, направления луча ДН, времени суток и других факторов, и для получения характеристик приемника как отдельного прибора выделяют ряд методов для определения только собственных шумов (коэффициента шума) [Бельчиков, 2008]. В простейшем случае используется генератор сигналов с известной выходной мощностью и измеритель мощности (ваттметр), тогда для измерения коэффициента шума не требуется знать об усилении g , но этот метод обладает большой ошибкой. Метод прямого измерения шума или метод холодного источника основан на одиночном измерении шума при подключении ко входу приемника согласованной нагрузки с температурой 290 К. В этом случае требуется, чтобы значение усиления g было известно, например, по результатам измерений векторным анализатором. Кроме того, измерительное оборудование должно обладать высокой чувствительностью, либо приемник должен обладать высоким значением усиления, чтобы выходной сигнал был сильнее шумов измерителя.

Наиболее распространенным и ошибкоустойчивым методом является Y-метод или метод холодного/горячего источника [Friis, 1944; Adler et al., 1963], позволяющий получить как усиление, так и коэффициент шума измеряемого устройства. В методе используется источник шума (шумовой диод) и проводятся два измерения с известным значением мощности шума для определения наклона и смещения линейной модели приемника (формула (1.10), рис. 1.2). Дополнительные корректировки, вроде учета собственных шумов и коэффициента стоячей

волны (КСВ) самого измерительного прибора и кабелей, позволяют повысить точность измерения и определить доверительный интервал измерения.

Стандартным методом калибровки радиотелескопов является калибровка по мощным радиоисточникам с хорошо исследованным распределением плотности потока излучения по частоте. Такая калибровка в литературе называется калибровкой плотности потока [Baars, 2014; Heald et al., 2015]. В этом случае сигнал проходит через антенну, фидерный тракт и приемник, и, таким образом, проводится калибровка всей приемной системы (приемного тракта). Если источник радиоизлучения мал по сравнению с размерами луча ДН, мощность сигнала на входе приемника связана с потоком излучения S соотношением

$$P_c = SA_{\text{эфф}}B. \quad (1.11)$$

Для некоторых дискретных радиоисточников, вроде Лебедя-А, плотность потока S и её зависимость от частоты достаточно хорошо изучена по многочисленным измерениям на прецизионных радиотелескопах. Набор таких эталонных источников образует абсолютную шкалу потоков [Иванов, Станкевич, 1986; Scaife, Heald, 2012]. Подставив (1.10) в (1.11), получаем, что

$$P_{\text{вых}} = gSA_{\text{эфф}}B + gkT_cB = gSA_{\text{эфф}}B + P_{\text{ш}}. \quad (1.12)$$

Подобно методу холодного/горячего источника делается два измерения выходного сигнала — при наведении луча ДН на источник и в пространство вне источника. Если источник достаточно интенсивный, $P_{\text{ш}}$ можно проигнорировать и тогда достаточно одного измерения, что позволит избежать ошибки, связанной с разницей в T_A при наведении луча в разные участки неба. В результате калибровки по радиоисточнику определить g и $A_{\text{эфф}}$ по отдельности нельзя — необходимо отдельно измерять один из параметров [Findlay, 1966; Lu et al., 2015]. Например, для измерений потока излучения Солнца на длине волны 10.7 см, известного как индекс F10.7 [Tapping, 2013], помимо калибровки приемного тракта по источникам шума, расположенным в разных частях приемного тракта, также проводилось определение $A_{\text{эфф}}$ с помощью специальной калибровочной антенны — пирамидального рупора. Зная геометрические характеристики такого рупора, можно аналитически определить его эффективную площадь и далее посредством совместных сравнительных наблюдений определить площадь для основной антенны.

Ещё один вид калибровки, использующий космические источники излучения, основан на картах шума неба. Карты представляют собой распределение яркостной температуры по небесной сфере и составляются в ходе специальных обзоров всего неба на калиброванных радиотелескопах, проводимых на фиксированной частоте. Яркостная температура характеризует интенсивность излучения, т. е. количество энергии в единичном интервале частот, проходящее за единицу времени по нормали к единичной площадке в пределах единичного телесного угла

(1 стерадиана). Яркостная температура соответствует температуре абсолютно черного тела, которое создавало бы такое излучение, и определяется из формулы Планка. Известные примеры обзоров всего неба включают [Cane, 1978] (30 МГц), [Haslam et al., 1982] (408 МГц, см. рис. 1.3), [Bennet et al., 2003] (23, 33, 41, 61, 94 ГГц, радиотелескоп на борту космического аппарата WMAP), [Intema et al., 2017] (150 МГц). Для получения карты шума неба на произвольной частоте используется интерполяция. На низких частотах ($f < 1$ ГГц), где превалирует синхротронное излучение, строится степенная зависимость вида:

$$T(f) = T(f_0) \left(\frac{f}{f_0} \right)^\beta, \quad (1.13)$$

где β — спектральный индекс, f_0 — частота, на который были проведены измерения опорной карты шума неба. Более сложные способы интерполяции включают в себя полиномиальные законы, сплайн-интерполяцию и метод главных компонент. Последний метод использовался в [Oliveira-Costa et al., 2008] для составления глобальной модели шума неба (Global Sky Model — GSM), где собраны 11 карт шума неба в диапазоне 10 МГц – 94 ГГц. [Zheng et al., 2017] усовершенствовали модель, включив 18 дополнительных карт, расширив частотный диапазон до 5 ТГц и улучшив работу алгоритма построения. Модели GSM в основном аппроксимируют «диффузную» компоненту радиоизлучения, поэтому сигналы отдельных мощных радиоисточников сглаживаются.

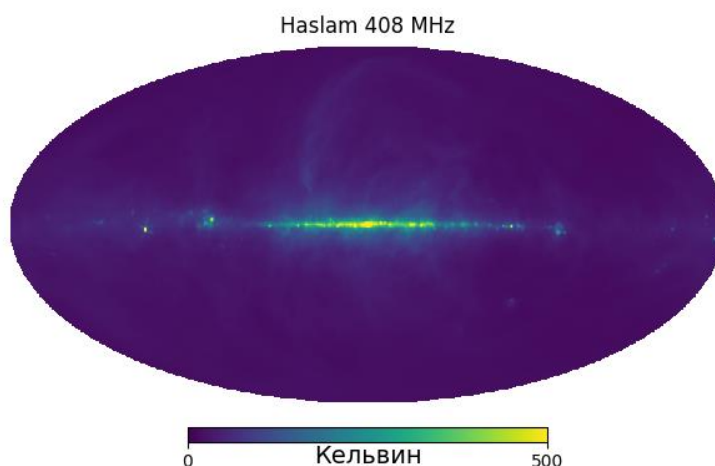


Рисунок 1.3. Проекция Мольвейде карты шума неба, измеренной в ходе обзора неба [Haslam et al., 1982] на частоте 408 МГц. Обработка первичных данных [Remazeilles et al., 2015]

Метод калибровки по картам шума неба позволяет ежедневно определять калибровочные коэффициенты по измерениям шумовой температуры антенны T_A . В течение дня измеряется шумовая температура антенны с фиксированного направления приема и сравнивается с вариациями шума, полученными по соответствующим картам неба с учетом ДН антенны. В

результате, вместо двух измерений метода холодного/горячего источника, получается набор измерений за день для построения линейной регрессии (рис. 1.2, формула 1.10). Так же, как и в случае с радиоисточниками, определяются собственные шумы и усиление системы антенна-приемник. [Stober et al., 2011b] использовали этот метод для калибровки среднеширотного метеорного радара в Коллье и сравнивали его с калибровкой по Y-методу, получив близкие результаты. [Rogers et al., 2004] калибровали фазированную антенную решетку 5 на 5 диполей, работающую на частоте 327 МГц, с помощью карты шума неба Haslam. Были получены модельные дневные вариации шума для диполей и для всей решетки, учитывающие взаимное влияние диполей. [Renkowitz et al., 2012] использовали частичные карты шума неба, измеренные на MU радаре [Maeda et al., 1999], для калибровки МСТ-радары MAARSY. В [Oberoi et al., 2017] схожий метод используется для калибровки и измерения солнечного потока на широкополосном низкочастотном радиотелескопе MWA [Sharma, Oberoi, 2020], расположенном в Австралии. Анализ, проведенный в их работе, показал, что ошибка, связанная с несовершенством модели шума неба, составляет примерно 5 %. Ещё один метод калибровки, популярный среди солнечных инструментов, основан на измерениях потока спокойного Солнца и минимального шума неба [Benz et al., 2009; Yan et al., 2023; Chang et al., 2024].

Отдельно стоит упомянуть периодичность калибровки. В связи с устареванием, обслуживанием и модернизацией оборудования характеристики приемников и антенн меняются со временем. Также на результаты измерений влияют атмосферные условия, например, температура окружающей среды может вносить значимую ошибку [Tan et al., 2015]. В связи с этими факторами, калибровку требуется проводить регулярно. Периодичность, с которой калибруются приемные устройства для измерения плотности солнечного потока варьируется от нескольких раз в год до нескольких раз в день [Hamini et al., 2021; Shimojo, Iwai, 2023; Giersch, Kennewell, 2022; Tapping, 2013].

Калибровку измерений некоторой физической величины часто осуществляют путем сравнения с результатами измерений, полученных иными методами или на других инструментах. Например, профиль электронной концентрации N_e , измеряемый на радарх некогерентного рассеяния можно определить несколькими способами. В [Bowles et al., 1962] был представлен метод абсолютных измерений для чего проводится калибровка радара, учитывающая возможные потери и погрешности. Метод фарадеевских замираний позволяет определить N_e по относительному профилю принятой мощности благодаря поляризационным измерениям [Evans, 1969; Shpynev, 2004]. В спектре сигнала некогерентного рассеяния помимо ионной линии содержится плазменная линия, смещенная относительно частоты зондирования на величину плазменной частоты, поэтому измеряя смещение также можно найти N_e [Evans,

1969; Akbari et al., 2017; Yue et al., 2023]. Измерения N_e с помощью ионозондов позволяют проверить измерения НР-радаров до высоты максимума F-слоя [Kirkwood et al., 1986; Gillies et al., 2016; Алсаткин и др., 2020]. Непосредственные измерения N_e с помощью ракет [Kirkwood et al., 1986] и спутников также служат средством оценки точности измерений. Другим примером калибровки, основанной на сторонних данных, являются измерения плотности потока на радиогелиографе ORFEES [Hamini et al., 2021], где роль опорного источника играет радиоизлучение спокойного Солнца, полученное комбинированием модели [Benz, 2009] и измерений солнечного потока сети RSTN [Giersch, Kennewell, 2022].

Оценить чувствительность радиометров можно по формуле (1.7) после калибровки приемного тракта и определения значения шумовой температуры системы T_c . Существуют эмпирические методы для измерения чувствительности напрямую, включая оценку стандартного отклонения на выходе приемника в отсутствие сигнала [Есепкина и др., 1973] и оценку разницы шумовых температур антенны [Aarons, 1954], однако эти методы мало отличаются от описанных выше методов калибровки.

1.1.4 Калибровка диаграммы направленности антенн

Кратко рассмотрим методы калибровки ДН, т. е. точности позиционирования максимума ДН, формы ДН и фазовых задержек между антеннами в фазированных решетках [Chau et al., 2014] и радиотелескопах [Haarlem van et al., 2013]. Методы основаны на измерении сигнала калибровочного источника, удаленного от антенны устройства. ДН излучающих антенн также можно измерить путем передачи сигнала в сторону некоторого калибровочного объекта. Объект либо отражает сигнал обратно в сторону антенны, где производится прием, либо сам принимает сигнал. При этом объект должен находиться за пределами первой зоны Френеля, в дальней зоне антенны, расстояние до которой принимают равной [Balanis, 2016]

$$R_\phi = 2 D^2 / \lambda, \quad (1.14)$$

где D — длина антенны по наибольшему измерению, $D > \lambda$. В дальней зоне считается, что угловое распределение поля не зависит от расстояния до антенны. Если же объект находится в пределах первой зоны Френеля, в ближней зоне, то распределение зависит от расстояния из-за положительной и отрицательной интерференции поля, что не позволяет сделать точных выводов о форме ДН.

Достаточно удаленными калибровочными объектами служат космические аппараты (КА), эфемериды которых доступны в открытых каталогах и обладают высокой точностью. КА сферической формы, вроде «EGP» или «Starshine-2», позволяют также проводить полную калибровку всего приемо-передающего тракта и радиотрассы [Лебедев, 2015; Лебедев и др.,

2004], поскольку для них можно аналитически вычислить ЭПР (рассеяние Ми [Ishimaru, 1991]). В случае, если $R_{\phi} < 3\text{--}5$ км, калибровочным объектом может служить квадрокоптер [Kurkin et al., 2022] или вертолет [Renkwitz, 2014], проводящие облет антенны по заданной траектории, охватывающей большую часть ДН. [Renkwitz et al., 2015] использовали ракеты с научным оборудованием для изучения атмосферы. Дополнительный интерес этот эксперимент обретает в связи с тем, что ракеты долетали до высоты ~ 120 км, промежуточной между высотами, где могут летать вертолеты и космические аппараты.

Мощные радиоисточники [Findlay, 1966; Лебедев, 2015; Thompson et al., 2017], включая Солнце [Aarons, 1954], используются для калибровки формы и положения максимума ДН приемных антенн, благодаря высокой точности их координат. Недостатком этого подхода по сравнению с облетом, является тот факт, что одиночный радиоисточник позволяет оценить ДН только в одном сечении. Преимуществом является возможность регулярной калибровки и простота.

1.2 Иркутский радар некогерентного рассеяния

1.2.1 Описание инструмента

Иркутский радар некогерентного рассеяния (ИРНР) создан на базе военной радиолокационной станции «Днепр» системы раннего обнаружения и наблюдения за космическим пространством [Жеребцов и др., 2002; Medvedev, Potekhin, 2019]. Он был модернизирован для использования в научных целях и передан Институту Солнечно-Земной Физики [Потехин и др., 2008; Potekhin et al., 2009; Кушнарев и др., 2017], в основном для исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния. Радар работает в частотном диапазоне 154–162 МГц и представляет собой вытянутую рупорную антенну, 246 м в длину и 12.2 м в ширину (см. рис. 1.4, 1.5) [Лебедев, 2015]. Рупор разделен перегородкой на два полурупора, каждый из которых формирует независимый приемо-передающий канал. Щелевой волновод в основании рупора представляет собой линейную решетку излучателей, образующих узкий лепесток ДН в продольном направлении с шириной 0.5° . В антенной системе координат ИРНР это направление называется азимутальным (угол ε) несмотря на то, что рупор направлен практически вертикально (отклонение от вертикали составляет 10°). Эта устоявшаяся терминология связана с тем, что радары «Днепр» в основном были направлены ближе к горизонту. ДН в ортогональном, угломестном направлении (угол γ) формируется системой из двух полурупоров и имеет ширину 10° . При этом ширина луча полурупоров по отдельности составляет 20° . В [Лебедев, 2015] была описана и откалибрована модель ДН ИРНР, $F(\varepsilon, \gamma) = F(\varepsilon)F(\gamma)$, где $F(\varepsilon)$ — ДН в азимутальном направлении, $F(\gamma)$ — ДН в угломестном направлении.

Коэффициент усиления антенны при работе двумя полурупорами составляет ~ 38 дБ. В раскрыве антенны расположен поляризационный фильтр, состоящий из металлических полос и пропускающий только волны с линейной (горизонтальной) поляризацией.

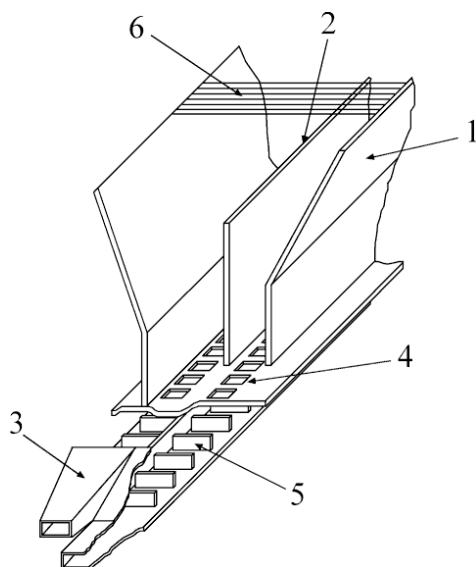


Рисунок 1.4. Структура антенны ИРНР. Описание: 1 — формирующий рупор, 2 — перегородка, 3 — возбуждающий рупор, 4 — щелевая панель, 5 — линейка замедляющей ребристой структуры, 6 — поляризационный фильтр



Рисунок 1.5. Вид на антенну Иркутского радара некогерентного рассеяния

Радар использует частотный принцип сканирования — направление излучения и приема в азимутальной плоскости контролируется электронным образом, путем изменения рабочей

частоты (см. рис. 1.6). Открытая ребристая структура, находящаяся под щелевой панелью в антенне, замедляет фазовую скорость проходящей волны в разной степени для разных частот, благодаря чему луч ДН отклоняется. Угол отклонения луча ε_0 описывается уравнением сканирования $\varepsilon_0 = \varepsilon_0(f_0)$, зависящим от габаритных параметров структурных частей антенны [Лебедев, 2015]. На частоте 154 МГц луч направлен по нормали к раскрытию рупора, на частоте 162 МГц — отклонен на 30° на юг. Эту особенность ИРНР необходимо учитывать при работе с широкополосными сигналами. При приеме, сигнал на выходе антенны представляет собой сумму сигналов со всего множества диаграмм направленности, формируемых на разных частотах. Фильтр приемника ограничивает полосу входного сигнала, например, до 1 МГц, таким образом осуществляя выборку по направлению приема. Разделить сигнал по направлениям можно с помощью преобразования Фурье. В активных режимах работы, при излучении, используются узкополосные импульсные сигналы для того, чтобы сконцентрировать мощность излучения в одном направлении.

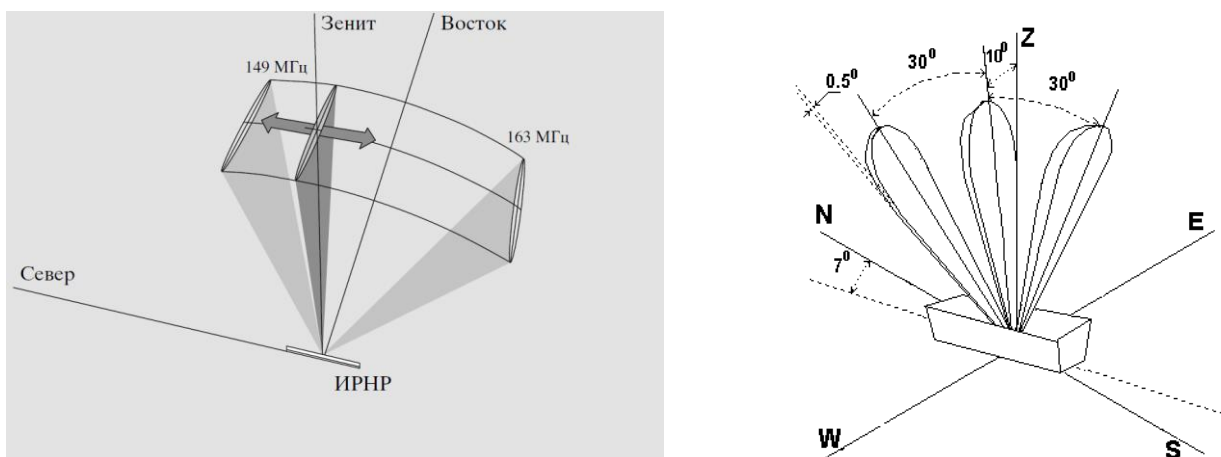


Рисунок 1.6. Пояснение к частотному принципу сканирования (слева) и ориентация антенны относительно сторон света (справа)

Импульсная мощность излучения радара достигает 3.2 МВт. При излучении функционирует три передатчика: два задействованы в одновременной работе и подключены к полурупорам, а последний является «горячим» резервом. Длительность зондирующего импульса составляет 700–900 мкс. Максимальная частота следования импульсов (опорная тактовая частота) радара составляет 24.4 Гц, которая являлась базовой частотой синхронизации системы радаров «Днепр». В 2015–2017 гг. вблизи ИРНР заработала станция «Воронеж», функционирующая в том же рабочем диапазоне и с которой была налажена синхронная работа. В связи этим частота следования импульсов стала переменной и в среднем составляет ~ 10 Гц.

Передающее оборудование ИРНР не менялось с момента передачи радара в ведомство института, проводилось только обслуживание и замена некоторых частей в связи с деградацией

и полумками. С другой стороны, приемное и контрольное оборудование модифицировалось неоднократно для повышения качественных характеристик приемного тракта, упрощения управления наблюдениями и расширения диагностических возможностей радара с появлением новых режимов работы.

1.2.2 Режимы работы

Режимы работы ИРНР включают активные ионосферные и спутниковые измерения, а также пассивные радиоастрономические наблюдения. В активных режимах радар излучает импульс, и далее, после фиксированной задержки, происходит прием сигнала в окне фиксированной длительности, аналоговое усиление, фильтрация, передача сигнала по кабелю от выхода первичного приемника до аппаратного зала радара и оцифровка [Кушнарев, 2010; Медведев, 2014]. До 2021 г. приемник был супергетеродинный и включал аналоговую цепь, переносящую принятый полосовой сигнал на промежуточные частоты перед передачей по кабелю и оцифровкой. С 2021 г. приемник работает по принципу прямого преобразования с оцифровкой сигнала непосредственно на несущей частоте. Принятый сигнал формирует развертку по дальности (реализацию). Зная направление излучения/приема, можно вычислить высоту, с которой пришел сигнал, составив таким образом высотный профиль мощности принятого сигнала. В начале развертки присутствуют широкополосные шумы из-за работы защитных разрядников и узкополосные местные помехи, связанные с сигналами, отраженными от объектов рельефа местности. Это ограничивает минимальную высоту, начиная с которой возможна оценка параметров ионосферы и космических объектов, до ~160 км. На ИРНР были разработаны методы борьбы с местными помехами, однако полностью убрать их не удалось [Tashlykov et al., 2019]. В ходе пассивных наблюдений радар не излучает, а работает в качестве радиотелескопа, принимая сигналы удаленных радиоисточников, приходящих на вход антенны.

Ионосферные наблюдения основаны на методе некогерентного рассеяния (НР). Излученная волна рассеивается на электронах (Томсоновское рассеяние) в ионосфере, движение которых модулируются волнами в плазме, в результате чего в спектре сигнала обратного рассеяния появляются ионная и электронная компоненты [Sheffield, 1975]. Форма этих компонент зависит от соотношения длины волны и радиуса Дебая, характеризующего локальность плазмы. В зависимости от ионосферных условий радиус Дебая варьируется в пределах 0.1–10 см, в то время как большинство радаров НР работают в диапазоне 50–500 МГц. В такой конфигурации электронная компонента вырождается в одиночную линию на плазменной частоте, а ионная компонента, называемая ионно-звуковой модой, обладает двугорбой структурой, форма которой зависит от ионосферных параметров [Evans, 1969].

Стандартный метод обработки спектров НР — многопараметрическая подгонка — позволяет определить температуры электронов T_e и ионов T_i , скорость дрейфа плазмы V_d и ионный состав m_i . При этом важно получить высокое спектральное разрешение. С другой стороны, электронную концентрацию N_e находят по абсолютным измерениям профиля мощности, методу фарадеевских вращений или по смещению электронной компоненты, где важно высокое разрешение по высоте. На ИРНР используется комбинация из двух импульсов, позволяющих достичь как высокого спектрального, так и высотного разрешений, — длинный прямоугольный импульс 700 мкс для анализа спектров и короткий фазоманипулированный импульс 200 мкс (с дискретом до 15 мкс) для получения N_e по методу фарадеевских замираний, который работает следующим образом. Из-за поляризационного фильтра в раскрыве антенны, ИРНР излучает и принимает только волны с линейной поляризацией. Поскольку ионосферная плазма находится в магнитном поле возникает эффект Фарадея, плоскость поляризации излученной волны начинает вращаться со скоростью, зависящей от N_e . В итоге поляризация обратной волны может быть перпендикулярна поляризационному фильтру, что вызывает замирания в принятом сигнале, а по полному профилю таких замираний можно найти N_e [Shpynev, 2004]. На рис. 1.7 показаны вариации высотного профиля мощности принятого сигнала за день наблюдения, где видны характерные фарадеевские «провалы» в мощности.

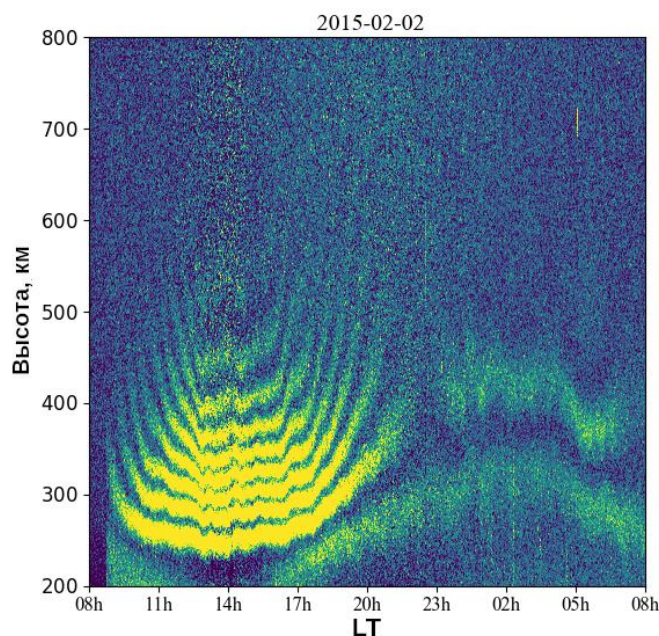


Рисунок 1.7. Дневные вариации высотного профиля мощности принятого сигнала некогерентного рассеяния, полученного на ИРНР

С некоторыми допущениями мощность принятого сигнала некогерентного рассеяния на ИРНР определяется по формуле [Лебедев, 2015; Shpynev, 2004]

$$P_{\text{нр}}(R) = \frac{P_{\text{п}} L_{\text{и}} L_{\text{п}} G_0^2 \lambda^2 c \tau r_e^2 N_e(R) \cos^2(\Omega(R))}{128 \pi^2 R^2 (1 + T_e(R)/T_i(R))} \iint_{4\pi} F_{\text{и}}(\varepsilon, \gamma) F_{\text{п}}(\varepsilon, \gamma) \cos(\varepsilon) d\varepsilon d\gamma, \quad (1.15)$$

где $P_{\text{п}}$ — пиковая излучаемая мощность, $L_{\text{и,п}}$ — потери в передающем и приемном трактах, G_0 — коэффициент усиления антенны, τ — длина импульса, r_e — радиус электрона, Ω — угол поворота плоскости поляризации, связанный с эффектом Фарадея, ε, γ — азимут и угол места, $F_{\text{и}}, F_{\text{п}}$ — ДН по мощности на передачу и прием. Так как рассеяние происходит во всем засвечиваемом объеме, размер которого определяется длиной импульса τ и расстоянием R , мощность падает как $1/R^2$, но тем не менее сигнал некогерентного рассеяния очень слабый — излучаемые мегаватты на приеме ослабевают до фемтоватт. Во время работы в ионосферном режиме многие реализации содержат сигналы, отраженные от космических объектов: искусственных спутников и космического мусора. Они значительно превышают ионосферный отклик, поэтому существует специальный алгоритм фильтрации, который отделяет такие реализации.

В **спутниковом режиме** наблюдаются космические объекты (КО), обычно по заранее подготовленному плану, т. е. целеуказаниям для выбранных КО. Наблюдение также может осуществляться путем повторяющегося сканирования некоторого сектора. КО включают искусственные спутники Земли, космические аппараты и космический мусор. По элементам орбиты КО, доступным в открытых каталогах, вычисляется траектория движения через сектор обзора ИРНР и далее по уравнению сканирования определяются частоты, на которых должен работать радар в каждый момент времени. На рис. 1.8 представлены развертки с квадратурами (I/Q компоненты) сигналов, отраженных от КО. В простом случае импульс прямоугольный — в настоящее время такие случайные отражения попадают только во время ионосферных наблюдений. В квадратурах импульс имеет форму синусоиды из-за наличия доплеровского сдвига в отраженном импульсе относительно центральной частоты. В современном спутниковом режиме используется ЛЧМ-импульс с полосой ~ 360 кГц. Из-за частотного принципа сканирования, он покрывает небольшую область пространства ($\sim 1.4^\circ$) около направления, соответствующего частоте излучения. Производится специальная согласованная обработка принятых сигналов, основанная на заранее просчитанных модельных импульсах, учитывающих влияние ДН ИРНР на всех частотах рабочего диапазона. Объем модельных импульсов в цифровом виде составляет 100 Гбайт, а программа обработки использует аппаратное ускорение на графических процессорах для работы в реальном масштабе времени. Применение ЛЧМ-импульсов на ИРНР позволяет точнее определить задержку до наблюдаемого объекта, повысить чувствительность и разрешение по высоте. На рис. 1.9 показаны результаты наблюдений, проведенных в спутниковом режиме с использованием ЛЧМ-импульсов.

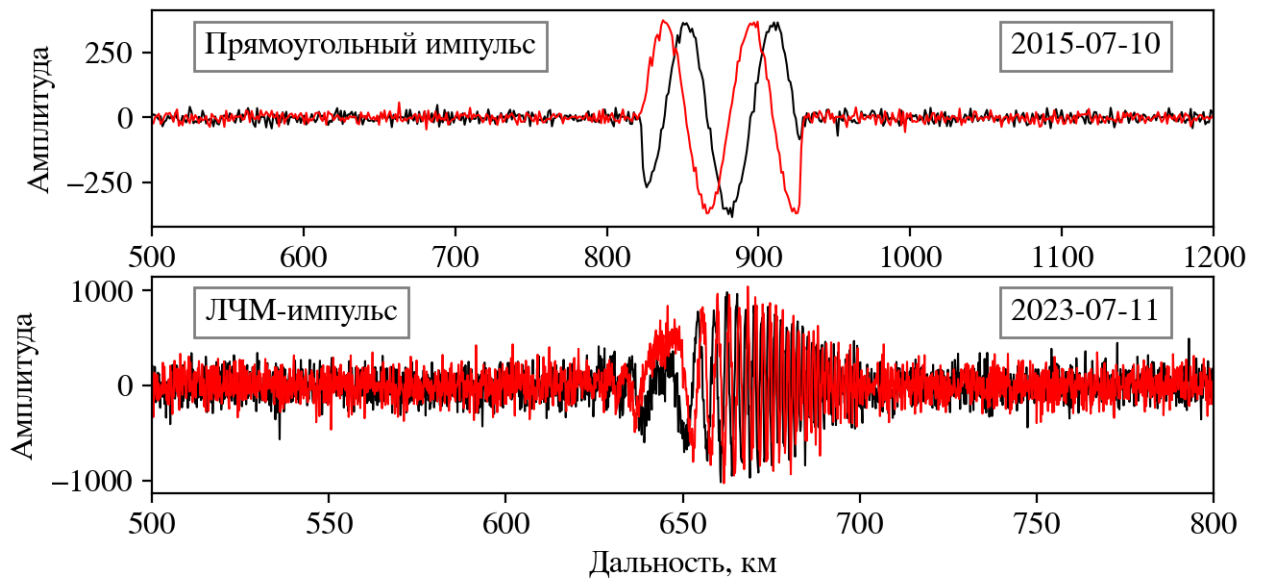


Рисунок 1.8. Квадратурные компоненты радиолокационных разверток, полученных в спутниковом режиме для прямоугольного и ЛЧМ-импульсов

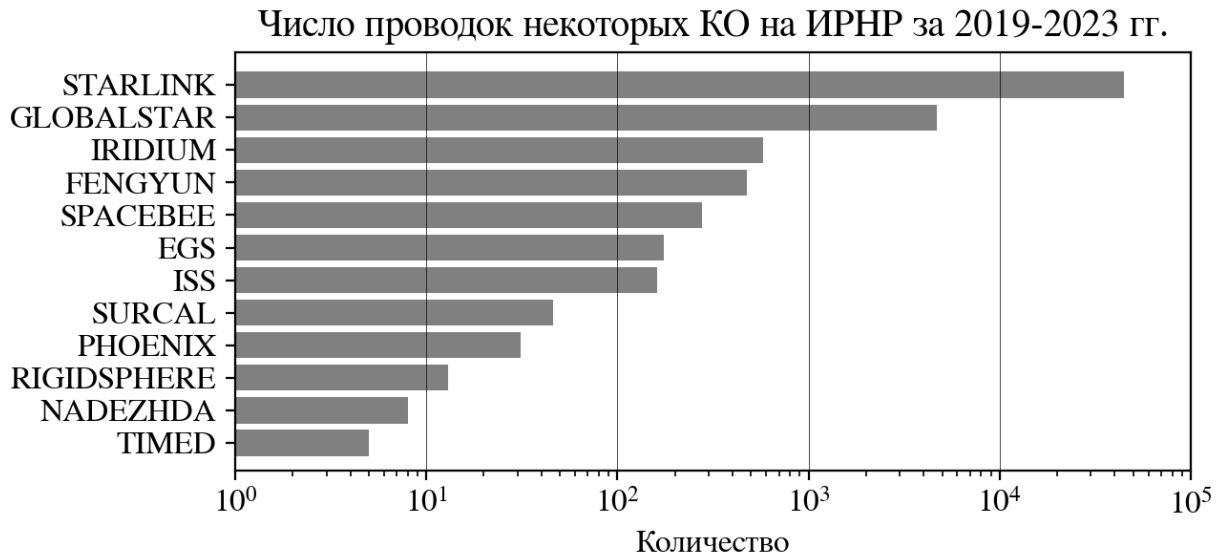


Рисунок 1.9. Результаты спутниковых наблюдений за 2019–2023 гг.: количество проводок 12 типов каталогизированных КО. Проводкой считается наблюдение сигналов от КО в течение как минимум 3 секунд. Всего на ИРНР за этот период было осуществлено 73124 проводки более чем 779 каталогизированных типов КО

Мощность сигнала, отраженного от точечного объекта с ЭПР σ , на входе приемника ИРНР имеет вид [Лебедев, 2015]

$$P_{\text{КО}} = \frac{P_{\text{п}} L_{\text{и}} L_{\text{п}} G_0^2 \lambda^2 F_{\text{и}}(\varepsilon, \gamma) F_{\text{п}}(\varepsilon, \gamma) \sigma \cos^2(\Omega(R))}{64\pi^3 R^4}. \quad (1.16)$$

Как и в случае с сигналом некогерентного рассеяния, в выражении (1.16) присутствует член $\cos^2(\Omega(R))$, связанный с эффектом Фарадея. Если космический объект будет находиться на высоте, соответствующей высоте замирания сигнала, то принятая мощность будет значительно ослаблена, что необходимо учитывать при обработке и интерпретации данных спутниковых наблюдений.

Основными объектами измерений в **радиоастрономическом (пассивном) режиме** являются радиоисточники Лебедь-А, Кассиопея, Крабовидная туманность, Солнце и распределенный космический шум. Регулярные радиоастрономические наблюдения на ИРНР проводятся с 2011 г. [Васильев и др., 2013; Vasilyev et al., 2013]. Пассивные и активные измерения одновременно проводятся не могут, однако в связи с тем, что радар работает в активном режиме не более 100 дней в году, объем данных пассивных измерений значительно больше. Радиоастрономические наблюдения представляют интерес по нескольким причинам. Во-первых, радар может выполнять функции риометра, т. е. измерять вариации сигналов радиоисточников, проходящих через ионосферу. Когда стабильное излучение от радиоисточника распространяется через неоднородности электронной концентрации в ионосфере, происходит интерференция, приводящая к ослаблениям и усилениям сигнала, — так называемым мерцаниям. Явление усиливается, если направление на радиоисточник совпадает с направлением магнитного поля (эффект магнитного зенита). По интенсивности вариаций можно оценить зональную скорость неоднородностей [Vasilyev et al., 2017]. Во-вторых, интересны измерения солнечного излучения в метровом диапазоне (см. главу 2), особенно ввиду высокой чувствительности антенны ИРНР. В-третьих, пассивный прием позволяет протестировать и откалибровать приемную систему радара, а также оценить помеховую обстановку, которая может значительно меняться ото дня ко дню и нарушать работу при проведении активных экспериментов. Корректность измерений в этом режиме была подтверждена сравнением с данными по солнечному радиоизлучению, принимаемому на радиогелиографах Нансэ [Kerdraon, Delouis, 1997] и Калгура [Wild, 1967], в том же диапазоне частот.

Из-за технических особенностей ИРНР и системы синхронизации, в пассивном режиме прием ведется также как и в активном, т. е. окнами фиксированной длительности (обычно до 8 мс), следующими с опорной частотой тактирования (максимум 24.4 Гц). При этом частота дискретизации сигнала в окне составляла от 25 кГц в ранних реализациях режима до 2 МГц в современной версии приемника в регулярных наблюдениях и до 10 МГц в специальных экспериментах. На рис. 1.10 показан пример сигнала в одном окне длительностью 2 мс (2048 отсчетов). Квадратурные компоненты сигнала ожидаемо представляют собой гауссовый белый шум, что видно по гистограммам на правых панелях рисунка.

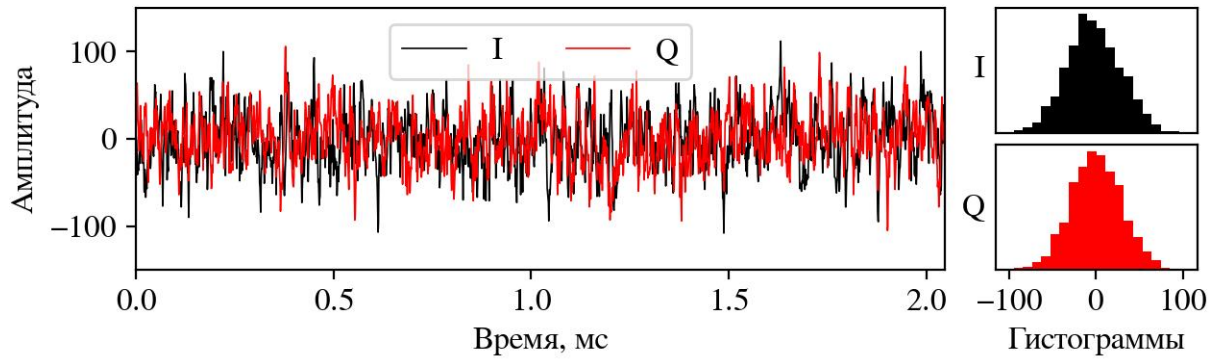


Рисунок 1.10. Квадратурные компоненты в окне приема (2048 отсчетов, частота дискретизации 1 МГц) и гистограммы распределения амплитуды в каждой квадратуре

Мощность принятого радиоастрономического сигнала на ИРНР с полосой B на центральной частоте f_0 находится по формуле

$$P_{\text{РА}}(f_0, B) = \frac{kL_{\text{п}}}{4\pi} \int_{f_0-B/2}^{f_0+B/2} G(f) \iint_{4\pi} T_{\text{я}}(f, \varepsilon, \gamma) F_{\text{пр}}(f, \varepsilon, \gamma) \cos(\varepsilon) d\varepsilon d\gamma df, \quad (1.17)$$

где $T_{\text{я}}$ — яркостная температура, k — постоянная Больцмана. Можно сказать, что на каждой частоте f в полосе B формируется своя ДН, смещенная относительно ДН на других частотах и, таким образом, производится сканирование небесной сферы в небольшом диапазоне углов. Скорость изменения направления луча ДН составляет около $3.75^\circ/\text{МГц}$. Яркостная температура с частотой меняется медленно, поэтому если полоса приема достаточно мала ($B < 100 \text{ кГц}$), в формуле (1.17) можно пренебречь интегрированием по частоте и определять ДН только на центральной частоте f_0 . Вычисление спектра мощности сигнала позволяет разделить принятую мощность по направлениям приема в полосе B .

Формула (1.17) учитывает, что сигнал принимается только в одной поляризации. В метровом диапазоне длин волн космическое радиоизлучение в основном неполяризованное. Определенную степень поляризации имеют Кассиопея-А, Крабовидная туманность и солнечное радиоизлучение во время некоторых типов радиовсплесков. В случае неполяризованного излучения поляризационный фильтр ИРНР ослабляет сигнал наполовину, а в случае поляризованного — необходимо иметь ввиду как фильтрацию антенной, так и вращение плоскости поляризации в ионосфере из-за эффекта Фарадея.

При анализе радиоастрономических сигналов также используется коэффициент когерентности KK между сигналами в полурупорах, определяемый по формуле

$$KK = \frac{\langle F_{\text{в}}(f) F_{\text{н}}^*(f) \rangle}{\sqrt{\langle |F_{\text{в}}(f)|^2 \rangle \langle |F_{\text{н}}(f)|^2 \rangle}} \quad (1.18)$$

где $F_{в,н}$ — фурье-спектр сигнала в верхнем и нижнем полурупорах. KK представляет собой меру схожести сигналов в соседних каналах и является комплексным числом, модуль которого изменяется от 0 до 1, а аргумент показывает сдвиг фазы между каналами. В радиоастрономическом режиме он удобен для точного определения положения источника в антенной системе координат, но не несет информации об амплитуде сигналов.

На ИРНР также использовались **специальные режимы** для отдельных экспериментов, включая радиозондирование Луны, наблюдение когерентных эхо [Potekhin et al., 1999] и эксперименты «Радар-Прогресс» по наблюдению ионосферных возмущений, возникающих в результате работы двигателей космических аппаратов «Прогресс» [Хахинов и др., 2011].

Многообразие режимов работы, частотный принцип сканирования и отсутствие системы автоматической калибровки привело к появлению задачи калибровки по радиоастрономическим наблюдениям, которые регулярно проводятся с 2011 г. и охватывают практически весь рабочий диапазон ИРНР. Сигналы от радиоисточников и шума неба измерялись на разных прецизионных радиотелескопах, их интенсивность доступна в радиоастрономических каталогах, и они могут использоваться в качестве опорного известного сигнала. Была составлена модель шумовой температуры ИРНР, описывающая уровень шумов неба в любой выбранный момент времени для любой частоты. Однако как приемное оборудование радара, так и параметры наблюдений с 2011 г. изменялись несколько раз, поэтому архив данных был сначала приведен к общему виду.

1.3 Обработка данных радиоастрономических наблюдений

1.3.1 Виды данных пассивных наблюдений

За более десяти лет регулярных радиоастрономических наблюдений были проведены несколько значительных модернизаций приемной системы. Менялись также и способы обработки и хранения данных. Первоначально, в 2011 г., режим работы был основан на сканировании всего сектора обзора ИРНР (режим сканирования): частотный диапазон 149–163 МГц разбивался на 88 отдельных частот с шагом 164 кГц [Vasilyev et al., 2013]. Время на одно сканирование составляло ~ 3.67 с при частоте повторения 24.4 Гц. Полученные реализации сигналов усреднялись и по ним определялись собирательные характеристики: амплитуда и мощность сигналов в каждом полурупоре, дисперсия и комплексный коэффициент когерентности между полурупорами. Они сохранялись в отдельные файлы для каждого дня наблюдения. На рис. 1.11 показано распределение мощности сигнала по 88 частотам в течение дня. Видны следы (треки), оставляемые радиоисточниками — Солнцем, Лебедем-А и Кассиопеей-А. Кроме того, виден зеркальный, «обратный» трек, возникающий из-за отражения падающей волны от дальнего конца антенны. Помехи носят случайный характер, могут быть

как узкополосными (как на рисунке), так и широкополосными, перекрывающими весь частотный диапазон. Мощность фонового сигнала изменяется с частотой, что говорит о значительной неравномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) всего приемного тракта.

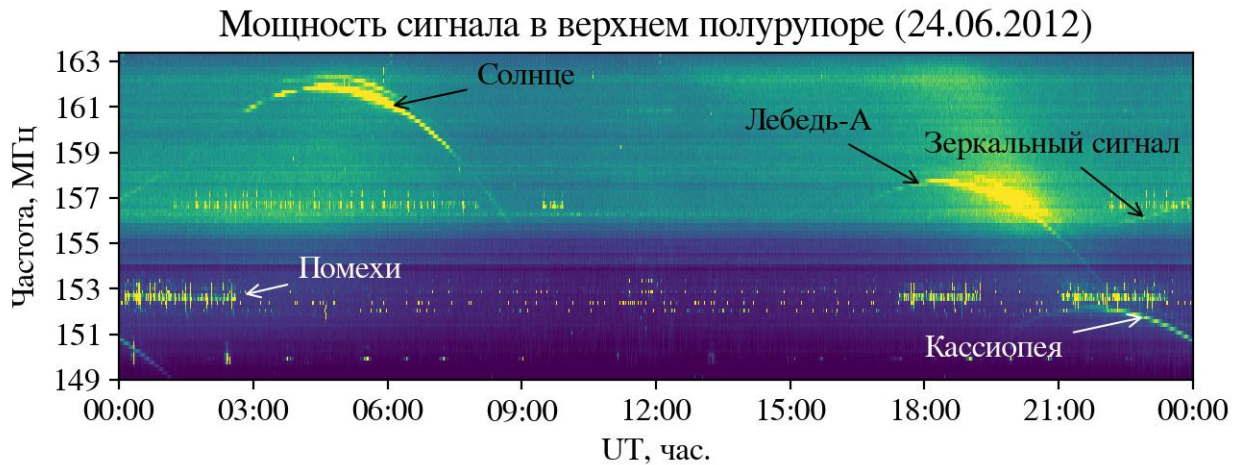


Рисунок 1.11. Частотно-временное распределение мощности сигнала (спектр) в пассивном режиме, использовавшемся в 2011–2014 гг.

С целью повышения временного разрешения, с 2015 г. стал использоваться широкополосный режим, при котором производилось сканирование в меньшем диапазоне (154–163 МГц), разбитом на 11 частотных каналов с шириной полосы ~ 800 кГц. Кроме того, вместо накопительных характеристик стали храниться исходные квадратурные компоненты принятых сигналов, из-за чего объем хранимой информации увеличился в 50 раз, но открылась возможность отложенной обработки данных. На рис. 1.12 показан спектр мощности принятого сигнала в этом режиме работы, полученный путем вычисления фурье-спектров в каждом частотном канале. Расчет спектров производился следующим образом: развертки сигнала длиной 2048 точек разбивались на отрезки по 256 точек, по которым вычислялись спектры мощности, после чего проводилось усреднение 40–100 спектров. Частота дискретизации составляет 1 МГц, что для фурье-преобразования длиной 256 точек дает разрешение по частоте, равное 3.9 кГц. К неравномерности АЧХ во всем частотном диапазоне добавляется неравномерность отдельных частотных каналов, в результате чего на рисунке четко выражены 11 «полос», соответствующих сигналу на каждой частоте сканирования. При этом уровень мощности сигнала остается достаточным для получения корреляционных характеристик практически без искажений. Так, на рис. 1.13 показан коэффициент когерентности между сигналом в нижнем и верхнем полурупорах для того же дня наблюдений и видно, что полосы в этом случае практически пропадают.

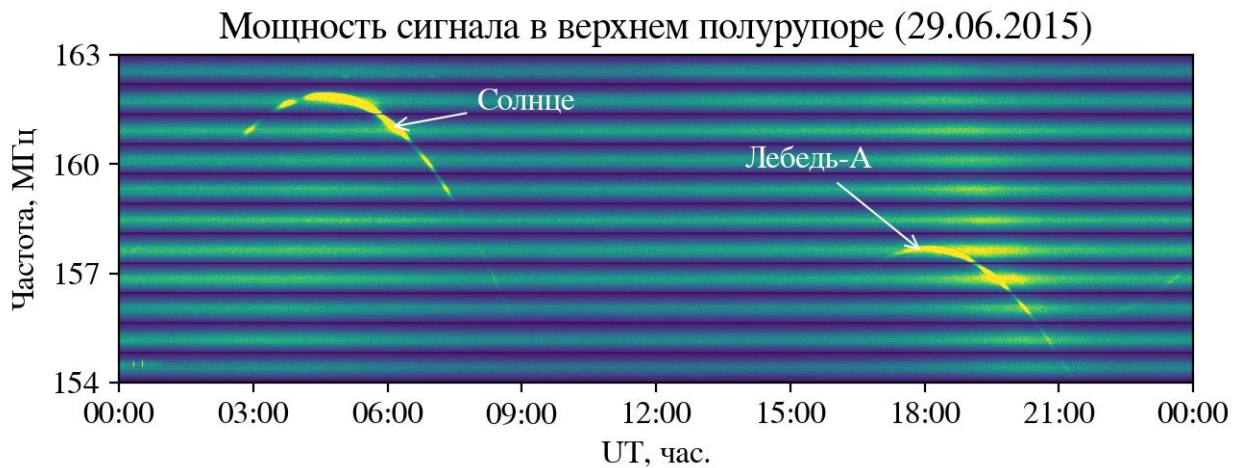


Рисунок 1.12. Частотно-временное распределение мощности принятого сигнала в широкополосном режиме в 2015 г.

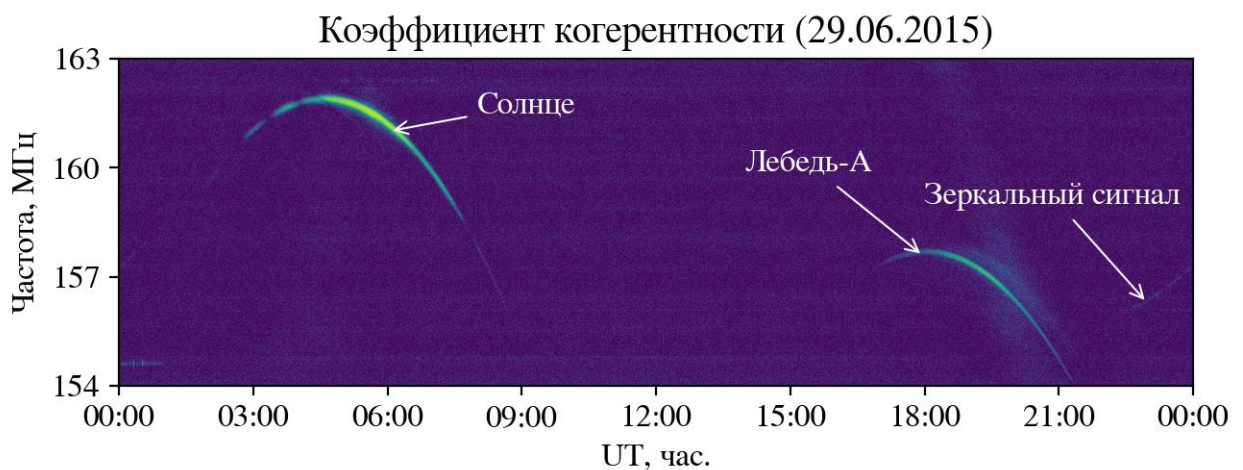


Рисунок 1.13. Коэффициент когерентности сигналов между полурупорами

Мерцания сигнала и солнечные радиовсплески — это быстрые события, и для изучения их тонкой структуры нужно максимально повысить временное разрешение, поэтому в 2017 г. был разработан новый режим, сочетающий в себе привычный режим сканирования и режим отслеживания (трекинга) радиоисточников, при котором измерение ведется только на одной частоте, заранее рассчитанной по модельному положению радиоисточника. Пример спектров для одного дня наблюдения показан на рис. 1.14. В зимнее время, проводится отслеживание Лебедя-А, Кассиопеи-А и Крабовидной туманности. В летнее время отслеживаются только Солнце и Лебедь-А. Перерывы между сеансами трекинга заполняются сканированием диапазона 154–163 МГц, теперь на 15 частотах для обеспечения более равномерного покрытия. Рисунок 1.14 отражает ещё одну важную особенность антенны ИРНР — зависимость уравнения сканирования (иначе говоря направления ДН) от температуры окружающего воздуха. Это видно

по смещению трека Лебедя-А от центра полосы к краю — реальная частота наблюдения выше, чем модельная.

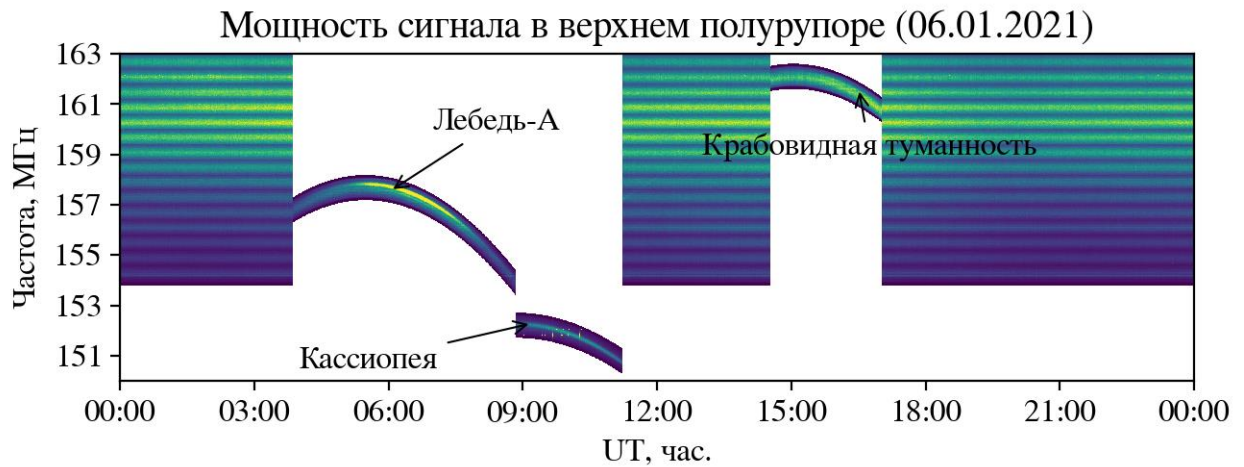


Рисунок 1.14. Частотно-временное распределение мощности принятого сигнала в смешанном режиме (сканирование и отслеживание)

В 2021 г. была проведена основательная модернизация приемного тракта ИРНР: разработан новый входной усилительный пункт (первичное устройство приемного тракта) с несколькими каскадами усиления и фильтрации, проложен кабель с низкими потерями и фазовыми искажениями сигнала, куплены новые приемники, работающие по принципу прямого преобразования. Все это позволило значительно улучшить характеристики принятого сигнала. Теперь максимальная ширина полосы приемника на произвольно выбранной центральной частоте составляет 10 МГц, поэтому «полосы», ранее наблюдаемые на графиках частотно-временного распределения, отсутствуют (см. рис. 1.15) и графики стали больше похожи на исходный режим работы 2011–2014 гг. При внимательном рассмотрении детализированных распределений стали заметны другие радиоисточники. Оставшиеся слабые «полосы» — это вариации АЧХ нового приемника, а также помехи на фиксированных частотах. Кроме того, в результате модернизации фаза сигнала стала более линейной и стабильной, а также повысились возможности по гибкому управлению режимом работы.

Смена режима работы приводила к смене формата выходных данных, поэтому в программном комплексе для обработки и калибровки производится приведение данных к единому формату, с учетом особенностей каждого режима. Выходными данными первичной обработки являются частотно-временные зависимости мощности принятого сигнала в полурупорах (спектры) и коэффициент когерентности. Помимо изменений, связанных со сменой режима, любые модификации оборудования приемного тракта или ремонт ведут к

изменениям характеристик, что требует повторной калибровки, поэтому калибровка должна проводиться как можно чаще.

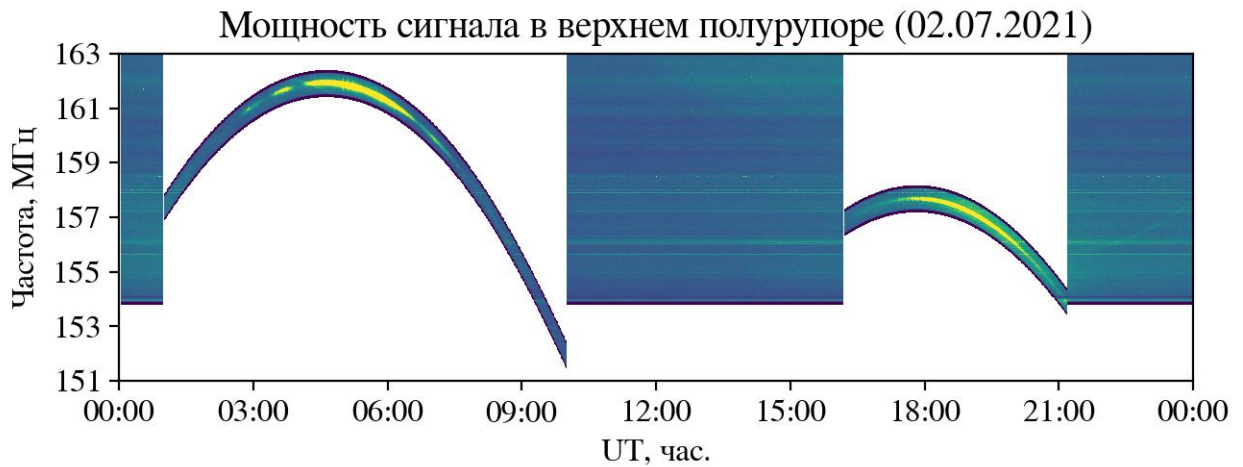


Рисунок 1.15. Частотно-временное распределение мощности принятого сигнала в смешанном режиме (сканирование и отслеживание) после модернизации середины 2021 г.

1.3.2. Температурная коррекция (коррекция положения трека)

Анализ треков радиоисточников начинается с полосовой фильтрации — нужно выделить узкую полосу сигнала радиоисточника для снижения общего уровня шумов. Упомянутая в предыдущем разделе зависимость уравнения сканирования от вариаций температуры окружающей среды приводит к смещению трека радиоисточника относительно модельного, что препятствует фильтрации. Смещение нужно определить, и для этого находится центр трека путем оценки положения максимума в коэффициенте когерентности сигнала радиоисточника. Форма коэффициента повторяет ДН антенны в азимутальном направлении, определяемой линейкой щелевых излучателей, и поэтому может быть аппроксимирована гауссианой. Процедура выделения трека состоит из вписывания гауссианы в коэффициент когерентности, определения смещения и его использовании для фильтрации спектров мощности по узкой полосе. На рис. 1.16 показано сравнение положений центра трека по модели и после вписывания на примере реальных данных. Вписанная линия лежит на центральной части трека, смещенной в более высокочастотную область, в то время как модельная линия соответствует середине спектра, заданной перед началом наблюдений.

На ИРНР есть метеостанция, которая постоянно фиксирует температуру, давление и влажность окружающей среды, благодаря чему можно определить температурную зависимость отклонения от модели для Лебеда-А. Хотя сигнал от Крабовидной туманности слабый по сравнению с Лебедем-А, его также можно использовать для определения температурной зависимости на верхней границе частотного диапазона, как раз там, где наблюдается Солнце. На

рис. 1.17 показаны зависимости для Лебедя-А и Крабовидной туманности, полученные за 2017 г. Явно видно, что смещение трека Лебедя-А с температурой проявляется значительно сильнее. При этом Лебедь-А наблюдается в диапазоне частот 156–157 МГц, а Крабовидная туманность — 161–162 МГц, из чего можно сделать вывод, что температурная зависимость по-разному проявляется в разных частях рабочего диапазона частот.

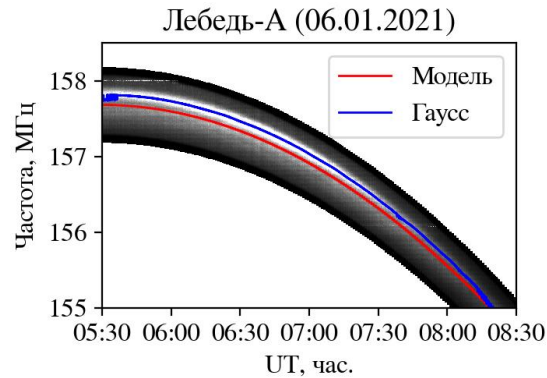


Рисунок 1.16. Сравнение модельного положения трека и результата вписывания гауссианы

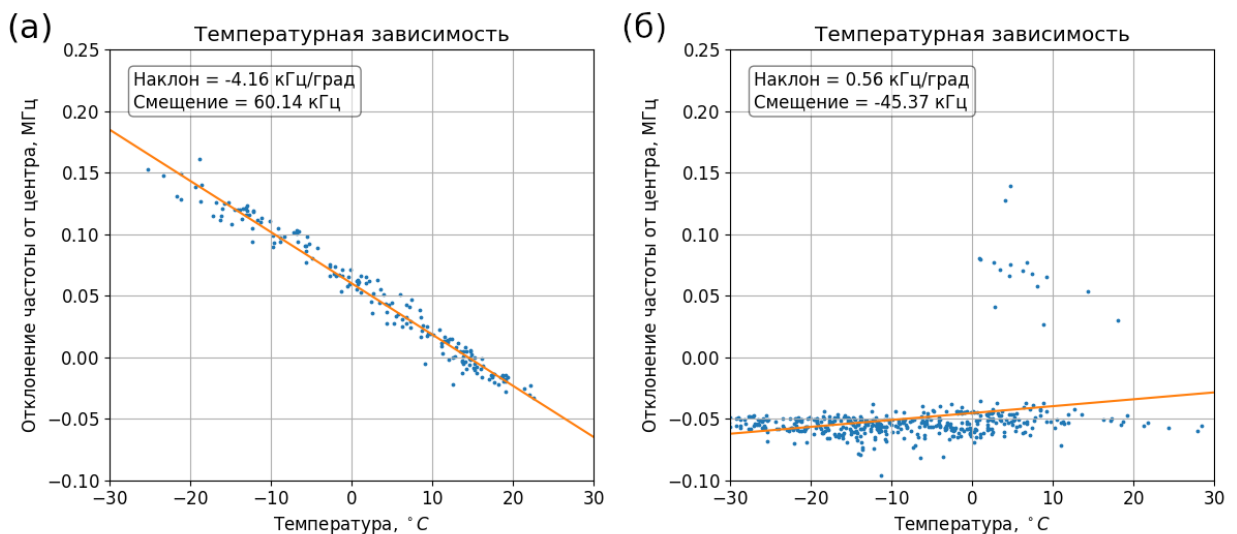


Рисунок 1.17. Зависимости отклонения частоты от температуры окружающей среды, полученные по радиоисточникам (а) Лебедь-А, (б) Крабовидная туманность

Можно попытаться применить полученную зависимость для корректировок, но на практике лучше себя показал непосредственно сам метод вписывания гауссианы, устраняющий смещение вне зависимости от частоты и положения трека в секторе обзора ИРНР.

1.3.3. Фильтрация помех

Вблизи ИРНР находится станция «Воронеж», работающая в том же диапазоне частот и с которой налажена синхронизация для минимизации взаимных помех. Тем не менее, полностью

избежать помех не удастся — в конце радиолокационной развертки в активных режимах и в сигнале в пассивном режиме наблюдаются помеховые сигналы различной интенсивности и формы, как широкополосные импульсные помехи, так и сохраняющиеся в течение нескольких дней узкополосные помехи вблизи некоторых частот, видимые, например, на рис. 1.11 в период наблюдений, когда новой станции ещё не было. Такая проблема характерна для радиотелескопов, чаще всего имеет антропогенную природу и решается путем бланкирования помеховых импульсов на временных развертках или вычитания модельной помехи, в случае если характеристики помехи хорошо известны [Ford, Buch, 2014].

На рис. 1.18 показан пример появления помехового сигнала в данных ИРНР. На нижней панели графика показаны 0.6 секунд измерений, за которые прием включался 4 раза. Прием в пассивном режиме ведется окнами, частота которых зависит от работы системы синхронизации. В данном случае частота повторения составляет 6.6 Гц, а каждое окно приема включает 2048 оцифрованных отсчетов сигнала. На двух верхних панелях показаны увеличенные развертки второго и третьего приемных окон, с примерами помехового и полезного сигналов. Амплитудный профиль и интенсивность помех может быть разной, как и частота их появления. Для борьбы с помехами на ИРНР применяется пороговая фильтрация, причем ввиду того, что распределение интенсивности помех имеет длинный хвост, в качестве порога используется медианное абсолютное отклонение:

$$\sigma_m = \text{медиана}(|X_i - \text{медиана}(X)|), \quad (1.19)$$

где X_i — амплитуда i -го отсчета квадратуры. Если медианное значение амплитуды любой квадратурной компоненты в окне приема превышает величину, кратную медианному абсолютному отклонению, то все окно отбрасывается. На данных ИРНР этот фильтр показал себя лучше, чем фильтрация относительно стандартного отклонения. Дополнительная фильтрация по спектрам в полурупорах проводится для того, чтобы убрать широкополосные помехи. Рисунки 1.11–1.15, ранее показанные для демонстрации радиоастрономического режима работы, построены по уже отфильтрованным данным. Схожий по принципу работы фильтр часто используется для определения выбросов при анализе данных в этой работе.

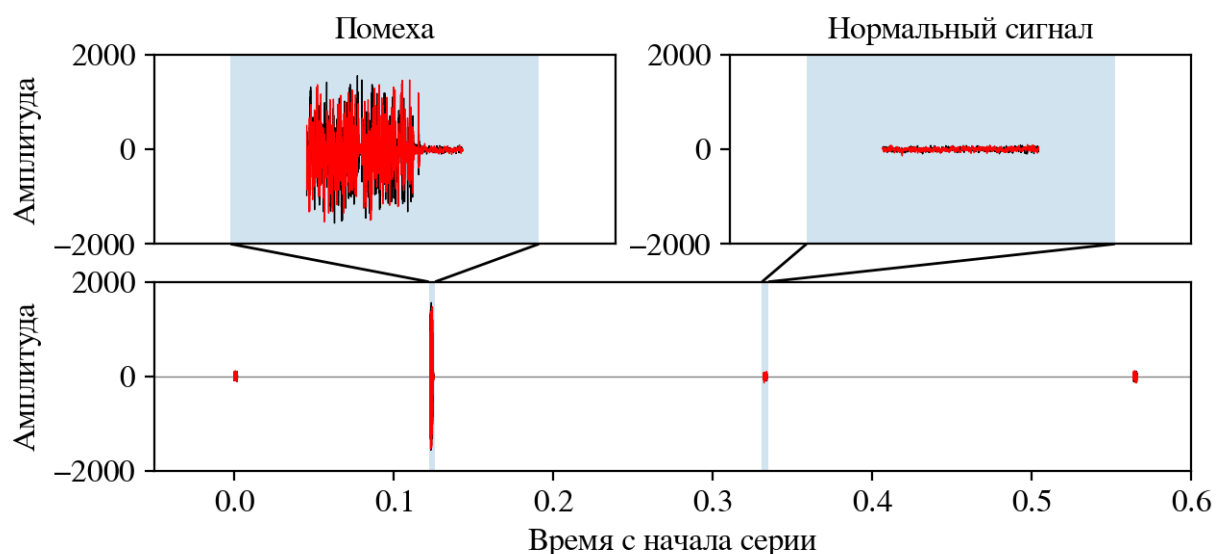


Рисунок 1.18. Пример помехового сигнала в последовательности из 4 окон приема (нижний график). На верхних графиках показаны приближения помехового и нормального сигналов из последовательности

Антенна ИРНР обладает ещё одной особенностью, которая приводит к появлению высокочастотных колебаний в АЧХ, видимых в спектрах мощности. На рис. 1.19 показаны вариации мощности, найденные путем вычитания усредненной мощности для каждой частоты спектра. Возникают осцилляции, видимые как горизонтальные полосы разного цвета, повторяющиеся каждые ~ 62.5 кГц (16 периодов на 1 МГц рабочих частот). Осцилляции выражены слабее на частотах выше 160 МГц. Более полный анализ осцилляций показал, что они смещаются с течением времени и это смещение коррелирует с изменением температуры окружающей среды. Осцилляции относительно слабые — 5–10 % от общей мощности, однако поскольку их положение варьируется с температурой в течение дня, они мешают ежедневной почастотной калибровке. Поэтому перед проведением калибровки осцилляции в частотно-временном распределении фильтруются с помощью полосового фильтра Баттерворта.

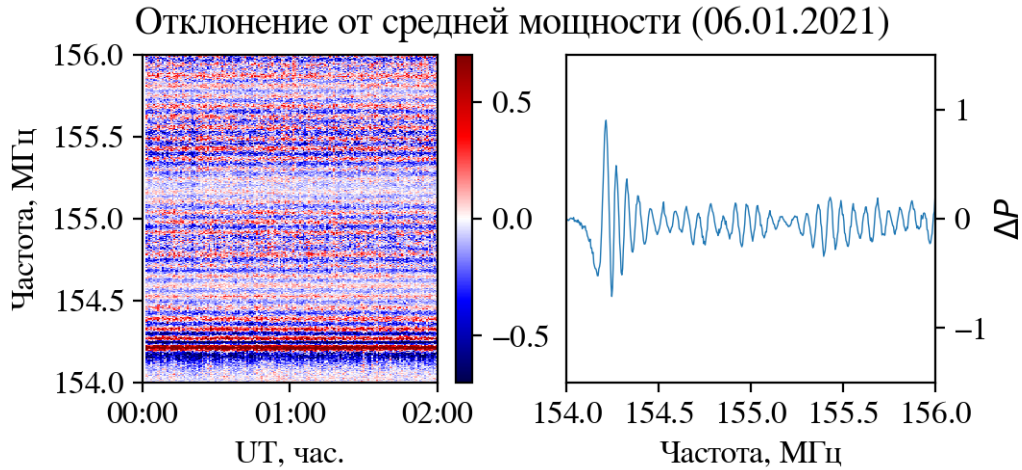


Рисунок 1.19. Осцилляции АЧХ антенны, проявляющиеся в спектрах мощности. На левом рисунке показана временная динамика, на правом — среднее за показанный период

1.4 Модель шумовой температуры антенны

Шумовая температура антенны T_A , введенная в формуле (1.2), характеризует мощность шумов внешнего происхождения, воздействующих на приемную антенну. Так как ДН антенны ИРНР направлена преимущественно вертикально, доминирующим постоянным источником шума является именно шум неба T_n , а не земли и шумов от человеческой деятельности, и таким образом $T_A = T_n$. На некоторой фиксированной частоте f , шумовая температура T_n связана с яркостной температурой T_γ и диаграммой направленности по мощности F^2 формулой [Драбкин и др., 1974]

$$T_n(f) = \frac{G(f)}{8\pi} \iint_{4\pi} T_\gamma(\theta, \varphi, f) F_\pi^2(\theta, \varphi, f) \sin\theta d\theta d\varphi, \quad (1.20)$$

где G — коэффициент усиления антенны, Ω — телесный угол. В формуле (1.20) учитывается прием в одной поляризации.

В разделе 1.1.3 были упомянуты модель распределения шума неба по небесной сфере, Global Sky Model (GSM), представленная в [Oliveira-Costa et al., 2008] и усовершенствованная в [Zheng et al., 2017]. GSM позволяет получить карту распределения яркостной температуры на произвольной частоте от 10 МГц до 94 ГГц, представленную в формате HEALPix (Hierarchical Equal Area isoLatitude Pixelisation) [Gorski et al., 2005] — иерархической пикселизации, разбивающей сферу на элементы равной площади, расположенные вдоль нескольких выбранных широт. В оригинальной модели карта состоит из ~ 3 миллионов пикселей (разрешение $\sim 6.8'$), а усовершенствованная — из 12.5 миллионов (разрешение $\sim 3.4'$). По ссылке [https://github.com/telegraphic/pygdsml] доступна наиболее актуальная версия программного обеспечения (PyGDSM), позволяющего получить карты модели GSM.

Модель шумовой температуры антенны ИРНР определяется по выражению (1.20) по моделям ДН и карте шума неба GSM. Для вычисления интеграла использовалось три метода интегрирования по сфере [Freeden et al., 2015], которые дали приблизительно одинаковый результат. В первом методе использовалось свойство формата HEALPix о равенстве площади каждого пикселя карты: ДН вычислялась в координатах пикселей и интеграл определялся простым суммированием. Во втором методе производилось разбиение сферы равномерной сеткой по азимуту и углу места, вычислялась ДН в точках сетки, $T_{\text{я}}$ карты шума неба интерполировалась к ближайшей ячейке сетки, после чего использовалась формула Симпсона. В третьем методе координатная сетка карты HEALPix разбивалась на сферические треугольники (строилась триангуляция Делоне), в которых вычислялась ДН, после чего определялась площадь каждого сферического треугольника и производилось суммирование.

Таким образом была вычислена $T_{\text{н}}$ для суточной частотно-временной сетки с шагом 100 кГц по частоте и 5 мин по времени. Результат показан на рис. 1.20 для 01.01.2015: двумерное распределение и примеры дневного хода на трех частотах. Две яркие дуги, наблюдаемые с 5 до 15 ч — это радиоисточники Лебедь-А и Кассиопея-А, проходящие через сектор обзора. Их время наблюдения близко к картине, показанной на рис. 1.14. Крабовидную туманность тоже можно заметить в промежуток времени с 15 до 17 ч, однако уровень очень слабый по сравнению с фоном. Относительно меньший сигнал радиоисточников по сравнению с реальными данными связан с принципом работы модели GSM — она аппроксимирует в основном распределенный шум (в оригинале — диффузный), а сигналы радиоисточников ослабляются либо бланкируются. Фоновое U-образное усиление шума с 5 до 20 ч, на котором находятся все интенсивные радиоисточники, — это галактический диск. Его слабый след можно увидеть на ранее приведенных спектрах, описывающих радиоастрономический режим работы (рис. 1.11, 1.2), а более заметный сигнал будет виден далее, на откалиброванных спектрах. Для произвольных частоты и времени суток значение шума вычисляется с помощью двумерной сплайн-интерполяции. От дня ко дню картина на рис. 1.20 будет сдвигаться по времени и через год повторится. Прецессия и нутация дают относительно малый вклад в изменение $T_{\text{н}}$, поэтому вычисления проводятся только для одного опорного дня, и для произвольного дня $T_{\text{н}}$ смещается в соответствии со звездным временем. Программный комплекс для моделирования $T_{\text{н}}$ может быть использован для получения его распределения для любой антенны в любой точке Земли.

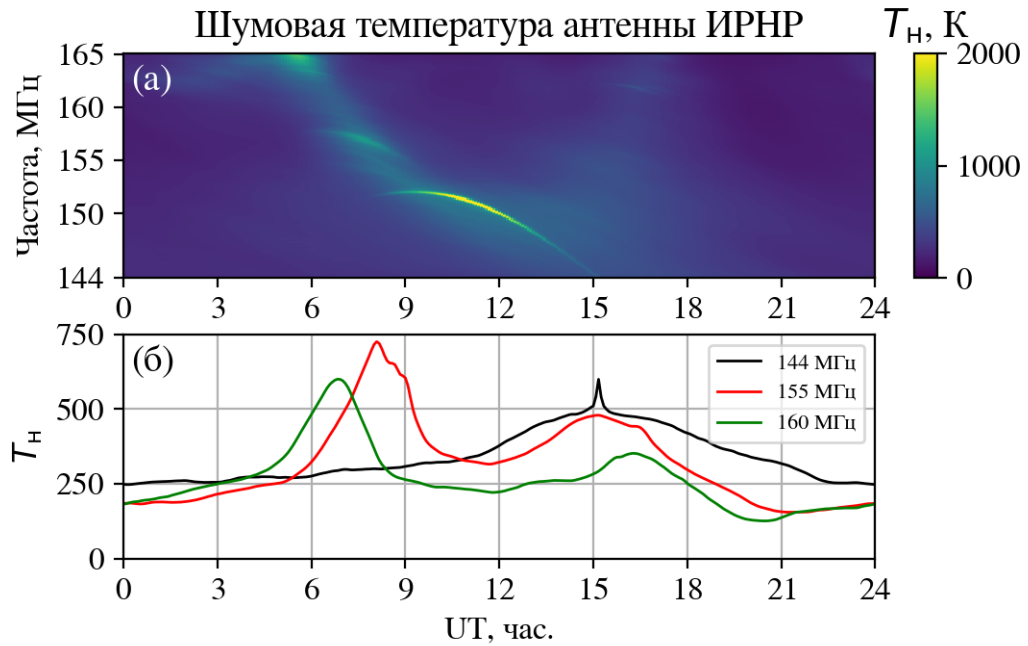


Рисунок 1.20. Частотно-временное распределение (а) шумовой температуры (ед. измерения — К) ИРНР в течение суток, 01.01.2015 (б) Дневной ход шумовой температуры на разных частотах

Согласно полученной модели, средний уровень шума неба на ИРНР составляет 337 К (5 % процентиль — 161 К, 95 % процентиль — 628 К), что ограничивает минимальный уровень чувствительности ИРНР при приеме двумя полурупорами на уровне $SEFD(\text{мин}) = 550$ Ян. Чтобы элементы приемного тракта незначительно ухудшали чувствительность, нужно чтобы шумы приемника были менее 10 % от шума неба, т. е. не выше 40 К, или, в терминах коэффициента шума, $NF < 0.56$ дБ. На протяжении всей истории регулярных радиоастрономических наблюдений на ИРНР данное условие выполнялось. В приемнике до 2021 г. использовался входной усилитель ARR P144VDG с $NF = 0.5$ дБ, а в современном приемнике — ZX60-P103LN+ с $NF \approx 0.4$ дБ. Эти значения коэффициентов шума также были подтверждены измерениями методами холодного источника и Y-методом, упомянутыми в разделе 1.1.3. При суммировании мощности сигналов с двух полурупоров, шумовая температура системы будет равна ~ 420 К.

1.5 Калибровка приемного тракта

Шумовая температура антенны — единственный источник калибровочного сигнала, который охватывает весь частотный диапазон радара и доступен для всего архива регулярных радиоастрономических наблюдений. Так как усиление приемника и коэффициент усиления антенны не известны с достаточной точностью и меняются с течением времени, для калибровки

выбран регрессионный метод, при котором измерения шума неба за один день наблюдений используются для определения коэффициентов линейной модели g и $P_{\text{шп}}$ методом наименьших квадратов (МНК):

$$P_{\text{АЦП}} = gP_c + P_{\text{шп}} = gkT_n B + P_{\text{шп}}, \quad (1.21)$$

где $P_{\text{АЦП}}$ — мощность на выходе аналого-цифрового преобразователя, записанная в цифровом виде в хранилище данных, T_n — модельная шумовая температура, B — полоса приемника. В формуле (1.21) делается предположение о том, что шум неба — единственный источник внешнего сигнала. Вычисления проводятся для каждой частоты из частотно-временного распределения мощности, полученного в режиме сканирования всего сектора обзора. Таким образом определяется частотные зависимости усиления (АЧХ) и уровень собственных шумов для каждого приемного канала (порупупора), практически полностью покрывающие рабочую полосу ИРНР. Впоследствии полученные коэффициенты применяются к любым измерениям для оценки мощности сигнала в ваттах.

Перед калибровкой помимо фильтрации выбросов и шумов, не относящихся к шуму неба, а также фильтрации осцилляций делается ещё одна процедура — бланкирование радиоисточников, чтобы их сигнал не участвовал при построении регрессии (1.21), что необходимо по двум причинам. Во-первых, появление трека Солнца в летнее время, интенсивность которого невозможно промоделировать. Во-вторых, модель GSM плохо аппроксимирует уровень сигнала радиоисточников.

Пример работы метода калибровки представлен на рис. 1.21 для частоты 155.5 МГц. На левой панели приведено сравнение формы дневных вариаций шума в приемном канале после калибровки и модельного шума. На правой панели приведено построение линейной регрессии экспериментальных данных на модельные, в результате чего были получены g и $P_{\text{шп}}$. Хорошее согласие между формами временных рядов говорит о том, что модель шумовой температуры антенны хорошо аппроксимирует шумы, наблюдаемые на ИРНР. Выброс вблизи 05 LT на графиках временного хода — это прохождение Лебедя-А через диаграмму на частоте 155.5 МГц, и, как видно, модельное значение ниже, чем реальное, что подтверждает необходимость бланкирования радиоисточников.

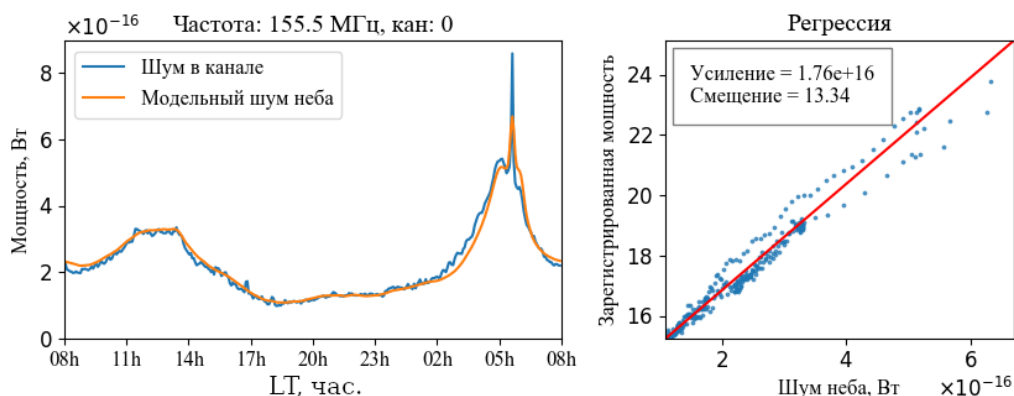


Рисунок 1.21. Результат подгонки модельного шума неба к реальным данным с помощью линейной регрессии. Справа в окне приведены полученные калибровочные коэффициенты g (усиление) и $P_{\text{шп}}$ (смещение)

На рис. 1.22 показаны АЧХ и собственные шумы приемного тракта ИРНР, полученные по результатам калибровки на каждой рабочей частоте. Форма АЧХ, характерна для периода с 2015 по 2020 гг., когда наблюдения шума неба производились в 11 приемных каналах, центральные частоты которых отмечены на оси абсцисс. Ширина полосы каналов по уровню -3 дБ равнялась ~ 625 кГц, в то время как расстояние между частотами составляло ~ 820 кГц, что приводило к наличию видимых «полос» в частотно-временном распределении мощности сигнала. Ошибка определения коэффициентов также растет в промежутках между центральными частотами. Помимо статистической ошибки, полученной по МНК, имеют место систематические ошибки, связанные с неотфильтрованными шумами, дневным температурным ходом параметров приемного тракта и расхождениями с моделями шума неба и ДН. Кроме того, несмотря на то что, что применялась фильтрация осцилляций, описанная ранее, в собственных шумах они все равно проявляются из-за дневного хода фазы осцилляций. Для снижения ошибки калибровочные коэффициенты дополнительно сглаживаются. Частотные каналы приемника ИРНР не были привязаны к аналоговой части схемы, а задавались цифровым методом, поэтому если центральная частота канала, требующего калибровки, отличается от частот 11 радиоастрономических каналов, то используются огибающие g и $P_{\text{шп}}$, полученные путем полиномиальной интерполяции их значений на центральных частотах (серая линия на графике усиления). После 2021 г. необходимость интерполяции исчезла, поскольку полоса приемника стала существенно шире.

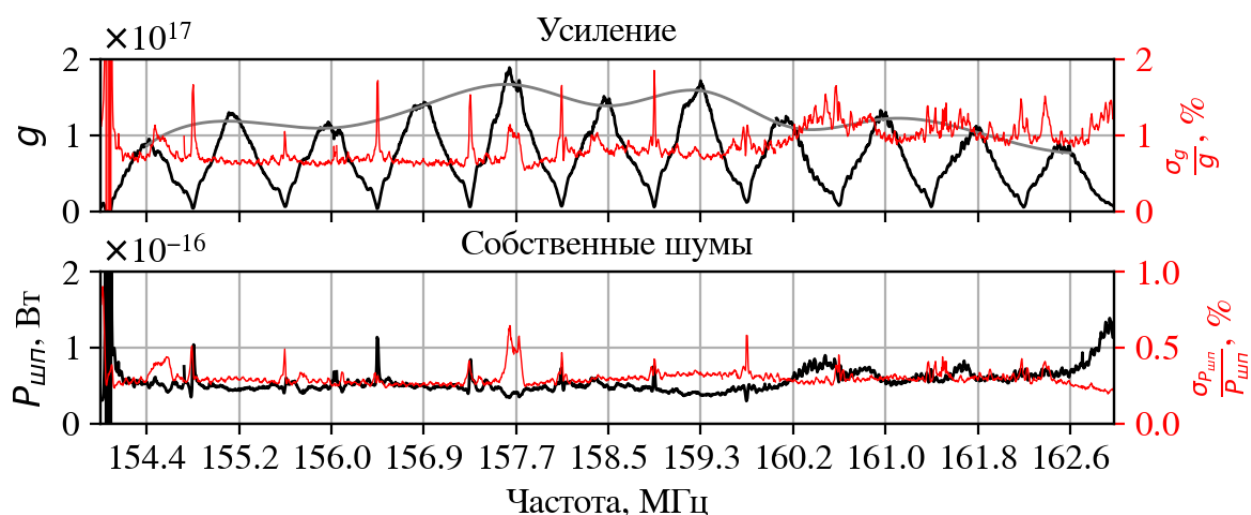


Рисунок 1.22. АЧХ и собственные шумы приемного тракта ИРНР по результатам калибровки для 29.06.2015. По оси абсцисс отмечены центральные частоты наблюдения в режиме сканирования. Серой линией на графике АЧХ построена огибающая по значениям на центральных частотах. Красными линиями показаны относительные ошибки МНК

Результаты калибровки в некоторые дни обладают слишком высокой ошибкой, что не позволяет их использовать. В разные периоды наблюдений причинами этого служили следующие факторы: ночное освещение антенны шумящими светодиодными лампами, работающие вблизи приемника электроприборы, строительные и ремонтные работы, несанкционированные помехи от гражданских радиоприборов, появление резонансных колебаний в первых ступенях приемника и сильный дневной ход характеристик приемника или его поломки. Так как сложно выработать единую методику фильтрации таких дней, ошибочные калибровочные коэффициенты фильтруются вручную.

Учитывая, что параметры антенно-фидерного тракта и приемника меняются со временем и зависят от температуры окружающего воздуха, возникает необходимость проводить калибровку чаще, чем один раз в день. Можно попытаться разбить дневные наблюдения шума неба на несколько интервалов времени и вычислять коэффициенты линейной регрессии для каждого интервала. Однако в этом случае метод не дает стабильных результатов — значения коэффициентов обладают слишком большим разбросом, теряется преемственность между соседними интервалами калибровки и близкими частотами. Известно, что ошибка оценки коэффициентов по МНК уменьшается при повышении дисперсии данных, что видно из формул для стандартных отклонений коэффициентов линейной регрессии $y = kx + b$ [Taylor, 1996]:

$$\begin{aligned}\varepsilon_i &= y_i - kx_i - b, \\ \sigma_k &= \sqrt{\frac{\sum \varepsilon_i^2}{(n-2) \sum (x_i - \bar{x})^2}}, \\ \sigma_b &= \sigma_k \sqrt{\frac{1}{n} \sum x_i^2}.\end{aligned}\tag{1.22}$$

В знаменателе стандартного отклонения σ_k стоит отклонение переменной x от среднего, поэтому, если значения обладают большим разбросом, ошибка будет меньше. Таким образом, проводить калибровку архивных данных ИРНР чаще чем один раз в день нецелесообразно с точки зрения возрастания ошибки.

1.6 Результаты калибровки

Полученные калибровочные коэффициенты используются для преобразования мощности в относительных единицах в абсолютную мощность в Вт по формуле (1.10). В радиоастрономическом режиме калибруются как данные сканирования, так и отслеживания радиоисточников. Для режима сканирования результат наиболее нагляден. На рис. 1.23–1.26 показаны исходные и калиброванные спектры принятого сигнала в 2011, 2013, 2015 и 2024 гг. В данных после 2017 г. используется режим отслеживания, поэтому они не так показательны, а в 2024 г. проводились специальные эксперименты с использованием только режима сканирования. На верхних панелях рисунков показаны спектры мощности сигнала на выходе АЦП, на нижних панелях — спектр откалиброванной мощности в Вт, отнесенной ко входу приемника. Благодаря калибровке радиоисточники стало легче различать. На фоне треков виден галактический диск, а в целом спектр становится больше похож на модель шумовой температуры. Проведем краткий разбор каждого рисунка.

На рис. 1.23, 06.06.2011, видны основные радиоисточники: Солнце (02:00–09:00 UT), Лебедь-А и его зеркальное отражение (18:00–24:00 UT), Кассиопея и её зеркальное отражение (00:00–02:30 UT, частоты ниже 152 МГц). Зеркальный относительно 154 МГц сигнал возникает из-за отражения от дальнего конца антенны. Каждый трек сопровождается сверху дополнительным треком, возникающим из-за прохождения радиоисточников через боковой лепесток ДН. На галактическом диске на этом и следующих рисунках различимы треки других радиоисточников, которые особенно заметны при повышении контраста изображения. Новые видимые радиоисточники — это одно из преимуществ анализа спектров мощности по сравнению с анализом коэффициента когерентности, который более чувствителен к помехам и где эти источники не проявляются. Видно, что присутствующее в изначальном спектре повышение мощности к середине диапазона частот полностью отсутствует в картине после

калибровки. На некоторых частотах в нижней части диапазона присутствуют краткосрочные помехи, периодически появляющиеся весь день. Калибровка на этих частотах была провальной — в абсолютной мощности на их месте находятся белые линии.

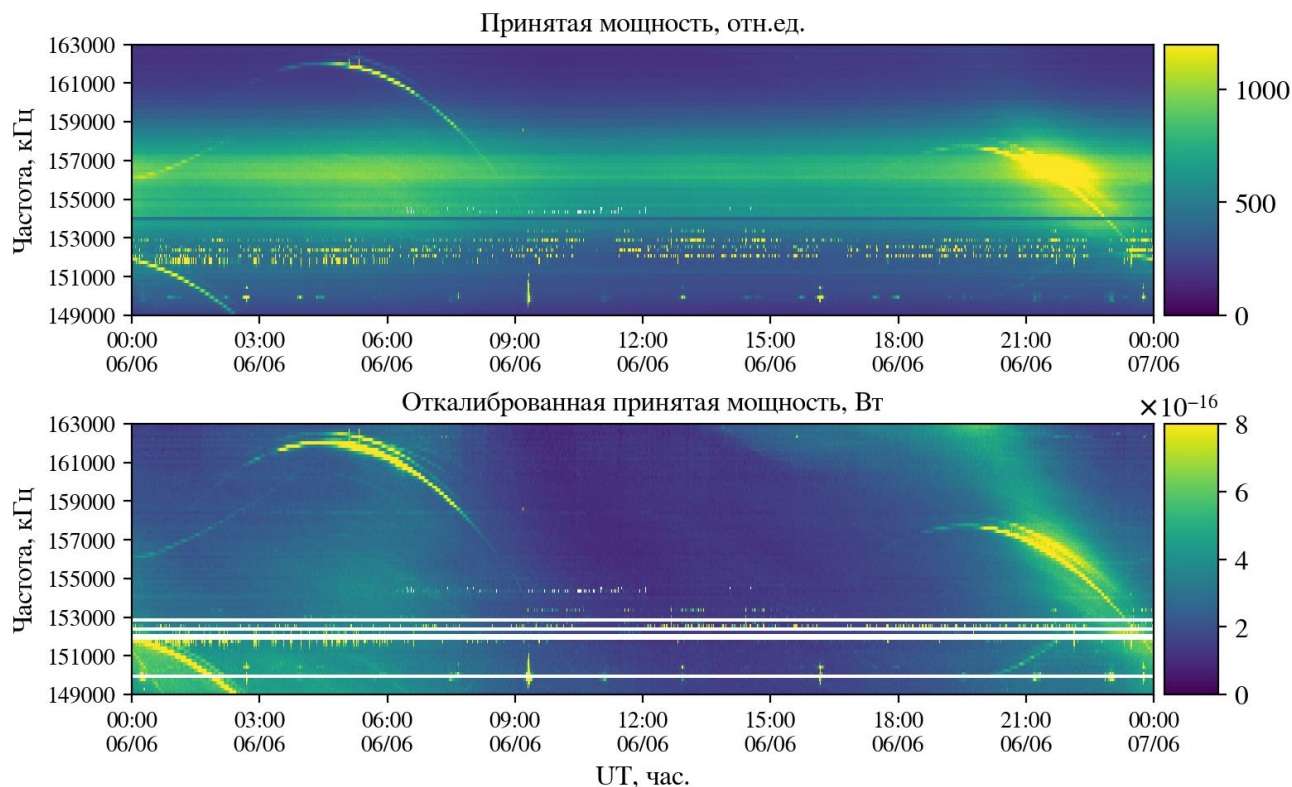


Рисунок 1.23. Результат калибровки 06.06.2011: исходная принятая мощность в относительных единицах (верхняя панель) и абсолютная принятая мощность (Вт) после калибровки (нижняя панель)

Время наблюдений на рис. 1.24 приходится на весну (08.03.2013), поэтому положение радиоисточников смещено, а основного трека Солнца нет. Здесь калибровка четко выявила появление широкополосных помех. Заметно, как поменялась АЧХ по сравнению с предыдущим рисунком: в исходных спектрах в 2011 г. минимум сигнала был в области верхних частот, в то время как на графике для 2013 г. минимум в нижних частотах. При этом, несмотря на увеличение числа помех, равномерный шум неба и галактический диск все равно проявляется после калибровки.

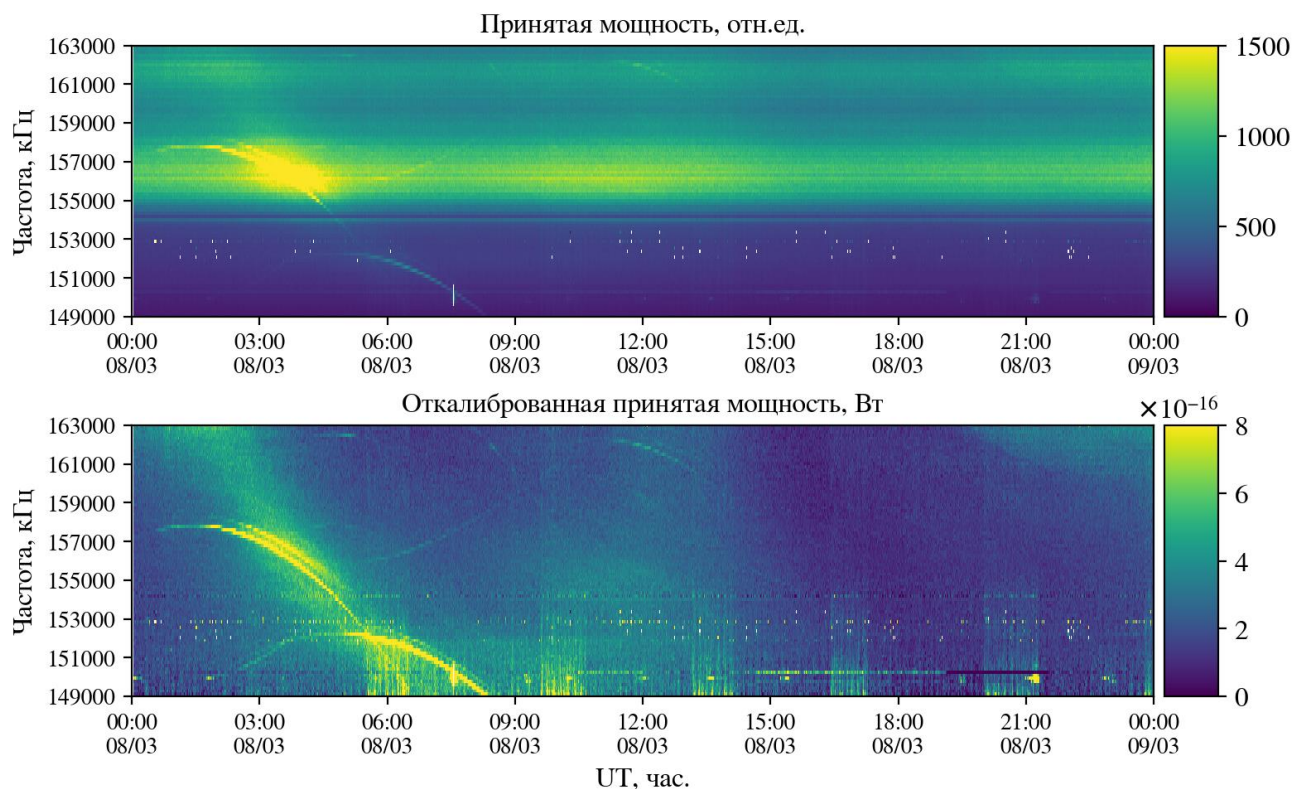


Рисунок 1.24. Результат калибровки 08.03.2013

В 2015 г. (рис. 1.25, 22.06.2015) диапазон уменьшился до 154–163 МГц, в спектрах появились полосы и, тем не менее, алгоритм калибровки позволяет получить ровный спектр абсолютной мощности. В этот и следующий дни на Солнце наблюдалась мощная радиобуря, поэтому видно существенное утолщение трека, а также множество его копий, смещенных по частоте, — это сигнал от Солнца попадает в разные боковые лепестки азимутальной ДН. На изображении был специально увеличен контраст для того, чтобы лучше выявить сигнал в боковых лепестках. Слабые горизонтальные линии соответствуют осцилляциям АЧХ. Они фильтруются перед почастотной калибровкой для повышения надежности метода, но в итоговых спектрах их фильтровать нельзя, поскольку это повлияет на корректную оценку абсолютных значений мощности.

После модификации 2021 г. приемник стал работать по принципу прямого преобразования, без переноса полосового сигнала на промежуточную частоту. Полоса аналоговой части приемника стала ограничена только диапазоном 149–163 МГц, поэтому «полосы» частотных каналов в спектре принятого сигнала исчезли (рис. 1.26). Тем не менее неравномерность АЧХ все равно присутствует, и калибровка позволяет от неё избавиться. Также как и в 2015 г., в продемонстрированный день наблюдается радиовсплеск на Солнце. В весеннее время Солнце находится вне 30-градусного сектора обзора ИРНР и при низкой активности не

видно, но из-за интенсивного радиовсплеска отчетливо видны треки в боковых лепестках ДН. В то же время, с 00:00 до 06:00 UT в диапазоне 154–158 МГц наблюдается Лебедь-А.

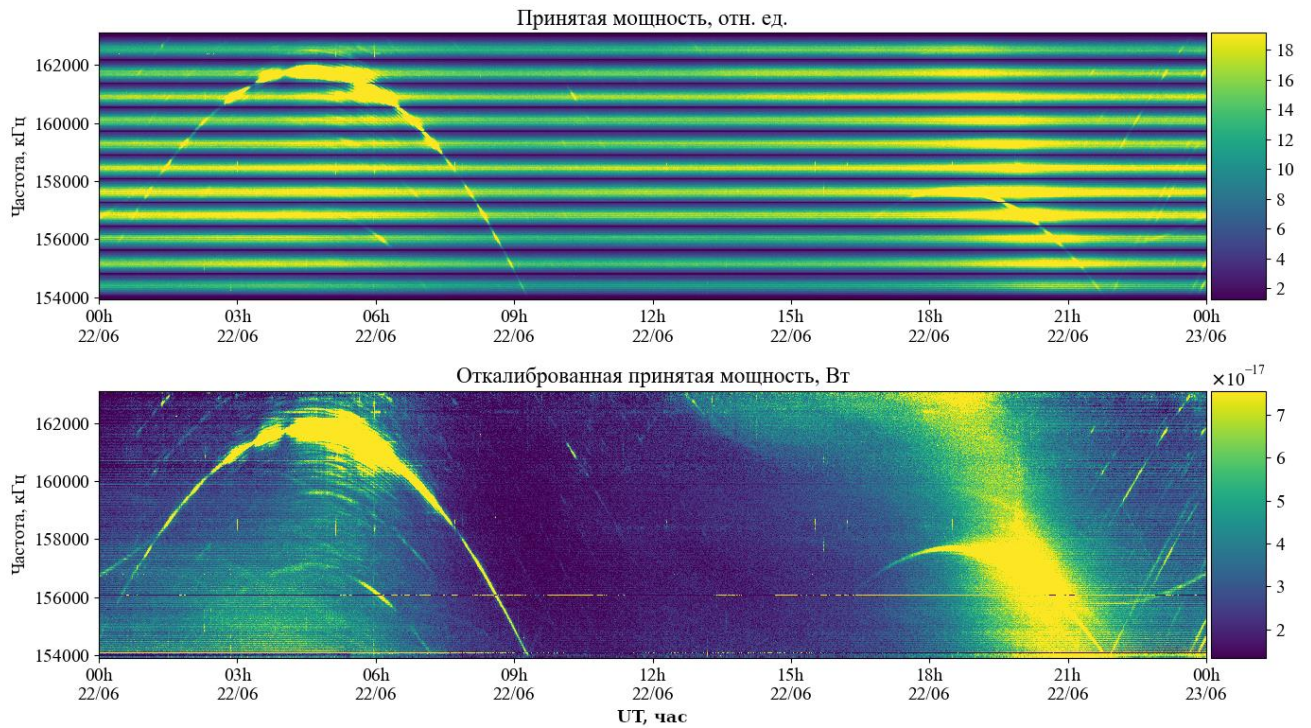


Рисунок 1.25. Результат калибровки 22.06.2015

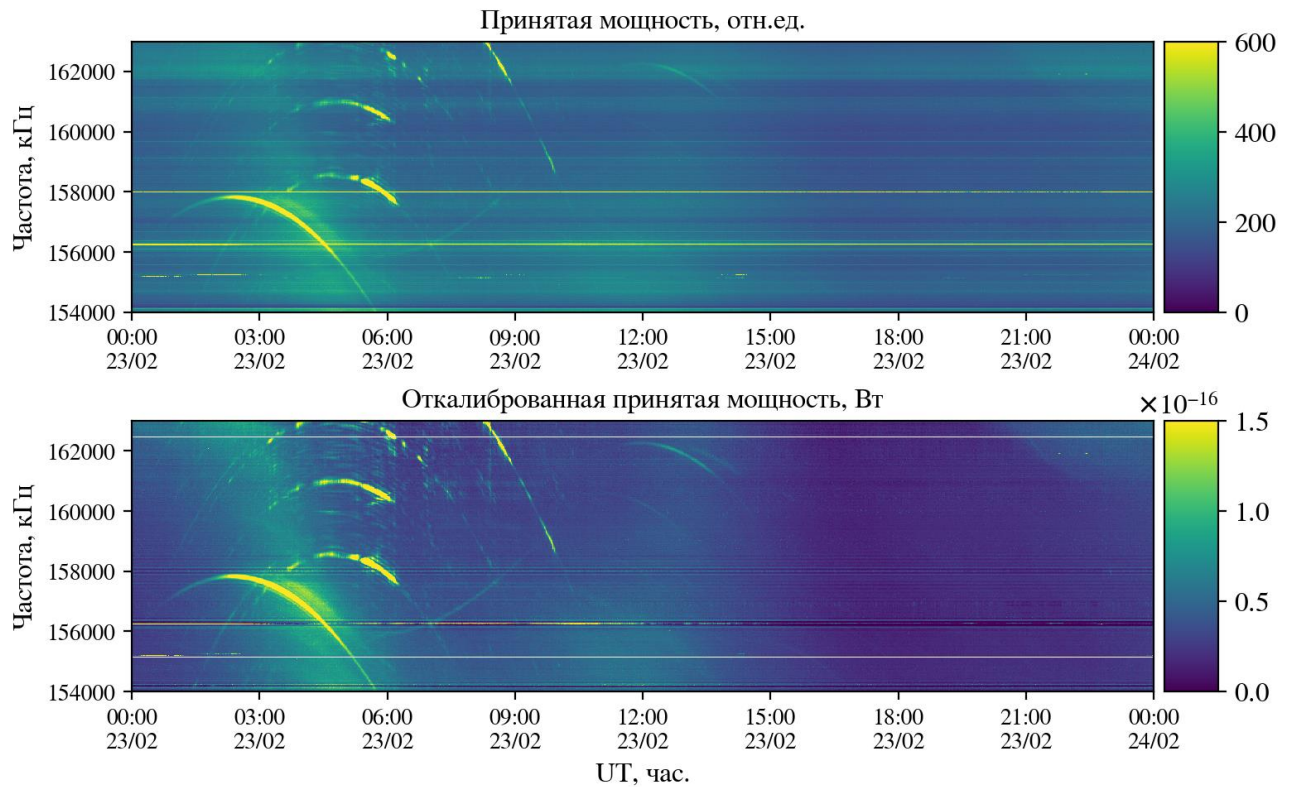


Рисунок 1.26. Результат калибровки 23.02.2024

Сравнивая рисунки, можно заметить разницу в шкалах для значений откалиброванной мощности, причиной чему служит разница в ширине полос частот ($P = kTB$). До 2015 г. полоса составляла 50 кГц для каждого отсчета в частотно-временном распределении мощности, а после приемная полоса 1 МГц разбивалась преобразованием Фурье на 256 отсчетов, каждый с полосой 3.9 кГц. Мощность в отдельных отсчетах уменьшилась в ~ 12 раз при соответствующем повышении частотного разрешения. В 2024 г. полоса приемника была увеличена до 2 МГц при тех же 256 отсчетах в спектре, в следствие чего полоса увеличилась до 7.8 кГц и, соответственно, мощность возросла в 2 раза.

Калибровка данных режима сканирования служит первым этапом перед получением более практичных измерений мощности солнечного излучения и данных активных режимов. Зная калибровочные коэффициенты на каждой частоте не сложно откалибровать треки радиоисточников. Положение трека определяется согласно разделу 1.3.2, после чего он вырезается из частотно-временного распределения в некоторой полосе, обычно 100 кГц, калибруется и суммируется по частоте. На рис. 1.27 показан солнечный поток, полученный после абсолютной калибровки принятой мощности, во время радиовсплеска.

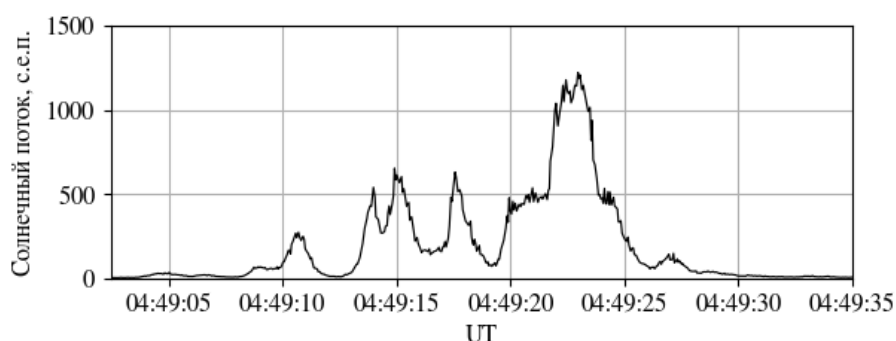


Рисунок 1.27. Абсолютный солнечный поток во время радиовсплеска 22.05.2021

Помимо треков Солнца также измерялась мощность от Лебедя-А, поскольку на нем наблюдаются мерцания, но они не исследовались в рамках данной диссертации. Сравнение уровня мощности от Лебедя-А с ожидаемым, согласно радиоастрономическим каталогам (3С), показало варьирующиеся различия в пределах 10 %.

Одновременно работать в активном и пассивном режимах радар ИРНР не может, поэтому если необходимо откалибровать данные активных измерений используется два метода. Во-первых, можно измерить дневной ход шума неба в активном режиме. Это актуально при ионосферных наблюдениях, благодаря тому что рабочая частота не изменяется в течение дня. Измерением шума может служить либо самый конец развертки принятого сигнала, где некогерентное рассеяние уже очень слабое и превалируют шумы, либо крайние части спектра

всей развертки сигнала, потому что спектр НР сконцентрирован в узкой полосе шириной до 20 кГц вблизи центральной частоты. Оба способа позволяют получить дневной ход шума неба наподобие того, что продемонстрировано на рис. 1.21 и провести калибровку. Второй метод предполагает интерполяцию значений калибровочных коэффициентов, полученных в радиоастрономическом режиме в соседние дни наблюдений. Это больше подходит для спутникового режима, где измерения проводятся на произвольных углах и частоте. Наилучшие результаты в этом методе дает сплайн-интерполяция.

Помимо вышеописанной процедуры калибровки, на ИРНР проводились измерения характеристик приемного тракта вручную с помощью генераторов шума, генераторов сигналов и спектроанализаторов. Результаты этих измерений отличаются от получаемых с помощью калибровки по модели шумовой температуры, потому что измерения с помощью приборов не включают коэффициент усиления антенны и потери в антенно-фидерном тракте, поскольку приборы возможно подключить только ко входу приемника вместо антенного выхода. Для совершенствования метода калибровки необходимо внедрение аппаратного устройства-калибратора в будущих версиях приемника, которое позволит регулярно подавать известный сигнал напрямую в фидерную часть антенны. В этом случае единственной неизвестной величиной остается только коэффициент усиления антенны, который можно найти моделированием или калибровкой по шуму неба. Реализация такого устройства также решит проблему с периодичностью калибровки и позволит проводить её несколько раз в день совместно с другими измерениями.

1.7 Калибровка передающего тракта

Предыдущие разделы были посвящены абсолютной калибровке принятой мощности, однако этого недостаточно для определения каких-либо физических параметров, как в НР, так и в спутниковом режимах. Во-первых, необходимо знать излучаемую мощность $P_{\text{и}}$, а во-вторых, в передающем тракте есть дополнительные неизвестные потери $L_{\text{и}}$ (см. формулы (1.15) и (1.16)).

Излучаемая мощность $P_{\text{и}}$ на ИРНР может варьировать в пределах 2–3.2 МВт и первый этап калибровки передающего тракта включает в себя регулярный контроль и запись значений излучаемой мощности. Передающая система ИРНР включает три передатчика: по одному передатчику на каждый работающий в данный момент полурупор и один резервных передатчик. $P_{\text{и}}$ в каждом полурупоре измеряется аналоговыми датчиками и отображается на аналоговых приборах. Для регистрации мощности в цифровом виде была разработана система удаленного контроля и телеметрии передатчиков на основе микроконтроллера STM-32 с передачей данных по Ethernet кабелю, подключенному к местной локальной сети. Система подключена к пульту со

старым аналоговым оборудованием станции, управляющим режимом работы передатчиков, и позволяет снимать показания аналоговых датчиков мощности и включать/выключать передатчики по отдельности. Данные снимаются каждые 2 секунды во время активных режимов работы начиная с 2014 г. На рис. 1.28, *а* показан пример измерений мощности в течение дня. Черной линией показаны измерения мощности, а красной линией помечено бегущее среднее. В течение дня $P_{\text{и}}$ немного варьируется сама по себе, но также может меняться при повышении анодного тока ламп вручную. На рис. 1.28, *б* приведены распределения $P_{\text{и}}$ за период 2015–2024 в нижнем и верхнем каналах (полурупорах) и можно сделать вывод, что суммарная мощность в основном лежит в пределах 1.6–3.2 МВт. Бимодальная форма распределения скорее всего связана с периодами наблюдений, когда лампы бегущей волны, являющиеся основным усилительными элементами передатчиков, работают в предельном и щадящем режимах. Работа на меньших мощностях позволяет продлить жизнь лампы. Важна не только суммарная мощность, но и соотношение мощностей в полурупорах, поскольку в случае дисбаланса в рупоре появляются волны высших типов, влияющие на форму ДН [Лебедев, 2015].

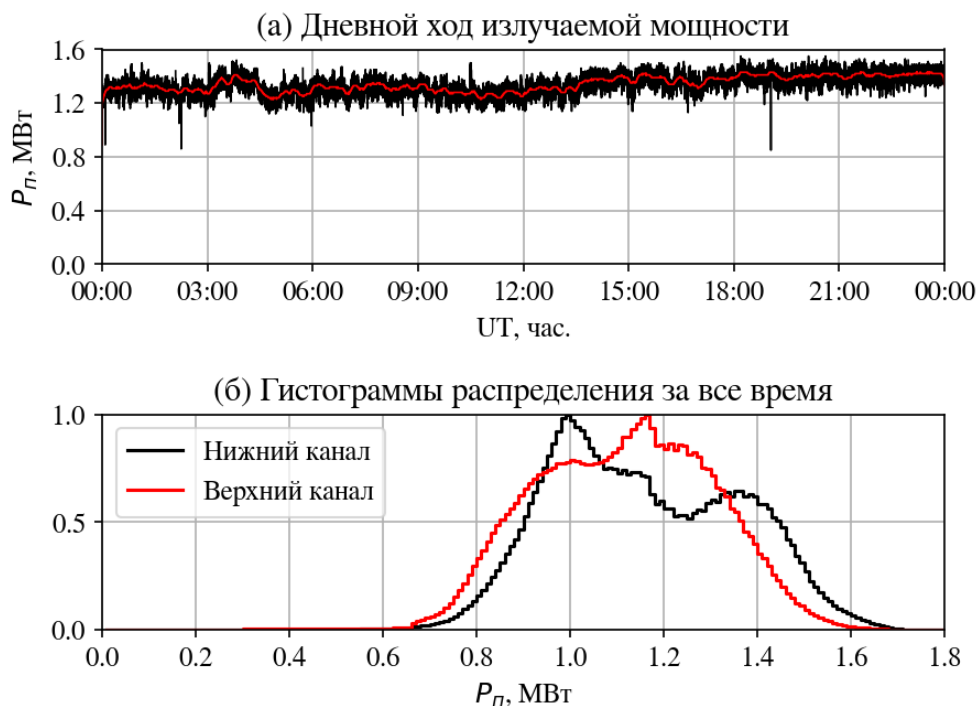


Рисунок 1.28. Измерения излучаемой мощности. (а) Пример измерений в одном полурупоре в течение дня. (б) Гистограммы распределений излучаемой мощности в каналах (полурупорах) за все время измерений

Приближенную оценку потерь $L_{\text{и}}$ можно получить по измерениям электронной концентрации, проводимым на ИРНР и основанными на анализе фарадеевских замираний в

профиле принятой мощности. При распространении линейно поляризованной волны в находящейся в магнитном поле ионосферной плазме, происходит вращение её плоскости поляризации пропорционально электронной концентрации N_e . В результате рассеянная волна будет периодически ослабляться поляризационным фильтром, что на профиле мощности видно, как проседание уровня сигнала (замирение) [Shpynev, 2004]. По положению замираний можно восстановить профиль N_e и при этом не нужно знать мощность в ваттах, важна именно форма. На ИРНР используется малопараметрическая подгонка модельной ионосферы, представляющей собой комбинацию из двух слоев Чепмена [Алсаткин и др., 2020; Алсаткин, 2023]. Результаты работы метода определения N_e на высотах до высоты максимума ионосферы сравнивались с данными ионозондов. Получив высотный профиль N_e по этому методу, можно вычислить мощность сигнала некогерентного рассеяния $P_{нр}$, ожидаемую при данном N_e , по формуле (1.15). В выражение также входит отношение температур электронов и ионов, которое для данной задачи было выбрано согласно модели IRI [Bilitza et al., 2017].

При калибровке передающего тракта $P_{нр}$ служит опорной величиной, которая сравнивается с абсолютной принятой мощностью $P_{п}$ для определения потерь. На рис. 1.29 показаны 5 дней ионосферных наблюдений, для которых были получены временные профили $P_{п}$ и $P_{нр}$ (1, 2 панели). В летнее время ионосферная концентрация высока практически весь день, и ослабевает только ночью. Характерные волны в профилях — это фарадеевские замирения, минимумы которых размыты из-за свертки с излучающим импульсом. На панели 3 показано отношение мощностей, где видны высоты, на которых преобладает $P_{п}$ или $P_{нр}$. На высотах выше 500 км расхождение становится сильнее, причиной чему может быть двухслойная модель Чепмена, используемая при оценке N_e , плохо аппроксимирующая верхние слои ионосферы. На панели 4 приведено среднее отношение, вычисленное в диапазоне высот 300–450 км. Отношение имеет достаточно стабильное значение и выражает неучтенные потери в передающем канале, равные ~ 0.4 .

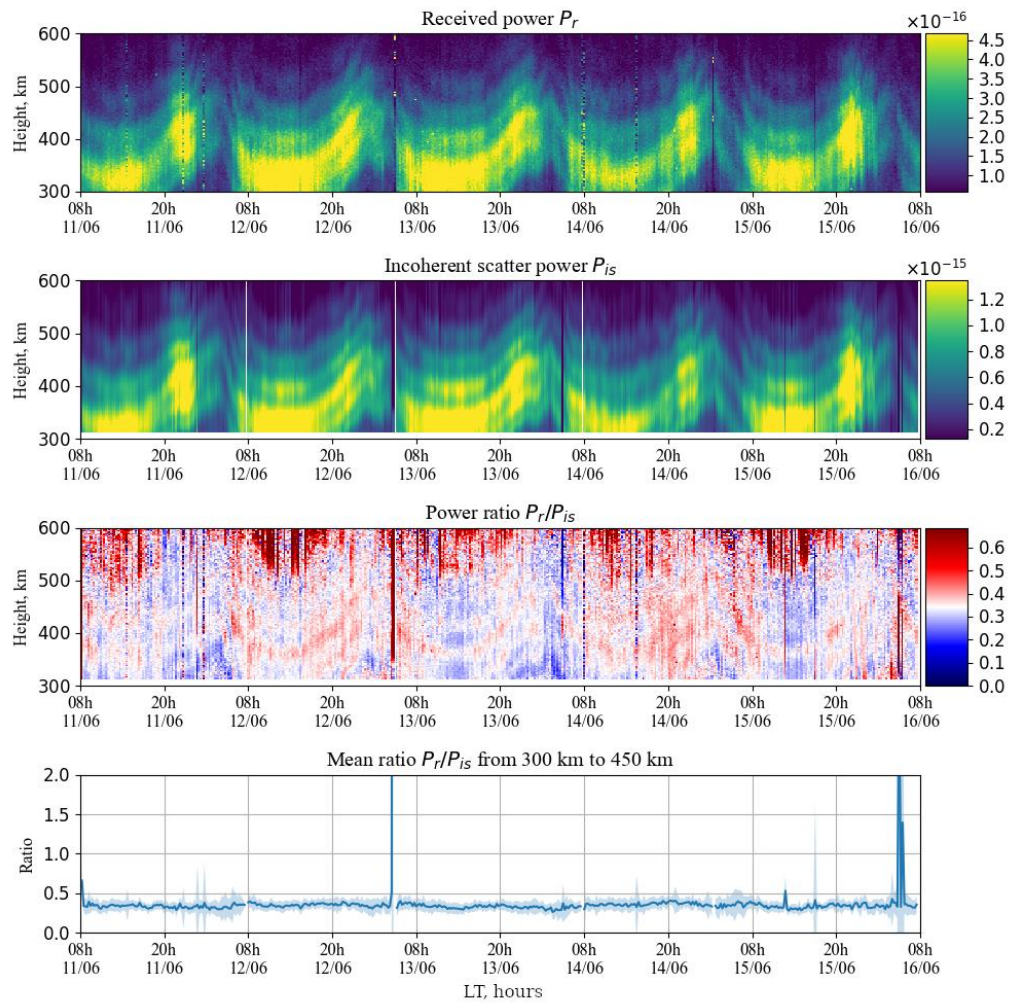


Рисунок 1.29. Сравнение значений абсолютной принятой мощности, полученных в результате калибровки и путем восстановления профиля мощности сигнала некогерентного рассеяния методом фарадеевских замираний. Сверху вниз – мощность принятого сигнала P_p , мощность сигнала НР $P_{нр}$, отношение мощностей $P_p/P_{нр}$, среднее значение отношения в диапазоне высот 300–450 км

ГЛАВА 2. Абсолютные измерения потока солнечного излучения

Одной из основных задач солнечно-земной физики является наблюдение солнечного излучения в радиодиапазоне, так как оно отражает структуру и динамику солнечной атмосферы [Shibasaki et al., 2011]. При этом механизмы и источники радиоизлучения разных диапазонов существенно различаются. Выделяют 1) радиоизлучение спокойного Солнца (фоновое излучение), соответствующее минимальному уровню интенсивности в отсутствие какой-либо активности, 2) медленно меняющуюся компоненту излучения, связанную с солнечными пятнами, и 3) спорадическое радиоизлучение, так называемые радиовсплески, связанные с проявлениями активности на Солнце, вроде корональных петель, вспышек и корональных выбросов массы. Из-за того, что концентрация солнечной плазмы падает с высотой, положение источников радиоизлучения удаляется от Солнца с ростом длины волны, а нижележащие источники экранируются более плотными слоями солнечной атмосферы. В сантиметровом и миллиметровом диапазонах радиоизлучение происходит из хромосферы и нижних слоев короны, а на метровых волнах (30–300 МГц) и в более длинноволновом диапазоне радиоизлучение генерируется в верхних слоях солнечной короны [Benz, 2009]. Поэтому с увеличением длины волны соответственно увеличиваются видимые размеры Солнца. Кроме того, из-за рефракции радиоволны отклоняются от направления на центр диска, что ещё сильнее усиливает эффект возрастания размера [Kundu et al., 1977].

От длины волны также зависит механизм излучения. Фоновая и медленно меняющаяся компоненты радиоизлучения в метровом диапазоне обусловлены тормозным излучением, возникающим из-за торможения заряженных частиц в плазме за счет кулоновских взаимодействий. В более коротковолновых диапазонах к тормозному добавляется магнитотормозное излучение, возникающее за счет вращения электронов вокруг линий магнитного поля, особенно мощного в области солнечных пятен. Вклад магнитотормозного и теплового излучений в меняющуюся компоненту радиоизлучения может быть сравним уже в декаметровом диапазоне [Dudok et al., 2014; Altyntsev et al., 2023].

Актуальность исследований радиоизлучения спокойной и активной солнечной короны обусловлена тем, что крупно- и среднемасштабные структуры в короне, такие как корональные дыры и стримеры [Alissandrakis, 1991], имеют определяющее влияние на геомагнитную активность [Zirker, 1977]. Низкочастотное радиоизлучение короны более чувствительно к плотности корональной плазмы и менее чувствительно к температуре, что позволяет наблюдать параметры корональных структур, отличные от видимых в рентгеновском и крайнем

ультрафиолетовом диапазоне, и составить более полную картину о происходящих процессах [Lantos, 1999].

Спорадическое радиоизлучение, радиовсплески, в метровом диапазоне разделяют на 5 основных типов в зависимости от их формы, длительности и частотного покрытия. Всплески типа I, иначе называемые радиобурями (radio storm) [Elgaroy, 1977], — это длительные серии коротких (около 1 с) скачков интенсивности, наложенные на широкополосное радиоизлучение с непрерывным спектром, продолжительностью от нескольких часов до недель. Основной теорией их возникновения считаются слабые магнитные пересоединения над активными областями, приводящие к излучению на плазменной частоте. Тип II связан с корональными выбросами массы, ударная волна от которых возбуждает радиоизлучение на плазменной частоте [Wild, 1950]. Они имеют характерную спектральную форму: две линии на плазменной частоте и её гармонике, убывающие по частоте со скоростью, соответствующей скорости прохождения выброса через корональную плазму. Радиовсплески типа III принципиально похожи на тип II с той разницей, что скорость их дрейфа по частоте значительно выше, поскольку они возникают вследствие распространения электронов с близкими к релятивистским скоростями [Reid, Ratcliffe, 2014]. Тип IV характеризуется широкополосным непрерывным спектром, охватывающим диапазон от дециметровых до сантиметровых волн [Pick, 1986], появляется на фазе спада солнечных вспышек и связан с электронами, захваченными в магнитную ловушку. Выделяют также перемещающиеся радиовсплески типа IV, возникающие либо после корональных выбросов массы вслед за радиовсплесками типа II, либо в расширяющихся магнитных арках [Pick, Vilmer, 2008]. Радиовсплески типа V наблюдают на частотах ниже 150 МГц после возникновения радиовсплесков типа III и связывают с тем, что часть электронов, возбуждающих тип III захватывается в магнитную ловушку и излучает на гармониках плазменной частоты несколько минут после лидирующего радиовсплеска [Железняков, Зайцев, 1968]. Радиовсплески разных типов метрового диапазона позволяют получить информацию о процессах на Солнце, недоступную другим методам.

2.1 Наблюдение Солнца на ИРНР

Астрономические инструменты, используемые для наблюдения за Солнцем в метровом диапазоне, включают как низкочувствительные радиоспектрополяриметры с простыми дешевыми антеннами, предназначенные для регистрации наиболее интенсивных радиовсплесков, так и крупные радиоинтерферометры, получающие полное изображение Солнца. Основной проблемой при создании инструментов метрового диапазона, приводящих к

удорожанию, является их размер — антенные системы занимают сотни и тысячи квадратных метров.

В таблице 2.1 сравниваются инструменты метрового диапазона, используемые для наблюдения Солнца, с указанием их меридионального расположения и чувствительности по потоку SEFD (формула (1.7)). Для некоторых инструментов чувствительность была приведена в соответствующих статьях, для остальных вычислялась на основе эффективной площади антенны $A_{\text{эфф}}$ и шумовой температуры системы T_c . Для ИРНР T_c складывается из среднего уровня шумов неба 337 К и шума каналов каждого полурупора (~ 40 К/канал, $NF = \sim 0.56$ дБ), оцененного по результатам калибровки. На большинстве приведенных инструментов тем или иным методом проводилась калибровка по потоку. Callisto [Benz et al., 2005] — это международная сеть, состоящая из более чем 100 солнечных радиоспектрометров, расположенных по всему миру и получающих спектр радиоизлучения Солнца в очень широком диапазоне. Антенны многих радиоспектрометров неподвижны, и достаточная длительность наблюдений обеспечивается благодаря широкой ДН. Продвинутое инструменты обладают системой слежения за Солнцем, наиболее часто выполняемой в виде механической поворотной системы для параболической антенны. Более чувствительные радиоспектрометры и радиоспектрографы включают: японский IPRT/AMATERAS [Iwai et al., 2012] (последние публичные данные датируются 2022 г.), греческий ARTEMIS-IV [Kontogeorgos et al., 2006], индийский GLOSS (Gauribidanur Lowfrequency Solar Spectrograph) [Kishore et al., 2014] из 8-и элементной линейной решетки логопериодических антенн, новый китайский радиоспектрометр в Чашани (Chashan solar spectrometer) [Chang et al., 2024] и французский ORFEES обсерватории Нансэ [Namini et al., 2021]. На территории Сибирского Радиогелиографа также имеется радиоспектрометр, работающий в диапазоне 50–3000 МГц.

Радиоинтерферометры позволяют получить угловое распределение интенсивности радиоизлучения и состоят из разнесенных друг от друга антенн. Единственным радиоинтерферометром метрового диапазона, специализирующимся на изучении Солнца, является радиогелиограф обсерватории Нансэ (NRH — Nancay Radio Heliograph) [Kerdran, Delouis, 1997] (современное описание на сайте обсерватории <https://www.obs-nancay.fr/>). Несмотря на то, что он состоит из 47 антенн, его общая эффективная площадь мала по сравнению с другими радиоинтерферометрами из-за небольшого размера антенн (2–10 м). Остальные приведенные радиотелескопы имеют общее, радиоастрономическое назначение: австралийский MWA (Murchison Widefield Array) [Lonsdale et al., 2009; Tingay et al., 2013], индийский GMRT (Giant Metrewave Radio Telescope) [Intema et al., 2017], чувствительность которого должна была вырасти ещё сильнее после последнего обновления до 56 антенн [Patra et

al., 2018], и LOFAR [Haarlem van et al., 2013; Vocks et al., 2018; Darowski et al., 2025], включающий 52 станции, из которых 38 находится в Голландии, а остальные 14 распределены по Европе. Однако, эксперименты по исследованию Солнца на радиотелескопах общего назначения проводятся редко.

Таблица 2.1. Характеристики и чувствительность радиотелескопов и радиометров метрового диапазона, проводящих наблюдение Солнца, на частоте 160 МГц

Инструмент	Меридиан	Диапазон, МГц	Тип	Антенна	Аэфф, м ² (160 МГц)	T _{сист} , К (160 МГц)	SEFD, кЯн (160 МГц)
Callisto	- -	80–800	Солнечный радиоспектрометр	Лог. 6 дБ	1	600 ¹	1656
				Параб., 5 м	12		138
GLOSS	77°26'E	40–440	Солнечный радиоспектрограф	Лог. 6.7 дБ × 8	10.6	640	167
ORFEES	2°11.5'E	144–1004	Солнечный радиоспектрограф	Параб., 5 м	12	600 ¹	138
IPRT/AMATE RAS	140°41'E	100–500	Солнечный радиоспектрометр	Асимм. параб. 31 м × 16.5 м × 2	35	1500	118
ARTEMIS-IV	22°41'E	100–650	Солнечный радиоспектрограф	Параб. 7 м	22	800	100
Chashan solar spectrometer	113°52.2'E	90–600	Солнечный радиоспектрометр	Параб., 12 м	68	425	17
NRH	2°11.7'E	150–450	Солнечный радиоинтерферометр	47 ант., 2–10 м	410 ²	600 ¹	4
ИРНР	103°15.5'E	160–165	Радиометр	Рупор, 246 м × 12 м	1900	420	0.6
MWA	116°40.3'E	80–300	Радиоинтерферометр	128 дипольных решеток	2752	400	0.4
GMRT	74°2.9'E	125–1450	Радиоинтерферометр	Параб., 45 м × 30	885 × 30	615	0.064
LOFAR	6°52'E ³	30–240	Радиоинтерферометр	52 станций, решетки 32–65 м	512–2048 × 52	560–1200	3.1–1.6 ⁴ на одну станцию

¹ $T_c = T_n + T_n$. Если T_c не приведена в доступных источниках, то полагается, что $T_c = 600$ К на 160 МГц

²Приближенная оценка по описанию системы антенн, представленной на сайте обсерватории Нансэ

³Расположение центральных станций в Голландии

⁴Измеренная чувствительность с учетом потерь в ходе обработки

Меридиональное расположение определяет, в какое время дня возможно наблюдение Солнца, и, как видно из таблицы, с ИРНР соседствует немного обсерваторий. Кроме того, благодаря большой эффективной площади антенны, ИРНР обладает высокой чувствительностью, сравнимой с некоторыми радиоинтерферометрами, и, в отличие от большинства радиоспектрометров, ИРНР может измерять поток спокойного Солнца,

составляющий единицы с.е.п. (1 с.е.п. = 10 кЯн), а также радиовсплески с невысокой интенсивностью. Все это делает результаты радиоастрономических наблюдений на ИРНР актуальными при изучении радиоизлучения Солнца в метровом диапазоне.

Начало наблюдений Солнца на ИРНР ведется со старта регулярных радиоастрономических наблюдений, с 2011 г. Солнце попадает в основной лепесток ДН в период с середины мая по август, но может проявляться в боковых лепестках во время радиобурь (см. рис. 1.26). Дневной интервал наблюдений составляет 01:00–10:00 UT, однако максимум ДН приходится на период с 03:00 до 07:30 UT, а в остальное время необходим повышенный уровень сигнала. В первых работах по радионаблюдениям ИРНР [Васильев и др., 2013; Vasilyev et al., 2013] описывалась приемная система, принцип работы ИРНР в пассивном режиме работы и методы обработки. Была показана схожесть формы сигналов от двух кратковременных радиовсплесков, измеренных во время солнечных вспышек в 2011 г., по данным ИРНР и обсерваторий Кулгура и Лермонт. Кроме того, проводилось сравнение мощности сигнала на длительном периоде времени (май-сентябрь 2011 г.) с измерениями обсерватории Нансэ, которое показало хорошее согласие. За этот период было зарегистрировано три промежутка с продолжительными усилениями мощности, которые авторы связали с шумовыми бурями. Все это подтвердило солнечную природу происхождения наблюдаемых вариаций принятого сигнала. С того времени накопился архив данных, длительностью в один солнечный цикл, включающий как множество радиовсплесков, так и измерения радиоизлучения спокойного Солнца. В ранних работах исследовалась мощность принятого сигнала в относительных единицах. Для более полного понимания физических процессов, необходима возможность сравнения с измерениями на других инструментах и в других диапазонах частот не только по форме сигнала, но и по абсолютному значению мощности, поэтому были разработаны методы для определения потока солнечного излучения.

2.2 Методы оценки потока солнечного излучения

Характеристикой интегрального излучения радиоисточников служит спектральная плотность полного потока мощности излучения S , для краткости называемая полным потоком или просто потоком и определяемая как интеграл распределения интенсивности излучения I по радиоисточнику

$$S = \iint_{\text{Ист}} I(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi. \quad (2.1)$$

Благодаря абсолютной калибровке приемного тракта на ИРНР возможно определение потока солнечного излучения в с.е.п., однако для этого требуется учесть ряд отличительных

особенностей антенны. Способ измерения потока зависит от размера радиоисточника по отношению к угловому разрешению измеряющего инструмента. Мощность сигнала в одной поляризации на входе приемника P_{π} связана с распределением интенсивности излучения I выражением

$$P_{\pi} = \frac{\lambda^2 GB}{8\pi} \iint_{4\pi} I(\theta, \varphi) F^2(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi. \quad (2.2)$$

Радиотелескопы, у которых угловое разрешение намного меньше размеров радиоисточника, позволяют получать двумерную картину распределения интенсивности излучения I и найти суммарный поток путем интегрирования по видимым размерам радиоисточника. С другой стороны, ширина ДН простых спектрополяриметров существенно превышает размеры большинства радиоисточников, поэтому значение $F^2(\theta, \varphi)$ практически постоянно в масштабах наблюдаемого радиоисточника. При этом, однако, поток излучения объекта наблюдения должен существенно превышать поток всех остальных радиоисточников, попадающих в ДН инструмента, иначе уровень шума станет сопоставимым с уровнем полезного сигнала. Для ИРНР оба этих способа определения потока солнечного излучения нельзя применить напрямую, поскольку ширина ДН составляет $0.5^\circ \times 20^\circ$, что сопоставимо с угловым размером Солнца, $\sim 0.5^\circ$. Используется два подхода к решению этой проблемы.

В первом подходе полагается, что форма распределения интенсивности излучения по диску Солнца известна. В ряде исследований угловых размеров радиоизлучения было показано, что в метровом диапазоне форма распределения для спокойного Солнца близка к эллиптической [Железняков, 1964]. Например, измерения, проводимые [Leblanc, Le Squeren, 1969] на радиоинтерферометре Нансэ на частоте 169 МГц показали, что диаметр на экваторе составляет $\sim 38'$, а на полюсе $\sim 32'$. В качестве модельного распределения для ИРНР используется эллипс с этими размерами (рис. 2.1), сглаженный гауссовым фильтром с шириной 0.25° . Тогда поток определяется как

$$S = I_0 \iint_{\text{Солнце}} I_m(\varepsilon, \gamma) \cos(\varepsilon) d\varepsilon d\gamma, \quad (2.3)$$

где (ε, γ) — антенный азимут и угол места ИРНР, I_m — модельное распределение, I_0 — масштабирующий коэффициент, соответствующий максимуму интенсивности в центре эллипса. По модельной диаграмме направленности рассчитывается интеграл в выражении (2.3), по результатам измерений определяется I_0 , после чего вычисляется полный поток. Этот подход использовался для получения первых оценок потока солнечного излучения на ИРНР для периода с 2011 по 2019 гг. Очевидный недостаток метода проявляется, когда реальное распределение интенсивности отличается от модельного, что особенно критично во время

радиовсплесков, так как в этом случае спорадическое радиоизлучение, значительно превосходящее фоновое, происходит из небольшого участка на диске. Было проведено моделирование ошибки определения потока при появлении радиовсплеска, результаты которого показаны на рис. 2.2. Использовался модельный радиовсплеск гауссовой формы с разным значением потока относительно фонового потока (ось ординат рисунка) и отклонением от солнечного экватора в направлении север-юг (ось абсцисс рисунка, отклонение вдоль экватора слабо влияет на ошибку). Наибольшая ошибка, вплоть до 50 % возникает, когда радиовсплеск находится вблизи экватора и обладает потоком, на порядок превышающим фоновый. При удалении от экватора ошибка убывает, но радиовсплески возникают над активными областями на Солнце, чаще появляющимися на малых широтах.

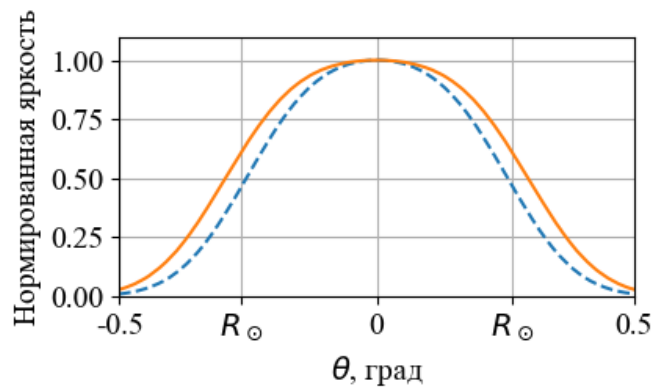


Рисунок 2.1. Модель распределения интенсивности излучения по диску Солнца. Сплошной линией обозначено направление восток-запад, штриховой — север-юг

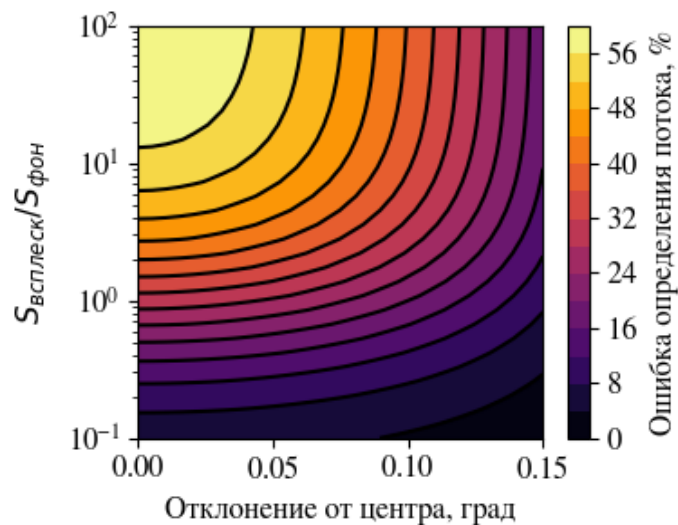


Рисунок 2.2. Относительная ошибка определения солнечного потока по первому методу при появлении радиовсплеска на Солнце

Во втором подходе используется принцип частотного сканирования ИРНР. На фиксированной частоте ДН представляет собой луч, узкий в продольном направлении относительно длинной стороны антенны и широкий в поперечном направлении (антенный азимут и угол места соответственно). Положение луча плавно меняется в продольном направлении при изменении частоты. Если проводится прием или излучение в некоторой полосе, то выходной сигнал принимает интегральное значение со всех направлений, затронутых частотами в этой полосе, что отражено в формуле (1.17) для мощности радиоастрономического сигнала. Пусть интенсивность радиоисточника $I(\varepsilon, \gamma)$ слабо меняется в пределах частотной полосы ИРНР, тогда можно ввести интегральную ДН $W(\varepsilon, \gamma)$, направление которой задается рабочей частотой f_0 :

$$W(\varepsilon, \gamma) = \int_{f_0-B_0/2}^{f_0+B_0/2} \frac{G(f)\lambda^2}{4\pi} F_{\Pi}(f, \varepsilon, \gamma) df = \int_{f_0-B_0/2}^{f_0+B_0/2} A_{\text{эфф}}(f) F_{\Pi}(f, \varepsilon, \gamma) df. \quad (2.4)$$

Из формулы (2.4) следует, что интегральная ДН $W(\varepsilon, \gamma)$ таким образом будет шире, чем моночастотный луч. Например, на центральной частоте 161 МГц при полосе $B = 1000$ кГц, ширина луча ДН в азимутальном направлении становится равной $\sim 4^\circ$, в 8 раз больше чем ширина ДН на одной частоте, как показано на рис. 2.3. Также видно, что у интегральной ДН присутствует наклон, связанный с ослаблением направленности антенны ИРНР при отклонении луча ДН от вертикали. Кроме того, ширина интегральной ДН тоже растет с частотой. Тогда ДН достаточно широкая, чтобы считать значение постоянным в пределах солнечного диска и выражение для принятой мощности будет иметь вид

$$P_{\Pi} = \frac{1}{2} \iint_{4\pi} I(\varepsilon, \gamma) W(\varepsilon, \gamma) \cos \varepsilon d\varepsilon d\gamma = \frac{1}{2} W_0 \iint_{4\pi} I(\varepsilon, \gamma) \cos \varepsilon d\varepsilon d\gamma = \frac{1}{2} W_0 S_{\text{Сол}}, \quad (2.5)$$

где $S_{\text{Сол}}$ — искомый поток солнечного излучения, W_0 — значение интегральной ДН в направлении центра диска, вычисляемое по модельной ДН, $\frac{1}{2}$ предполагает прием в одной поляризации.

Этот метод оценки потока не зависит от распределения излучения по диску Солнца, поэтому лишен недостатка первого подхода и позволяет определять поток во время радиовсплесков. Кроме того, эллиптическая модель справедлива только при спокойном Солнце, а новый подход не зависит от солнечной активности. Однако, есть недостаток, связанный с невыполнением условия постоянства $W(\varepsilon, \gamma)$ вблизи нулей ДН в поперечном направлении. Все результаты измерения солнечного потока, представленные далее, были получены с использованием нового метода.

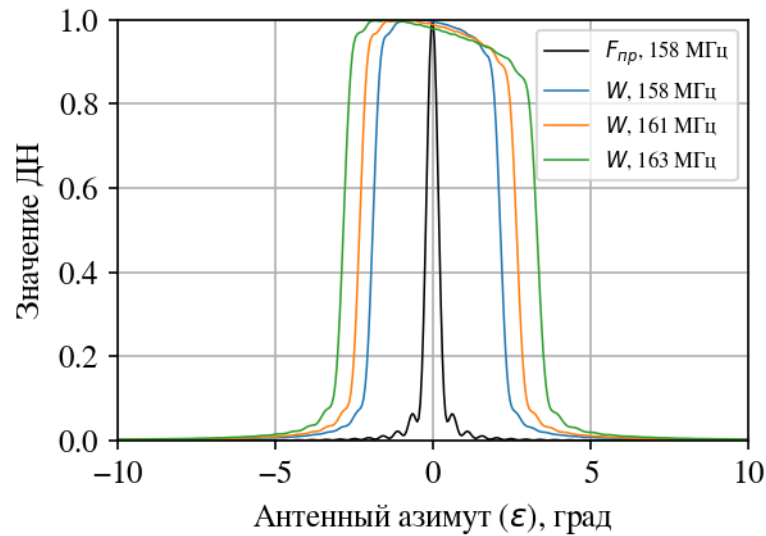


Рисунок 2.3. Сравнение формы и ширины моночастотной ДН (F_{np}) и нормированной на единицу интегральной ДН (W) в продольном направлении ($\gamma = 0$)

2.3 Модель солнечного трека

Модель ДН ИРНР [Лебедев, 2015] хорошо описывает форму дневных треков радиоисточников Лебедь-А и Кассиопея-А, однако анализ дневных измерений калиброванной мощности сигнала от Солнца показал, что на частотах выше 160 МГц форма треков значительно отличается от модельной. Так, модель предполагает гауссообразную форму с одним максимумом, в то время как в реальной мощности может наблюдаться два или три пика. На рис. 2.4 показано сравнение калиброванных треков Солнца, наблюдаемых в один и тот же день и месяц года (15.06), но за разные годы (2018, 2019, 2020). Положение Солнца в один и тот же день с годами будет немного меняться ввиду разницы между длительностью календарного и солнечного года. Видно, что форма треков в обоих полурупорах существенно отличается от гауссовой, но практически полностью сохраняется от года к году с небольшими отклонениями в нижнем полурупоре в 2018 и 2020 гг. Показаны треки за годы с низкой солнечной активностью, поэтому максимальное значение мощности почти не меняется и отражает уровень радиоизлучения спокойного Солнца. Также можно отметить значительную разницу в форме сигнала в двух полурупорах. Причиной расхождения с моделью может быть то, что частоты, на которых наблюдается Солнце, находятся в верхней части рабочего диапазона, в то время как основная проверка модели проводилась для нижней части диапазона, где луч ДН направлен ближе к вертикали.

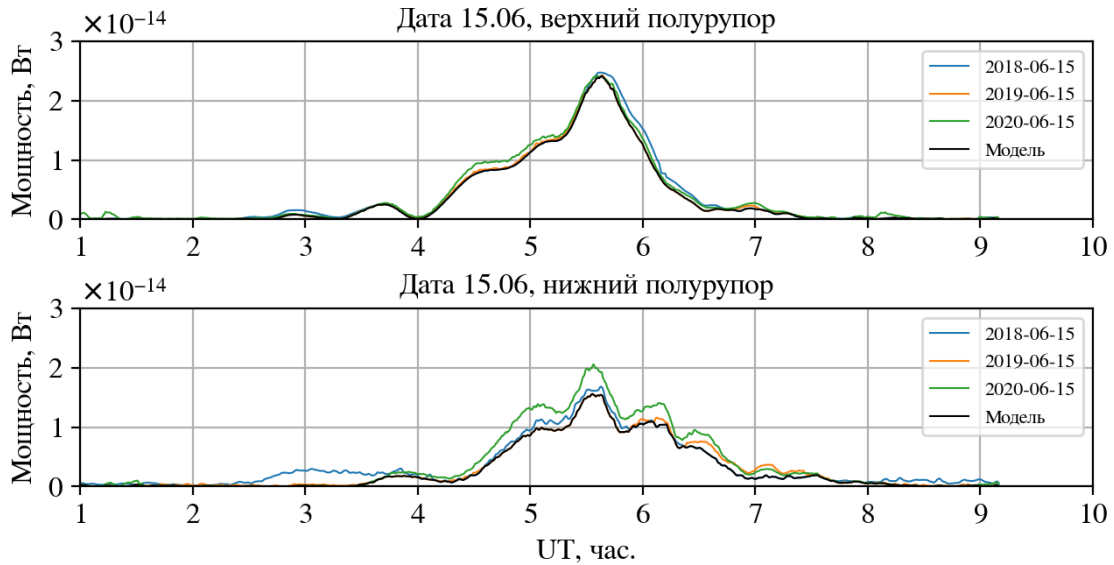


Рисунок 2.4. Сравнение формы калиброванных треков, полученных в один и тот же день года в приемных каналах за 4 разных года

Форма солнечного трека, показанная на рис. 2.4, значительно меняется ото дня ко дню по мере того, как меняется рабочая частота наблюдения и положение Солнца в секторе обзора. Чтобы скорректировать расхождение ДН, была разработана модель солнечного трека ИРНР. Для каждого дня года определяется трек с минимальной мощностью, т. е. трек спокойного Солнца. На верхней панели рис. 2.5 показано ожидаемое значение трека согласно модели ДН. На нижней панели показано изменение нормированной на единицу формы дневного трека спокойного Солнца от дня ко дню в течение периода солнечных наблюдений ИРНР (конец апреля — середина августа). Временной диапазон 04:00–07:00UT соответствует наблюдениям в основном луче ДН, в остальное время Солнце попадает в боковые лепестки. В середине июня в треках наблюдается один выраженный пик, а в остальное время пиков может быть несколько. По мере того, как максимальный угол возвышения Солнца меняется в течение сезона наблюдений, охватываемый диапазон частот также меняется, поэтому вариации мощности в треках отражают изменение ДН. Нормированные треки спокойного Солнца составляют модель солнечного трека ИРНР и используются в качестве корректировки ДН при определении потока в диапазоне частот, охватывающем наблюдения Солнца (160–165 МГц). Однако это применимо только ко второму подходу, описанному в предыдущем разделе, так как в первом подходе необходимо знание полной формы ДН. Тем не менее, вычислить КУ антенны по этой модели невозможно, и в формуле (2.5) для определения солнечного потока используется КУ, полученное по исходной модели ДН.

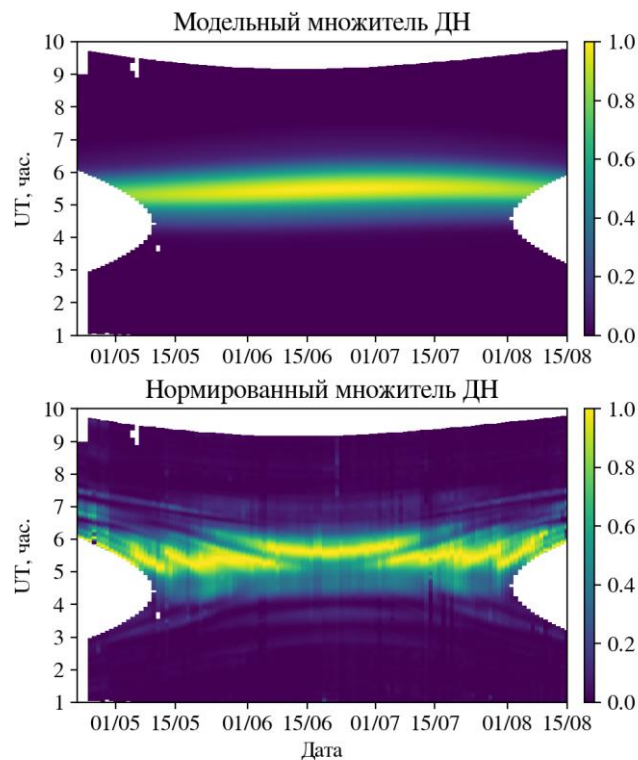


Рисунок 2.5. Модельные (вверху) и калибровочные (внизу) треки спокойного Солнца для периода солнечных наблюдений

2.4 Результаты измерений потока солнечного излучения

После калибровки принятой мощности и учета корректировок ДН для большинства дней наблюдений Солнца за период с 2011 по 2022 гг. был получен полный солнечный поток (см. рис. 2.6). Общее количество дней с измерениями потока составило 634 дня. Измерения на ИРНР не проводились в 2014 и 2016 гг., а в остальное время пробелы в наблюдениях обусловлены проведением активных экспериментов. На рис. 2.9 раздела 2.6 показано детальное распределение дней наблюдений по годам.

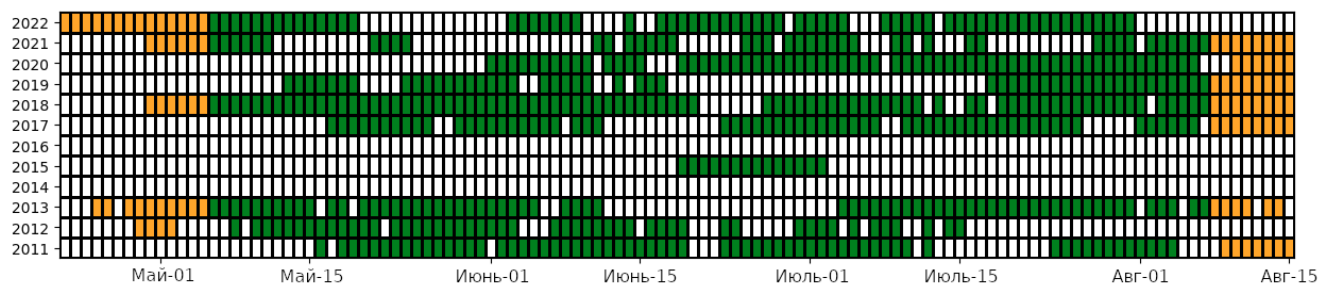


Рисунок 2.6. Календарь калиброванных измерений солнечного потока на ИРНР. Зеленым цветом отмечены дни, когда Солнце попадало в основной и боковые лепестки ДН, желтым — только в боковые лепестки

Стандартной единицей измерений солнечного потока является с.е.п. — солнечные единицы потока, $1 \text{ с.е.п.} = 10^5 \text{ Ян} = 10^{-21} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{Гц}$. Так как на ИРНР проводится независимый прием сигналов двух полурупоров представляющих два канала, поток определяется в каждом из них по отдельности. На рис. 2.7 показано сравнение полных потоков солнечного излучения, полученных в двух полурупорах (каналах) во время шумовой бури за один день наблюдений 12.07.2017. Измеренный поток хорошо согласуется между каналами, повторяя форму и значения. Так как ДН полурупоров немного отличаются друг от друга и направлены слегка в разные стороны, время наблюдения Солнца в максимуме ДН в каналах отличается, поэтому измерения охватывают разные временные интервалы. Кроме того, в рядах полученного потока могут быть разрывы, связанные с прохождением Солнца через минимум ДН в поперечном сечении и оставшимися после фильтрации помехами. Для спокойного Солнца пример измерений потока после усреднения двух каналов приведен на рис. 2.8, где видно, что значение полного потока и его вариации значительно слабее, чем во время шумовой бури.

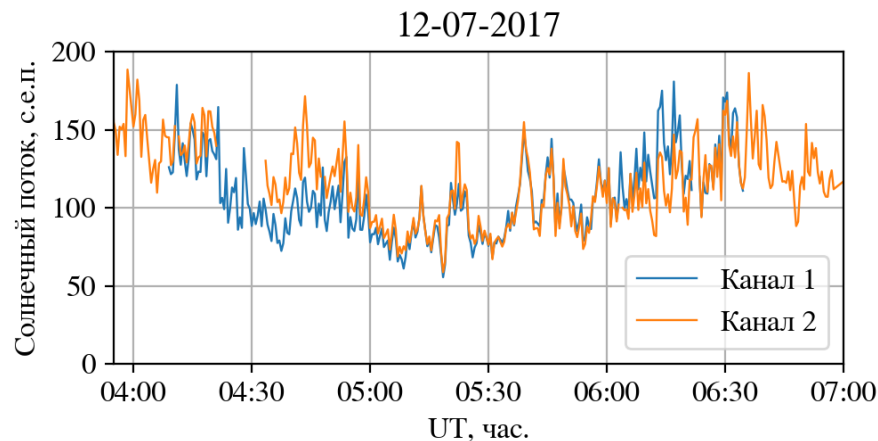


Рисунок 2.7. Измерения солнечного потока в двух каналах (канал 1 — верхний полурупор, канал 2 — нижний полурупор) во время шумовой бури

2.5 Ошибки измерений

Измерения включают в себя несколько этапов: калибровку приемного тракта, корректировку ДН и вычисление солнечного потока. Каждый этап добавляет собственную ошибку измерения. Для оценки погрешности измерения потока использовался метод распространения ошибок [Taylor, 1996]. Например, выражение для калибровки принятой мощности P_n имеет вид

$$P_n = \frac{P_{\text{АЦП}}}{g} - P_n - P_{\text{шп}}, \quad (2.6)$$

где $P_{\text{АЦП}}$ — мощность на выходе АЦП, g , $P_{\text{шп}}$ — усиление и собственные шумы приемного тракта, $P_{\text{н}}$ — шум неба. Согласно методу распространения ошибок дисперсия оценки принятой мощности будет зависеть от дисперсии отдельных переменных:

$$\begin{aligned}\sigma_{P_{\text{н}}}^2 &= \sigma_{P_{\text{АЦП}}}^2 \left(\frac{\partial P_{\text{н}}}{\partial P_{\text{АЦП}}} \right)^2 + \sigma_g^2 \left(\frac{\partial P_{\text{н}}}{\partial g} \right)^2 + \sigma_{P_{\text{н}}}^2 \left(\frac{\partial P_{\text{н}}}{\partial P_{\text{н}}} \right)^2 + \sigma_{P_{\text{шп}}}^2 \left(\frac{\partial P_{\text{н}}}{\partial P_{\text{шп}}} \right)^2, \\ \sigma_{P_{\text{н}}}^2 &= \frac{\sigma_{P_{\text{АЦП}}}^2}{g^2} + \frac{\sigma_g^2 P_{\text{АЦП}}^2}{g^4} + \sigma_{P_{\text{н}}}^2 + \sigma_{P_{\text{шп}}}^2,\end{aligned}\quad (2.7)$$

где $\sigma_{P_{\text{АЦП}}}$ — среднеквадратичное отклонение (СКО) сигнала на выходе АЦП, определяемое при накоплении, σ_g и $\sigma_{P_{\text{шп}}}$ — ошибки определения калибровочных коэффициентов, полученных по МНК (формула (1.22)), $\sigma_{\text{н}}$ — СКО модели шума неба GSM, указанная в оригинальной статье [Oliveira-Costa et al., 2008] и составляющая 4–6 % от мощности шума для представляющего интерес диапазона частот. По результатам анализа вычислений, наибольший вклад в ошибку оценки принятой мощности при калибровке дает первый член выражения, т. е. сама дисперсия мощности входного сигнала. При вычислении потока солнечного излучения по формуле (2.5), также нужно учитывать то, что интегральная ДН W_0 включает корректировку по модели солнечного трека, которая также имеет ошибку. Тогда СКО оценки солнечного потока будет иметь вид

$$\sigma_{S_{\text{сол}}}^2 = \frac{4\sigma_{P_{\text{н}}}^2}{W_0^2} + \frac{4\sigma_{W_0}^2 P_{\text{н}}^2}{W_0^4}, \quad (2.8)$$

где σ_{W_0} находится из СКО опорного калиброванного трека, выбранного для представления дня года в модели солнечного трека.

Расчет СКО оценки солнечного потока проводится для каждого измерения. Анализ ошибок показал, что 92 % всех измерений потока обладают относительным СКО менее 10 %, а 98 % измерений — относительным СКО менее 20 %. В эти ошибки, однако, не включена систематическая погрешность, обусловленная ошибками при калибровке, неточностью корректировки ДН, отклонением модельных карт шума неба от реальных и допущений, принятых при вычислении солнечного потока. Потенциальным значимым источником ошибки калибровки являются дополнительные шумы, неучтенные в модели приемного тракта, уровень которых может меняться в течение дня, и это может приводить к значительному ухудшению определения калибровочных коэффициентов по линейной модели. Это могут быть шумы, распространяющиеся по земле и варьирующиеся из-за изменения характеристик подстилающей поверхности в течение дня, а также шумы антропогенного происхождения. Нестабильность усиления приемного устройства может существенно повлиять на ошибку, особенно при длительном накоплении при попытке измерить слабые сигналы [Christiansen, Høgbom, 1969].

Точно определить систематическую погрешность сложно, но на основе анализа полученных измерений, предполагаемый диапазон систематической ошибки составляет 5–25 % в зависимости от даты наблюдения.

Для повышения точности измерений солнечный поток, полученный в каждом из полурупоров, может быть усреднен. Если ошибка в обоих каналах одинакова, это приведет к её снижению в $\sqrt{2}$ раз. На рис. 2.8 показаны измерения потока при спокойном Солнце (20.07.2018) после усреднения двух каналов. Период минимальной ошибки совпадает с прохождением Солнца через основной лепесток ДН (04:30–06:00 UT). При прохождении Солнца через минимумы ДН ошибка возрастает в соответствии с формулой (2.8). Чаще вместо усреднения потока двух каналов выбираются измерения только с верхнего полурупора, поскольку за всю историю наблюдений он обладал большей стабильностью и меньшим уровнем помех.

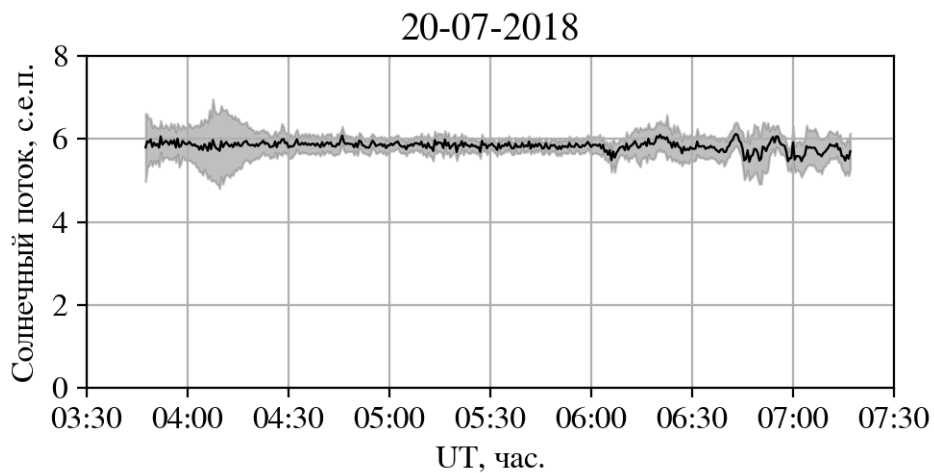


Рисунок 2.8. Измерения солнечного потока в спокойный день после усреднения каналов с указанием ошибки измерения серым цветом по уровню 3σ

2.6 Сравнительный корреляционный анализ потока солнечного излучения на частоте 161 МГц по данным ИРНР и 245 МГц по данным станции Лермонт

Проверка корректности измерений солнечного потока сопряжена с рядом трудностей, поскольку сложно найти радиотелескопы, работающие в том же диапазоне частот и в то же время, с достаточно длительными рядами данных. Проводилось сравнение отдельных радиовсплесков, показавшее идентичность формы сигнала, однако либо отсутствовала калибровка, либо время наблюдения соответствовало боковым лепесткам (при сравнении с спектрометрами, расположенными в Европе), где ошибка измерения слишком велика. Однако так как измерения потока на ИРНР охватывают около 11 лет наблюдений как спокойного, так и активного Солнца, необходимо провести сравнение для длительных масштабов времени. Близким меридиональным расположением и богатым набором данных обладает радиометр

обсерватории Лермонт [Giersch et al., 2017] в западной Австралии (долгота 114° В). Инструмент принадлежит сети RSTN, состоящей из 4-х станций, разнесенных по меридиональному расположению для обеспечения непрерывных наблюдений за Солнцем, и ведет калиброванные измерения солнечного потока на 8 дискретных частотах в диапазоне 245–15400 МГц. В отличие от многих низкочувствительных спектрополяриметров, радиометры сети измеряют не только интенсивные радиовсплески, но и дневные вариации потока спокойного Солнца, а работа ведется с 2006 г. Благодаря широкому диапазону, регулярности измерений и меридиональному покрытию, данные сети RSTN используются во многих прикладных [Giersch, Kennewell, 2022] и научных задачах [Namini et al., 2021; Kashapova et al., 2021].

Хотя ближайшая частота 245 МГц, на которой проводятся измерения сети RSTN, отличается от средней частоты наблюдения Солнца на ИРНР, 161 МГц, механизм излучения одинаков, а источники излучения относятся к корональной плазме, поэтому должны обладать высокой корреляцией. С другой стороны, интересно выявление взаимосвязи между солнечным потоком на разных частотах на длительных масштабах времени. Также как и на ИРНР, данные станции Лермонт представляют собой измерения дневного хода солнечного потока (с $\sim 00:00$ по $10:00$ UT), что позволяет непосредственно сравнивать их между собой. Временное разрешение данных Лермонт составляет 1 с, данных ИРНР — 0.5 с. Сравнительный анализ проводился для всех измерений ИРНР (с 2011 г.) и всех измерений обсерватории Лермонт (с 2006 г.) до 2022 г. Для приема на частоте 245 МГц на станции Лермонт используется логопериодическая антенна с эффективной площадью $\sim 30\text{--}35\text{ м}^2$, при шуме системы $T_c = 250\text{ К}$ (шум неба уменьшается с ростом частоты) чувствительность составляет $\text{SEFD} \approx 20\text{ кЯн}$, что достаточно для измерения вариаций радиоизлучения спокойного Солнца.

На рис. 2.9 показаны среднегодовые значения солнечного потока на 161 и 245 МГц в сравнении с числом солнечных пятен. На оси абсцисс указан год наблюдения, а также представлена таблица количества дней наблюдения в каждый год на двух частотах. Измерений Лермонт существенно больше, 5458 дней с 2006 г., поскольку они более регулярны и проводятся круглый год. В данных были отфильтрованы кратковременные радиовсплески длительностью до 1 мин, поэтому поток включает фоновую и медленно меняющуюся компоненты солнечного радиоизлучения, а также сигнал от длительных повышений интенсивности вроде шумовых бурь. Ожидается, что поток радиоизлучения спокойного Солнца в метровом диапазоне, генерируемый в нагретой до миллиона градусов короне, должен возрастать с частотой [Kundu et al., 1977; Borkowski, 1982; Benz, 2009; Tan et al., 2015]. Видно, что в 2012, 2013 и 2015 гг. среднегодовой поток по данным ИРНР превысил поток на частоте 245 МГц, что связано с связано с несколькими шумовыми бурями, сильнее выраженными на частоте 161 МГц, и малой

статистикой. Кроме того, в период с 2011 по 2013 гг. измерения проводились в старом режиме с низким частотным разрешением, где формат данных не позволял эффективно фильтровать помехи, потому что сохранялся уже усредненный сигнал, а не квадратурные компоненты. В 2015 г. отличие значительное, потому что измерения на ИРНР проводились всего 14 дней, на которые пришлось длительная шумовая буря. В целом, солнечный поток в метровом диапазоне в показанный период ожидаемо возрастает с ростом солнечной активности.

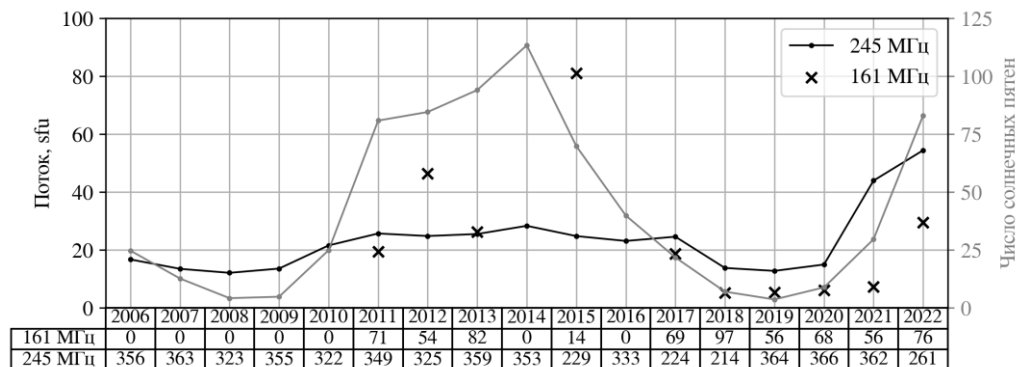


Рисунок 2.9. Среднегодовые значения солнечного потока по данным ИРНР (161 МГц, кресты) и Лермонт (245 МГц, черная линия). Сплошной серой линией отложено число солнечных пятен. В таблице в нижней части рисунка показано число дней наблюдения за год для каждой из частот

Гистограммы среднесуточного солнечного потока показаны на рис. 2.10 для обоих потоков за всё время наблюдения (левая панель) и при спокойном Солнце (правые панели, верхняя для 161 МГц, нижняя для 245 МГц). Среднесуточный поток за всё время наблюдений меняется в широких пределах, от единиц до сотен с.е.п. Мода распределения для потока 161 МГц ожидаемо ниже моды для 245 МГц, но на 161 МГц наблюдается больше значений выше 100 с.е.п. Для того чтобы отделить поток спокойного Солнца от потока медленно меняющейся компоненты излучения и радиовсплесков, были отобраны дни, когда число солнечных пятен равно нулю в день наблюдения, а также в предыдущий и последующий дни. Для ИРНР это 124 дня, 19 % всех измерений, для обсерватории Лермонт — 1416 дней, 22 % измерений. Такие дни встречаются и в максимуме солнечной активности, хоть и в существенно меньшей доле. Для минимума солнечной активности в [Benz, 2009] приводятся формулы, аппроксимирующие поток спокойного Солнца, согласно которым поток на частоте 161 МГц составляет 4.8 с.е.п., на 245 МГц — 11.1 с.е.п. (черные линии на правых панелях рис. 2.10). Реально наблюдаемые средние значения распределений близки к модельным по [Benz, 2009], но немного превышают их. Можно предположить, что превышение связано с теми днями, когда пятен нет, но солнечная активность ближе к максимуму. [Hamini et al., 2021] модифицировали формулу [Benz, 2009] на

основе данных станции Сан Вито сети RSTN для аппроксимации потока спокойного Солнца во время максимума солнечной активности, и по расчетам для 161 МГц поток составляет 8.1 с.е.п., для 245 МГц — 18.8 с.е.п.

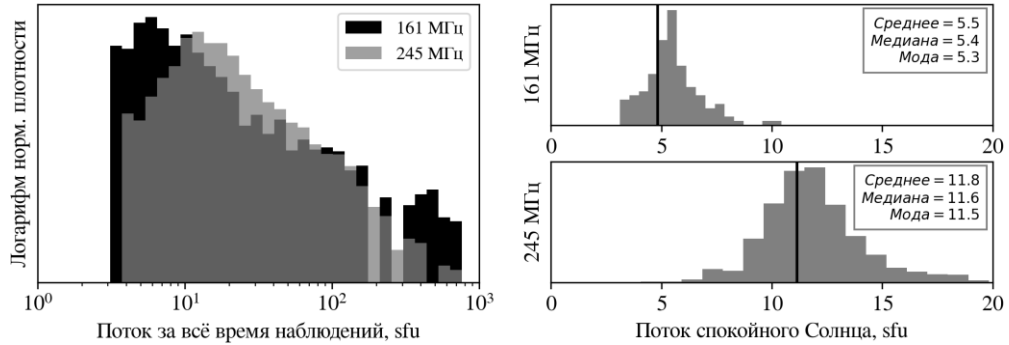


Рисунок 2.10. Гистограммы распределения среднесуточного потока солнечного излучения на 161 и 245 МГц за все время наблюдения (слева) и для спокойного Солнца (справа). Черной линией на графиках справа отмечено модельное значение потока спокойного Солнца

По данным среднесуточного потока были вычислены коэффициенты корреляции Пирсона (p) и Спирмана (s) между 161 и 245 МГц. Общеизвестная корреляция Пирсона отражает степень линейной зависимости между двумя случайными величинами, а коэффициент ранговой корреляции Спирмана [Spearman, 1904] используется реже и показывает, насколько связь двух случайных величин может быть описана с помощью монотонной функции. При определении коэффициента Спирмана исходные ряды данных заменяются на ранги — порядковые номера измерений в отсортированных по возрастанию выборках. Далее вычисляется корреляция Спирмана между наборами рангов по упрощенной формуле

$$s = 1 - \frac{6}{n(n-1)(n+1)} \sum_{i=1}^n (R_i(X) - R_i(Y))^2, \quad (2.9)$$

где $R_i(X)$, $R_i(Y)$ — ранги i -го измерения в выборках X и Y , n — размер выборок. Коэффициент Спирмана используется как более общая метрика взаимосвязи двух величин, не ограниченная линейной зависимостью.

На рис. 2.11 приведены матрицы корреляций Пирсона и Спирмана для среднесуточных потоков на 161 МГц, 245 МГц и 2800 МГц (индекс F10.7 [Tapping, 2013]). В каждой ячейке матрицы вычислялся коэффициент корреляции на основании части исходной выборки — процентиля, указанного на осях графиков. Потоки на 161 и 245 МГц обладают высокой корреляцией Пирсона, $p = 0.71$, и меньшей корреляцией Спирмана, $s = 0.67$, если используются все доступные данные. Корреляция Пирсона существенно снижается до $p = 0.54$, если 10 %

наиболее интенсивных значений потока не участвуют при расчете. Такие значения потока возникают во время шумовых бурь. В то же время корреляция Спирмана снижается незначительно. Это говорит о том, что, во-первых, события с экстремальными значениями потока часто наблюдаются одновременно на 161 и 245 МГц, и, во-вторых, что в спокойных условиях потоки связаны нелинейной зависимостью.

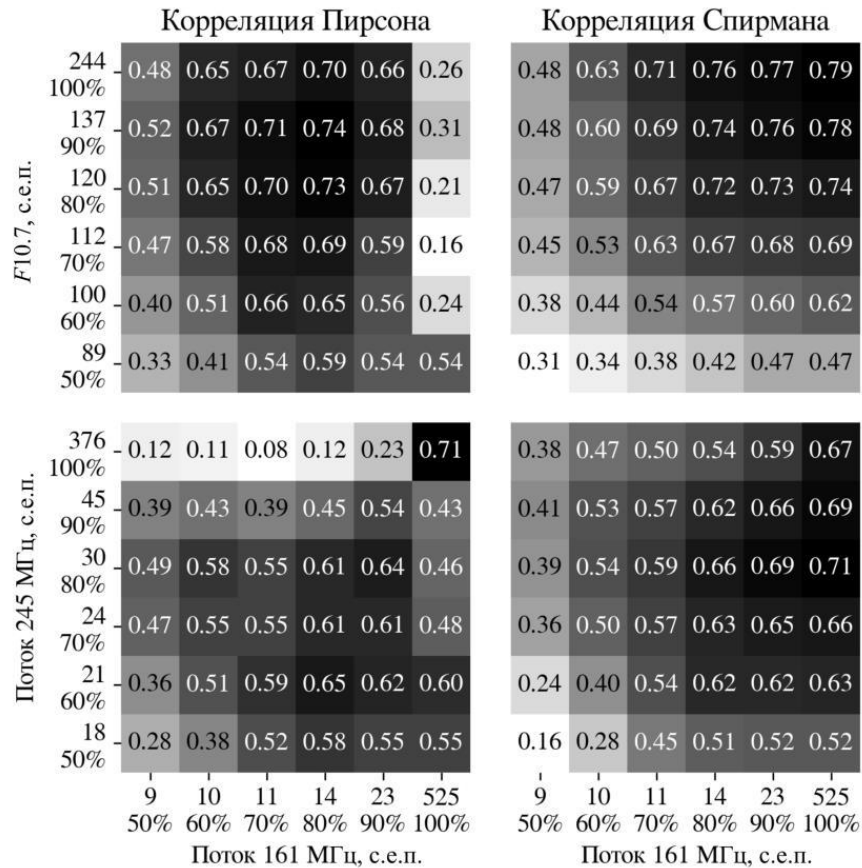


Рисунок 2.11. Матрицы корреляции среднесуточного потока при разных процентиях выборок данных. Верхний ряд — корреляция между потоком 161 МГц и F10.7. Нижний ряд — корреляция между потоками 161 и 245 МГц. Слева — корреляция Пирсона, справа — корреляция Спирмана

При сравнении потока 161 МГц с индексом солнечной активности F10.7, часто используемым при моделировании ионосферы [Bilitza et al., 2017], ситуация противоположная — низкая корреляция Пирсона, $p = 0.26$, для обоих исследуемых потоков при использовании всех данных, и высокая, $p = 0.68$ при фильтрации дней с наиболее интенсивными значениями потока. В то же время корреляция Спирмана ($s = 0.79$) высока как в отсутствии, так и при использовании фильтрации. Не приведенная на рисунке матрица корреляции между 245 МГц и F10.7 обладает схожим распределением с максимумом корреляции $p = 0.67$ для значений ниже

24.7 с.е.п. (80 % выборки) и резким падением до $p = 0.25$ для 100 % выборки, и высокой корреляцией $s = 0.71$. Из этого следует, что экстремальные значения потока метрового диапазона редко сопровождаются соответствующими по амплитуде усилениями потока F10.7 и связь между F10.7 и потоками 161/245 МГц нелинейна. В среднем корреляция F10.7 с данными ИРНР выше, чем с данными обсерватории Лермонт. Стоит отметить, что данные обсерватории Лермонт также показали сравнительно малые значения коэффициента корреляции (0.6–0.8) с данными других станций сети RSTN согласно исследованию [Giersch, Kennewell, 2022].

Анализ внутрисуточных вариаций показал, что распределение корреляции Пирсона обладает гауссовой формой со средним значением 0.04 и стандартным отклонением 0.4, т. е. в среднем корреляция отсутствует, но присутствуют дни с высокой положительной и отрицательной корреляцией вариаций потоков в течение дня. Также было установлено, что за редким исключением внутрисуточная корреляция не зависит от величины среднесуточного потока. На рис. 2.12 показаны два дня с относительно высоким значением коэффициента корреляции для спокойного Солнца ($p = 0.62$) и во время шумовой бури ($p = 0.97$). Согласно анализу, доля дней с корреляцией $p > 0.6$ мала и составляет всего 15 %, что можно отнести к разнице высот в короне, на которых генерируется радиоизлучение 161 и 245 МГц, но больший вопрос представляют дни с высокой антикорреляцией. Изучение отдельных дней с высокой антикорреляцией показало, что в данных обеих обсерваторий может присутствовать погрешность — суточный ход, вносящий дополнительную ошибку и для оценки которого был проведен автокорреляционный анализ.

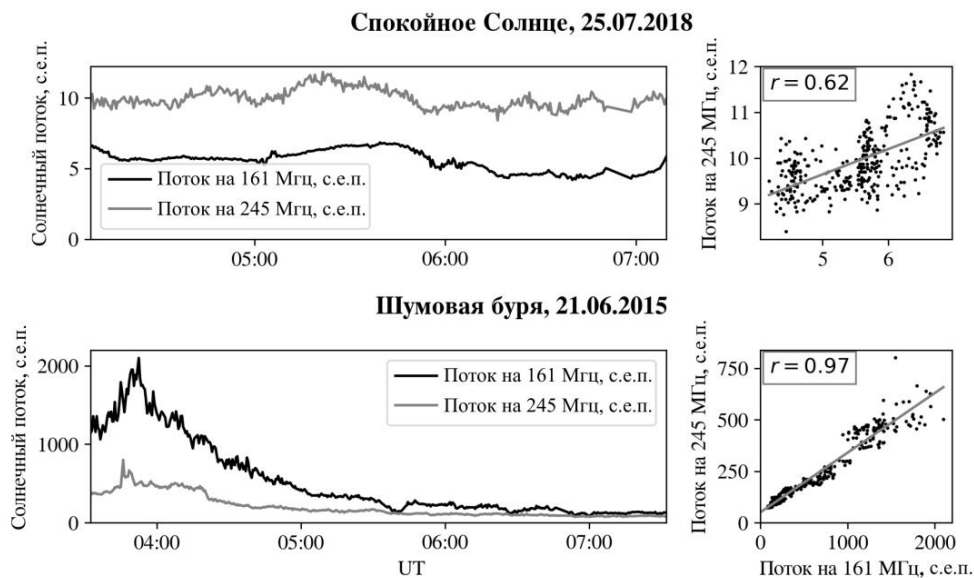


Рисунок 2.12. Сравнение внутрисуточных вариаций потоков 161 и 245 МГц в два дня с низкой и высокой активностью

Ожидается, что корреляционной связи между соседними днями измерений потока быть не должно, но в реальных наблюдениях может присутствовать неучтенная инструментальная погрешность. Для поиска ошибки были вычислены корреляции Пирсона между суточными измерениями потока соседних дней измерений (автокорреляция) по отдельности для обсерваторий Лермонт и ИРНР. Результаты приведены на рис. 2.13. Гистограммы распределения автокорреляции для 161 и 245 МГц смещены в область положительных корреляций и существенно различаются по форме. На правых панелях показаны примеры временных рядов при $p > 0.8$, где преобладание вариаций потока соседних дней очевидно. Исходя из формы распределения и методов измерений на ИРНР, можно сделать вывод, что в части данных присутствует суточный ход, связанный с погрешностью модели ДН. Для данных Лермонт похоже, что гистограмма состоит из двух мод: моды около нуля, ожидаемой при корректных измерениях, и моды с высокой корреляцией с пиком вблизи $p = 1.0$, относящейся к дневным измерениям вроде тех, что продемонстрированы на рисунке. Ошибочные «пики» обладают высоким значением потока и напоминают прохождение мощного радиоисточника через ДН и проявляются в течении нескольких дней. Тем не менее, усреднение автокорреляции по месяцам не показало какого-либо выраженного периода повышения в течение года ни для Лермонт, ни для ИРНР.

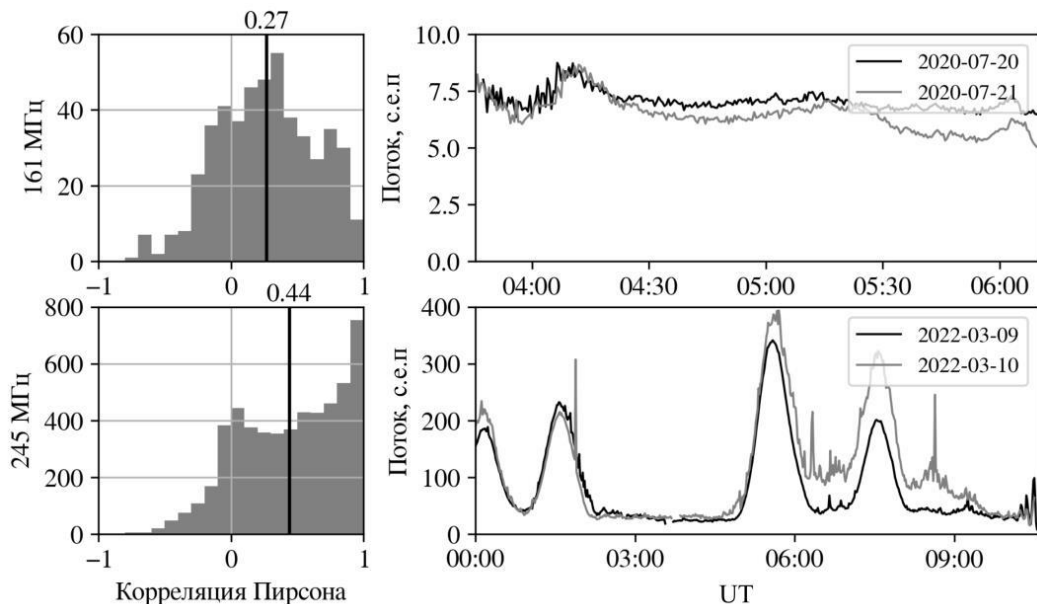


Рисунок 2.13. Распределение значения внутрисуточной автокорреляции соседних дней (слева) и примеры дней с высокой корреляцией (справа) для 161 МГц (верхние панели) и 245 МГц (нижние панели). Черной линией на гистограммах отмечено среднее значение

В ходе проведенного корреляционного анализа было сделано несколько выводов. Показано, что при спокойном Солнце измеренные потоки солнечного радиоизлучения на 161 МГц (ИРНР) и 245 МГц (Лермонт) согласуются с модельным. Среднегодовой поток на обеих частотах ожидаемо увеличивается с ростом солнечной активности. Измерения коррелируют между собой и с F10.7, причем характер связи нелинеен, а максимум корреляции Пирсона потоков 161/245 МГц достигается за счет шумовых бурь, при которых среднесуточный поток значительно повышается на обеих частотах. Внутрисуточные вариации обладают слабой корреляцией, а часть измерений ИРНР и Лермонт обладает высокой ошибкой, проявляющейся как сохраняющийся дневной ход. При этом в данных Лермонт ошибка проявляется чаще и обладает большей величиной, практически полностью препятствуя корректному трактованию измерений.

2.7 Наблюдение радиовсплесков

Обработка первичных данных в радиоастрономическом режиме включает в себя усреднение, снижающее дисперсию мощности принятого сигнала за счет снижения временного разрешения, и автоматическую фильтрацию выбросов. Для изучения радиовсплесков был разработан дополнительный программный комплекс, интерфейс которого показан на рис. 2.14. Он позволяет напрямую работать с квадратурами принятого радиоастрономического сигнала, удалять помехи и выбирать полосовой фильтр для наиболее точной фильтрации и получения максимального временного разрешения. Таким образом было обработано большинство радиовсплесков, которые наблюдались на ИРНР с 2017 г., после введения режима слежения за радиоисточниками.

Рассмотрим детально одно из таких из событий, которое связано со вспышкой на Солнце 22 мая 2021 г. 06:15:15 UT (по GOES), сопровождавшейся радиовсплеском, наблюдаемым в разных диапазонах: на частоте 161 МГц по данным ИРНР, на частоте 5.6 ГГц на Сибирском радиогелиографе (СРГ) [Lesovoi et al., 2017] и в данных спектрополяриметров.

Установлено, что на ИРНР наблюдался радиовсплеск типа III (см. рис. 2.15), радиоизлучение которого генерируется электронами, распространяющимися вдоль поля. На СРГ наблюдался микроволновый всплеск на частоте 5.6 ГГц, также изображенный на рисунке. Наблюдения, полученные на спектрополяриметре Ямагава [Iwai et al., 2017] также подтвердили, что наблюдаемое событие не является артефактом измерений или обработки. Однако, данные наблюдения показали сложную структуру динамического спектра в метровом диапазоне. Одновременно наблюдались радиовсплеск типа II на частотах 400–225 МГц в 06:16:20–06:17:27 и типа III на частотах 175–70 МГц в 06:16:47–06:17:19.

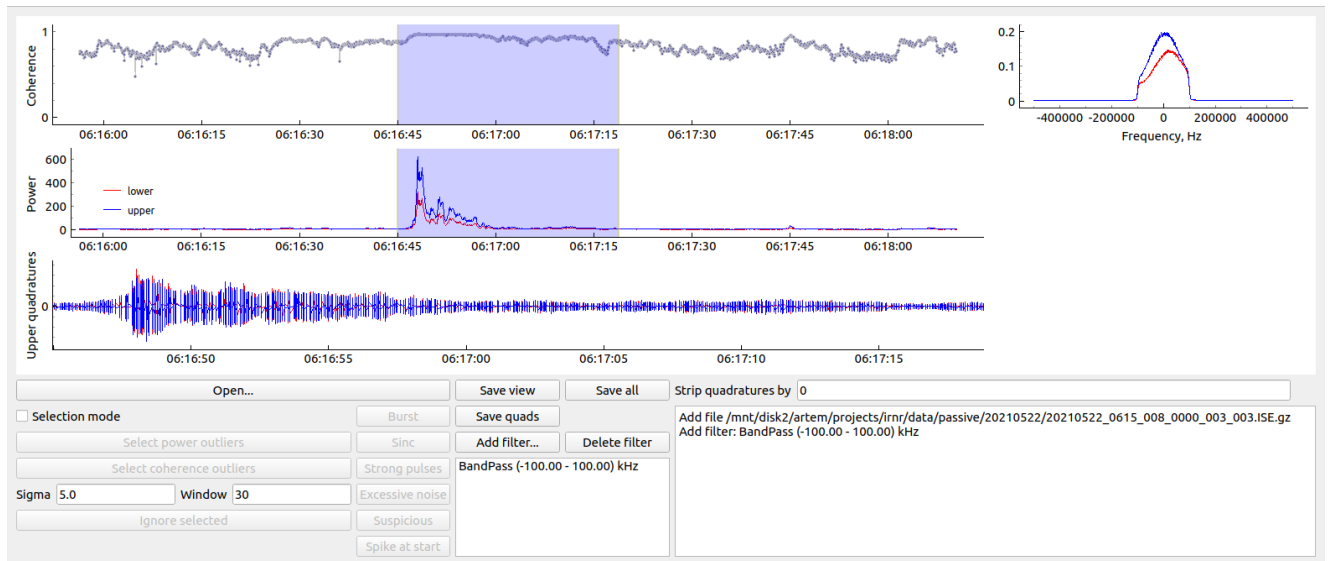


Рисунок 2.14. Графический интерфейс для ручной фильтрации радиоастрономических данных. Отображает коэффициент когерентности, мощность, амплитуду квадратурных компонент и спектр мощности сигнала

Использование наблюдений ИРНР позволило выделить быстрый радиовсплеск, связанный с быстрым всплеском в микроволновом диапазоне, и с помощью радиокарт локализовать его положение в нижних слоях атмосферы Солнца. Месторасположение источника микроволнового всплеска было ассоциировано со вспышкой путем сравнения изображений, полученных на СРГ, и изображений в крайнем ультрафиолете с космического аппарата SDO (Solar Dynamics Observatory, обсерватория солнечной динамики).

Исследуемая вспышка являлась круговой, т. е. имеющей круговую форму с купольной структурой магнитных линий [Wang, Chang, 2012]. Центральная, отрицательная часть области вспышки окружена положительным кольцом, на котором замыкаются магнитные линии из центра. Из области над куполом магнитные силовые линии идут к удаленному источнику, а также присутствуют открытые силовые линии, уходящие в корону.

Радиовсплеск на частоте 161 МГц предшествовал радиовсплескам на частотах 5.6 ГГц и 72 МГц, поэтому возмущение изначально возникло в короне на высоте, соответствующей 161 МГц, и ускорило электроны в разные стороны вдоль силовых линий — вниз, возбуждая излучение на 5.6 ГГц, и вверх, возбуждая излучение в верхней короне.

Описанная выше картина была подтверждена путем экстраполяции магнитограмм в область короны и анализа топологии восстановленных магнитных линий. Были найдены относительно открытые силовые линии над магнитным куполом в области солнечной вспышки, которые взаимодействовали с полем купола, что приводило к процессам пересоединения,

возбуждения электронов и эрупции. Наиболее вероятной причиной осцилляций в метровом и микроволновом диапазонах является эрупция, зарегистрированная на SDO до момента начала радиовсплеска типа III.

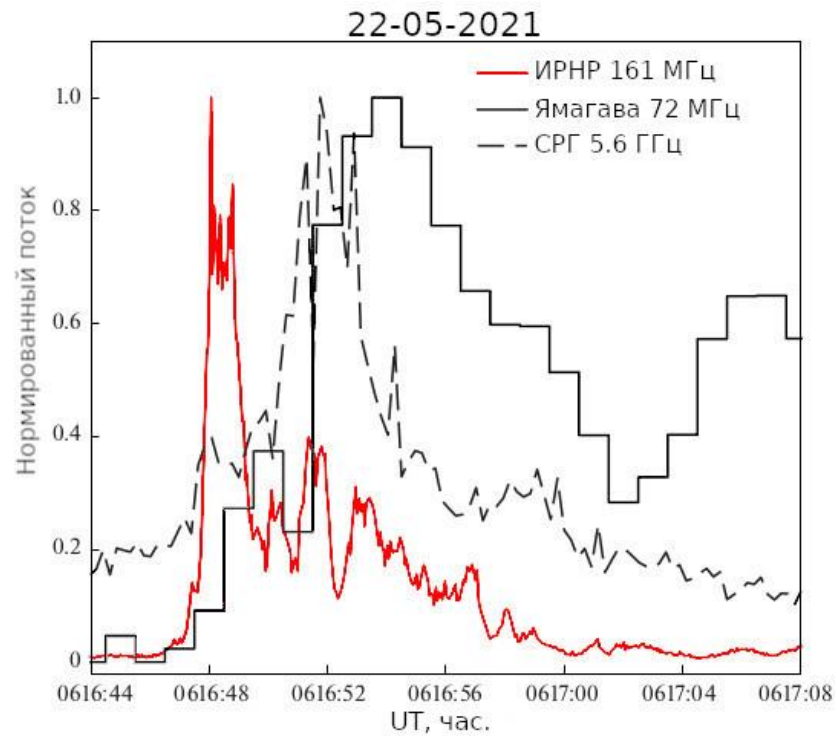


Рисунок 2.15. Радиовсплеск 22.05.2021, измеренный на разных инструментах

ГЛАВА 3. Метод оценки диагностического потенциала радаров некогерентного рассеяния (НР) и мезосферно-стратосферно-тропосферных (МСТ) радаров

В ходе калибровки приемного тракта радара определяются собственные шумы, которые ограничивают минимальный уровень детектируемых радаром сигналов. Для описания минимального уровня сигналов часто используется понятие чувствительности системы. Поскольку радары для исследования атмосферы Земли используются для оценки физических параметров, их чувствительность должна учитывать достигаемую статистическую точность измерений. Вместе с характеристиками антенны и передатчиков, чувствительность описывает диагностический потенциал радара в задачах исследования атмосферы, который может использоваться для сравнения радаров между собой и при проектировании новых инструментов. Диагностический потенциал радара определяет диапазон значений физических параметров, измеряемых на заданной высоте, либо охват высот, на которых возможно измерение некоторого заданного по модели параметра с необходимой статистической значимостью.

Задача оценки диагностического потенциала возникла в рамках проектирования НР-МСТ радара — части Национального Гелиогеофизического Комплекса (НГК) [Жеребцов, 2020], включающего ряд научных инструментов мирового уровня для исследований в области солнечно-земной физики: солнечный телескоп-коронограф, многоволновой радиогелиограф, сеть когерентных ионосферных радаров, лидарно-оптический комплекс, нагревный стенд и радар НР-МСТ. Комплекс создается на базе Института Солнечно-Земной Физики СО РАН и позволит существенно расширить его экспериментальную базу, актуализировать исследования на несколько ближайших десятилетий. Инструменты затрагивают значительную часть физических процессов, ответственных за текущее состояние космической погоды, от волновых возмущений и изменений химического состава в нейтральной атмосфере, ионосфере и магнитосфере до активных областей и структуры магнитного поля в солнечной атмосфере.

Радар НР-МСТ сочетает в себе возможности двух типов атмосферных радаров, обычно ограниченных только областью нижних либо верхних слоев атмосферы, — мезосферно-стратосферно-тропосферного (МСТ) радара и радара некогерентного рассеяния (НР). МСТ-радары [Hocking, 1997; Kato, 2005; Hocking, 2011] используются для изучения динамики нижней и средней атмосферы, внутренних гравитационных волн, характеристик турбулентных

слоев и метеоритных следов. Как правило они обладают достаточно крупными антеннами, позволяющими достигнуть высокой эффективной мощности, т. е. произведения средней излучаемой мощности и площади антенны, $P_{\text{ср}} \times A_{\text{эфф}} \geq 2 \times 10^7 \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$, что необходимо для приема слабых мезосферных сигналов. Режим НР основан на рассеянии радиоволн в ионосферной плазме и является самым информативным методом диагностики ионосферы, поскольку позволяет одновременно измерять высотные профили нескольких параметров плазмы: электронной концентрации, температуры электронов и ионов, скорости дрейфа и ионного состава. Рассеянный НР сигнал при этом очень слабый, особенно на высотах выше 1000 км, что ужесточает требования к чувствительности радара, поэтому инструменты обладают эффективной мощностью $P_{\text{ср}} \times A_{\text{эфф}} \geq 10^8 \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$. Помимо основных режимов, связанных с изучением атмосферы, на радарх с таким высокими энергетическими характеристиками проводится множество других научных экспериментов [McCrea et al., 2015], включая исследования неоднородностей разных масштабов, радиозондирование поверхности планет и астероидов, мониторинг космических аппаратов и космического мусора, радиоастрономические измерения и регистрация мерцаний, эксперименты по нагреву ионосферы.

НР-МСТ изначально проектировался как радар, работающий в обоих режимах наблюдения атмосферы, и в рамках диссертации было проведено обоснование такой возможности путем моделирования базовых экспериментов и определения диагностического потенциала в разных слоях атмосферы. Общие принципы для такого анализа приводятся во многих книгах по радиолокации [Doviak, Zrnic, 1993; Skolnik, 2008; Richards et al., 2010; Fukao, Namazu, 2014], а более глубокая теория излагается в работах посвященных статистической теории измерений [Lehtinen, 1986; Vallinkoski, 1989; Van Trees, 2013]. С другой стороны научных работ, посвященных определению диагностического потенциала конкретных инструментов мало (например, [Lu et al., 2016]), во-первых из-за редкости и дороговизны инструментов такого масштаба, во-вторых, потому что эта часть работ при проектировании чаще оформляется как технический отчет [Murdin, 1979; Lehtinen et al., 2014]. В данной работе был разработан метод, позволяющий единообразно оценить потенциал как НР-, так и МСТ-радаров на примере существующего ИРНР и проектируемого НР-МСТ радаров.

3.1 Принципы работы НР- и МСТ-радаров

Как в случае НР, так и МСТ, радар излучает импульсный сигнал, который рассеивается в среде на градиентах показателя преломления, и принимает сигнал обратного рассеяния. Величина задержки после излучения определяет высоту, на которой происходит рассеяние. Излученный сигнал, распространяясь в среде, занимает некоторый объем пространства,

определяемый длительностью импульса и шириной ДН. Характеристики сигнала обратного рассеяния — амплитуда, фаза и форма спектра — зависят от механизма рассеяния и параметров среды, благодаря чему анализ принятого сигнала позволяет получить высотные профили параметров с пространственным разрешением, пропорциональным размеру облученного объема. Методы радиолокации позволяют улучшить пространственное и временное разрешение благодаря использованию сложных сигналов [Farley, 1972; Holt et al., 1992] и интерферометрических измерений.

3.1.1 НР-измерения

В основе метода НР лежит томсоновское рассеяние на свободных электронах в ионосферной плазме [Evans, 1969], первый эксперимент по наблюдению которого приведен в [Bowles, 1958]. Однако если бы рассеяние происходило только на случайно движущихся электронах, спектр сигнала обратного рассеяния был бы очень широк и количество энергии на единицу частоты было бы слишком мало для практического применения. Вместо этого радары НР работают в диапазонах частот, в которых спектр рассеяния определяется коллективными движениями в плазме, находящейся в магнитном поле. Переход между случайными и коллективными движениями определяются соотношением длины волны радара λ и дебаевской длины D ионосферной плазмы. D характеризует расстояние, в пределах которого действуют электростатические связи между заряженными частицами в плазме, и определяется выражением

$$D = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 k T_e}{4\pi N_e^2}}, \quad (3.1)$$

где N_e — электронная концентрация, T_e — температура электронов. Если $\lambda \ll D$, то движение электронов исключительно тепловое с гауссовой формой спектра, ширина которого пропорциональна температуре T_e . Если $\lambda \gg D$, то рассеяние происходит на флуктуациях электронной концентрации, а не на индивидуальных электронах, спектр рассеянного сигнала состоит из двух основных компонент [Sheffield, 1975; Брюнелли и др., 1979]: электронных (плазменных) линий и ионно-звуковой линии, форма которых зависит от физических параметров плазмы (см. рис. 3.1). Две узкополосные электронные линии зеркально смещены на величину плазменной частоты относительно центральной частоты радиоволны. Ионно-звуковая линия имеет характерную двугорбую структуру с глубиной провала, зависящей от соотношения электронной T_e и ионной T_i температур. Ширина спектра составляет от единиц до десятков кГц и зависит от T_e . На форму также влияет ряд других ионосферных параметров: ионный состав,

частота столкновений с нейтральными молекулами, наличие внешнего электронного поля (дрейф электронов относительно ионов), а центральная частота моды смещена на величину дрейфа плазмы. Из-за связи с параметрами ионосферы, ионно-звуковая волна представляет наибольший интерес при измерениях, поэтому рабочую частоту радаров НР выбирают таким образом, чтобы эффективно наблюдать эту моду. Всего в мире насчитывается около 10 НР радаров, частотный диапазон которых попадает в интервал 46–1330 МГц.

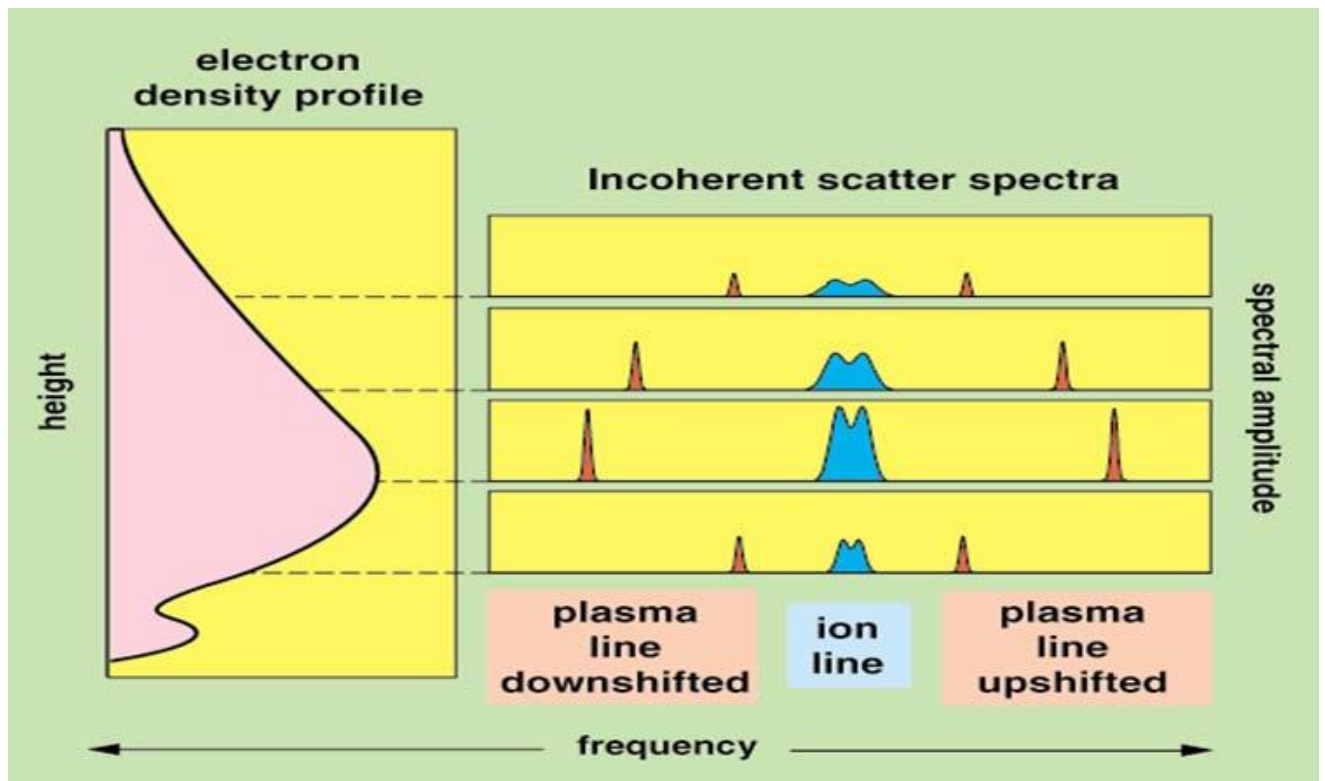


Рисунок 3.1. Схематичный пример профиля электронной концентрации (слева) и формы спектра НР-сигнала на разных высотах ионосферы (справа). Из материалов EISCAT Radar School (презентации Tony van Eyken, 2006)

Стандартный режим наблюдения Е- и F-слоев ионосферы предполагает вычисление спектра, либо, чаще, автокорреляционной функции (АКФ) принятого сигнала обратного рассеяния для каждого излученного импульса, после чего происходит их некогерентного накопление, увеличивающее ОСШ в $\sqrt{N}$ раз, где N — число накопленных спектров/АКФ. Когерентное накопление АКФ для этих слоев ионосферы невозможно, поскольку НР-сигнал теряет когерентность между соседними импульсами (ширина спектра превышает частоту следования импульсов). По усредненным АКФ можно найти параметры ионосферы путем решения обратной задачи [Snieder, Trampert, 2003; Ташлыков и др., 2024], в литературе по НР-радарам называемой инверсией профиля задержек АКФ [Virtanen et al., 2008; Шпынев, Воронов,

2013; Ташлыков и др., 2024], в ходе которой производится параметрическая подгонка по модели некогерентного рассеяния для ионно-звуковой моды. Помимо этого, существует ряд других методик позволяющих измерять параметры ионосферы вроде профиля электронной концентрации [Evans, 1969; Shpynev, 2004], высоты перехода O^+/H^+ [Хабитуев, Шпынев, 2014], характеристик перемещающихся ионосферных неоднородностей [Медведев и др., 2012]. По абсолютным измерениям принятой мощности возможно получение профиля электронной концентрации по радиолокационному уравнению для НР-сигнала [Bowles et al., 1962; Evans, 1969].

3.1.2 МСТ-измерения

Через несколько лет после успешных измерений НР стали наблюдать и сигналы, рассеянные от турбулентностей в тропосфере, стратосфере и мезосфере [Woodman, Guillen, 1974], положивших начало развитию сети МСТ-радаров. В этом случае градиент показателя преломления появляется из-за турбулентного перемешивания атмосферных слоев [Hocking, 1985; Rottger, 1997]. Рассеяние происходит на флуктуациях показателя преломления с характерными масштабами k , равными половине длины радиоволны λ , согласно условию Брегга (это справедливо и для НР, но в литературе по МСТ акцент на этом делается чаще). При этом интенсивность турбулентных флуктуаций характеризуется энергетическим спектром, структура которого меняется с высотой в атмосфере и определяет амплитуду рассеянного сигнала. Спектр делится на три интервала: длинноволновый интервал, где происходит основная генерация энергии из осредненного движения воздуха, интервал инерции, где интенсивность убывает как $k^{-5/3}$, и интервал вязкости, где происходит сильное затухание флуктуаций (k^{-7}) и переход энергии в тепло (см. рис. 3.2).

Высота перехода между интервалами зависит от параметров атмосферы и интенсивности турбулентностей, характеристикой которой выступает скорость диссипации турбулентной энергии ε . Отмеченный на рисунке промежуточный вязко-конвективный подинтервал имеет значение для мезосферы, где рассеяние усиливается благодаря присутствию электронов и тяжелых ионов. При описании спектра турбулентностей важное значение имеет так называемый Колмогоровский масштаб, находящийся в интервале инерции:

$$\eta_K = (v^3/\varepsilon)^{1/4}, \quad (3.2)$$

где v — кинематическая вязкость среды. С ростом высоты вязкость растет, что приводит к смещению η_K в область больших масштабов. Масштаб перехода между интервалами инерции и вязкости можно аппроксимировать выражением, справедливым для воздуха [Hocking, 1985]:

$$l_0 \approx 7.4\eta_K. \quad (3.3)$$

Переход в длинноволновую область, иначе называемую интервалом плавучести, определяется ε и частотой Брента-Вайсяля ω_B :

$$L_B \approx (2\pi/0.62)\varepsilon^{1/2}\omega_B^{-3/2}. \quad (3.4)$$

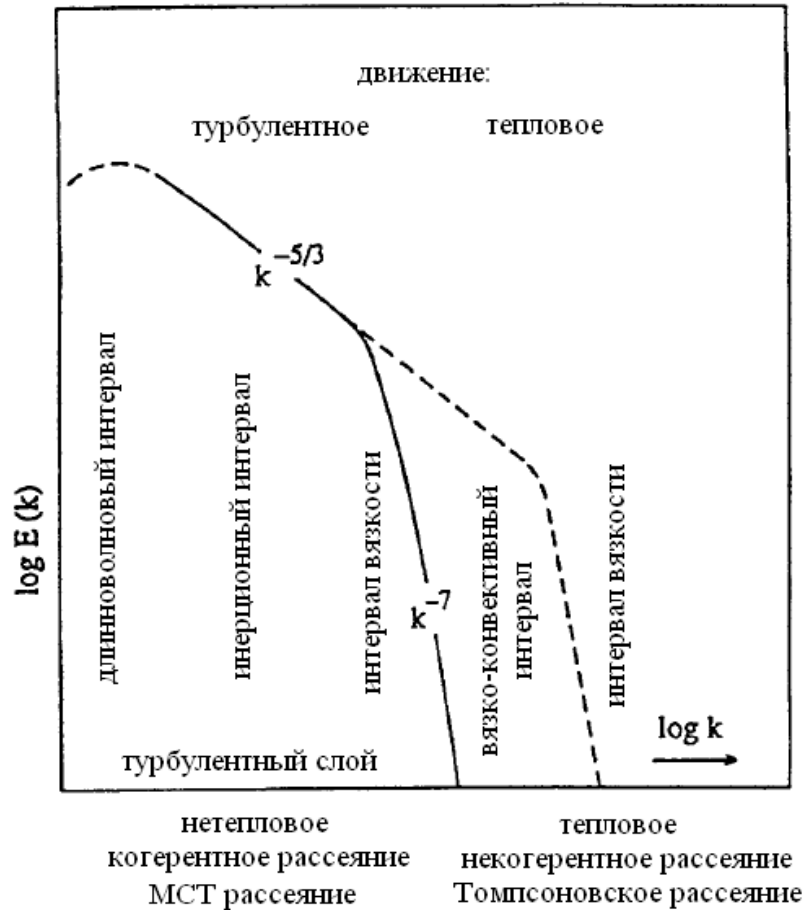


Рисунок 3.2. Энергетический спектр турбулентных флуктуаций. Из материалов [Rottger, 1997]

На рис. 3.3 показаны высоты переходов между интервалами спектра, построенные по атмосфере, заданной моделью NRLMSISE-00 [Picone et al., 2002] для Иркутска, при разных значениях скорости диссипации турбулентной энергии. Для МСТ-радара с узкой рабочей полосой, важно подобрать частоту таким образом, чтобы наблюдать турбулентные флуктуации с масштабами, лежащими в интервале инерции. Также из рисунка видно, что турбулентности с высокой интенсивностью имеют более широкий интервал инерции. Большинство МСТ-радаров работает около частот 50 МГц ($\lambda = 6$ м), соответствующей бреговскому масштабу 3 м. Тем не менее, в средней и верхней стратосфере рассеянный сигнал становится слишком слабым из-за низкой интенсивности турбулентностей, поэтому измерения в этой области проводились только с помощью самых крупных радаров [Maekawa et al., 1993].

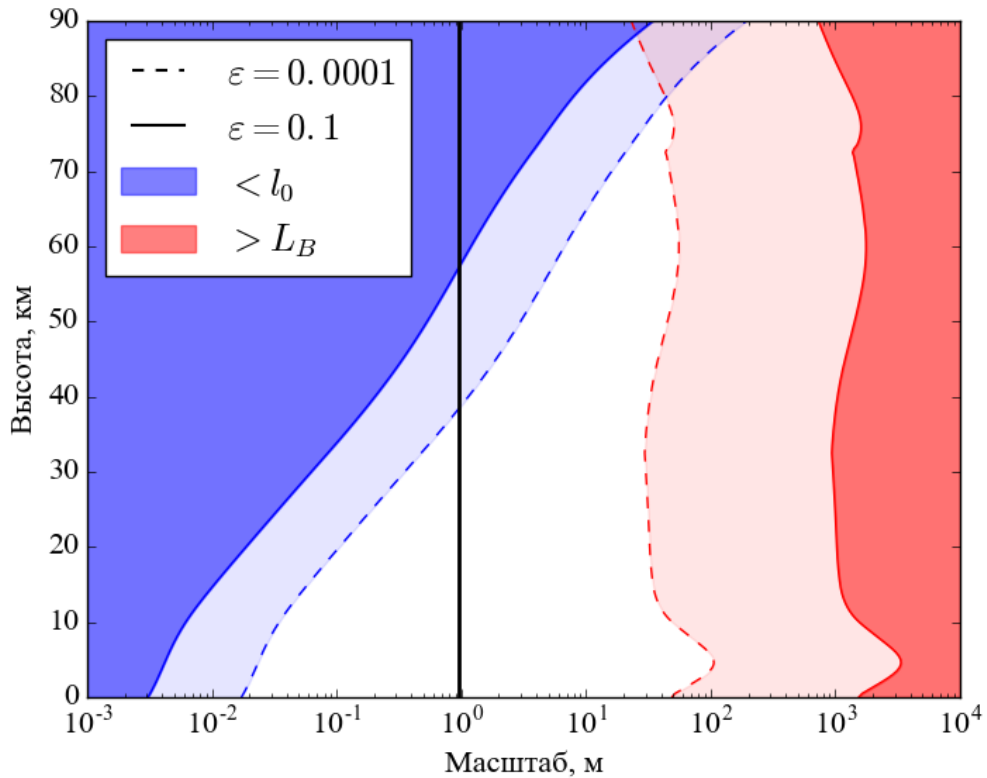


Рисунок 3.3. Изменение границ переходов между интервалами спектра турбулентностей с высотой. Голубым цветом отмечен интервал вязкости, красным — длинноволновый интервал. Показаны границы для разного значения ε , соответствующего интенсивности турбулентности. Вертикальной черной линией отмечен масштаб 0.95 м, соответствующий радарным измерениям на частоте 158 МГц (по условию Брегга)

В мезосфере рассеяние с одной стороны ослабляется из-за роста вязкости, с другой — усиливается благодаря присутствию заряженных частиц, поэтому возможность наблюдения рассеяния сильно зависит от текущих условий. Наблюдаются, также, особенно интенсивные эхо-сигналы от мезосферы на высотах ~ 85 км в летнее время (летнее мезосферное эхо, MSE) [Cho, Kelley, 1993] и на высотах ~ 70 км в зимнее время (зимнее мезосферное эхо, MWE) [Kirkwood, 2007]. Их измерения проводились в широком диапазоне частот, от средних до ультракоротких волн [Терещенко и др., 2002; Rapp et al., 2008; Strelnikova, Rapp, 2011]. Мезосферное эхо чаще появляется в полярном регионе, однако регулярно наблюдается даже на относительно небольших среднеширотных радарх [Zeller et al., 2006].

Физические механизмы, ответственные за формирование эха, являются предметом активных исследований. Согласно основной теории возникновения летнего мезосферного эха, на высоте ~ 85 км образуются ионизированные ледяные частицы, уменьшающие диффузию электронов и, как результат, усиливающие флуктуации электронной концентрации на малых

пространственных масштабах [Rapp, Lubken, 2004]. Степень ослабления диффузии характеризуется числом Шмидта Sc , которое может возрасти на несколько порядков при появлении эха [Strelnikov et al., 2009]. Летнее эхо часто сопровождается серебристыми облаками, видимыми невооруженным взглядом [Терещенко и др., 2010] и возникающими несколько ниже, на высоте ~ 82 км. На высоте возникновения зимнего мезосферного эха (~ 70 км) кинематическая вязкость ниже, поэтому повышения электронной концентрации и интенсивности турбулентностей достаточно для появления эха [Lubken et al., 2007a].

Помимо рассеяния на турбулентных флуктуациях среды, в тропосфере и стратосфере наблюдаются частичные отражения излученного сигнала [Rottger, Liu, 1978], обладающие высокой ракурсной зависимостью [Tsuda et al., 1997]. Данный тип сигналов возникает при наличии сильных горизонтальных градиентов показателя преломления в атмосфере, имеющих размер порядка первой зоны Френеля. В мезосфере интерес представляет рассеяние на метеоритах и их следах, по характеристикам которого можно определить температуру и скорость нейтрального ветра [Serplecha et al., 1998; Hocking, 2011].

Рассеянные и отраженные сигналы, принимаемые МСТ-радары, обладают узким гауссовым спектром, порядка единиц и десятков Гц [Balsley, Gage, 1980; Rottger, 1989]. С учетом того, что МСТ-измерения проводятся на высотах до ~ 100 км, частота повторения импульсов может составлять тысячи кГц, когерентные свойства сигнала между импульсами сохраняются, благодаря чему возможно когерентное накопление существенно улучшающее ОСШ. Спектр обладает доплеровским смещением, соответствующим радиальной скорости ветра. Для определения полного вектора скорости, измерения проводятся как минимум в трех разных направлениях. Оценка характеристик спектра — смещения, интенсивности и ширины — производится разными спектральными и корреляционными методами [Doviak, Zrnic, 1993; Fukao, Namazu, 2014]. На основе полученных характеристик сигнала находят высотные профили физических параметров среды: скорости диссипации турбулентной энергии, полного вектора скорости нейтрального ветра, характеристик волновых процессов, слоев и мезосферного эха. Как и в НР, некоторые измерения возможны только после абсолютной калибровки, например, измерения интенсивностей турбулентностей [Hocking, 1985] и мезосферного эха [Latteck et al., 2008] по величине принятой мощности.

3.2 Метод оценки диагностического потенциала

В основных видах НР- и МСТ-измерений считается, что рассеиватели равномерно распределены в пределах облученного объема среды, что называют объемным рассеянием, интенсивность которого характеризуется удельной эффективной площадью рассеяния $\sigma_{\text{ср}}$

(УЭПР), измеряемой в м^{-1} ($\text{м}^2/\text{м}^3$, ЭПР на единицу объема). Для того чтобы оценить возможность измерения некоторого параметра атмосферы, проводится сравнение УЭПР среды $\sigma_{\text{ср}}$ с чувствительностью радара. При этом чувствительность радара должна учитывать не только шумовую обстановку и собственные шумы, но и характеристики самого радара и метода обработки сигнала. Пусть чувствительность радара определяется минимальной УЭПР $\sigma_{\text{мин}}$, которой должна обладать среда для достижения необходимой статистической точности. Тогда в качестве диагностического потенциала радара выступает отношение $\sigma_{\text{ср}}/\sigma_{\text{мин}}$ — если оно превышает единицу, то измерение возможно. Поскольку радары измеряют высотные профили параметров среды, метод позволяет получить диапазон высот, где возможно проведение измерений, при заданной модели среды. Минимальная УЭПР $\sigma_{\text{мин}}$ определяется из основного радиолокационного уравнения для случая объемного рассеяния (например, [Bowles et al., 1962]):

$$P_{\text{п}} = \frac{P_{\text{и}} L \sigma \tau c \lambda^2}{128 \pi^3 R^2} \int_{4\pi} G_{\text{и}} G_{\text{п}} d\Omega, \quad (3.5)$$

где $P_{\text{и}}$ — мощность излучения, τ — длина импульса, $G_{\text{и}}$, $G_{\text{п}}$ — коэффициент усиления антенны на излучение и прием. Выразим принятую мощность $P_{\text{п}}$ через отношение сигнал/шум:

$$\text{ОСШ} = \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{ш}}} = \frac{P_{\text{п}}}{k T_{\text{с}} B}. \quad (3.6)$$

Тогда чувствительность радара будет иметь вид

$$\sigma_{\text{мин}} = \frac{128 \pi^3 R^2 k T_{\text{с}} B}{P_{\text{и}} L \tau c \lambda^2 \int_{4\pi} G_{\text{и}} G_{\text{п}} d\Omega} \text{ОСШ}. \quad (3.7)$$

При некотором заданном методе обработке сигнала и желаемой статистической точности определения параметра сигнала или среды, можно установить требование к ОСШ и вычислить чувствительность радара. Для режима НР воспользуемся выражениями для ошибок определения электронной концентрации N_e , температуры электронов T_e и скорости дрейфа плазмы V , полученных по результатам моделирования [Murdin, 1979] и проверенным по реальным измерениям радаров EISCAT и Chatanika:

$$\frac{\sigma_{N_e}}{\mu} = \frac{0.2 + 0.22 \text{ОСШ}^{-1}}{\sqrt{N}}, \quad (3.8)$$

$$\frac{\sigma_{T_e}}{\mu} = \frac{0.15 + 0.18 \text{ОСШ}^{-1}}{\sqrt{N}}, \quad (3.9)$$

$$\sigma_V = \frac{72 + 113 \text{ОСШ}^{-1}}{\sqrt{N}}, \quad (3.10)$$

где μ — среднее значение параметра, N — число некогерентных накоплений.

Для режима МСТ использовались аналитические оценки ошибок, найденные по методу максимального правдоподобия для мощности, доплеровского смещения и ширины спектра, из [Zrníc, 1979], и позднее доработанные в [Doviak, Zrníc, 1993] и [Fukao, Namazu, 2014]. В статьях приводятся выражения для дисперсии этих параметров сигнала при автокорреляционной или спектральной обработке, зависящие от ОСШ, времени накопления и параметров среды. Важное значение имеют корреляционные свойства среды из-за потери когерентности между реализациями соседних импульсов при длительном когерентном накоплении сигнала.

УЭПР среды $\sigma_{\text{ср}}$ для метода НР, ионно-звуковой моды, имеет вид [Evans, 1969]

$$\sigma_{\text{НР}} = \frac{N_e \sigma_e}{(1 + \alpha^2)(1 + \alpha^2 + T_e/T_i)}, \quad (3.11)$$

где $\sigma_e \approx 10^{-28} \text{ м}^2$ – томсоновское сечение рассеяния, $\alpha = 4\pi D/\lambda$, T_e/T_i – отношение температур электронов и ионов.

УЭПР для рассеяния на турбулентных флуктуациях в МСТ зависит от спектра флуктуаций $\Phi_n(k)$ [Татарский, 1967]:

$$\sigma_{\text{МСТ}} = 8\pi^2 k^2 \Phi_n(k). \quad (3.12)$$

Спектр $\Phi_n(k)$ характеризуется структурной постоянной C_n^2 , зависящей от градиента показателя преломления среды и параметров турбулентности. Для тропосферы-стратосферы использовалось выражение из [Hocking, 1985], для мезосферы – [Lubken, 2014], включающее также зависимость от числа Шмидта для моделирования мезосферного эха. Важно отметить зависимость интенсивности рассеяния от частоты: в нейтральной атмосфере УЭПР пропорциональна $\lambda^{-1/3}$, а в ионизированной – $\lambda^{1/3}$, поэтому МСТ-радары с более высокой частотой лучше подходят для измерений в нижней атмосфере [Kato, 2005].

Было проведено тестирование методики на данных СТ радара EAR Университета Киото [Fukao et al., 2003]. Радар расположен вблизи экватора, в Индонезии, представляет собой фазированную антенную решетку (ФАР) из 560 элементов с шириной луча 3.4° , работает на частоте 47 МГц и обладает излучаемой мощностью 100 кВт. Результаты измерений регулярно публикуются на сайте [<https://www.rish.kyoto-u.ac.jp/ear/index-e.html>]. На рис. 3.4 показаны высотные профили принятой относительной мощности, скорости зонального ветра и ширины спектра сигнала для 15.06.2015. Особенностью профилей является наличие провала на высотах 12–16 км. По формулам (3.7) и (3.12) были посчитаны $\sigma_{\text{мин}}$ согласно спецификациям радара и $\sigma_{\text{ср}}$ по параметрам среды в точке размещения, полученные по модели NRLMSISE-00. Скорость диссипации турбулентной энергии составляла $10^{-3} \text{ м}^2\text{с}^{-3}$ в тропосфере и $10^{-5} \text{ м}^2\text{с}^{-3}$ в стратосфере, что соответствует умеренным возмущениям [Watkins et al., 1988; Kantha, Hocking, 2011; Gavrilov, 2013]. На рис. 3.5 продемонстрирован диагностический потенциал $\sigma_{\text{ср}}/\sigma_{\text{мин}}$

радар EAR в стратосфере-тропосфере согласно представленному методу. Требуемое СКО измерения мощности – 10 %, скорости – 0.5 м/с, ширины спектра – 1 м/с. Если потенциал превышает единицу, измерения с заданными требованиями возможны. Чем больше потенциал, тем ниже может быть временное разрешение или выше точность измерений. В целом, форма профиля потенциала похожа на реальные измерения – высота ограничена 20 км, а в диапазоне 10–12 км наблюдается провал. Тем не менее, высота провала немного смещена вниз относительно реальных данных.

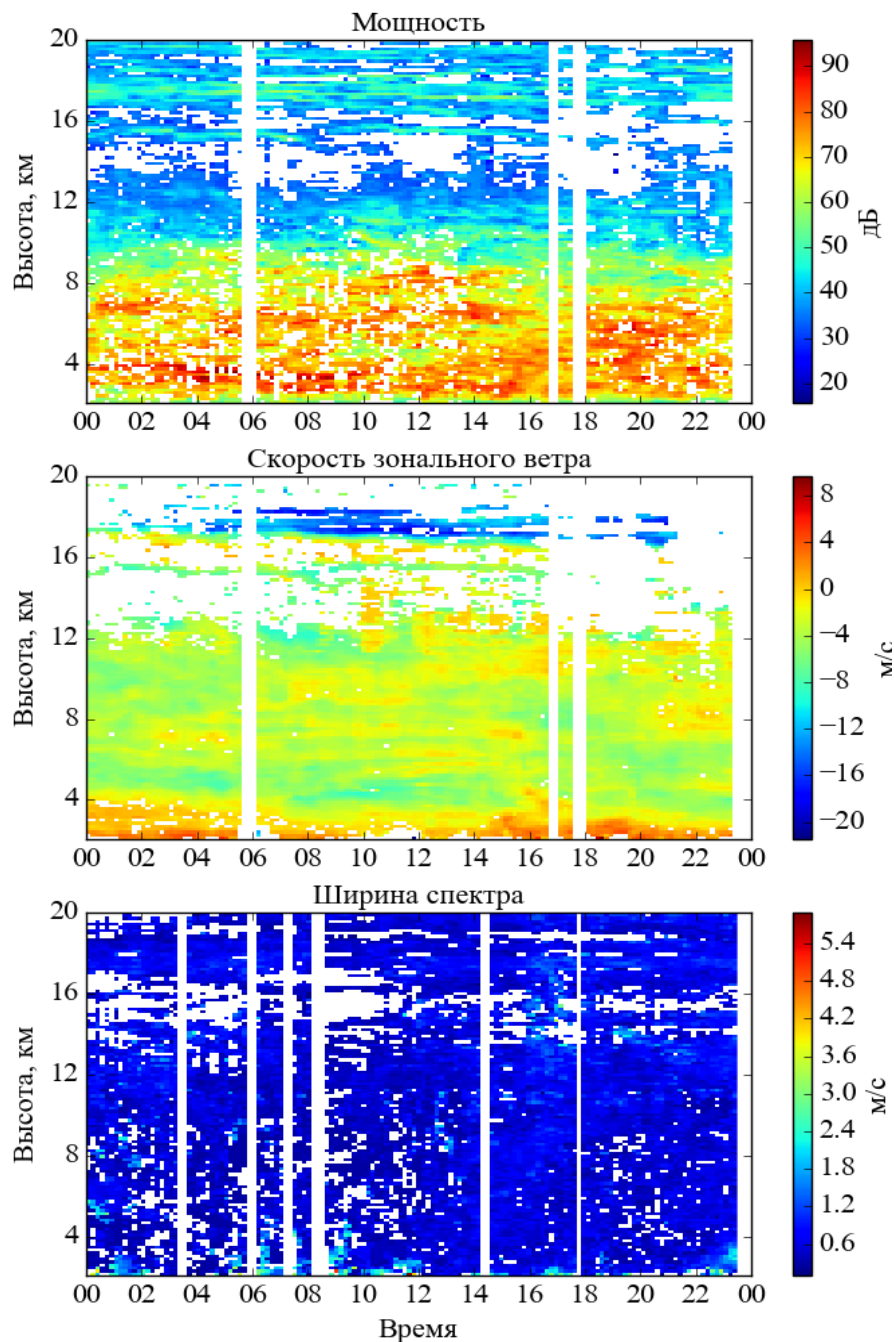


Рисунок 3.4. Результаты измерений параметров атмосферы на радаре EAR 15.06.2015

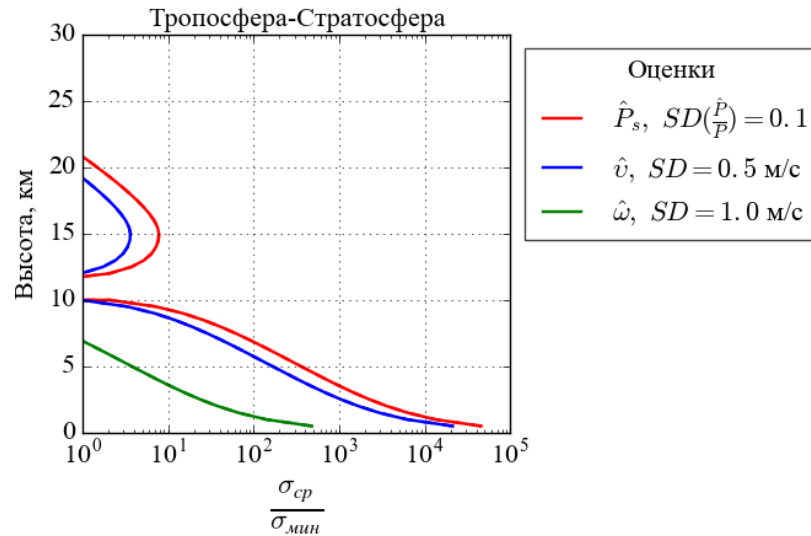


Рисунок 3.5. Диагностический потенциал радара EAR в тропосфере-стратосфере

3.3 Диагностический потенциал ИРНР и перспективного радара НР-МСТ

На этапе написания этой работы (2024–2025 гг.) известно большинство характеристик радара НР-МСТ. Это ФАР на диапазон 154–163 МГц, состоящая из трех панелей: двух близкорасположенных приемо-передающих и одной приемной на удалении в ~ 2 км. Расстояние между основными панелями составляет 100 м, панели наклонены на 20° в стороны друг от друга (см. рис. 3.6) и ориентированы вдоль направления Север-Юг, что позволяет расширить сектор обзора для исследований, связанных с магнитным полем. Между панелями располагаются контейнеры с приемным, передающим и управляющим оборудованием. Радар будет расположен вблизи м. Харикта Ольхонского района Иркутской области, в естественной котловине, для обеспечения низкого радиогоризонта, т. е. расстояния, на котором ожидается снижение уровня помех от рельефа местности. Каждая панель состоит из 1536 крест-вибраторов, сгруппированных в подрешетки для гибкого контроля над диаграммообразованием радара. Благодаря группировке, возможно формирование сразу нескольких независимых лучей ДН. Разнесение панелей ФАР позволит проводить интерферометрические измерения для исследования тонкой структуры наблюдаемых объектов.

В таблице 3.1 перечислены основные характеристики радара НР-МСТ в сравнении с ИРНР. В современном видении проекта, все характеристики нового радара лучше по сравнению со старым. Существенным является различие в радиогоризонте — на ИРНР помехи от рельефа местности мешают приему сигналов до высоты 100–160 км. Но основное преимущество радара НР-МСТ — это скважность излучения, потому что из-за особенностей синхронизации, частота повторения импульсов ИРНР не превышает 24.4 Гц, а в настоящее время равна ~ 10 Гц, в то время как радар НР-МСТ обладает частотой повторения до 5 кГц. Кроме того, в новом радаре

будет организована более совершенная система формирования сигналов, позволяющая задавать сигналы разной формы с широкой полосой.

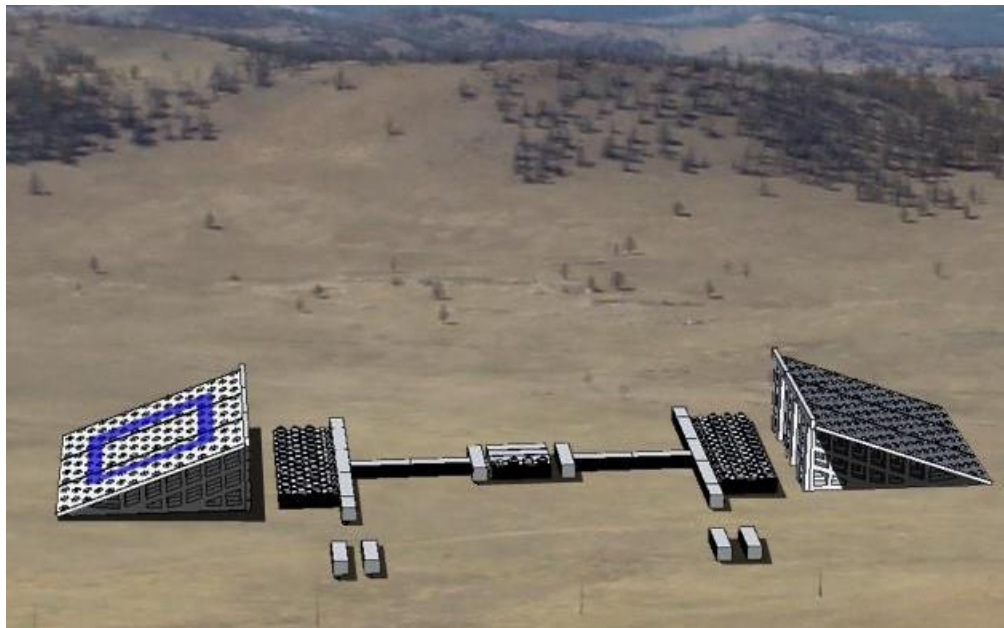


Рисунок 3.6. Вид радара НР-МСТ, согласно проекту

Таблица 3.1. Сравнение характеристик ИРНР и радара НР-МСТ

Характеристика	ИРНР	НР-МСТ
Тип антенны	Рупор с щелевым волноводом в основании	ФАР из 3 антенных панелей по 1536 крест-вибраторов
Поляризация	линейная	две ортогональные линейные
Радиогоризонт	~160 км	2 км
Частотный диапазон	154–163 МГц	
Импульсная мощность	3.2 МВт	6 МВт
Эффективная площадь	1900 м ²	1250×2 = 2500 м ² передача 1250×3 = 3750 м ² прием
Ширина луча ДН	0.5°×10°	2.5°×2.5° для каждой панели
Сектор обзора	0–30° в южном направлении	±65° север–юг ±45° восток–запад
Максимальное разрешение по высоте	- ~2.5 км (ионосфера)	30 м (тропосфера–стратосфера) 1 км (ионосфера)
Максимальная частота повторения импульсов	- 24.4 Гц (ионосфера)	5 кГц (тропосфера–стратосфера) 75-250 Гц (ионосфера)
Чувствительность (SEFD)	0.6 кЯн	0.4 кЯн (три панели)

По приведенным в таблице значениям видно, что радар НР-МСТ обладает чуть большей чувствительностью по потоку. Помимо этого, антенная и приемная система НР-МСТ лучше подходит для радиоастрономических измерений. Она не привязана к тактам системы

синхронизации, а направление приема не зависит от частоты, в связи с чем регистрацию сигнала в пассивном режиме можно осуществлять непрерывно и её проще встроить в активные режимы работы, чтобы вести наблюдения радиоисточников постоянно. Чувствительности по потоку обоих радаров достаточно для основных видимых радиоисточников, но НР-МСТ позволит накапливать сигнал быстрее.

По методу оценки диагностического потенциала проведено моделирование для радара НР-МСТ и ИРНР при измерениях высотных профилей электронной концентрации N_e , температуры электронов T_e и скорости дрейфа плазмы V . В качестве модели ионосферы в формуле (3.11) для УЭПР среды использовалась IRI (International Reference Ionosphere) [Bilitza et al., 2017] в месторасположении радаров для летнего полдня (15.06.2012 12:00 LT). Требование к относительному СКО N_e и T_e составляет 10 %, СКО оценки скорости дрейфа плазмы — 45 м/с при длительности накопления 10 мин (формулы (3.8), (3.9), (3.10)).

Для НР-МСТ предполагается работа в двух режимах: НР-1 для диапазона высот 100–600 км и НР-2 для высот от 600 до 2000 км. В первом режиме излучение и прием ведется одной панелью ФАР, длительность импульса 700 мкс, частота повторения 250 Гц. НР-2 — это наиболее энергетически затратный режим для измерения параметров на максимально возможной высоте, предполагающий работу двумя панелями одновременно с импульсами длительностью 4000 мкс и частотой повторения 75 Гц. Общие потери в приемном и передающем тракте L радара НР-МСТ выбраны равными 0.25. Диагностический потенциал при исследовании ионосферы приведен на рис. 3.7. Проведение измерений возможно на высотах, где отношение $\sigma_{\text{ср}}/\sigma_{\text{мин}} > 1$, а там, где превышение значительное, возможно увеличение временного разрешения или снижение погрешности измерения. Из рисунка следует, что одной панели радара НР-МСТ достаточно для измерений в высотном диапазоне 100–600 км, а при использовании двух панелей возможно получение профилей скорости до 900 км, температуры электронов до 1100 км и электронной концентрации до 1300 км.

Оценить достоверность предсказаний можно путем моделирования потенциала ИРНР. Параметры моделирования выбраны согласно штатному режиму работы ИРНР. Потери на передачу составляют 0.4, шумовая температура — 420 К, согласно проведенной калибровке. Параметры ионосферы и требования к СКО остаются прежними. На рис. 3.8 показано сравнение промоделированного диагностического потенциала ИРНР с реально наблюдаемой относительной ошибкой измерения N_e , оцененной по одному дню наблюдений ионосферы. Из опыта исследований ионосферы, проводимых на ИРНР, предельные высоты оценки параметров по результатам моделирования близки к реальным [Shcherbakov et al., 2015; Ташлыков и др., 2018; Алсаткин и др., 2020]. Высотные профили ИРНР начинаются от ~160 км из-за

ограниченного радиогоризонта, поэтому ошибка измерения N_e начинается с этой высоты. На высоте 530 км на графике ошибки имеется пик — следствие отраженных от спутников Starlink помеховых сигналов, которые регулярно присутствуют на этих высотах. Ошибка начинает существенно расти на высотах выше 500 км, в то время как диагностический потенциал падает ниже 1 на высоте около 600 км. Это можно объяснить разницей в частоте повторения импульсов, поскольку в реальных наблюдениях она ниже максимально возможной. Начиная с высоты 500–600 км измерения на ИРНР редки, ведутся при низком $ОСШ$, обладают высокой погрешностью.

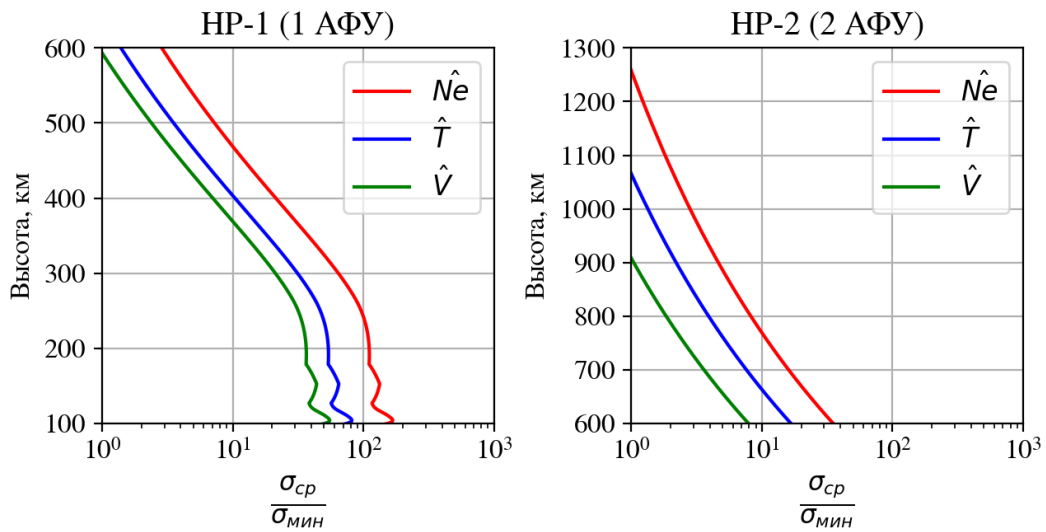


Рисунок 3.7. Диагностический потенциал НР-МСТ при измерении параметров ионосферы. Слева — режим НР-1 (100–600 км), справа — режим НР-2 (600–1300 км). Антенно-фидерное устройство (АФУ) в заголовках, соответствует одной панели ФАР

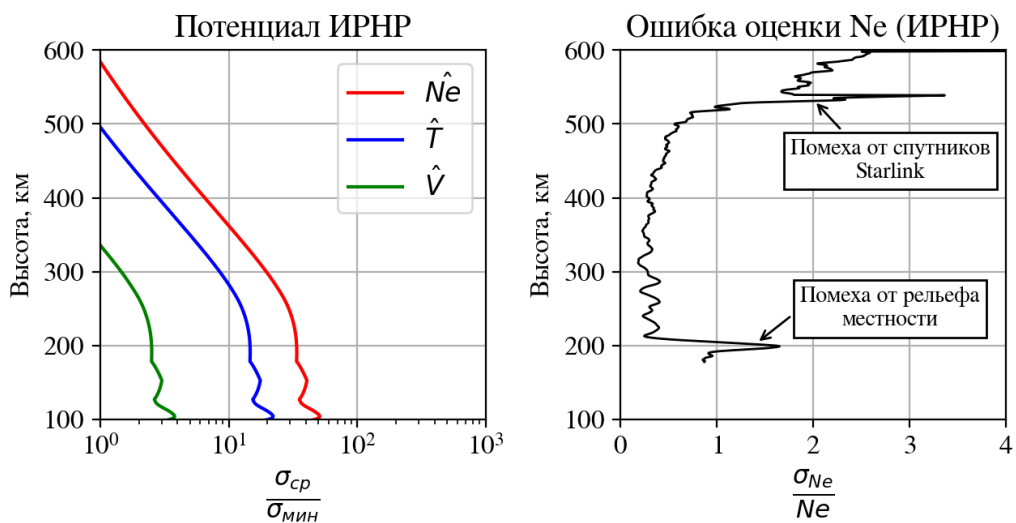


Рисунок 3.8. Сравнение диагностического потенциала ИРНР (слева) и относительной ошибки определения N_e , усредненной за день наблюдений (справа)

Поскольку радар НР-МСТ также позволяет исследовать область нижней и средней атмосферы, была проведена оценка его диагностического потенциала при измерении характеристик сигналов, рассеянных на турбулентных флуктуациях в стратосфере-тропосфере (СТ) и мезосфере (М). В этом случае, в связи с значительной частотной зависимостью интенсивности рассеяния, интересно было посмотреть разницу в потенциале для радаров с разной частотой: характерной для МСТ-радаров частотой 50 МГц, частотой 158 МГц радара НР-МСТ и популярной среди радаров НР частотой 233 МГц. В качестве моделей атмосферы и ионосферы использовались NRLMSIS-00 и IRI. Скорость диссипации турбулентной энергии задана на уровне $10^{-3} \text{ м}^2\text{с}^{-3}$ в тропосфере, $10^{-5} \text{ м}^2\text{с}^{-3}$ в стратосфере и $10^{-1} \text{ м}^2\text{с}^{-3}$ в мезосфере. Предполагается измерение высотных профилей радиальной скорости, как наиболее важной характеристики при исследовании динамики атмосферы. Длительность импульса составляет 7 мкс, частота повторения 1 кГц, длительность накопления 20 с. Требуемое СКО скорости в тропосфере – 0.5 м/с, в мезосфере — 2 м/с. В мезосферном режиме предполагается наблюдение летнего мезосферного эха (повышение числа Шмидта) и зимнего мезосферного эха (повышенная электронная концентрация). Результаты моделирования приведены на рисунках 3.9 и 3.10.

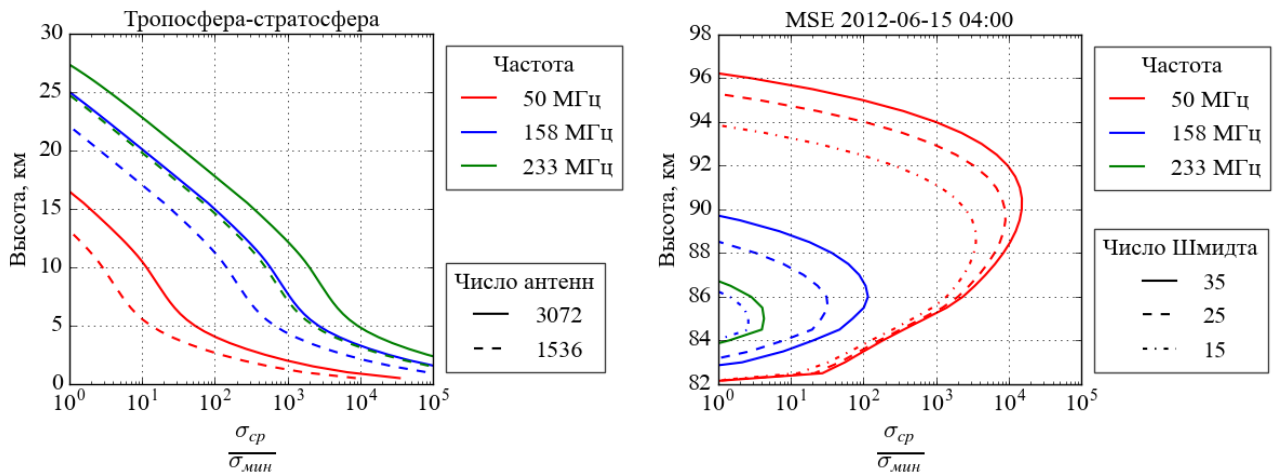


Рисунок 3.9. Диагностический потенциал радара НР-МСТ в режиме МСТ при наблюдении тропосферы–стратосферы (слева) и летнего мезосферного эха (справа). Число антенн 1536 соответствует работе одной панелью ФАР, 3072 антенны — две панели ФАР. Число Шмидта характеризует соотношение вязкости и диффузии

Видно, что СТ наблюдения на радаре НР-МСТ возможны до высоты ~ 25 км, а увеличение частоты приводит к повышению диагностического потенциала. В мезосфере наблюдения возможны только при возникновении подходящих условий для мезосферного эха,

т. е. понижения диффузии электронов в случае летнего эха и повышении электронной концентрации в случае зимнего эха. В мезосфере частота 50 МГц имеет существенное преимущество, позволяя получать сигналы от большего диапазона частот, но возможность наблюдений есть даже на 233 МГц. Представленные частотные зависимости согласуются с теорией [Kato, 2005].

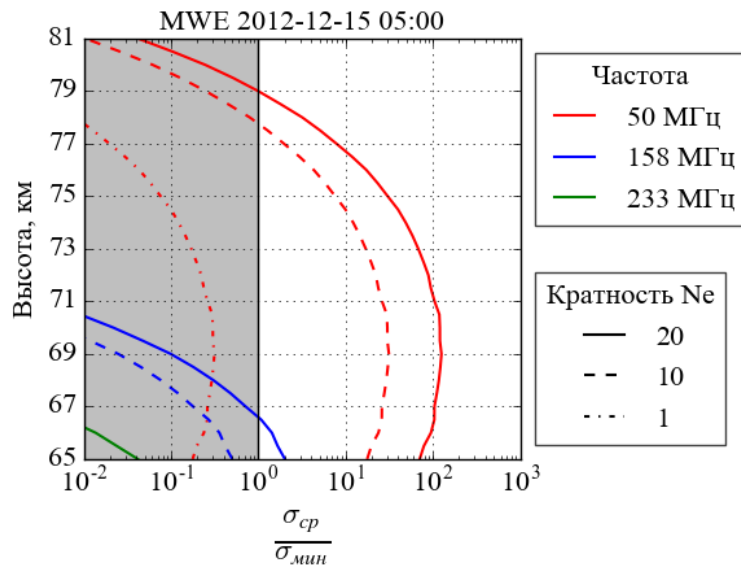


Рисунок 3.10. Диагностический потенциал НР-МСТ радара при наблюдении зимнего мезосферного эха. Разными видами штриховки линий обозначено кратное повышение N_e .

Серым показана область, где требования к качеству оценок параметров не выполняется

Также проведено моделирование изменения диагностического потенциала радара НР-МСТ в течение года. На рис. 3.11 цветом показаны периоды и высоты, где наблюдения возможны, причем в мезосфере считается, что число Шмидта фиксировано, а меняются только параметры среды. Ожидается, что измерение летнего мезосферного эха возможно только в летнее время, потому что в зимнее время фоновой электронной концентрации недостаточно для получения достаточного $ОСШ$. Тем не менее, более существенным фактором будет появление ледяных частиц в холодной летней мезосфере, необходимых для возрастания числа Шмидта. В тропосфере–стратосфере же измерения возможны постоянно.

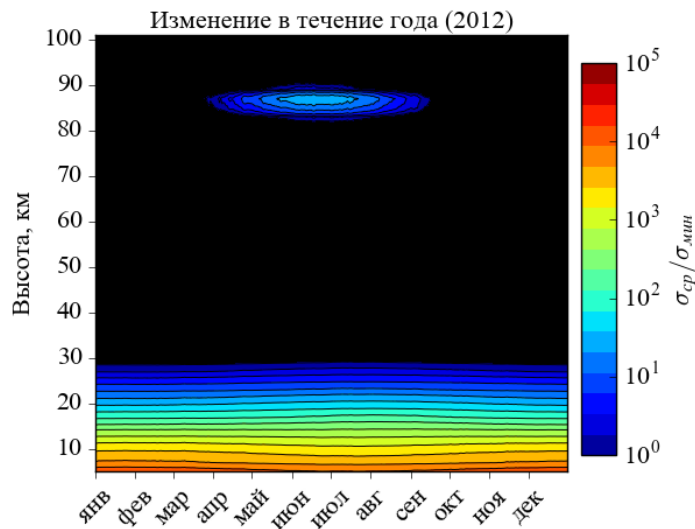


Рисунок 3.11. Изменение диагностического потенциала в МСТ-области в течение года

Основным выводом проведенной работы является факт возможности наблюдений в МСТ новым радаром с заданными техническими характеристиками, а также значимое повышение диагностического потенциала относительно ИРНР в ионосферных и других видах измерений.

3.4 Рекомендации по разработке НР- и МСТ-радаров

На основе проведенной работы можно привести ряд рекомендаций по выбору характеристик и конфигурации радиолокационных систем, сочетающих в себе функции НР- и МСТ-радара.

Главным параметром, определяющим технический вид и диагностические возможности радара, является рабочая частота, которая, однако, чаще выбирается исходя из доступного радиочастотного диапазона и имеющихся проектных решений. Нижняя граница частот ограничена условием распространения в ионосфере — частота радиоволны должна быть выше максимальной плазменной частоты на высоте F2-слоя в месте размещения радара. Выбор конкретной частоты для возможности работы в НР- и МСТ-режимах является скорее компромиссным. МСТ-радары выигрывают от меньшей частоты, поскольку основная сложность состоит в наблюдении мезосферы, но, тем не менее, в тропосфере–стратосфере потенциал выше у радаров с более высокой частотой. Мощность ионно-звуковой компоненты НР-сигнала падает с частотой, но обеспечить высокий коэффициент усиления антенны, требуемый для измерений, проще с более высокочастотным радаром. Кроме того, повышение частоты ведет к уменьшению размеров антенны, а следовательно, меньшим затратам на производство и эксплуатацию оборудования. Ещё одним фактором выбора частоты НР-измерений является определение

электронной концентрации по вращению плоскости поляризации из-за эффекта Фарадея — на частотах ~ 50 МГц плоскость может вращаться слишком быстро при высоких значениях N_e , а на частотах выше 300 МГц — слишком медленно при малых N_e . Чувствительность приемной системы также зависит от частоты, поскольку шум неба возрастает с единиц Кельвина в сантиметровом диапазоне до десятков тысяч Кельвина в декаметровом диапазоне. Соответственным образом должны выбираться шумовые характеристики входных усилителей приемников — нет смысла в усилителе с малым коэффициентом шума, эквивалентным 50 К, если доминирующей и неизбежной помехой является шум неба в 10000 К.

Требуемая мощность излучения зависит от задач радара. Естественно, повышение мощности ведет к повышению ОСШ и качественных характеристик измерений, но можно выделить ряд значений мощности для основных видов наблюдений. В стратосфере–тропосфере необходимая импульсная мощность составляет 100 кВт, в мезосфере — 1 МВт, в ионосфере на высотах Е- и F-слоев — 2–3 МВт, в верхней ионосфере и плазмосфере — 4 МВт и выше. При этом слишком большая излучаемая мощность может привести к насыщению приемников при работе на низких высотах, поэтому приемник должен обладать высоким динамическим диапазоном, а мощность излучения должна регулироваться.

Ранние радары НР часто выполнялись как массивные параболические антенны, для направления луча которых требовалась механическая поворотная система. Современные НР- и МСТ-радары выполняются в виде ФАР с электронным сканированием, прежде всего необходимым для быстрого получения информации о среде в разных направлениях. Антенны ФАР должны позволять вести прием сигналов в двух ортогональных поляризациях, для получения полной информации о вращении плоскости поляризации из-за эффекта Фарадея в ионосфере. Более совершенные ФАР разбиты на независимые подрешетки с произвольным амплитудно-фазовым распределением, предоставляя гибкость выбора режима работы и возможность ограниченного использования антенной площади для задач, не требующих высокого потенциала или углового разрешения. Наиболее перспективным является создание антенной системы с разнесенными приемо-передающими пунктами, открывающей возможности по томографии атмосферы и ионосферы. Расположение антенны следует выбирать в целях минимизации радиогоризонта, вплоть до 2 км для измерений в стратосфере–тропосфере, для снижения помех от рельефа местности, поскольку методы их вычитания имеют ограниченную эффективность.

Корреляционные свойства атмосферы существенно меняются при переходе между атмосферными слоями и соответственно должна меняться форма, методы формирования и обработки сигнала. Система формирования должна позволять генерировать импульсные

сигналы произвольной формы с разными видами модуляции, а передающая система должна позволять беспрепятственно их излучать. Минимальное разрешение по высоте, требуемое в нижней атмосфере, составляет десятки метров, и определяет необходимую минимальную длину импульса и максимальную полосу сигнала. Например, для получения разрешения 15 м требуется фазоманипулированный импульс с кодовой последовательностью, длина дискрета которого составляет 0.1 мкс, и, соответственно, ширина полосы приемника и передатчика должна составлять 10 МГц. В режиме НР широкая полоса открывает доступ к измерениям электронной линии спектра сигнала, смещенной относительно центральной на величину плазменной частоты, хотя существуют способы измерений и с малой полосой. Исследование верхней ионосферы требует большой длины импульсов (4 мс и более) и высокой скважности для достижения максимальных энергетических характеристик и ОСШ.

В ходе этой работы было показано, что абсолютная калибровка имеет множество нюансов, учесть которые сложно, используя только сигналы радиоисточников и шума неба. Новые радары должны на этапе проектирования разрабатываться с системой автоматической регулярной калибровки, затрагивающей не только полный приемный тракт, но и отдельные его части, а также предоставляющей контроль за уровнем и формой излучаемого сигнала.

Заключение

Основные результаты работы:

1. Разработан метод и программный комплекс для абсолютной калибровки приемного тракта ИРНР по картам шума неба, применимый для большинства режимов работы и позволяющий измерять принятую мощность сигнала в ваттах. Разработана модель шумовой температуры антенны ИРНР. Проведена абсолютная калибровка всех радиоастрономических данных с 2011 по 2022 гг., а именно получены частотные зависимости усиления и собственных шумов приемного тракта. По результатам калибровки средняя шумовая температура приемной системы ИРНР составила 420 К (шум неба и собственные шумы), чувствительность по потоку — 0.6 кЯн. Проведена калибровка передающего тракта путем сравнения измеренных абсолютных значений мощности и мощности сигнала некогерентного рассеяния, полученной по фарадеевским вариациям. Для этого был разработан телеметрическое оборудование, позволяющее регистрировать мощность излучения. Показано, что потери в передающем тракте составляют ~ 0.4 .

2. Разработан метод и программный комплекс для определения солнечного потока на частоте 161 МГц по данным радиоастрономических наблюдений ИРНР. Разработана модель солнечного трека ИРНР, необходимая для оценки потока. Проведены калиброванные измерения потока для 634 дней наблюдений с 2011 по 2022 гг. и оценена погрешность измерений. Разработано программное обеспечение для оценки солнечного потока во время радиовсплесков, позволяющее достичь максимального временного разрешения.

3. По полученным измерениям солнечного потока на 161 МГц был проведен статистический и корреляционный анализ в сравнении с измерениями потока на 245 МГц станции Лермонт и индексом F10.7. Определено, что среднее значение потока спокойного Солнца, измеряемого на ИРНР, составляет 5.5 с.е.п., что согласуется с теоретическими значениями. Показано, что интенсивные вариации среднедневного потока часто происходят одновременно на 161 и 245 МГц, но не сопровождаются соответствующими по амплитуде усилениями потока F10.7. Связь между потоками 161 МГц, 245 МГц и F10.7 носит нелинейный характер. Автокорреляция внутрисуточных вариаций потока на 161 и 245 МГц показала, что в данных ИРНР и Лермонт присутствуют дни с суточным ходом, обусловленным погрешностью измерений.

4. Проведен анализ радиовсплеска 22 мая 2021 г., появившегося на фазе спада солнечной вспышки и проявившегося в измерениях солнечного потока ИРНР. Показано, что радиовсплеск

на частоте 161 МГц предшествовал всплескам на частотах 5.6 ГГц и 72 МГц, поэтому возмущение изначально возникло в короне на высоте, соответствующей 161 МГц, и ускорило электроны в разные стороны вдоль силовых линий.

5. Разработан метод оценки диагностического потенциала НР- и МСТ-радаров в задачах исследования атмосферы Земли. С помощью этого метода было проведено сравнение радаров НР-МСТ и ИРНР, и показано, что перспективный радар НР-МСТ, строящийся в рамках Национального гелиогеофизического проекта, обладает более высоким исследовательским потенциалом. Благодаря уникальной рабочей частоте, высокому энергетическому потенциалу, гибкости системы формирования импульсов и частоте повторения импульсов до 5 кГц, возможны не только изучение ионосферы методом НР на высотах до 1300 км, но и исследования тропосферы, стратосферы и мезосферы.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю Андрею Всеволодовичу Медведеву за наставления, ценные идеи и продуктивные обсуждения, а также за помощь в освоении моего научного пути. Автор благодарит Валентина Павловича Лебедева, без которого эта работа не была бы завершена, за объяснение радиофизических принципов работы антенны ИРНР, терпение и поддержку. Автор выражает признательность Роману Валерьевичу Васильеву за советы и дискуссии, касающиеся радиоастрономических наблюдений, а также Ларисе Камалетдиновне Кашаповой и Илье Дмитриевичу Мотыку за совместную работу по солнечной вспышке. Эта диссертация была бы немыслима без людей, занимающихся Иркутским радаром некогерентного рассеяния, поэтому автор крайне признателен Дмитрию Сергеевичу Кушнареву за создание программного комплекса радара и помощь в обработке пассивных данных, инженерному коллективу ИСЗФ (В.Е. Зарудневу, С.Е. Евстифееву) за постоянную работу над усовершенствованием оборудования радара и коллективу обсерватории радиофизической диагностики атмосферы за поддержание радара в работоспособном состоянии.

Автор благодарит сотрудников Бюро метеорологии правительства Австралии и университета Киото за предоставление открытого доступа к данным обсерваторий Лермонт и радара EAR.

Публикации по теме диссертации

1. Potekhin A.P, **Setov A.G.**, Lebedev V.P., Medvedev A.V., Kushnarev D.S. Prospective IS-MST radar. Potential and diagnostic capabilities // Solar-Terrestrial Physics. 2016. V.2, N.3. P. 3–16. DOI: 10.12737/22281.
2. **Setov A.G.**, Medvedev A.V., Lebedev V.P., Kushnarev D.S., Alsatkin S.S., Tashlykov V.P. Calibration methods for absolute measurements at the Irkutsk incoherent scatter radar // Proceedings of 22nd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics, N. 10466, Irkutsk. 2017. DOI: 10.1117/12.2287328.
3. **Setov A.G.**, Globa M.V., Medvedev A.V., Vasilyev R.V., Kushnarev D.S. First results of absolute measurements of solar flux at the Irkutsk incoherent scatter radar (IISR) // Solar-Terrestrial Physics. 2018. V.4 N.3. P. 24–27. DOI: 10.12737/stp-43201804.
4. Medvedev A.V., Potekhin A.P., **Setov A.G.**, Kushnarev D.S., Lebedev V.P. All-atmosphere IS-MST radar // Solar-Terrestrial Physics. 2020. V.6, N.2. P. 41–48. DOI: 10.12737/stp-62202004.
5. **Setov A.G.**, Kushnarev D.S., Vasilyev R.V., Medvedev A.V. Long-term solar flux observations with Irkutsk incoherent scatter radar (IISR) in 2011–2019 // Solar-Terrestrial Physics. 2020. V.6, N.3. P. 29–33. DOI: 10.12737/stp-63202004.
6. Лебедев В.П., **Сетов А.Г.**, Ермаков В.Ю. Антенна Иркутского радара некогерентного рассеяния: математическая модель, методы калибровки // Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». 2022, Муром, с. 527–537. DOI: 10.24412/2304-0297-2022-1-527-537.
7. **Setov A.G.**, Kushnarev D.S. Correlation analysis of solar flux absolute measurements at 161 and 245 MHz // Solar-Terrestrial Physics. 2023. V.9, N.4. P. 46–54. DOI: 10.12737/stp-94202306.
8. Motyk I.D., Kashapova L.K., **Setov A.G.**, Shamsutdinova Yu. N., Kupriyanova E.G. Quick event during the decay phase of the microwave emission of a flare on May 22, 2021 // Geomagnetism and Aeronomy. 2023. V.63, N.7. P. 1062–1071. DOI: 10.1134/S0016793223070174.

Список сокращений

АКФ	— автокорреляционная функция
АФУ	— антенно-фидерные устройства
ДН	— диаграмма направленности
ИРНР	— Иркутский радар некогерентного рассеяния
КА	— космические аппараты
КО	— космический объект
КУ	— коэффициент усиления
МСТ	— мезосфера-стратосфера-тропосфера
НР	— некогерентное рассеяния
ОСШ	— отношение сигнал/шум
с.е.п.	— солнечные единицы потока
СКО	— среднеквадратичное отклонение
ФАР	— фазированная антенная решетка
УЭПР	— удельная эффективная площадь рассеяния
ЭПР	— эффективная площадь рассеяния
GSM	— Global Sky Model
IRI	— International Reference Ionosphere
MSE	— mesospheric summer echo
MWE	— mesospheric winter echo
NF	— noise figure
RSTN	— Radio Solar Telescope Network
s.f.u.	— solar flux units

Список литературы

1. Алсаткин С.С., Медведев А.В., Ратовский К.Г. Особенности метода восстановления N_e на Иркутском радаре некогерентного рассеяния // Солнечно-Земная Физика. 2020. Т. 6. № 1. С. 97-110. DOI: 10.12737/szf-61202009.
2. Алсаткин С.С. Метод восстановления высотного профиля электронной концентрации на основе малопараметрической модели фарадеевских замираний // Канд. диссерт. Иркутск, 2023. 97 с.
3. Бельчиков С. Коэффициент шума. Теория и практика измерений // Компоненты и технологии. 2008. № 5. С. 16-20.
4. Брюнелли Б.Е., Кочкин М.И., Пресняков И.Н. Метод некогерентного рассеяния радиоволн. Ленинград: «Наука», 1979. 188 с.
5. Васильев Р.В., Кушнарев Д.С., Кашапова Л.К., и др. Первые результаты радионаблюдений Солнца и мощных дискретных источников на Иркутском радаре // Астрономический журнал. 2013. Т. 90. № 11. С. 948-958.
6. Драбкин А.Л., Зузенко В.Л., Кислов А.Г. Антенно-фидерные устройства. Второе издание. «Советское радио», 1974. 536 с.
7. Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н. Радиотелескопы и радиометры. «Наука», 1973. 416 с.
8. Железняков В.В., Зайцев В.В. О происхождении солнечных радиовсплесков V типа // Астрономический журнал. 1968. Т. 45. № 1. С. 19-27.
9. Железняков В.В. Радиоизлучение Солнца и планет. «Наука», 1964. 560 с.
10. Жеребцов Г.А., Заворин А.В., Медведев А.В., и др. Иркутский радар некогерентного рассеяния // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47. № 11. С. 1-7.
11. Жеребцов Г.А. Комплекс гелиогеофизических инструментов нового поколения // Солнечно-Земная Физика. 2020. Т. 6. № 2. С. 1-13. DOI: 10.12737/szf-62202001.
12. Иванов В.П., Станкевич К.С. Радиоастрономическая абсолютная шкала потоков (обзор) // Радиофизика. 1986. Т. 29. № 1. С. 3-27.
13. Кушнарев Д.С., Лебедев В.П., Хахинов В.В., и др. Модернизация Иркутского радара некогерентного рассеяния // Солнечно-Земная Физика. 2017. Т. 3. № 3. С. 88-93. DOI: 10.12737/szf-33201708.
14. Кушнарев Д.С. Управляющий и приемно-регистрирующий комплекс для исследования ионосферы и окружающего космического пространства на Иркутском радаре некогерентного рассеяния // Канд. диссерт. Иркутск, 2010. 112 с.

15. Лебедев В.П., Медведев А.В., Хахинов В.В., Шпынев Б.Г. Экспериментальное исследование радиолокационных сигналов, отраженных от космических аппаратов, на Иркутском радаре НР // Труды 7-ой Международной Байкальской Молодежной Научной Школы по Фундаментальной Физике. Иркутск, 2004. С. 96-98.
16. Лебедев В.П. Развитие диагностических возможностей Иркутского радара некогерентного рассеяния для решения задач контроля космических аппаратов и проведения активных космических экспериментов // Канд. диссерт. Иркутск, 2015. 118 с.
17. Медведев А.В. Развитие методов и аппаратных средств радиофизических исследований верхней атмосферы Земли на Иркутском радаре некогерентного рассеяния // Докт. диссерт. Иркутск, 2014. 225 с.
18. Медведев А.В., Ратовский К.Г., Толстиков М.В., и др. Статистическое исследование характеристик распространения перемещающихся ионосферных возмущений по данным радиофизического комплекса ИСЗФ СО РАН // Солнечно-Земная Физика. 2012. № 20. С. 85-91.
19. Потехин А.П., Медведев А.В., Заворин А.В., и др. Развитие диагностических возможностей Иркутского радара некогерентного рассеяния // Космические исследования. 2008. Т. 46. № 4. С. 356-362.
20. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. «Наука», 1967. 548 с.
21. Ташлыков В.П., Алсаткин С.С., Медведев А.В., Ратовский К.Г. Метод эффективных вычитаний: работа с данными Иркутского радара некогерентного рассеяния // Солнечно-Земная Физика. 2024. Т. 10. № 1. С. 68-73. DOI: 10.12737/szf-101202409.
22. Ташлыков В.П., Медведев А.В., Васильев Р.В. Модель сигнала обратного рассеяния для Иркутского радара некогерентного рассеяния // Солнечно-Земная Физика. 2018. Т. 4. № 2. С. 55-65. DOI: 10.12737/szf-42201805.
23. Терещенко В.А., Терещенко В.Д., Черняков С.М. Зимние полярные стратосферные облака 2010 года в высоких широтах // Вестник МГТУ. 2010. Т. 13. № 4/2. С. 1052-1059.
24. Терещенко В.Д., Терещенко В.А., Ковалевич Т.В. Сезонные изменения полярного мезосферного эха средних радиоволн // Труды 20-й Всероссийской конференции по распространению радиоволн. Нижний Новгород, НИРФИ, 2002. С. 135-136.
25. Хабитуев Д.С., Шпынев Б.Г. Вариации высоты перехода О/Н над Восточной Сибирью по данным Иркутского радара НР и ПЭС GPS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 107-117.
26. Хахинов В.В., Лебедев В.П., Потехин А.П., и др. Радиофизические методы и результаты диагностики процессов в ионосфере вызванных работой двигателей космических аппаратов //

Сборник трудов XVII Международной симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, ИОА СО РАН, 2011. С. 212-215.

27. Шпынев Б.Г., Воронов А.Л. Минимизация нелинейного функционала невязки в задачах потоковой обработки экспериментальных данных // Вычислительные методы и программирование. 2013. Т. 14. С. 503-515.

28. Aarons J. Antenna and Receiver Measurements by Solar and Cosmic Noise // Proceedings of the IRE. 1954. Vol. 42. № 5. P. 810-815. DOI: 10.1109/JRPROC.1954.274516.

29. Adler R., Haus H.A., Engelbrecht R.S., et al. Description of the noise performance of amplifiers and receiving systems // Proceedings of the IEEE. 1963. Vol. 51. № 3. P. 436-442. DOI: 10.1109/PROC.1963.1846.

30. Akbari H., Bhatt A., La Hoz C., Semeter J.L. Incoherent Scatter Plasma Lines: Observations and Applications // Space Science Reviews. 2017. Vol. 212. P. 249-294. DOI: 10.1007/s11214-017-0355-7.

31. Alissandrakis C.E. Radio observations of the quiet solar corona // Advances in Space Research. 1991. Vol. 14. № 4. P. 481-491. DOI: 10.1016/0273-1177(94)90167-8.

32. Altyntsev A.T., Globa M.V., Meshalkina Quiet solar corona: Daily images at 8.8–10.7 cm wavelengths // J. Sol.-Terrestr. Phys. 2023. Vol. 9. № 2. P. 66-72. DOI: 10.12737/stp-92202308.

33. Baars J.W.M. History of Flux-Density Calibration in Radio Astronomy // URSI Radio Science Bulletin. 2014. Vol. 2014. № 348. P. 47-66. DOI: 10.23919/URSIRSB.2014.7909943.

34. Balanis C.A. Antenna Theory. Analysis and Design. Fourth Edition. «Wiley», 2016. 1072 p.

35. Balsley B.B., Gage K.S. The MST radar technique: Potential for middle atmosphere studies // Pure and Applied Geophysics. 1980. Vol. 118. P. 452-493. DOI: 10.1007/BF01586464.

36. Bennet C.L., Hill R.S., Hinshaw G., et al. First-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Foreground Emission // The Astrophysical Journal. Supplement Series. 2003. Vol. 148. P. 97-117. DOI: 10.1086/377252.

37. Benz A.O., Monstein C., Beverland M., et al. High Spectral Resolution Observation of Decimetric Radio Spikes Emitted by Solar Flares – First Results of the Phoenix-3 Spectrometer // Solar Physics. 2009. Vol. 260. P. 375-388. DOI: 10.1007/s11207-009-9455-1.

38. Benz A.O., Monstein C., Meyer H. CALLISTO - A New Concept for Solar Radio Spectrometers // Solar Physics. 2005. Vol. 226. P. 143-151. DOI: 10.1007/s11207-005-5688-9.

39. Benz A.O. Radio emission of the quiet Sun // Landolt-Börnstein. 2009. Vol. VI/4B. P. 1-13. DOI: 10.1007/978-3-540-88055-4_5.

40. Bertin F., Barat J., Wilson R. Energy dissipation rates, eddy diffusivity, and the Prandtl number: An in situ experimental approach and its consequences on radar estimate of turbulent parameters // *Radio Science*. 1997. Vol. 32. № 2. P. 791-804. DOI: 10.1029/96RS03691.
41. Bilitza D., Altadill D., Truhlik K., et al. International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions // *Space Weather*. 2017. Vol. 15. P. 418-429. DOI: 10.1002/2016SW001593.
42. Borkowski K. The quiet sun brightness temperature at 127 MHz // *Solar Physics*. 1982. Vol. 81. P. 207-215. DOI: 10.1007/BF00151297.
43. Bowles K.L. Observation of Vertical-Incidence Scatter from the Ionosphere at 41 Mc/sec // *Physical Review Letters*. 1958. Vol. 1. № 12. P. 454-457. DOI: 10.1103/PhysRevLett.1.454.
44. Bowles K.L., Ochs G.R., Green J.L. On the Absolute Intensity of Incoherent Scatter Echoes from the Ionosphere // *Journal of Research of the National Bureau of Standards - D. Radio Propagation*. 1962. Vol. 66D. № 4. P. 395-407.
45. Bregman J.D. System Optimization of Multi-Beam Aperture Synthesis Arrays for Survey Performance // *Experimental Astronomy*. 2004. Vol. 17. P. 365-380. DOI: 10.1007/s10686-005-2872-8.
46. Brown P., Stober G., Schult C., et al. Simultaneous optical and meteor head echo measurements using the Middle Atmosphere Alomar Radar System (MAARSY): Data collection and preliminary analysis // *Planetary and Space Science*. 2017. Vol. 141. P. 25-34. DOI: 10.1016/j.pss.2017.04.013.
47. Cane H.V. A 30 MHz map of the whole sky // *Aust. J. Phys.* 1978. Vol. 31. P. 561-565.
48. Cepelcha Z., Borovicka J., Elford W.G., et al. Meteor Phenomena and Bodies // *Space Science Reviews*. 1998. Vol. 84. P. 327-471. DOI: 10.1023/A:1005069928850.
49. Chang S.W., Wang B., Lu G., et al. Development of a 90-600 MHz Meter-wave Solar Radio Spectrometer // *The Astrophysical Journal. Supplement Series*. 2024. Vol. 272. № 21. P. 10. DOI: 10.3847/1538-4365/ad3de7.
50. Chau J.L., Renkowitz T., Stober G., Latteck R. MAARSY multiple receiver phase calibration using radio sources // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2014. Vol. 118. P. 55-63. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.04.004.
51. Cho J.Y.N., Kelley M.C. Polar Mesosphere Summer Radar Echoes. Observation and Current Theories // *Reviews of Geophysics*. 1993. Vol. 31. № 3. P. 243-265. DOI: 10.1029/93RG01535.
52. Christiansen W.N., Hogbom J.A. Radiotelescopes. «Cambridge University Press», 1969. 231 p.
53. Darowski B., Wolowska A., Vocks C., et al. Fine structures of a solar type III radio bursts observed with LOFAR // *Acta Geophysica*. 2025. Vol. 73. DOI: 10.1007/s11600-024-01421-4.

54. Doviak R.J., Zrnic D.S. Doppler Radar and Weather Observations. Second Edition. «Academic Press», 1993. 575 p.
55. Dudok de W., Bruinsma T., Shibasaki K. Synoptic radio observations as proxies for upper atmosphere modelling. 2014. Vol. 4. № A06. DOI: 10.1051/swsc/2014003.
56. Elgaroy E.O. Solar noise storms. Oxford: «Pergamon Press», 1977. 363 p.
57. Evans J.V. Theory and Practice of Ionosphere Study by Thomson Scatter Radar // Proceedings of the IEEE. 1969. Vol. 57. № 4. P. 496-530. DOI: 10.1109/PROC.1969.7005.
58. Farley D.T. Multiple-pulse incoherent-scatter correlation function measurements // Radio Science. 1972. Vol. 7. № 6. P. 661-666. DOI: 10.1029/RS007i006p00661.
59. Findlay J.W. Absolute intensity calibrations in radio astronomy. 1966. Vol. 4. P. 77-94. DOI: 10.1146/annurev.aa.04.090166.000453.
60. Ford J.M., Buch K.D. RFI mitigation techniques in radio astronomy // Proceedings of IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. Quebec City, QC, Canada, 2014. P. 231-234.
61. Freedden W., Nashed M.Z., Sonar T. Handbook of Geomathematics. Second Edition. London: «Springer», 2015. 3146 p.
62. Friis H.T. Noise Figures of Radio Receivers // Proceedings of the IRE. 1944. Vol. 32. № 7. P. 419-422. DOI: 10.1109/JRPROC.1944.232049.
63. Fukao S., Hamazu K. Radar for Meteorological and Atmospheric Observations. «Springer», 2014. 556 p.
64. Fukao S., Hashiguchi H., Yamamoto M., et al. Equatorial Atmosphere Radar (EAR): System description and first results // Radio Science. 2003. Vol. 38. № 3. P. 17. DOI: 10.1029/2002RS002767.
65. Gage K.S., Gossard E.E. Recent Developments in Observation, Modeling, and Understanding Atmospheric Turbulence and Waves // AMS Meteorological Monographs. 2003. Vol. 30. № 52. P. 139-174. DOI: 10.1175/0065-9401(2003)030<0139:RDIOMA>2.0.CO;2.
66. Gage K.S., Green J.L., VanZandt T.E. Use of Doppler radar for the measurement of atmospheric turbulence parameters from the intensity of clear-air echoes // Radio Science. 1980. Vol. 15. № 2. P. 407-416. DOI: 10.1029/RS015i002p00407.
67. Gavrilov N.M. Estimates of turbulent diffusivities and energy dissipation rates from satellite measurements of spectra of stratospheric refractivity perturbations // Atmos. Chem. Phys. 2013. Vol. 13. P. 12107-12116. DOI: 10.5194/acp-13-12107-2013.
68. Giersch O., Kennewell J. Analysis of the radio solar telescope network's noon flux observations over three solar cycles (1988-2020) // Radio Science. 2022. Vol. 57. DOI: 10.1029/2022RS007456.

69. Giersch O., Kennewell J., Lynch M. Solar Radio Burst Statistics and Implications for Space Weather Effects // *Space Weather*. 2017. Vol. 15. № 11. P. 1511-1522. DOI: 10.1002/2017SW001658.
70. Gillies R.G., Eyken A. van, Spanswick E., et al. First observations from the RISR-C incoherent scatter radar // *Radio Science*. 2016. Vol. 51. № 10. P. 1645-1659. DOI: 10.1002/2016RS006062.
71. Gorski K.M., Hivon E., Banday A.J., et al. HEALPix: A Framework for High-Resolution Discretization and Fast Analysis of Data Distributed on the Sphere // *The Astrophysical Journal*. 2005. Vol. 622. № 2. P. 759-771. DOI: 10.1086/427976.
72. Haarlem M.P. van, Wise M.W., Gunst A.W., et al. LOFAR: The LOw-Frequency ARray // *Astronomy & Astrophysics*. 2013. Vol. 556. № A2. P. 53. DOI: 10.1051/0004-6361/201220873.
73. Hamini A., Auxepaules G., Biree L., et al. ORFEES - a radio spectrograph for the study of solar radio bursts and space weather applications // *J. Space Weather Space Clim*. 2021. Vol. 11. № 57. DOI: 10.1051/swsc/2021039.
74. Haslam C.G.T., Salter C.J., Stoffel H., Wilson W.E. A 408 MHz All-Sky Continuum Survey. II. The Atlas of Contour Maps // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1982. Vol. 47. P. 1-143.
75. Heald G.H., Pizzo R.F., Orru E., et al. The LOFAR Multifrequency Snapshot Sky Survey (MSSS). I. Survey description and first results // *Astronomy & Astrophysics*. 2015. Vol. 582. № A123. P. 22. DOI: 10.1051/0004-6361/201425210.
76. Hocking W.K. A review of Mesosphere-Stratosphere-Troposphere (MST) radar developments and studies, circa 1997-2008 // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2011. Vol. 73. P. 848-882. DOI: 10.1016/j.jastp.2010.12.009.
77. Hocking W.K. Measurement of turbulent energy dissipation rates in the middle atmosphere by radar techniques: A review // *Radio Science*. 1985. Vol. 20. № 6. P. 1403-1422. DOI: 10.1029/RS020i006p01403.
78. Hocking W.K. Recent advances in radar instrumentation and techniques for studies of the mesosphere, stratosphere, and troposphere // *Radio Science*. 1997. Vol. 32. № 6. P. 2241-2270. DOI: 10.1029/97RS02781.
79. Holt J.M., Rhoda D.A., Tetenbaum D., Eyken A.P. van Optimal analysis of incoherent scatter radar data // *Radio Science*. 1992. Vol. 27. № 3. P. 435-447. DOI: 10.1029/91RS02922.
80. Intema H.T., Jagannathan P., Mooley K.P., Frail D.A. The GMRT 150 MHz all-sky radio survey // *Astronomy & Astrophysics*. 2017. Vol. 598. № A78. P. 1-28. DOI: 10.1051/0004-6361/201628536.
81. Ishimaru A. *Electromagnetic Wave Propagation, Radiation, and Scattering*. «Prentice Hall», 1991. 637 p.

82. Iwai K., Kubo Y., Ishibashi H., et al. OCTAD-S: digital fast Fourier transform spectrometers by FPGA // *Earth, Planets and Space*. 2017. Vol. 69. P. 8. DOI: 10.1186/s40623-017-0681-8.
83. Iwai K., Tsuchiya F., Morioka A., Misawa H. IPRT/AMATERAS: A New Metric Spectrum Observation System for Solar Radio Bursts // *Solar Physics*. 2012. Vol. 277. P. 447-457.
84. Janches D., Close S., Fentzke J.T. A comparison of detection sensitivity between ALTAIR and Arecibo meteor observations: Can high power and large aperture radars detect low velocity meteor head-echoes. 2008. Vol. 193. № 1. P. 105-111. DOI: 10.1016/j.icarus.2007.08.022.
85. Kantha L., Hocking W.K. Dissipation rates of turbulence kinetic energy in the free atmosphere: MST radar and radiosondes // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2011. Vol. 73. P. 1043-1051. DOI: 10.1016/j.jastp.2010.11.024.
86. Kashapova L.K., Kolotkov D.Y., Kupriyanova E.G., et al. Common Origin of Quasi-Periodic Pulsations in Microwave and Decimetric Solar Radio Bursts // *Solar Physics*. 2021. Vol. 296. № 185. P. 16. DOI: 10.1007/s11207-021-01934-x.
87. Kato S. Middle atmosphere research and radar observations // *Proceedings of Japan Academy*. 2005. Vol. 81(B). P. 306-320.
88. Kerdraon A., Delouis J.-M. The Nancay Radioheliograph // *Proceedings of the CESRA workshop "Coronal Physics from Radio and Space Observations"*. 1997. P. 192-201.
89. Kirkwood S., Collis P.N., Schmidt W. Calibration of electron densities for the EISCAT UHF radar // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 1986. Vol. 48. № 9-10. P. 773-775. DOI: 10.1016/0021-9169(86)90051-6.
90. Kirkwood S. Polar mesosphere winter echoes - A review of recent results // *Advances in Space Research*. 2007. Vol. 40. P. 751-757. DOI: 10.1016/j.asr.2007.01.024.
91. Kishore P., Kathiravan C., Ramesh R., et al. Gauribidanur Low-Frequency Solar Spectrograph // *Solar Physics*. 2014. Vol. 289. P. 3995-4004. DOI: 10.1007/s11207-014-0539-1.
92. Kontogeorgos A., Tsitsipis P., Caroubalos C., et al. The improved ARTEMIS IV multichannel solar radio spectrograph of the University of Athens // *Experimental Astronomy*. 2006. Vol. 21. P. 41-55. DOI: 10.1007/s10686-006-9066-x.
93. Kundu M.R., Gergely T.E., Erickson W.C. Observations of the quiet Sun at meter and decameter wavelengths // *Solar Physics*. 1977. Vol. 53. P. 489-496. DOI: 10.1007/BF00160291.
94. Kurkin V.I., Lebedev V.P., Podlesnyi A.V., Cedrik M.V. Using unmanned aerial vehicles to calibrate transmitting and receiving paths and antenna feeder devices of chirp ionosondes // *Proceedings - 2022 IEEE 8th All-Russian Microwave Conference, RMC 2022*. 2022. P. 397-400. DOI: 10.1109/RMC55984.2022.10079391.

95. Lambour R., Rajan N., Morgan T., et al. Assessment of orbital debris size estimation from radar cross-section measurements // *Advances in Space Research*. 2004. Vol. 34. № 5. P. 1013-1020. DOI: 10.1016/j.asr.2003.02.043.
96. Lantos P. Low Frequency Observations of the Quiet Sun: a Review // *Proceedings of Nobeyama Symposium "Solar Physics with Radio Observations"*. Kiyosato, Japan, 1999. P. 11-24.
97. Latteck R., Singer W., Kirkwood S., et al. Absolute calibration of VHF radars using a calibrated noise source and an ultrasonic delay line // *Proceedings of the Eleventh International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar*. Gadanki/Tirupati, India, 2007. P. 301-305.
98. Latteck R., Singer W., Morris R., et al. Similarities and differences in polar mesosphere summer echoes observed in the Arctic and Antarctica // *Ann. Geophys.* 2008. Vol. 26. № 9. P. 2795-2806. DOI: 10.5194/angeo-26-2795-2008.
99. Leblanc Y., Le Squeren A.M. Dimensions, Temperature and Electron Density of the Quiet Corona. Their Variations during the Solar Cycle // *Astronomy & Astrophysics*. 1969. Vol. 1. P. 239-248.
100. Lehtinen M.S. Statistical theory of incoherent scatter radar measurements // Ph.D. Thesis. Kiruna, Sweden, 1986. 98 p.
101. Lehtinen, M. S. EISCAT_3D Measurement Methods Handbook / M. S. Lehtinen, I. I. Virtanen, M. R. Orispaa. 2014. P. 310.
102. Lesovoi S.V., Altyntsev A.T., Kochanov A.A., et al. Siberian Radioheliograph: First Results // *Solar-Terrestrial Physics*. 2017. Vol. 3. № 1. P. 3-18. DOI: 10.12737/24347.
103. Lonsdale C.J., Cappallo R.J., Morales M.F., et al. The Murchison Widefield Array: Design Overview // *Proceedings of the IEEE*. 2009. Vol. 97. № 8. P. 1497-1506. DOI: 10.1109/JPROC.2009.2017564.
104. Lu L., Liu S., Song Q., Ning Z. Calibration of Solar Radio Spectrometer of the Purple Mountain Observatory // *Chinese Astronomy and Astrophysics*. 2015. Vol. 39. № 4. P. 497-511. DOI: 10.1016/j.chinastron.2015.10.007.
105. Lu Z., Yao M., Deng X. An effective method for incoherent scattering radar's detecting ability evaluation // *Radio Science*. 2016. Vol. 51. DOI: 10.1002/2015RS005827.
106. Lubken F.-J., Singer W., Latteck R., Strelnikova I. Radar measurements of turbulence, electron densities, and absolute reflectivities during mesosphere winter echoes (PMWE) // *Advances in Space Research*. 2007a. Vol. 40. № 6. P. 758-764. DOI: 10.1016/j.asr.2007.01.015.

107. Lubken F.-J., Singer W., Latteck R., Strelnikova I. Radar measurements of turbulence, electron densities, and absolute reflectivities during polar mesosphere winter echoes (PMWE) // *Advances in Space Research*. 2007b. Vol. 40. № 6. DOI: 10.1016/j.asr.2007.01.015.
108. Lubken F.-J. Turbulent scattering for radars: A summary // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2014. Vol. 107. P. 1-7. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.10.015.
109. Maeda K., Alvarez H., Aparici J., et al. A 45-MHz continuum survey of the northern hemisphere // *Astronomy & Astrophysics Supplement Series*. 1999. Vol. 140. P. 145-154. DOI: 10.1051/aas:1999413.
110. Maekawa Y., Fukao S., Yamamoto M., et al. First observation on the upper stratospherical vertical wind velocities using the Jicamarca VHF radar // *Geophysical Research Letters*. 1993. Vol. 20. № 20. P. 2235-2238. DOI: 10.1029/93GL02606.
111. McCrea I., Aikio A., Alfonsi L., et al. The science case for the EISCAT_3D radar // *Progress in Earth and Planetary Science*. 2015. Vol. 2. № 21. P. 1-63. DOI: 10.1186/s40645-015-0051-8.
112. Medvedev A.V., Potekhin A.P. Irkutsk Incoherent Scatter Radar: history, present and future // *Hist. Geo Space Sci*. 2019. Vol. 10. P. 215-224. DOI: 10.5194/hgss-10-215-2019.
113. Murdin, J. Errors in incoherent scatter radar measurements / J. Murdin. Kiruna, Sweden: «EISCAT Scientific Association», 1979. P. 46.
114. Nyquist H. Thermal Agitation of Electric Charge in Conductors // *Physical Review*. 1928. Vol. 32. DOI: 10.1103/PhysRev.32.110.
115. Oberoi D., Sharma R., Rogers A.E.E. Estimating Solar Flux Density at Low Radio Frequencies Using a Sky Brightness Model // *Solar Physics*. 2017. Vol. 292. № 75. P. 1-16. DOI: 10.1007/s11207-017-1096-1.
116. Oliveira-Costa A., Tegmark M., Gaensler B.M., et al. A model of diffuse Galactic radio emission from 10 MHz to 100 GHz // *Mon. Not. R. Astron. Soc*. 2008. Vol. 388. P. 247-260. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2008.13376.x.
117. Papoulis A., Pillai S.U. Probability, Random Variables and Stochastic Processes. 4th edition. «Tata McGraw Hill», 2002. 852 p.
118. Patra N.N., Kanekar N., Chengalur J.N., et al. The Expanded Giant Metrewave Radio Telescope // *Mon. Not. R. Astron. Soc*. 2018. Vol. 483. № 3. P. 3007-3021. DOI: 10.1093/mnras/sty3266.
119. Penzias A.A., Wilson R.W. A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s // *Astrophysical Journal*. 1965. Vol. 142. P. 419-421. DOI: 10.1086/148307.
120. Pick M. Observations of radio continua and terminology // *Solar Physics*. 1986. Vol. 104. P. 19-32. DOI: 10.1007/BF00159942.

121. Pick M., Vilmer N. Sixty-five years of solar radioastronomy: flares, coronal mass ejections and Sun-Earth connection // *Astron. Astrophys. Rev.* 2008. Vol. 16. P. 1-153. DOI: 10.1007/s00159-008-0013-x.
122. Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // *Journal of Geophysical Research: Space Physics.* 2002. Vol. 107. № A12. P. 16. DOI: 10.1029/2002JA009430.
123. Potekhin A.P., Berngardt O.I., Kurkin V.I., et al. Observations of abnormally powerful scattering with ISTP IS-radar // *Proceedings of SPIE/Sixth International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics.* Tomsk, Russia, 1999. Vol. 3983. P. 328-335.
124. Potekhin A.P., Medvedev A.V., Zavorin A.V., et al. Recording and Control Digital Systems of the Irkutsk Incoherent Scatter Radar // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2009. Vol. 49. № 7. P. 1011-1021. DOI: 10.1134/S0016793209070299.
125. Rapp M., Lubken F.-J. Polar mesosphere summer echoes (PMSE): Review of observations and current understanding // *Atmos. Chem. Phys.* 2004. Vol. 4. P. 2601-2633. DOI: 10.5194/acp-4-2601-2004.
126. Rapp M., Strelnikova I., Latteck R. Polar mesosphere summer echoes (PMSE) studied at Bragg wavelength of 2.8 m, 67 cm, and 16 cm // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* 2008. Vol. 70. P. 947-961. DOI: 10.1016/j.jastp.2007.11.005.
127. Reid H.A.S., Ratcliffe H. A review of solar type III radio bursts // *Research in Astronomy and Astrophysics.* 2014. Vol. 14. № 7. P. 773-804. DOI: 10.1088/1674-4527/14/7/003.
128. Remazeilles M., Dickinson C., Banday A.J., et al. An improved source-subtracted and destriped 408-MHz all-sky map. 2015. Vol. 451. P. 4311-4327. DOI: 10.1093/mnras/stv1274.
129. Renkwitz T. Evaluation and validation of a novel MST-Radar for studying atmospheric 3D structures // *Ph.D. Thesis.* Rostock, Germany, 2014. 168 p.
130. Renkwitz T., Schult C., Latteck R., Stober G. Validation of the radiation pattern of the VHF MST radar MAARSY by scattering off a sounding rocket's payload // *Adv. Radio Sci.* 2015. Vol. 13. P. 41-48. DOI: 10.5194/ars-13-41-2015.
131. Renkwitz T., Singer W., Latteck R., Rapp M. Validation of the radiation pattern of the Middle Atmosphere Alomar Radar System (MAARSY) // *Adv. Radio Sci.* 2012. Vol. 10. P. 245-253. DOI: 10.5194/ars-10-245-2012.
132. Richards M.A., Scheer J.A., Holm W.A. *Principles of Modern Radar.* «Scitech Publishing», 2010. 962 p.
133. Rogers A.E.E., Pratap P., Kratzenberg E., Diaz M. Calibration of active antenna arrays using a sky brightness model // *Radio Science.* 2004. Vol. 39. № RS2023. DOI: 10.1029/2003RS003016.

134. Rottger J., Liu C.H. Partial reflection and scattering of VHF radar signals from the clear atmosphere // *Geophysical Research Letters*. 1978. Vol. 5. № 5. P. 357-360. DOI: 10.1029/GL005I005P00357.
135. Rottger J. Radar Observations of the Middle and Lower Atmosphere // *Incoherent scatter. Theory, Practice and Science* (ed. Alcayde D.). Kiruna, Sweden: «EISCAT Scientific Association», 1997. P. 263-314.
136. Rottger J. The instrumental principles of MST radars and Incoherent Scatter radars and configuration of radar system hardware // *Handbook of Map : International School on Atmospheric Radar*. 1989. Vol. 30. P. 54-113.
137. Sato T., Kayama H., Furusawa A., Kimura I. MU Radar Measurements of Orbital Debris // *J. Spacecraft*. 1991. Vol. 28. № 6. P. 677-682. DOI: 10.2514/3.26299.
138. Scaife A.M.M., Heald G.H. A broadband flux scale for low frequency radio telescopes // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2012. Vol. 423. № 1. P. L30-L34. DOI: 10.1111/j.1745-3933.2012.01251.x.
139. Sharma R., Oberoi D. Propagation Effects in Quiet Sun Observations at Meter Wavelengths // *The Astrophysical Journal*. 2020. Vol. 903. № 2. DOI: 10.3847/1538-4357/abb949.
140. Shcherbakov A.A., Medvedev A.V., Kushnarev D.S., et al. Calculation of meridional neutral winds in the middle latitudes from the Irkutsk incoherent scatter radar // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2015. Vol. 120. P. 10851-10863. DOI: 10.1002/2015JA021678.
141. Sheffield J. *Plasma Scattering of Electromagnetic Radiation*. «Academic Press», 1975. 308 p.
142. Shibasaki K., Alissandrakis C.E., Pohjolainen S. Radio Emission of the Quiet Sun and Active Regions (Invited Review) // *Solar Physics*. 2011. Vol. 273. P. 309-337. DOI: 10.1007/s11207-011-9788-4.
143. Shimojo M., Iwai K. Over seven decades of solar microwave data obtained with Toyokawa and Nobeyama Radio Polarimeters // *Geoscience Data Journal*. 2023. Vol. 10. № 1. P. 114-129. DOI: 10.1002/gdj3.165.
144. Shpynev B.G. Incoherent scatter Faraday rotation measurements on a radar with single linear polarization // *Radio Science*. 2004. Vol. 39. № RS3001. P. 1-8. DOI: 10.1029/2001RS002523.
145. Skolnik M. *Radar Handbook*. Third Edition. «McGraw Hill», 2008. 1352 p.
146. Snieder R., Trampert J. Linear and Nonlinear Inverse Problems // *Geomatic Method for the Analysis of Data in the Earth Sciences*. 2003. P. 93-164.
147. Spearman C. The Proof and Measurement of Association between Two Things // *The American J. Psychology*. 1904. Vol. 15. № 1. P. 72-101. DOI: 10.2307/1412159.

148. Stober G., Jacobi Ch., Singer W. Meteoroid mass determination from underdense trails // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2011a. Vol. 73. P. 895-900. DOI: 10.1016/j.jastp.2010.06.009.
149. Stober G., Singer W., Jacobi Ch. Cosmic radio noise observations using a mid-latitude meteor radar // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2011b. Vol. 73. P. 1069-1076. DOI: 10.1016/j.jastp.2010.07.018.
150. Strelnikov B., Rapp M., Strelnikova I., et al. Small-scale structures in neutrals and charged aerosol particles as observed during the ECOMA/MASS rocket campaign // Ann. Geophys. 2009. Vol. 27. № 4. P. 1449-1456. DOI: 10.5194/angeo-27-1449-2009.
151. Strelnikova I., Rapp M. Majority of PMSE spectral widths at UHF and VHF are compatible with a single scattering mechanism // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2011. Vol. 73. № 14-15. P. 2142-2152. DOI: 10.1016/j.jastp.2010.11.025.
152. Strelnikova I., Rapp M. Studies of polar mesosphere summer echoes with the EISCAT VHF and UHF radars: Information contained in the spectral shape // Advances in Space Research. 2010. Vol. 45. № 2. P. 247-259. DOI: 10.1016/j.asr.2009.09.007.
153. Swarnalingam N., Hocking W.K., Argall P.S. Radar efficiency and the calibration of decade-long PMSE backscatter cross-section for the Resolute Bay VHF radar // Ann. Geophys. 2009a. Vol. 27. P. 1643-1656. DOI: 10.5194/angeo-27-1643-2009.
154. Swarnalingam N., Hocking W.K., Singer W., Latteck R. Calibrated measurements of PMSE strengths at three different locations observed with SKiYMET radars and narrow beam VHF radars // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2009b. Vol. 71. P. 1807-1813. DOI: 10.1016/j.jastp.2009.06.014.
155. Tan C., Yan Y., Tan B., et al. Study of calibration of solar radio spectrometers and the quiet-sun radio emission // The Astrophysical Journal. 2015. Vol. 808. № 61. DOI: 10.1088/0004-637X/808/1/61.
156. Tanaka H., Castelli J.P., Covington A.E., et al. Absolute calibration of solar radio flux density in the microwave region // Solar Physics. 1973. Vol. 29. P. 243-262. DOI: 10.1007/BF00153452.
157. Tapping K.F. The 10.7 cm solar radio flux (F10.7) // Space Weather. 2013. Vol. 11. P. 394-406. DOI: 10.1002/swe.20064.
158. Tashlykov V.P., Setov A.G., Medvedev A.V., et al. Ground Clutter Deducting Technique for Irkutsk Incoherent Scatter Radar // Proceedings of Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP). Kazan, Russia, 2019.
159. Taylor J.R. An Introducton to Error Analysis - The study of uncertainties in physical measurements. 2nd edition. «University Science Books», 1996. 327 p.

160. Thompson A.R., Moran J.M., Swenson G.W. Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy. Third edition. «Springer Cham», 2017. 872 p.
161. Tingay S.J., Goeke R., Bowman J.D., et al. The Murchison Widefield Array: The Square Kilometre Array Precursor at Low Radio Frequencies // Publications of the Astronomical Society of Australia. 2013. Vol. 30. № e007. P. 21. DOI: 10.1017/pasa.2012.007.
162. Tsuda T., Gordon W.E., Saito H. Azimuth angle variations of specular reflection echoes in the lower atmosphere observed with the MU radar // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 1997. Vol. 59. № 7. P. 777-784. DOI: 10.1016/S1364-6826(96)00058-2.
163. Vallinkoski M. Error analysis of incoherent scatter radar measurements // Ph.D. Thesis. Kiruna, Sweden, 1989. 118 p.
164. Van Trees H.L. Detection, estimation, and modulation theory. Part I: Detection, Estimation, and Filtering Theory. Second edition. «John Wiley & Sons, Inc.», 2013. 1151 p.
165. Vasilyev R.V., Globa M.V., Kushnarev D.S., et al. Spectral characteristics of ionospheric scintillations of VHF radiosignal near magnetic zenith // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2017. Vol. 160. P. 48-55. DOI: 10.1016/j.jastp.2017.05.016.
166. Vasilyev R.V., Kushnarev D.S., Lebedev V.P., et al. Perspectives of usage of Irkutsk incoherent scatter radar (IISR) as an imaging riometer and radio-heliograph // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2013. Vols. 105-106. P. 273-280. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.06.012.
167. Virtanen I.I., Lehtinen M.S., Nygren T., et al. Lag profile inversion method for EISCAT data analysis // Ann. Geophys. 2008. Vol. 26. P. 571-581. DOI: 10.5194/angeo-26-571-2008.
168. Vocks C., Mann G., Breitling F., et al. LOFAR observations of the quiet solar corona // Astronomy & Astrophysics. 2018. Vol. 614. DOI: 10.1051/0004-6361/201630067.
169. Wang H., Chang L. Circular ribbon flares and homologous jets // The Astrophysical Journal. 2012. Vol. 760. № 01. P. 9. DOI: 10.1088/0004-637X/760/2/101.
170. Wang J., Yue X., Ding F., et al. Simulation and Observation Evaluation of Space Debris Detection by Sanya Incoherent Scatter Radar // Radio Science. 2022. Vol. 57. DOI: 10.1029/2022RS007472.
171. Watkins B.J., Philbrick C.R., Balsley B.B. Turbulence energy dissipation rates and inner scale sizes from rocket and radar data // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 1988. Vol. 93. № D6. P. 7009-7014. DOI: 10.1029/JD093iD06p07009.
172. Wild J.P. Observations of the spectrum of high-intensity solar radiation at metre wavelength. II. Outbursts // Australian Journal of Scientific Research A. 1950. Vol. 3. P. 399.

173. Wild J.P. The Radioheliograph and the Radio Astronomy Programme of the Culgoora Observatory // *Proceedings of the Astronomical Society of Australia*. 1967. Vol. 1. № 2. P. 38-39. DOI: 10.1017/S1323358000010407.
174. Woodman R.F., Guillen A. Radar observations of Winds and Turbulence in the Stratosphere and Mesosphere // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1974. Vol. 31. P. 493-505. DOI: 10.1175/1520-0469(1974)031<0493:ROOWAT>2.0.CO;2.
175. Yan F., Wu Z., Shang Z.Q., et al. The First Flare Observation with a New Solar Microwave Spectrometer Working in 35–40 GHz // *The Astrophysical Journal Letters*. 2023. Vol. 942. № L11. P. 7. DOI: 10.3847/2041-8213/acad02.
176. Yue X., Liu F., Wang J., et al. On the Ion Line Calibration by Plasma Line in ISR Measurements // *Remote Sens*. 2023. Vol. 15. № 1553. DOI: 10.3390/rs15061553.
177. Zeller O., Zecha M., Bremer J., et al. Mean characteristics of mesosphere winter echoes at mid- and high-latitudes // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2006. Vol. 68. P. 1087-1104. DOI: 10.1016/j.jastp.2006.02.015.
178. Zheng H., Tegmark M., Dillon J.S., et al. An Improved Model of Diffuse Galactic Radio Emission from 10 MHz to 5 THz // *Mon. Not. R. Astron. Soc*. 2017. Vol. 464. № 3. P. 3486-3497. DOI: 10.1093/mnras/stw2525.
179. Zirker J.B. Coronal Holes and High-Speed Wind Streams // *Reviews of Geophysics and Space Physics*. 1977. Vol. 15. № 3. P. 257-269. DOI: 10.1029/RG015i003p00257.
180. Zrnic D.S. Estimation of Spectral Moments for Weather Echoes // *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*. 1979. Vol. 17. № 4. P. 113-128. DOI: 10.1109/TGE.1979.294638.