

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИЗМИРАН
канд. физ.-мат. наук

Абунин А.А.

« 20 » января 2026 г.



Отзыв

ведущей организации

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова Российской Академии наук (ИЗМИРАН)
на диссертационную работу Сетова А.Г.

«Разработка методов калибровки и оценки чувствительности радаров
некогерентного рассеяния»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.4 Радиофизика

1. Актуальность темы диссертации. Исследования верхней атмосферы и околоземного космического пространства важны для многих прикладных задач, включая спутниковую навигацию, локацию, дальнюю радиосвязь. Радары некогерентного рассеяния играют в этих исследованиях важнейшую роль, по сути являясь одним из немногих наземных инструментов дистанционного зондирования, позволяющих получать данные с высот выше максимума слоя F2 — области, в которой многие современные операционные модели ионосферы испытывают существенные трудности. Кроме того, за счет своей высокой мощности и чувствительности к слабым сигналам, радары некогерентного рассеяния можно использовать для радиоастрономических наблюдений, отслеживания космических объектов и изучения нижней и средней атмосферы. Все это требует надежной абсолютной калибровки приемо-передающих трактов, а также оценки диагностических потенциалов радаров. В связи с этим задачи, решаемые в диссертации на примере уникальных инструментальных средств исследования ионосферы — радаров ИРНР и НР-МСТ, являются безусловно актуальными, а разработанные автором методы и алгоритмы могут быть с незначительными изменениями применены и для других инструментов подобного рода, что обуславливает несомненную практическую ценность работы.

2. Структура и содержание работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка сокращений и списка литературы из 180 пунктов. Общий объем работы составляет 113 страниц, включая 55 рисунков и 2 таблицы.

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, описаны цели работы, охарактеризованы ее научная новизна и практическая ценность решаемых задач, сформулированы положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена абсолютной калибровке приемо-передающего тракта ИРНР. Первые разделы содержат обзор распространенных методов калибровки приемо-передающих устройств, описание ИРНР и основных режимов его работы. Далее в главе рассматривается модель шумовой температуры антенны ИРНР, как основы для разработанного автором метода калибровки приемного тракта радара. Она использует модель диаграммы направленности ИРНР, развитую в работах Лебедева с соавторами, и глобальную модель распределения галактического радиоизлучения GSM. Калибровка приемного тракта происходит в предложенном автором методе по шумам неба, а не по радиоисточникам, что позволяет провести калибровку для всего частотного диапазона радара, а не для узкой полосы. Сама калибровка заключается в определении коэффициентов линейной регрессии мощности на входе АЦП на шумовую температуру для каждой частоты по отдельности на суточном интервале наблюдений. Поскольку используемая в методе модель GSM описывает диффузное излучение, треки радиоисточников при проведении калибровки бланкируются. Автор приводит примеры радиоастрономических наблюдений на ИРНР с использованием разработанного им метода калибровки. Последний раздел главы посвящен методу калибровки передающего тракта ИРНР по измерениям электронной плотности.

Вторая глава посвящена абсолютным измерениям потока солнечного излучения в метровом диапазоне на ИРНР, которые становятся возможными после калибровки приемного тракта методом, изложенным в первой главе. С учетом особенностей антенны ИРНР эти измерения проводятся с использованием принципа частотного сканирования, также используется модель солнечного трека ИРНР, используемая для корректировки модели диаграммы направленности в диапазоне частот наблюдения Солнца. Приводятся и анализируются результаты наблюдений солнечного потока в период 2011-2022гг (всего доступны 634 дня наблюдений). Продемонстрированы возможности предложенного метода для исследования как спокойного Солнца, так и солнечных радиовсплесков. Проведен статистический и корреляционный анализ солнечного потока на частоте 161МГц по данным ИРНР и на частоте 245 МГц по данным RSTN Лермонт. Оценен средний среднесуточный поток излучения спокойного Солнца на частоте 161МГц по данным ИРНР, который составляет 5.5. с.е.п, что хорошо согласуется с модельными оценками.

В **третьей главе** кратко описаны принципы работы НР и МСТ радаров и представлен разработанный автором метод оценки диагностического потенциала НР

и МСТ радаров при измерении параметров атмосферы. Метод основан на определении отношения удельной эффективной площади рассеяния единичного объема среды (может быть получено на основе моделей атмосферы) к минимальной удельной эффективной площади рассеяния, которой должна обладать среда, для достижения необходимой статистической точности. Последняя зависит только от характеристик радара и метода обработки сигнала и может быть определена из радиолокационного уравнения. Автор приводит сравнение диагностического потенциала радаров ИРНР и перспективного НР-МСТ и показывает, что использование ФАР и большая частота повторения импульсов при одинаковом частотном диапазоне и близких энергетических характеристиках, обеспечивают превосходство диагностического потенциала радара НР-МСТ. Так он позволит проводить измерения электронной концентрации до высот 1300 км, в то время как на ИРНР эта высота составляет ~600 км. Также приведены оценки диагностического потенциала радара НР-МСТ в стратосфере-тропосфере и показано, что в этой области наблюдения возможны до высот ~25 км. В заключение главы приведен раздел, где сформулированы основные рекомендации по разработке радаров НР и МСТ (выбор частот, мощностей, типов антенны и импульсных последовательностей) с точки зрения их диагностического потенциала.

В **Заключении** приведены основные результаты, полученные в ходе работы над диссертацией. Эти результаты являются новыми и вносят важный вклад как в обеспечение радиофизических наблюдений на радаров НР и МСТ, так в описание процессов, протекающих в ионосфере и ОКП.

3. Соответствие содержания диссертации заявленной специальности. Тема и содержание диссертации соответствуют областям исследования специальности 1.3.4. Радиофизика в части п.2, п.5 и п.7

4. Научная и практическая значимость результатов исследований

Разработанные автором методы калибровки и измерения солнечного потока с учетом разнообразия режимов работы радиоастрономических наблюдений ИРНР позволили обработать архивные данные, усовершенствовать методы сбора данных и грамотно спроектировать новые режимы, используемые на радаре в настоящее время. Кроме того, калиброванные измерения фонового шума использовались для тестирования нового приемного тракта, который вводился в эксплуатацию в 2021 году.

5. Обоснованность научных положений подтверждается апробацией результатов, представленных в данной работе, применением современных методов цифровой обработки сигналов, а также соответствию полученных измерений общепринятым физическим моделям. Результаты калибровки согласуются с предыдущими

научными и техническими работами, проводимыми по данным ИРНР, и были протестированы другими исследователями

6. Личный вклад автора. Методы калибровки, определения шумовой температуры антенны, измерения солнечного потока и оценки диагностического потенциала были предложены, разработаны и реализованы автором данной работы. Автором был разработан программный комплекс для обработки принятых сигналов ИРНР и реализации перечисленных методов.

7. Замечания по содержанию и оформлению работы.

Работа при этом не лишена недостатков и к ней можно высказать следующие замечания:

1) Второе защищаемое положение сформулировано не очень удачно. Непонятно о каком методе измерений идет речь. Кроме того, приведенную в защищаемом положении оценку среднего потока излучения спокойного Солнца на частоте 161 МГц в 5.5 с.е.п. очень сложно найти в посвященной этим исследованиям автора главе 2, она в явном виде присутствует только на рис. 2.10 и практически не обсуждается, а сам вывод делается уже в заключении диссертации.

2) В первой главе основное внимание уделено калибровке приемного тракта ИРНР, в тоже время описание калибровки передающего тракта (раздел 1.7) представлено не так подробно.

3) На стр. 43 работы указано, что для некоторых дней результаты калибровки приемного тракта обладают слишком высокой ошибкой. Хотелось бы видеть в работе некоторые оценки пороговых значений ошибки, по которым эти дни отбрасывались, даже в случае ручной обработки, как это указывает автор. Это было бы полезно для исследователей, которые захотят применить метод калибровки разработанный автором для своих исследований.

4) Автор утверждает (стр 44), что одним из преимуществ нового метода калибровки при радиоастрономических наблюдениях по сравнению с анализом коэффициента когерентности является проявление дополнительных треков радиоисточников на спектрах мощности. Это утверждение никак не подтверждается в работе, было бы неплохо, если бы автор привел коэффициенты когерентности для случая, представленного на рис. 1.23, чтобы подтвердить это утверждение.

Указанные недостатки не умаляют общей положительной оценки диссертации А.Г. Сетова, в которой изложены оригинальные и новые результаты, полученные автором. Содержание диссертации соответствует заявленной специальности 1.3.4 — Радиофизика, автореферат оформлен в соответствии с требованиями ВАК и полностью отражает содержание диссертации.

8. Заключение Основные результаты диссертации хорошо известны научной общественности, были представлены и обсуждались на крупных конференциях и опубликованы в 8 статьях в рецензируемых научных изданиях, включая 6 статей в изданиях, входящих в список ВАК или международные базы WOS/Scopus.

Полученные в диссертации результаты, в особенности разработанный оригинальные методы калибровки радаров и оценки их диагностических потенциалов, могут представлять интерес для специалистов в области радиофизики и быть использованы в ИЗМИРАН, НИРФИ ННГУ, ПГИ, АНИИ и других организациях при анализе данных НР и проектировании новых научных приборов.

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком уровне, на актуальную тему и имеет большое практическое значение. Она соответствует требованиям "Положения о порядке присуждения ученых степеней" (пункты 9-14), а её автор, Сетов Артём Геннадьевич, заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 — Радиофизика.

Диссертация А.Г. Сетова обсуждалась на семинаре отделения «Ионосфера и распространение радиоволн» ИЗМИРАН.

Отзыв составил ведущий научный сотрудник ИЗМИРАН, доктор физико-математических наук Игорь Васильевич Крашенинников (диссертация защищена по специальности 01.04.03 — Радиофизика)

Я, Крашенинников Игорь Васильевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

Ведущий научный сотрудник ИЗМИРАН

доктор физ.-мат. наук

Игорь Васильевич Крашенинников

108840, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4, ИЗМИРАН

телефон: (495) 851-02-79

e-mail: krash@izmiran.ru

И.В. Крашенинников

Сведения о ведущей организации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова
Российской академии наук

Адрес организации: 108840, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4, ИЗМИРАН

E-mail: izmiran@izmiran.ru

тел.: (495) 851-02-80

факс: (495) 851-01-24

Подпись И.В. Крашенинникова удостоверяю

Ученый секретарь ИЗМИРАН

А.И. Рез

