

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения
Российской академии наук

На правах рукописи
УДК 537.86: 550.388.2: 621.396.6



Лебедев Валентин Павлович

**РАЗВИТИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ
ИРКУТСКОГО РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ КОНТРОЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ
И ПРОВЕДЕНИЯ АКТИВНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Иркутск – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель:

Потехин Александр Павлович, чл.-корр. РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, директор института.

Официальные оппоненты:

Шилин Виктор Дмитриевич, кандидат технических наук, ОАО «МАК «Вымпел», главный конструктор системы контроля космического пространства

Сажин Виктор Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой радиофизики и радиоэлектроники, Иркутский государственный университет, физический факультет.

Ведущая организация:

ОАО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца», г. Москва

Защита диссертации состоится _____ 2015 г. в _____ на заседании диссертационного совета Д.003.034.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291, ИСЗФ СО РАН

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук: <http://iszf.irk.ru>

Автореферат разослан «____» _____ 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



Поляков В.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Радары некогерентного рассеяния (НР) позволяют осуществлять наиболее полную диагностику ионосферы. С их помощью можно получать электронную концентрацию, температуру ионов и электронов, ионный состав и скорость дрейфа в диапазоне высот 100–1000 км. Потенциал и диагностические возможности радаров НР позволяют проводить многопараметрические исследования ионосферы и физических процессов в верхней атмосфере Земли. Радары НР используются в качестве точных диагностических средств в исследовании процессов, проходящих во время активных экспериментов [1]. Радары НР позволяют определять пространственно-временную динамику плотности, температуры и ионного состава локальных неоднородностей ионосферы, возникающих в результате работы бортовых двигательных установок (ДУ) космических аппаратов (КА) [2]. В последнее время радары НР используются для наблюдения различных КА [3] и малоразмерного космического мусора (КМ) на низкой орбите Земли [4], привлекаются для изучения метеоров [5].

Радары НР — сложные и дорогостоящие установки, мировая сеть насчитывает 11 таких радиолокационных станций (РЛС). Каждый радар НР имеет уникальную антенную систему, технические характеристики, режим работы, географическое положение. В современных экспериментальных исследованиях для получения высокоточных измерений необходимо детальное знание характеристик приемо-передающего канала [6]. Для решения широкого круга описанных задач необходимо использовать и развивать самые передовые методики обработки экспериментальных данных.

Иркутский радар некогерентного рассеяния (ИРНР) создан на базе переданного Институту солнечно-земной физики (ИСЗФ) СО РАН оборудования РЛС «Днепр» [7]. Диагностические возможности радара по измерению координатных и некоординатных характеристик КА улучшились после модернизации и перехода на современную цифровую технику. В настоящее время новый аппаратно-программный комплекс позволяет использовать ИРНР в экспериментальных исследованиях ионосферы методом НР и наблюдениях КА и КМ не только как самостоятельное устройство, но и вместе с оптическими средствами ИСЗФ СО РАН

Проблема контроля КМ, особенно его малоразмерной фракции, стоит уже не одно десятилетие, сейчас количество зарегистрированных фрагментов КМ исчисляется уже десятками тысяч. Для наблюдений за такой высокой численностью КМ необходимы плотная сеть наблюдательных станций и высокая точность измерений [8]. Мировая практика показала перспективность использования радаров НР в качестве измерительных средств КМ и подтвердила актуальность полученных с их помощью данных [4, 7, 9, 10].

Радары НР, благодаря своей высокой чувствительности, регистрируют большой поток космических объектов (КО), причем большая часть из них является малоразмерной — менее 10 см. Информация о таких объектах

крайне важна, так как КО размером более 1 см представляют серьезную угрозу безопасности действующих КА, кроме того, данные по малоразмерному КМ необходимы для моделей распределения и эволюции облака КМ.

Для обеспечения требуемой точности определения координатных и некоординатных характеристик КО необходимо учитывать влияние среды распространения на характеристики радиолокационных (РЛ) сигналов. Таким образом, важным является знание профиля электронной концентрации в ионосфере, так как он определяет дополнительную задержку распространения сигнала и поляризационные замирания амплитуды сигнала, связанные с эффектом Фарадея [11]. Необходимо учитывать также особенности РЛС: форму диаграммы направленности антенны РЛС, поляризацию, процесс излучения и приема РЛ-сигнала.

Развитие диагностических возможностей ИРНР и расширение круга решаемых задач стало возможным после коренной модернизации всего комплекса управляющих, приемных, регистрирующих устройств и средств обработки сигналов [12]. Основное достоинство нового аппаратно-программного комплекса ИРНР — регистрация полной формы РЛ-сигнала в большом динамическом диапазоне. Анализ полной формы сигнала позволяет использовать передовые методики обработки сигнала и получать амплитуду сигнала, дальность, радиальную скорость, углы в каждом такте зондирования с необходимой точностью [8].

Основной особенностью ИРНР является антенна, излучающая и принимающая одну (линейную) поляризацию волн электромагнитного поля. Как и для любой другой подобной РЛС, для ИРНР актуальной задачей является определение эффективной площади рассеяния (ЭПР) КА с учетом вращения вектора плоскости поляризации в ионосферной плазме (эффект Фарадея). Созданный аппаратно-программный комплекс позволяет одновременно с наблюдением КО проводить диагностику ионосферы, что позволяет не только уточнять координатную информацию, но и определять фазу поляризационного замирания РЛ-сигнала для корректного определения эффективной площади рассеяния КА [11].

Развитие диагностических возможностей ИРНР повышает также потенциальные возможности радиооптического комплекса ИСЗФ СО РАН, состоящего из взаимодействующих оптических средств наблюдения КО и ИРНР. Координированные измерения на радиооптическом комплексе призваны расширить набор измеряемых характеристик наблюдаемых КО с целью повышения как точности определения координатных и некоординатных характеристик, так и надежности идентификации КО и контроля технического состояния КА.

Цель работы

Целью работы является развитие диагностических возможностей ИРНР для решения задач контроля КО и проведения активных космических экспериментов. Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие научно-технические задачи:

1. Разработка методики и комплекса программ для калибровки диаграммы направленности антенны ИРНР.

2. Разработка модели и методики определения характеристик принятого радиолокационного сигнала с учетом особенностей антенной ИРНР.

3. Разработка методик и комплекса программ для определения координатных и некоординатных характеристик наблюдаемых КО с учетом эффекта Фарадея.

4. Исследование влияния выхлопных струй бортовых двигательных установок космического аппарата на характеристики радиолокационного сигнала.

5. Проведение натурных измерений КО, определение координатных и некоординатных характеристик КО на основе разработанной модели принятого радиолокационного сигнала.

Новизна результатов

1. Впервые на основе современных цифровых средств измерено пространственное распределение поля в диаграмме направленности антенны ИРНР по данным наблюдений космических радиоисточников.

2. Впервые на радиолокационных станциях с линейной поляризацией реализован метод, учитывающий эффект Фарадея при определении эффективной площади рассеяния КО на основе одновременного измерения радиолокационного сигнала и профиля мощности сигнала некогерентного рассеяния.

3. Впервые по данным ИРНР оценено влияние выхлопных струй бортовых двигательных установок малой мощности транспортного грузового корабля (ТГК) «Прогресс» на координатные и некоординатные характеристики.

Научная и практическая ценность работы

1. Методики и алгоритмы восстановления пространственного распределения поля диаграммы направленности могут использоваться для антенн различного типа, в область обзора которых попадают мощные космические радиоисточники.

2. Метод измерения эффективной площади рассеяния КО может использоваться на радиолокационных станциях, оснащенных антенной с линейной поляризацией.

3. Созданный программный комплекс определения координатных и некоординатных характеристик КО и база результатов наблюдений КО за 2007–2011 гг.

4. Достигнутое расширение диагностических возможностей ИРНР позволяет на более высоком уровне точности получать координатную и некоординатную информацию о наблюдаемом КО и проводить исследования воздействия выхлопных струй бортовых двигательных установок на отражательные характеристики космического аппарата.

Достоверность результатов

Достоверность результатов, представленных в диссертации, обусловлена использованием физически обоснованных методов и статистикой наблюдений. Точность определения координатных и некоординатных характеристик

КО, наблюдаемых на ИРНР, была подтверждена оптическими средствами ИСЗФ, расположенными в Саянской солнечной обсерватории. Результаты, полученные в ходе работы и вынесенные на защиту, обсуждались на научных семинарах, публиковались в рецензируемых журналах и докладывались на российских и международных конференциях.

Личный вклад автора

В совместных исследованиях автору принадлежит основное участие на всех этапах — от постановки наблюдательного эксперимента и анализа данных до получения выводов и написания статей. Автор является разработчиком программных модулей расчета распределения поля диаграммы направленности ИРНР и расчета в масштабе реального времени координатных и некоординатных характеристик КО, наблюдаемых на ИРНР.

Апробация работы и публикации

Результаты работы докладывались на российских и международных конференциях: 4-я, 5-я, 6-я, 7-я, 9-я Научная сессия молодых ученых Международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике (БШФФ) (Иркутск, 2001, 2002, 2003, 2004, 2006 гг.), конференция «Околоземная астрономия XXI века» (Звенигород, 2001 г.), Eighth International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics (Irkutsk, 2001), IX Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, 2003 г.), LXIII научная сессия, посвященная Дню радио (Москва, 2003 г.), Международная конференция «Околоземная астрономия – 2003» (Институт астрономии РАН, МЦ АМЭИ, 2003 г.), Всероссийская конференция «Дистанционное зондирование поверхности Земли и атмосферы» (Иркутск, 2003 г.), Международная научная конференция «Излучение и рассеяние волн» (Таганрог, 2005 г.), VI US-Russian Space Surveillance Workshop (St. Petersburg, 2005), 36th COSPAR Scientific Assembly (Beijing, 2006), VII Russian-Chinese Workshop on Space Weather (Irkutsk, 2006), Научно-техническая конференция по основным результатам научно-прикладных исследований на РС МКС (Королев, 2007 г.), XXII Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн», (пос. Лео, 2008 г.), 37th COSPAR Scientific Assembly (Montreal, 2008), XXIX General Assembly of the International Union of Radio Science (URSI) (Chicago, Illinois, USA, 2008), 1-я Международная конференция МАА-РАКЦ «Космос для человечества» (Москва, 2008 г.).

Публикации

По результатам диссертации опубликовано 9 работ, 4 из них — в журналах, рекомендованных ВАК для публикаций результатов диссертаций:

1. Развитие диагностических возможностей Иркутского радара некогерентного рассеяния / А. П. Потехин, А. В. Медведев, А. В. Заворин, Д. С. Кушнарев, В. П. Лебедев, Б. Г. Шпынев // Космические исследования. – 2008. – Т. 46. – С. 356–362.

2. Исследование методами радиозондирования характеристик плазменного окружения низкоорбитальных космических аппаратов / В. П. Лебедев, В. В. Хахинов, Ф. Ф. Габдуллин, А. Г. Корсун, Е. М. Твердохлебова, Е. А. Лалетина, А. И. Манжелей // Космонавтика и ракетостроение. – 2008. – № 50 (1). – С. 51–60.

3. Радиофизические методы диагностики ионосферных возмущений, генерируемые бортовыми двигателями ТГК «Прогресс»: алгоритмы, инструменты и результаты / В. В. Хахинов, А. П. Потехин, В. П. Лебедев, А. В. Медведев, Д. С. Кушнарев, Б. Г. Шпынев, В. Е. Заруднев, С. С. Алсаткин, К. Г. Ратовский, А. В. Подлесный, И. Г. Брынько // Журнал радиоэлектроники. – 2010. – С. 555–571.

4. Результаты дистанционного зондирования ионосферных возмущений в активных космических экспериментах «Радар–Прогресс» / В. В. Хахинов, А. П. Потехин, В. П. Лебедев, С. С. Алсаткин, К. Г. Ратовский, Д. С. Кушнарев, Е. М. Твердохлебова, М. Ю. Куршаков, А. И. Манжелей, Н. И. Тимофеева // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т. 9, № 3. – С. 199–208.

Публикации из базы Web of Science и Scopus:

5. Ionospheric Perturbation Associated with the “Plasma-Progress” Experiment at Irkutsk / B. G. Shpynev, V. V. Khakhinov, A. V. Medvedev, A. P. Potekhin, V. P. Lebedev, E. M. Tverdokhlebova, A. I. Manzheley // Proceedings of the XXIX URSI General Assembly. Chicago, Illinois, USA. – 2008. – P. GP2-05.3.

6. Active space experiments with the use of the transport spacecraft “Progress” and Irkutsk IS Radar / A. P. Potekhin, V. V. Khakhinov, A. V. Medvedev, D. S. Kushnarev, V. P. Lebedev, B. G. Shpynev // PIRS Proceedings, Moscow, Russia. – 2009. – P. 223–227.

7. Results of Complex Radiosounding of Ionospheric Disturbances Generated by the Transport Spacecraft “PROGRESS” Onboard Thrusters / V. Khakhinov, A. Potekhin, B. Shpynev, S. Alsatkin, K. Ratovsky, V. Lebedev, D. Kushnarev // Proc. XXX URSI General Assembly, Istanbul, Turkey. – 2011. – HP2.15.

8. Variations of the Transport Spacecraft “Progress” Radar Characteristics Connected with the Orbital Maneuvering Subsystem Run / V. Lebedev, V. Khakhinov, A. Potekhin, D. Kushnarev, V. Zarudnev // Proc. XXX URSI General Assembly, Istanbul, Turkey. – 2011. – HP2.16.

9. Radiosounding of ionospheric disturbances generated by exhaust streams of the transport spacecraft “Progress” engines / V. V. Khakhinov, B. G. Shpynev, V. P. Lebedev, D. S. Kushnarev, S. S. Alsatkin, D. S. Khabituev // PIRS Proceedings, Moscow, Russia. – 2012. – P. 1168–1171.

Основные положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие результаты и положения:

1. Методика измерения диаграммы направленности ИРНР по наблюдениям космических радиоисточников, включающая: юстировку электрической оси антенны, восстановление двумерного распределения поля диаграммы направленности антенны, определение фазо-угломестной характеристики антенны.

2. Модель и методика определения характеристик принятого радиолокационного сигнала с учетом особенностей антенной системы ИРНР для исследования координатных и некоординатных характеристик наблюдаемого КО.

3. Методика учета эффекта Фарадея при наблюдении низкоорбитальных КА.

4. Вывод о том, что инжекция выхлопных струй бортовых двигательных установок малой мощности ТГК «Прогресс» в направлении на ИРНР приводит к появлению значимым изменений в динамике амплитуды РЛ-сигнала, при этом эффективная площадь рассеяния ТГК падает на 25–50 %.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 118 страниц текста, 11 таблиц, 71 рисунок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснованы актуальность, новизна, научная и практическая ценность решаемых задач, дается краткий обзор литературы по затронутым в работе вопросам, сформулированы основные результаты и защищаемые положения.

В **первой главе** приведено описание структуры и основные технические характеристики ИРНР, разработана модель ДН ИРНР и описана методика ее измерения.

ИРНР — моностатический импульсный радар с частотным сканированием. Основные характеристики ИРНР приведены в таблице 1. Антенная система ИРНР имеет внешний секториальный рупор с апертурой 246×12.2 м и поляризационным фильтром. Рупор разделен продольной перегородкой на две независимые секции (два полурупора), каждая из которых является приемо-передающей антенной со своими системами запитки от передатчиков и выхода на приемники. Облучающая система секции — волноводно-щелевая антенна с 296 поперечными щелями, внутри которой расположена ребристая замедляющая структура, обеспечивающая частотное сканирование ДН в направлении север–юг. Изменение частоты в диапазоне $154 \div 162$ МГц приводит к отклонению ДН в секторе $0 \div 30^\circ$ от вертикали. Полная ДН формируется обеими секциями рупора.

Решение внутренней задачи о распределении поля для описанной выше конструкции рупорной антенны в литературе не представлено, поэтому за основу описания поля и основных свойств ДН взяты известные результаты о распределении поля в секториальном рупоре без внутренней перегородки [13]. Модель распределения электромагнитного поля в раскрытом рупоре строится в предположении о том, что модовый состав определяется известным решением, однако основные характеристики мод — амплитуда и фаза — задаются в виде параметров, которые определяются по результатам калибровочных измерений.

Таблица 1.

Основные характеристики ИРНР

Диапазон частот	154–162 МГц
Пиковая мощность	3.2 МВт
Длительность импульса	70–1000 мкс
Частота повторения импульсов	24.4 Гц
Тип антенны	секториальный рупор
Коэффициент усиления антенны	35–28 дБ
Угловые размеры луча	0.5° (С–Ю) \times 10° (З–В)
Поляризация	линейная
Шумовая температура системы	400 К
Количество приемных каналов	4
Полосы пропускания приемных устройств	25–1000 кГц

Поскольку расчет двумерных распределений поля антенны является весьма непростой задачей, адекватные представления о ДН и других характеристиках антенны можно получить при непосредственных измерениях поля излучения или приема в дальней зоне, например, методом облета. Однако из-за сложности эта процедура не всегда доступна. Измерения на уменьшенных макетах антенн также требуют значительных дополнительных затрат и усилий и при этом не всегда дают адекватные результаты.

Радиоастрономические методы антенных измерений [14] позволяют экспериментально исследовать основные характеристики излучения антенн: ДН, положение и уровни боковых лепестков.

Методика калибровки, изложенная в работе, основана на измерении уровня мощности шума при прохождении через ДН космических радиоисточников [15]. На участке неба, который покрывает сектор сканирования антенны радара, в разное время проходят три мощных радиоисточника: Крабовидная туманность, «Кассиопея-А», «Лебедь-А». Поскольку угловые размеры этих радиоисточников не превышают 5 угл. мин, их можно считать точечными по сравнению с основным лепестком ДН.

По результатам калибровочных измерений определены параметры основных мод электромагнитного поля в раскрыве рупора ИРНР, исследованы дисперсионные характеристики антенны, определяющие зависимость угла наклона ДН ИРНР от несущей частоты (уравнение сканирования). Измерена фазовая характеристика антенны, связывающая разность фаз между сигналами от каждого полурупора и угол места объекта локации в радиолокационной системе координат (СК).

Уравнение сканирования

Наиболее важной характеристикой антенной системы ИРНР является зависимость угла наклона ДН от несущей частоты (уравнение сканирования). С учетом свойств волноводно-щелевой панели и ребристой замедляющей структуры антенны ИРНР уравнение сканирования в азимутальном направлении имеет следующий вид:

$$\sin(\varepsilon_0) = g(f) - \frac{\lambda}{d}, \quad (1)$$

где ε_0 — азимутальное направление (вдоль сектора сканирования) в биконической радиолокационной СК, $g=c/v_{\text{стр}}$ — коэффициент замедления волны в ребристой структуре, λ — длина волны в воздухе, $f=c/\lambda$ — рабочая частота, d — расстояние между щелями в ребристой структуре, $v_{\text{стр}}$ — фазовая скорость поверхностной волны в ребристой структуре. Задача калибровки — уточнить зависимость коэффициента замедления $g(f)=c/v_{\text{стр}}(f)$ от рабочей частоты. Коэффициент замедления показывает, во сколько раз фазовая скорость поверхностной волны $v_{\text{стр}}$ в ребристой структуре меньше фазовой скорости волны c в воздухе.

Положение радиоисточников известно с очень хорошей точностью (несколько угловых секунд). Таким образом, при наблюдениях в каждый момент времени рабочей частоте f можно поставить в соответствие рассчитанный угол ε и таким образом выполнить калибровку положения электрической оси ДН по рабочей частоте $\varepsilon=\varepsilon(f)$, см. рис. 1. На рис. 2 представлены результаты калибровки коэффициента замедления $g(f)$ скорости света в ребристой структуре.

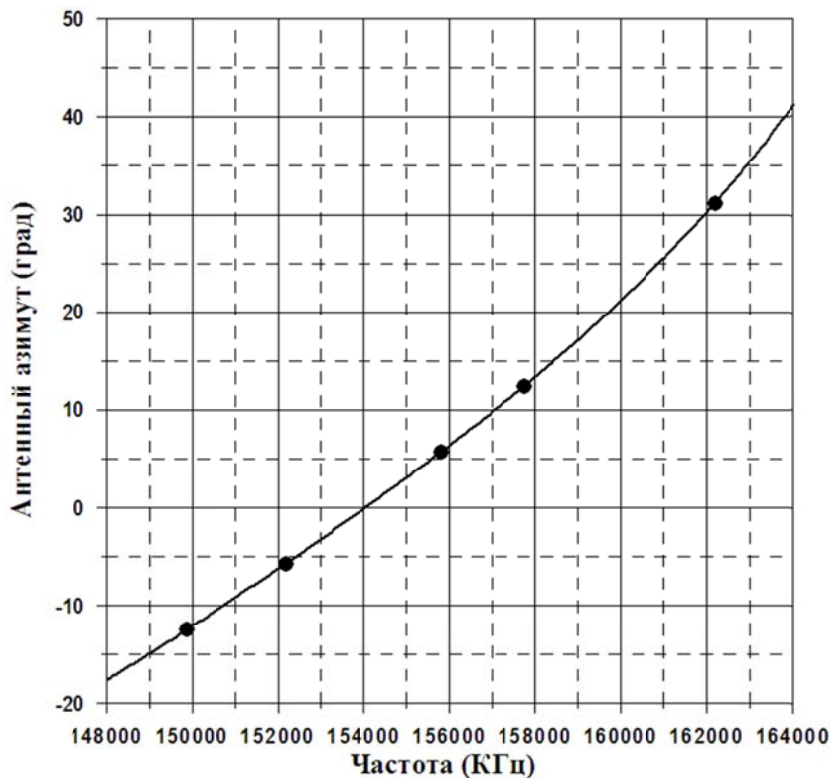


Рис. 1. Зависимость угла наклона центра ДН антенны ИРНР от рабочей частоты

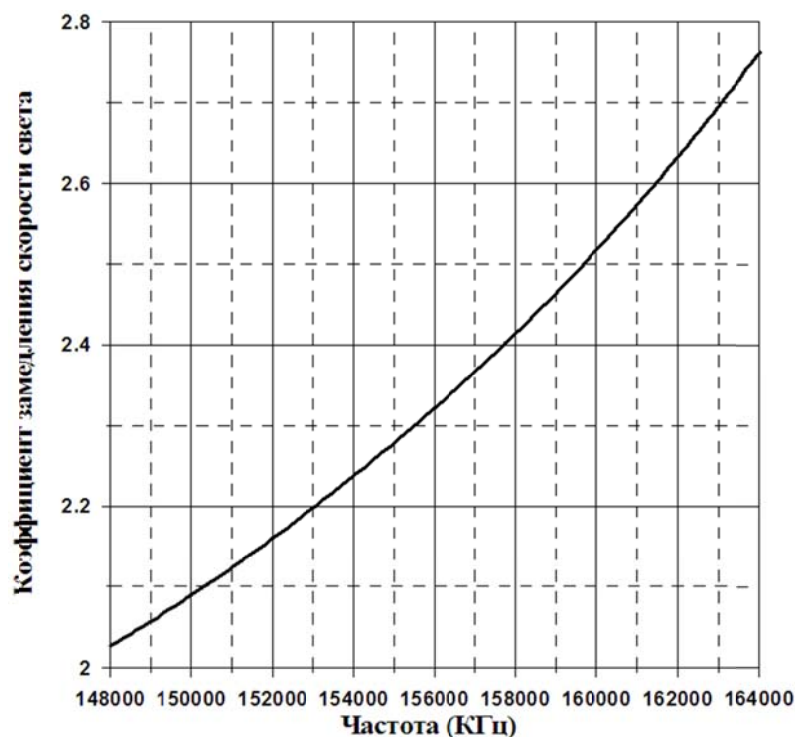


Рис. 2. Зависимость коэффициента замедления скорости света в ребристой структуре от рабочей частоты

Получены следующие значения коэффициента замедления g для различных участков рабочего диапазона длин волн: $g_{154\text{МГц}}=2.238$, $g_{158\text{МГц}}=2.414$, $g_{162\text{МГц}}=2.632$.

Определение коэффициента затухания и формы диаграммы направленности в азимутальном направлении

Формирование узкой ДН в плоскости частотного сканирования (в азимутальном направлении) происходит при помощи линейной решетки щелевых излучателей и замедляющей системы в виде открытой ребристой структуры. Для длинной антенны закон распределения амплитуды поля поверхностной волны, распространяющейся вдоль открытой ребристой структуры, можно считать экспоненциальным: $\exp(\alpha x)$, где $\alpha = \ln \Delta / L$ — коэффициент затухания, Δ — уровень поля в конце антенны (в относительных единицах) по отношению к уровню на входе, длина антенны $L=246$ м. С учетом экспоненциального распределения выражение для ДН ИРНР по мощности в плоскости частотного сканирования имеет вид

$$F(\epsilon) = A \frac{\text{ch}(\alpha L) - \cos(\psi N)}{\text{ch}(\alpha d) - \cos(\psi)}, \quad (2)$$

где $\psi = kd(g - \sin \epsilon)$ — разность фаз между соседними щелями, N — число щелей, d — расстояние между щелями, A — коэффициент, нормирующий максимум ДН на единицу.

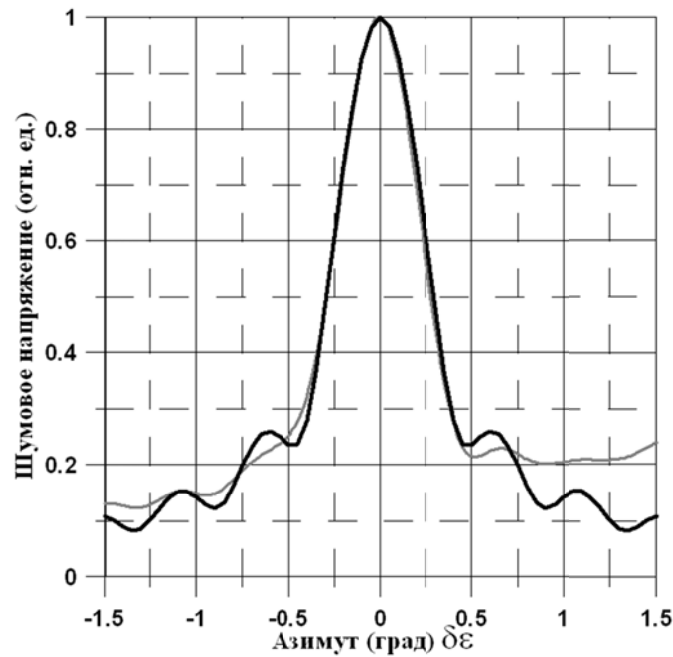


Рис. 3. Серая линия — измеренная зависимость амплитуды сигнала при прохождении радиоисточника через ДН, черная линия — восстановленная ДН в азимутальной плоскости

Теоретически достаточно сложно оценить, какая часть энергии передается ребристой структурой щелевым излучателям и приходит в конец антенны, поэтому задача определения коэффициента затухания является важной в калибровочных измерениях. Для ее корректного решения необходимо учесть свойства как антенны, так и приемного тракта. Решение рассматриваемой задачи может быть получено в результате анализа мощности принятого сигнала на рабочих частотах f_0 , в ДН которых попадает радиоисточник, когда пересекает центр сектора сканирования ИРНР. В этом случае мощность принятого сигнала

$$P(f_0) = AW(f_0) \int F(\varepsilon(f)) \Phi(f - f_0)^2 df, \quad (3)$$

где $W(f_0)$ — спектральная мощность радиоисточника, $\Phi(f - f_0)$ — амплитудно-частотная характеристика фильтра приемного тракта, $F(\varepsilon(f))$ определяется выражением (2) с учетом уравнения сканирования (1). Из выражения (3) видно, что измеренная динамика мощности, вообще говоря, не повторяет форму ДН, а является сверткой ДН и фильтра.

В выражении (3) известна форма фильтра (гауссов, с шириной полосы 25 КГц), $P(f_0)$ — регистрируемая мощность радиоисточника, форма ДН определена с точностью до искомого параметра Δ . С использованием метода наименьших квадратов для выражения (3) численно определены параметры $\Delta = 0.15$ и $\alpha = -0.0077$, что соответствует ширине ДН $2\Delta\varepsilon_{0.5} = 0.45^\circ$. На рис. 3 приведены результаты определения формы ДН по измерениям радиоисточников, серая линия — результат измерений $P(f_0)$, черная линия — восстановленная форма ДН в азимутальной плоскости $F(\varepsilon)$.

Пространственное распределение мощности в антенной системе координат. Диаграмма направленности в угломестном направлении

Для измерения ДН в угломестном направлении проводились наблюдения перечисленных выше радиоисточников. Измерения велись в режиме циклического сканирования с использованием собственного перемещения радиоисточника по небесной сфере. Область сканирования и количество рабочих частот (азимутов основного направления ДН) определялись геометрией эксперимента, т. е. областью пересечения эфемериды радиоисточника и сектора сканирования ИРНР.

Дискретный набор сечений ДН, полученных в режиме циклического сканирования, был аппроксимирован квадратичными В-сплайнами. На рис. 4 приведены восстановленные ДН восточного и западного полурупоров. Видно, что максимумы ДН полурупоров смещены от центра примерно на $\gamma_0 \approx \pm 1.5^\circ$.

Поскольку измерение и практическое использование двумерных распределений поля антенны является непростой задачей, обычно диаграмму направленности характеризуют двумя сечениями в ортогональных плоскостях, проходящих через главный максимум. Форма ДН в азимутальном направлении $F(\epsilon)$ определяется выражением (2). Формирование широкой ДН в угломестной плоскости обеспечивает рупор, разделенный металлической перегородкой на две равные части (два полурупора).

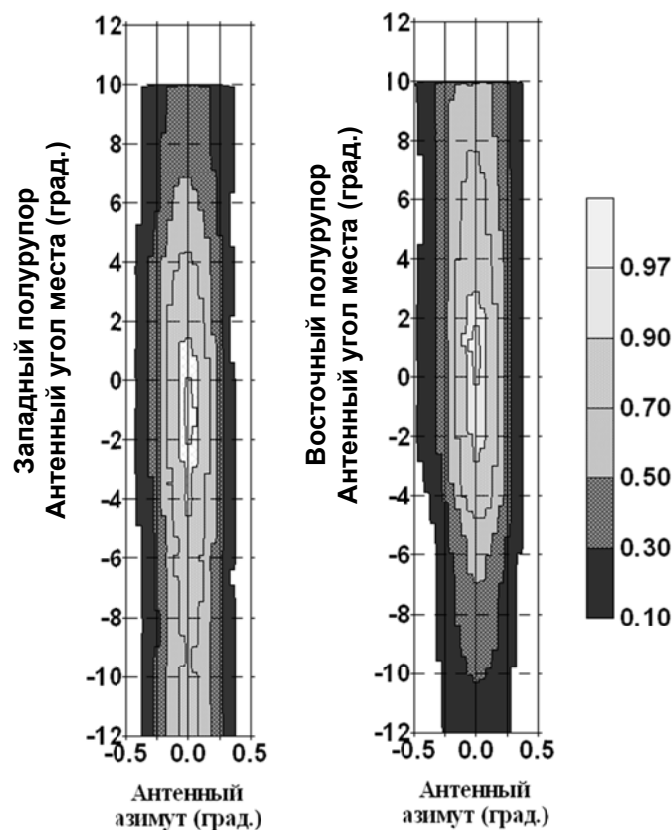


Рис. 4. Форма ДН по мощности в антенной системе координат для восточного и западного полурупоров

Основное отличие поля в рупоре от поля в волноводе состоит в том, что фронт волны в рупоре является не плоским, а цилиндрическим. Разность фаз $\psi(x)$ между возбуждающими полями в центре и в произвольной точке x в раскрыве рупора: $\psi(x) = -kx^2/2H$, где H — эффективная длина рупора. Учет несинфазного распределения на излучающей поверхности рупора приводит к следующему выражению для поля в угломестном направлении:

$$E(\gamma) = \int_{-D/2}^{D/2} E(x) \cdot \exp(ikx \sin(\gamma) + i\psi(x)) dx \quad (4)$$

где D — ширина раскрыва рупора, $E(x)$ — распределение поля в раскрыве рупора. Механизм формирования амплитудно-фазового распределения электромагнитного поля в раскрыве рупоре следующий: возбужденная щелями волна распространяется в рупоре между разделительной перегородкой и нижней (западной)/верхней (восточной) плоскостью рупора. За счет резкого и несимметричного изменения размеров рупора за перегородкой, кроме основной волны H_{10} возникают волны высших типов H_{20} , H_{40} , H_{80} . Эти волны, распространяясь далее по рупору с разными скоростями, приходят к раскрыву с разными амплитудами и фазами. Таким образом, в раскрыве каждому рупору соответствует свое несимметричное амплитудное распределение поля:

$$E(x) = \cos\left(\frac{\pi}{D}x\right) + \alpha_{21}e^{i\Delta\psi_{21}} \sin\left(\frac{2\pi}{D}x\right) + \dots + \alpha_{2n1}e^{i\Delta\psi_{2n1}} \sin\left(\frac{2n\pi}{D}x\right). \quad (5)$$

Форма ДН существенно зависит от параметров α_{2n1} , $\Delta\psi_{2n1}$ волн высших типов. Теоретическая оценка исследуемых параметров сложна, поскольку зависит от множества трудно учитываемых факторов.

В результате калибровочных измерений показано, что приемлемое, с точностью 10 %, согласие между расчетной и измеренной ДН достигается при учете двух мод волн высших типов H_{20} и H_{40} . Определены искомые параметры волн высших типов H_{20} ($\alpha_{21}=0.813$, $\Delta\psi_{21}=14.6^\circ$) и H_{40} ($\alpha_{41}=0.3$, $\Delta\psi_{21}=250^\circ$). На рис. 5 штриховая линия соответствует измеренной ДН, черная и серая линии — расчетным ДН восточного и западного полурупоров для найденных параметров волн высших типов.

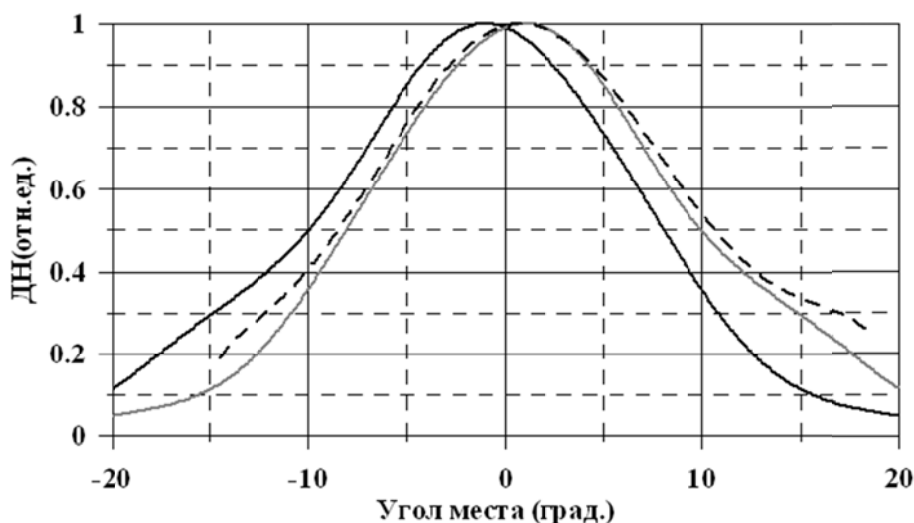


Рис. 5. Черная и серая линии — ДН восточного и западного полурупоров, штриховая линия — измеренная ДН в угломестном направлении

Фазовая характеристика антенны. Исследование возможности синтеза диаграммы направленности антенны ИРНР в угломестном направлении

Для определения координат цели в угломестной плоскости ИРНР применяется фазовый метод, основанный на измерении разности фаз эхосигналов, принятых двумя полурупорами антенной системы. Возможность использования фазового метода обусловлена несимметричным распределением поля в раскрыве рупора (5). Асимметрия необходима для формирования в области основного лепестка $\gamma \in [-10^\circ; 10^\circ]$ фазовой диаграммы, близкой к линейной, $\arg(E^{D,U}(\gamma))$: D и U — соответственно каналы западного и восточного полурупоров. Зависимость разности фаз $\varphi = \varphi(\gamma)$ между сигналами, принятыми восточным и западным полурупором, от антенного угла места γ называется фазо-угломестной характеристикой, или фазовой диаграммой антенны ИРНР:

$$\varphi(\gamma) = \arg(E^U(\gamma)) - \arg(E^D(\gamma)). \quad (6)$$

Задача точного определения координат в угломестном направлении требует калибровки фазовой ДН $\varphi(\gamma)$. Фазо-угломестная характеристика антенны, представленная на рис. 6, определялась по результатам наблюдения космических радиоисточников. В диапазоне углов места $\pm 10^\circ$ фазовая характеристика линейна и ее наклон составляет 17 электр. град./ 1° угла места, что соответствует интерферометру с базой примерно 5 м. Вне рассматриваемого диапазона зависимость разности фаз от антенного угла места цели более сложная, нелинейная.

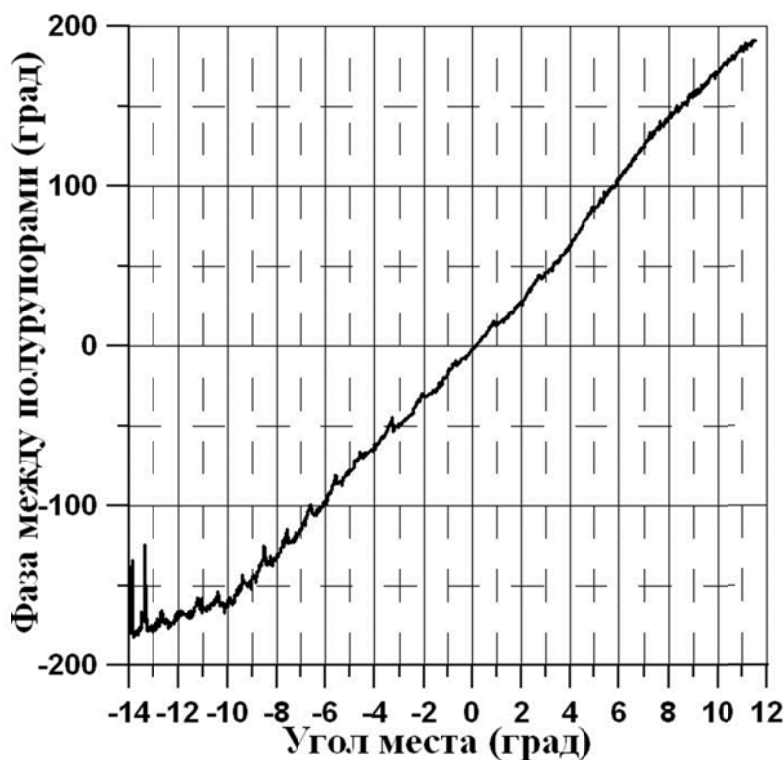


Рис. 6. Фазовая характеристика антенны ИРНР

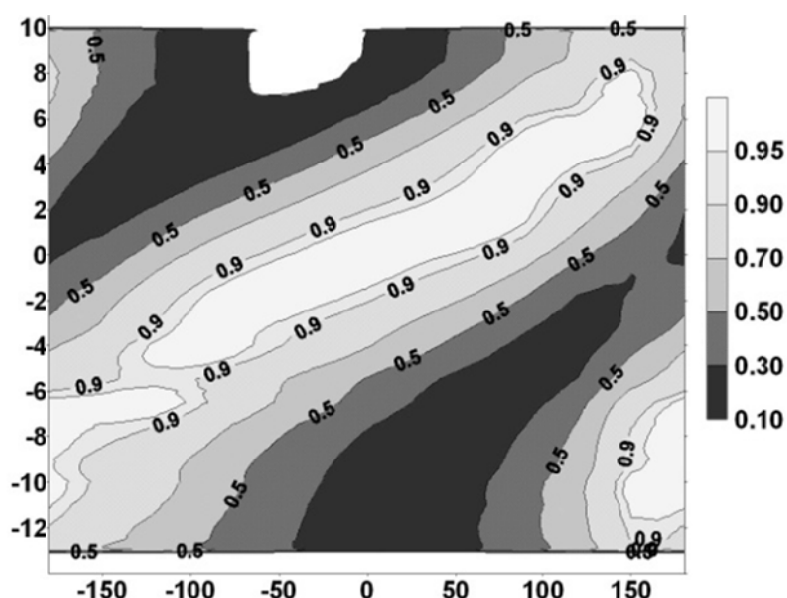


Рис. 7. Форма ДН в угломестном направлении в зависимости от разности фаз между полурупорами (ось абсцисс). По оси ординат — антенный угол места

Еще одной важной задачей, для которой необходима калибровка фазовой ДН ИРНР, является возможность управления формой ДН в угломестной плоскости. На рис. 7 представлена полученная в результате калибровочных измерений зависимость формы ДН в угломестном направлении от дополнительной разности фаз между каналами. Из рисунка видно, что сдвиг фаз между каналами в пределах $-90 \div +90^\circ$ приводит к тому, что максимум суммарной ДН смещается от центрального направления в пределах $-5 \div +5^\circ$. Таким образом можно осуществлять сканирование в угломестной плоскости. Если сдвиг фаз составляет 180° , то формируется двухлепестковая ДН.

Вторая глава посвящена определению координатных и некоординатных характеристик наблюдаемых КО на ИРНР и определению по полученной траекторной информации параметров орбиты КО.

На ИРНР регистрируется и записывается полная форма принятого сигнала в виде квадратур $a(t)$ и $b(t)$. Результатом одного сеанса наблюдений КО на ИРНР является записанная последовательность огибающих РЛ-сигналов, которую можно представить в комплексной форме: $q(t)=a(t)+ib(t)$.

Для анализа характеристик сигнала построена аналитическая модель регистрируемого РЛ-сигнала, содержащая координатные характеристики движения КА: дальность, радиальную скорость, антенный азимут, угол места — и некоординатную характеристику — амплитуду сигнала.

Модель принятого сигнала

Особое внимание в работе уделено проблеме уточнения антенного азимута по амплитуде вариаций формы фронтов принятого сигнала. Вариации возникают вследствие того, что интервал времени, в течение которого форма огибающей меняется значительно (например, передний и задний фронт сигнала или переброс фазы с 0 на 180°), сравним с временем прохождения сигнала по длине антенны, что приводит к необходимости учитывать в аналитической модели из-

лученного и принятого сигнала процесс распространения его в антенне. Учет запаздывания сигнала при работе на излучение и прием приводит к следующему выражению для формы принятого РЛ-сигнала на выходе приемника:

$$q(t) = \mu \cdot e^{i\omega_D \left(t - \frac{2R}{c}\right) + i\varphi(\gamma)} \int_0^L \int_0^L q_0 \left(t - \frac{2R}{c} - \frac{(x_1 + x_2)}{c} (g - \sin(\xi)) \right) \cdot e^{(x_1 + x_2)(\alpha - ik(g - \sin(\varepsilon)))} dx_1 dx_2, \quad (7)$$

где $q_0(t)$ — форма огибающей излученного сигнала, R — дальность до КА, $\omega_0 = 2\pi f_0$ — рабочая частота, ω_D — доплеровский сдвиг частоты (ДСЧ), φ — фаза принятого сигнала, ε — антенный азимут КА, μ — амплитуда РЛ-сигнала. В результате математического моделирования было найдено, что если характерное время изменения формы излученного сигнала не менее 6.5 мкс, то огибающую излучаемого сигнала q_0 на интервале 2 мкс (время распространения в антенне) можно разложить в ряд, ограничившись первыми тремя членами. После выполненного разложения интеграл берется аналитически, перегруппировка полученного выражения позволяет выделить два основных слагаемых:

$$q_r(t) = \mu \cdot e^{i(\varphi_n(\gamma) + \omega_D(t - \tau_0))} (a(t) + ib(t)), \quad (8)$$

$$a(t) = q_0(t - \tau_0 - \delta\tau), b(t) = \xi \frac{dq_0(t - \tau_0 - \delta\tau)}{dt}.$$

Здесь $\tau_0 = 2R/c$ — задержка сигнала, ξ — амплитуда вариаций принятого сигнала, $\delta\tau$ — дополнительная задержка, связанная с распространением сигнала в антенне:

$$\delta\tau = \frac{g - \sin(\varepsilon)}{\omega_0 \cos(\varepsilon)} \frac{\partial \psi(\varepsilon)}{\partial \varepsilon}, \quad (9)$$

$$\xi = \frac{g - \sin(\varepsilon)}{\omega_0 \cos(\varepsilon)} \frac{\partial \ln(F(\varepsilon))}{\partial \varepsilon}, \quad (10)$$

где $\psi(\varepsilon)$ — фазовая ДН в азимутальном направлении.

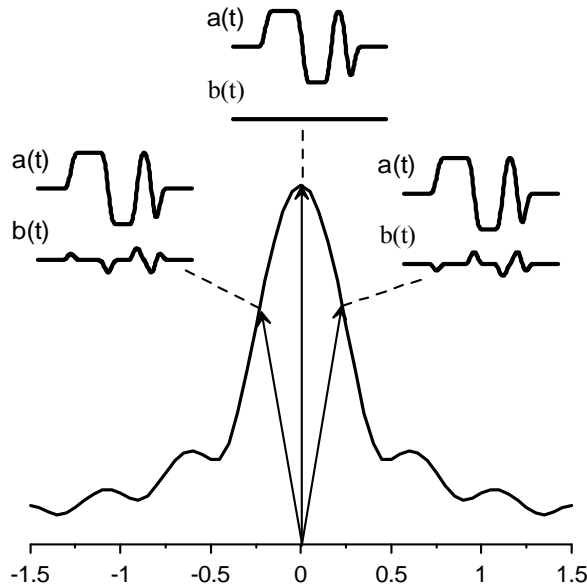


Рис. 9. Пример динамики искажений при движении через азимутальную ДН $F(\varepsilon)$

Амплитуда вариаций принятого сигнала зависит от скорости изменения формы сигнала $dq_0(t)/dt$ и ДН, знак ξ определяет сторону относительно центра ДН, на которой находится КА. В случае, когда КА находится в центре (максимуме) азимутальной ДН, $\xi=0$ и искажения в сигнале отсутствуют, т. е. формы излученного и принятого сигналов совпадают. Схематично форма вариаций принятого сигнала в зависимости от положения КА в азимутальной ДН приведена на рис. 9. Принятый сигнал представлен в виде двух квадратур: $a(t)$ — реальная часть и $b(t)$ — мнимая часть сигнала. Предполагается, что излученный сигнал $q_0(t)$ определяется только квадратурой $a_0(t)$. В этом случае вариации принятого сигнала сосредоточены в $b(t)$.

На рис. 10, *а* и *в* представлены амплитудная и фазовая ДН соответственно в азимутальной плоскости, на рис. 10, *б* и *г* приведены зависимости амплитуды вариаций ξ и дополнительной задержки δt в зависимости от антенного азимута $\delta\epsilon$ для рабочих частот $f_0=154, 159, 162$ МГц. Амплитуда вариаций имеет размерность времени, на рис. 10, *б* она приведена в мкс. Из рис. 10, *б* видно, что в пределах основного лепестка ДН амплитуда вариаций ξ почти линейно зависит от антенного азимута $\delta\epsilon$, что позволяет в данной области по амплитуде вариаций ξ уточнять $\delta\epsilon$.

Из рис. 10, *г* видно, что максимальная дополнительная задержка соответствует направлению главного максимума ДН. Таким образом, зависимость дополнительной задержки от азимута приводит к дополнительным вариациям в наблюдаемой динамике дальности КА, причем амплитуда этих вариаций для ИРНР составляет примерно 350 м.

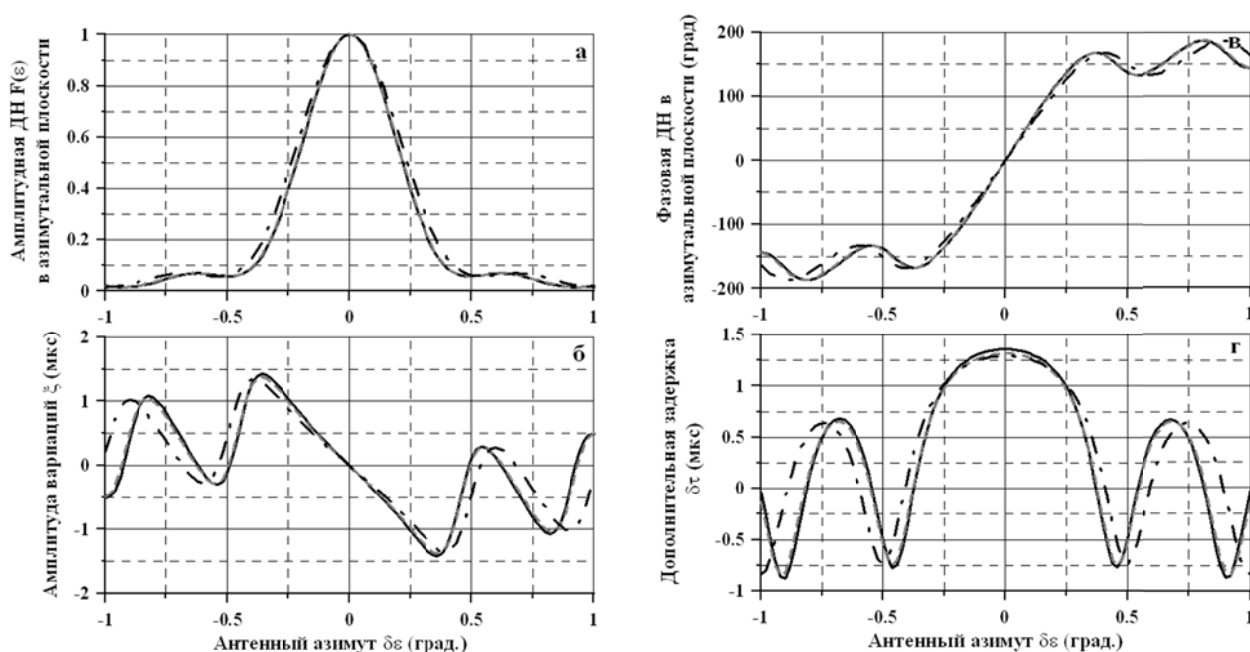


Рис. 10. Амплитудная ДН (*а*), амплитуды вариаций (*б*), фазовая ДН (*в*), — дополнительная задержка в зависимости от антенного азимута $\delta\epsilon$ и рабочей частоты f_0 (*г*): черная линия — 154 МГц, серая штриховая линия — 159 МГц, черная штрихпунктирная линия — 162 МГц.

Методика определения параметров РЛ-сигнала

Параметры РЛ-сигнала определяются путем аналитической минимизации среднеквадратичного отклонения (СКО) между модельным $q_r(t)$ и принятым $q(t)$ сигналом:

$$\Delta q(\mu, \varphi, \tau, \omega, \xi) = \int_{t_1}^{t_2} |q(t) - q_r(t)|^2 dt, \quad (11)$$

где $t_1 < \tau$, $t_2 < \tau + T$, T — длительность излученного сигнала. Аналитическое решение задачи минимизации приводит к следующему алгоритму измерения характеристик сигнала. Задержка определяется по максимуму функции

$$\rho(\tau, \omega_D) = \left| R(\tau, \omega_D) \right|^2 / W_0 + \left| R'(\tau, \omega_D) \right|^2 / W'_0 + \left| R(\tau, \omega_D) \right|^2 / W_0 - R'(\tau, \omega_D)^2 / W'_0, \quad (12)$$

где

$$R(\tau, \omega_D) = - \int_{t_1}^{t_2} q(t) q_0^*(t - \tau) e^{-i\omega_D(t - \tau)} dt, \quad (13)$$

W , W_0 , W'_0 — энергия принятого, излученного сигнала и производная энергии излученного сигнала:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} |q(t)|^2 dt, \quad W_0 = \int_0^T |q_0(t)|^2 dt, \quad W'_0 = \int_0^T \left(dq_0(t) / dt \right)^2 dt, \quad (14)$$

$$R'(\tau, \omega_D) = - \int_{t_1}^{t_2} q(t) \frac{dq_0^*(t - \tau)}{d\tau} e^{-i\omega_D(t - \tau)} dt. \quad (15)$$

После определения задержки τ и ω_D остальные характеристики сигнала находятся с помощью следующих выражений:

$$\xi = \text{Im} \left\{ R'(\tau, \omega_D) e^{-i\varphi} \right\} / (\mu W'_0), \quad (16)$$

$$\mu = \text{Re} \left\{ R(\tau, \omega_D) e^{-i\varphi} \right\} / (W_0), \quad (17)$$

$$\varphi = \arg \left(R(\tau, \omega_D)^2 / W_0 - R'(\tau, \omega_D)^2 / W'_0 \right) / 2. \quad (18)$$

Разность фаз $\Delta\varphi$ между полурупорами определяется из условия максимальной энергии суммы сигнала $q_1(t)$ от восточного полурупора и сдвинутого на искомую фазу сигнала $q_2(t)e^{i\Delta\varphi}$ от западного полурупора:

$$\int_{\tau}^{\tau+T} |q_1(t) + q_2(t)e^{i\Delta\varphi}|^2 dt \rightarrow \max. \quad (19)$$

Таким образом, разность фаз $\Delta\varphi$ между полурупорами:

$$\text{tg} \Delta\varphi = \frac{\text{Im}(Q(\tau))}{\text{Re}(Q(\tau))}, \quad (20)$$

$$Q(\tau) = \int_{\tau}^{\tau+T} q_1(t) q_2^*(t) dt.$$

В результате цифровой обработки РЛ-сигналов по изложенной методике в каждом такте зондирования можно получить траекторные характеристики: дальность R , скорость вдоль луча V_R (радиальная скорость), антенный азимут ε , антенный угол места γ . Задержка, ДСЧ, разность фаз между полурупорами достаточно просто связаны с параметрами наблюдаемого КА:

$$R = c\tau/2, V_R = \omega_D c/2\omega_0, \gamma = \Delta\varphi/k_\varphi.$$

Связь амплитуды вариаций ξ с антенным азимутом КА ε более сложная. Как отмечено выше, $\xi=0$ соответствует ситуации, когда наблюдаемый КА находится в центре ДН, т. е. $\varepsilon=\varepsilon_0$. В этом случае антенный азимут определяется уравнением сканирования (1). В общем случае, когда $\xi \neq 0$, азимут $\varepsilon = \Delta\varepsilon + \varepsilon_0$, где $\Delta\varepsilon$ определяется по амплитуде вариаций из уравнения (10). С другой стороны, можно воспользоваться квазилинейностью функции $\xi = \xi(\Delta\varepsilon)$ в области основного лепестка ДН $\Delta\varepsilon \in [-0.25^\circ; +0.25^\circ]$, что позволяет определить $\Delta\varepsilon$ в этой области с ошибкой не более одной угловой минуты, используя следующую аппроксимацию:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\xi}{a\Delta f^4 + b\Delta f^2 + c}, \quad (21)$$

где $\Delta f = f_0 - 154$ (МГц), $a = 4.8289 \cdot 10^{-5}$, $b = 0.00819664$, $c = -4.1195937$.

Связь амплитуды сигнала с параметрами исследуемого КО еще более сложная. Амплитуда сигнала зависит от характеристик приемо-передающего тракта, рассеивающих способностей КО и его углового положения в ДН антенны.

На рис. 11 представлен результат наблюдения МКС: a и b — динамика амплитуды РЛ-сигнала восточного и западного полурупоров, v — динамика амплитуды дополнительных вариаций формы принятого сигнала, z — дальность до КА, d — радиальная скорость, e — разности фаз между полурупорами. Серыми линиями на рис. 11 показана расчетная динамика измеряемых параметров.

Разработанная математическая модель принятого сигнала и алгоритм определения параметров координатной и некоординатной информации позволили провести статистический анализ наблюдений КО на ИРНР за несколько лет (обработаны несколько тысяч пролетов КА), определены СКО измеряемых траекторных параметров при отношении сигнал/шум $S/N > 20$ дБ: $\sigma_R = 150$ м, $\sigma_V = 10$ м/с, $\sigma_\varepsilon = 5$ угл. мин, $\sigma_\gamma = 5$ угл. мин.

Как правило, наблюдения КО совмещены с ионосферными наблюдениями, за год общее время наблюдений может достигать 3000–4000 ч, во время которых регистрируется порядка 100 тыс. пролетов КО через сектор сканирования ИРНР. В левой части рис. 12 представлена общая за 2007–2010 гг. гистограмма распределения по высоте зарегистрированных пролетов КО (более 350000), справа — гистограмма распределения по высоте каталогизированных КО (более 10500), попадающих в ДН ИРНР во время штатных НР-измерений. Из рис. 12 видно, что распределения в целом похожи, расхождения объясняются неравномерностью распределения наклонений орбит КО по высоте. Статистический анализ полученных данных может способствовать пониманию эволюции космического мусора на низкой орбите.

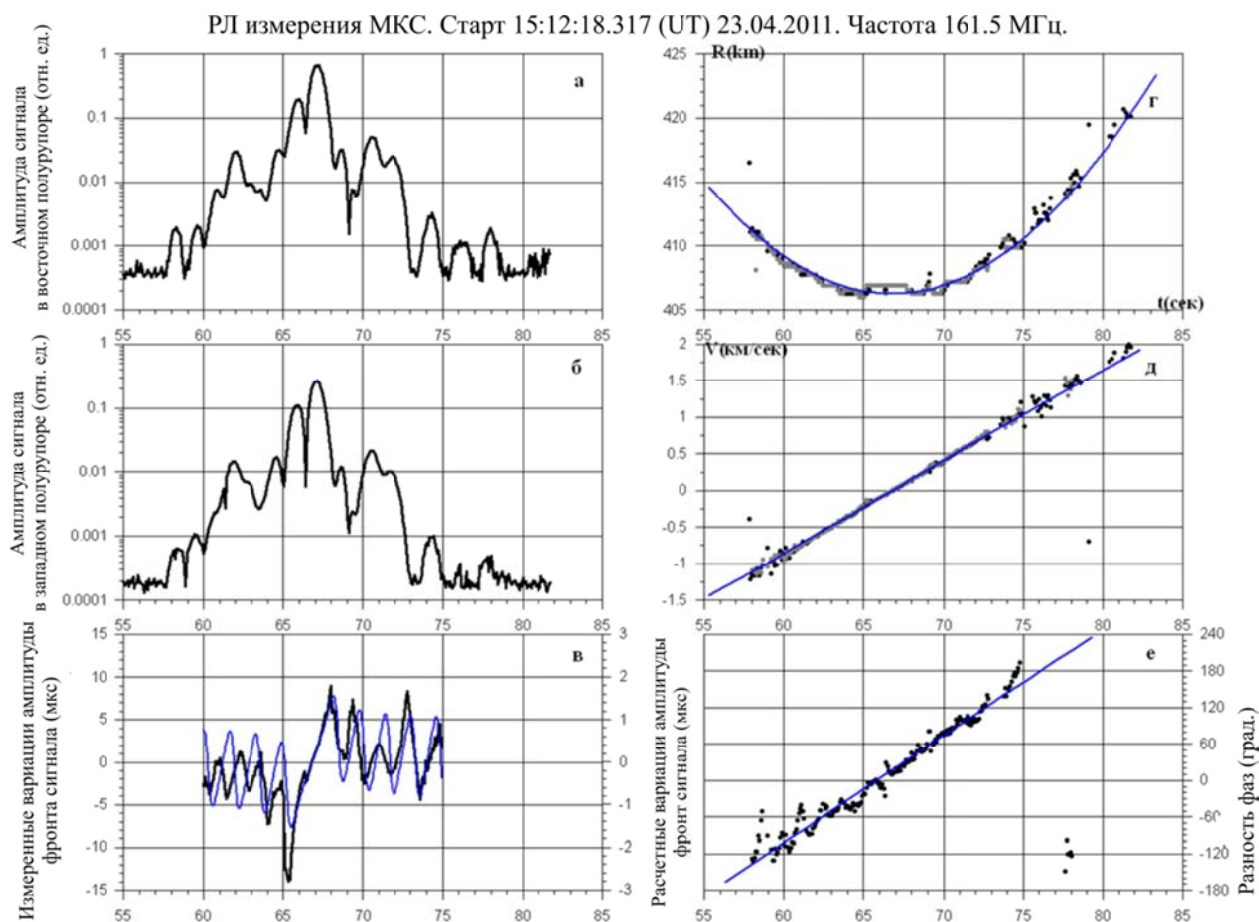


Рис. 11. Результаты наблюдений МКС.

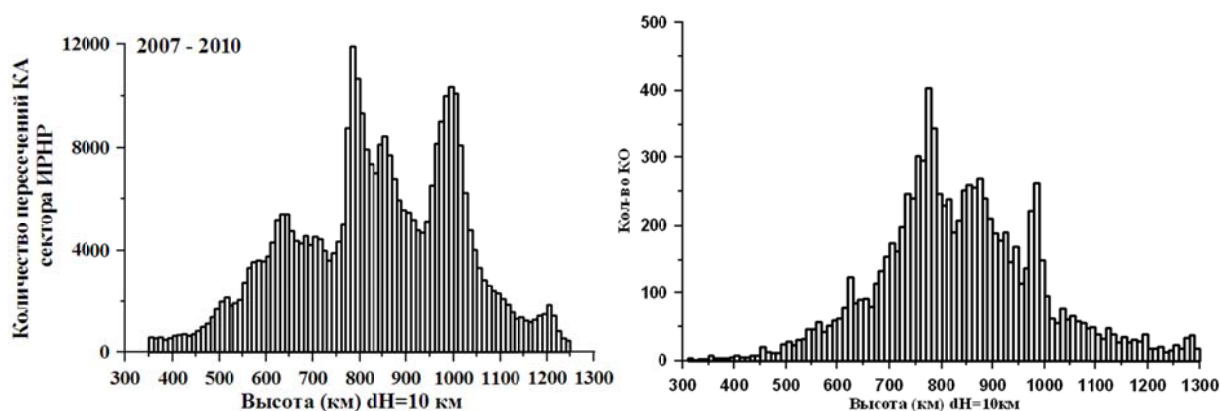


Рис. 12. Слева — распределение по высоте зарегистрированных пролетов КО за 2007–2010 гг. Общее число пролетов более 350000. Справа — распределение по высоте каталогизированных КО (более 10500), попадающих в ДН ИРНР.

Третья глава посвящена исследованию возможностей определения не-координатных характеристик КО по результатам измерения на ИРНР. Решаются следующие задачи:

- определение эффективной площади рассеяния (ЭПР) КО с учетом эффекта Фарадея,
- определение ориентации КО и его скорости движения вокруг центра масс,

– исследование влияния работы бортовых двигательных установок на ЭПР КО на ИРНР.

Приводятся результаты экспериментальных исследований на ИРНР радиолокационных сигналов.

Определение ЭПР КО с учетом эффекта Фарадея

Из-за установленного в антенне поляризационного фильтра ИРНР излучает и принимает одну линейную поляризацию электромагнитного поля. Это приводит к тому, что РЛ-сигнал испытывает квазипериодические замирания вследствие эффекта Фарадея — вращения плоскости поляризации радиоволны в ионосферной плазме, находящейся во внешнем магнитном поле Земли. Показано, что одновременные измерения параметров ионосферной плазмы и РЛ-сигнала от КО позволяют учесть фазу $\Omega(R)$ поляризационного замирания, а также получить информацию об ЭПР наблюдаемого КО. Учет эффекта Фарадея приводит к следующему выражению для мощности принятого сигнала от КО $P_{\text{Ц}}$ и мощности сигнала НР $P_{\text{НР}}$ [11]:

$$P_{\text{Ц}} = \frac{PG^2}{(4\pi)^3 k_0^2} \frac{\sigma_{\text{Ц}}}{R^4} F^2(\varepsilon, \gamma) \cos^2 \Omega(R), \quad (22),$$

$$P_{\text{НР}}(R) = \frac{P_{\text{тр}} G_0^2 \lambda^2}{R^2 (4\pi)^3} \frac{c \tau_u}{2} \pi r_e^2 \frac{N_e(R) \cos^2(\Omega(R))}{(1 + T_e(R)/T_i(R))} \int F^2(\varepsilon, \gamma) \cos^2 \varepsilon d\gamma d\varepsilon, \quad (23),$$

где R — дальность до КА, G — коэффициент усиления антенны в основном направлении. При анализе результатов измерения НР-сигнала определяются: N_e — профиль электронной концентрации, T_i — температура ионов, T_e — температура электронов, что дает возможность учесть фазу поляризационных замираний и тем самым определить $\sigma_{\text{Ц}}$ — ЭПР КО.

Предложенная методика была проверена по результатам наблюдения низкоорбитальных сферических КА. Результаты, полученные по описанной методике, согласуются с теоретическими оценками ЭПР данных КА.

Особенности РЛ-сигналов, отраженных от КА сферической формы

Важной задачей контроля технического состояния КА является определение его ориентации и скорости движения вокруг центра масс. Интересные результаты были получены при анализе динамики амплитуды РЛ-сигнала от сферического КА ЕРР (международный номер 1986-061А) диаметром 214 см. Поверхность КА ЕРР покрыта алюминиевыми пластинами и уголковыми отражателями размером 20×20 см (см. рис. 13, а). Динамика амплитуды РЛ-сигнала характеризуется ярко выраженной мелкомасштабной изрезанностью, спектральный анализ показал, что природа этих флуктуаций имеет нешумовой характер (см. рис. 13, б). Спектр имеет выделенные частоты и устойчив от пролета к пролету данного КА, соотношения амплитуд на этих частотах также устойчивы. Полученный спектр с хорошей точностью описывается моделью двух «блестящих» точек, вращающихся вокруг центра масс, разнесенных на расстояние порядка диаметра ЕРР (см. рис. 13, в).

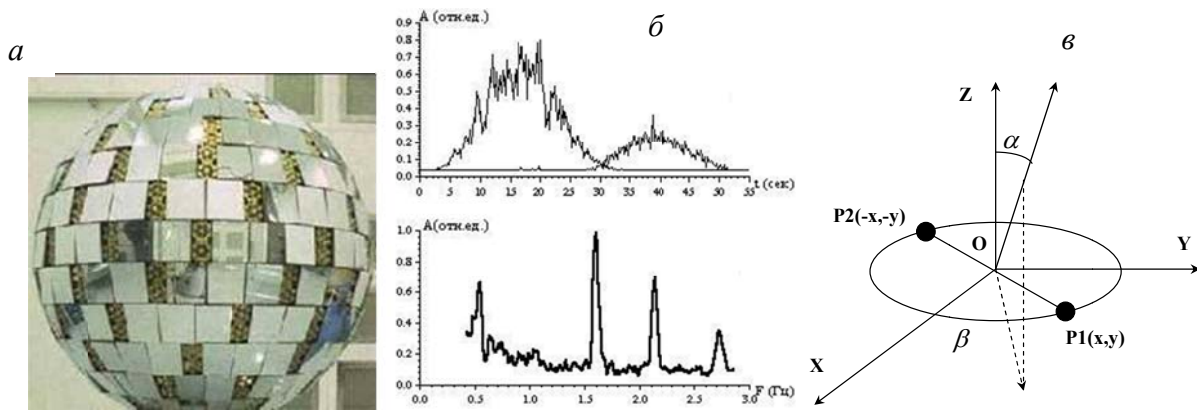


Рис. 13. Панель а — КА EGP. Панель б: сверху — вариации амплитуды РЛ-сигнала, внизу — спектр вариаций амплитуды. Панель в — модель двух отражающих точек.

В работе [16] рассмотрены наблюдаемые особенности и приведены результаты моделирования радиолокации КА сферической формы с неоднородной структурой поверхностного покрытия. Показано, что частота вращения и ориентация оси вращения в двухточечной модели могут быть определены из характера спектра вариаций амплитуды отраженного сигнала.

Частота вращения определяется первой «резонансной» частотой, деленной пополам. Угол α между осью вращения и направлением на радар:

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{\lambda}{4\pi \cdot l} \arccos(J_0 - 2J_2 + 2J_4 - \dots) \right), \quad (24)$$

где l — расстояние между отражающими центрами, J_i — амплитуды спектральных пиков. Спектру, приведенному на рис. 13, б, соответствует период обращения 4 с и угол наклона оси вращения $\alpha=85^\circ$.

Исследование радиолокационных характеристик ТГК «Прогресс» во время работы бортовых двигателей

Важной задачей контроля технического состояния КА является исследование влияния работы бортовых двигательных установок (ДУ) на его ЭПР. С 2007 по 2014 г. ракетно-космической корпорацией «Энергия» им. С.П. Королева, ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (ЦНИИМаш) и ИСЗФ СО РАН проводились совместные активные космические эксперименты по исследованию газоплазменных образований, возникающих при работе ДУ, и их влияния на отражательные характеристики ТГК серии «Прогресс». Отличительной особенностью эксперимента «Радар–Прогресс» является использование относительно маломощных ДУ, порядка 1 кг/с. За 8 лет проведено более 80 наблюдений ТГК «Прогресс» с работающими ДУ.

Исследование воздействия газоплазменных образований, возникающих при работе двигателей системы коррекции движения (СКД), на отражательные характеристики ТГК «Прогресс» позволило сделать следующие выводы:

- работа СКД оказывает значительное воздействие на некоординатные характеристики и практически не сказывается на координатных,
- наблюдаемость эффекта влияния струй СКД зависит от ориентации ТГК относительно направления падения электромагнитной волны.

Инжекция выхлопных струй навстречу радиоизлучению ИРНР («на ИРНР»), практически вдоль силовых линий геомагнитного поля, приводит к уменьшению ЭПР ТГК на 20–50 %. Инжекция в направлениях «на торможение», «на разгон» и «на север», когда вектор скорости выхлопной струи почти ортогонален магнитному полю, практически не оказывает влияния на характеристики РЛ-сигнала [17].

На рис. 14 представлены результаты эксперимента, проведенного 26 августа 2012 г. Вектор выхлопных струй СКД ориентирован на ИРНР, моменты включения и выключения СКД обозначены вертикальными линиями. Слева на рис. 14 черной линией показана динамика измеренной амплитуды РЛ-сигнала, серой — расчетная динамика амплитуды без влияния работы СКД. Справа на рис. 14 приведена динамика ЭПР ТГК «Прогресс». Видно, что во время работы СКД наблюдается резкое отрицательное возмущение в ЭПР ТГК «Прогресс» с 8.3 до 6 м² (на 25 %) после включения СКД.

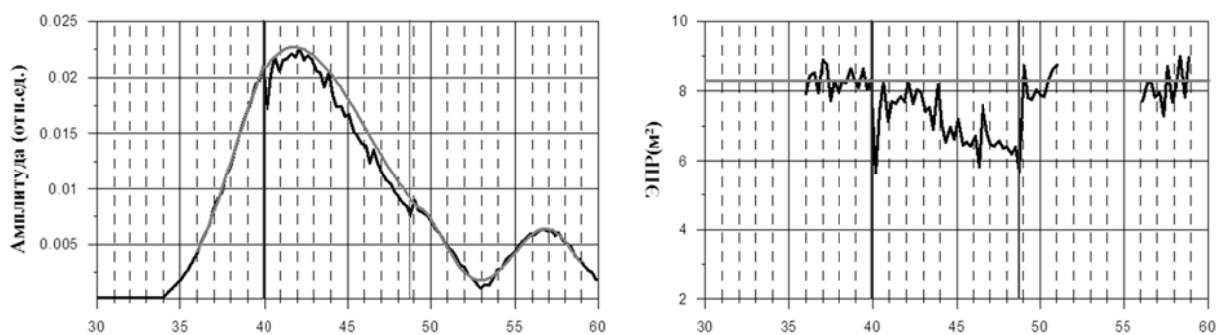


Рис. 14. Результаты измерений 26 августа 2012 г. СКД на ИРНР, время работы СКД обозначено вертикальными линиями

В **заключении** сформулированы основные выводы диссертационной работы, сделанные на основании разработанных методик и проведенных РЛ-наблюдений. Принципы, лежащие в основе методик калибровки ДН антенны, измерения параметров РЛ-сигнала, определения ЭПР КО могут быть использованы для решения соответствующих задач на других РЛ-станциях. Результаты работы в настоящее время в виде действующих алгоритмов используются на ИРНР как при обработке полученных данных в режиме реального времени, так и при последующей их обработке.

Основные результаты

1. Проведена калибровка диаграммы направленности Иркутского радара некогерентного рассеяния. По результатам наблюдений космических радиостанций проведена юстировка электрической оси антенны, восстановлено двумерное распределение поля в диаграмме направленности антенны, определена фазовая характеристика антенны, исследована возможность синтеза диаграммы направленности.

2. Построена модель принятого РЛ-сигнала с учетом особенностей антенной системы ИРНР, параметры модели связаны с координатными и некоординатными характеристиками наблюдаемого КО. Показано, что форма фронта принятого сигнала зависит от азимута, что позволяет повысить точ-

ность измерения данного угла. Разработаны методика и комплекс программ для определения координатных и некоординатных характеристик наблюдаемого КА.

3. Разработана методика учета эффекта Фарадея при наблюдении низкоорбитальных КА, проведена экспериментальная апробация оценки ЭПР КА сферической формы с использованием одновременных измерений параметров ионосферы и РЛ от КА. Экспериментально показано, что спектр динамики амплитуды РЛ-сигнала от КА EGP имеет линейчатый характер и положение его основных линий практически совпадает с линиями спектра блеска КА (оптический диапазон).

4. Обнаружено и исследовано влияние работы ДУ ТГК «Прогресс» на координатные и некоординатные характеристики КА.

Список цитируемой литературы

1. Rietveld, M. T. Introduction to ionospheric heating at Tromsø — I. Experimental overview / M. T. Rietveld, H. Kohl, H. Kopka, P. Stubbe // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. — 1993. — Vol. 55, Iss. 4–5. — P. 577–599.

2. Ionospheric perturbation associated with the “Plasma–Progress” Experiment at Irkutsk / B. G. Shpynev, V. V. Khakhinov, A. V. Medvedev, A. P. Potekhin, V. P. Lebedev, E. M. Tverdokhlebova, A. I. Manzheley // *Proceedings of the XXIX URSI General Assembly*. Chicago, Illinois, USA. — 2008. — P. GP2-05.3.

3. Анализ результатов координированных наблюдений ИСЗ «EGP» радаром некогерентного рассеяния и оптическим телескопом АЗТ-14 ИСЗФ СО РАН / В. П. Лебедев, А. В. Заворин, Ю. С. Караваев, А. В. Медведев, П. Г. Папушев, А. П. Потехин, В. В. Хахинов, Ю. Н. Юнгов // *Сборник трудов международной конференции «Околоземная астрономия – 2003»*. — М.: Институт астрономии РАН, МЦ АМЭИ, 2003. — С. 89 – 96.

4. Capabilities of the Irkutsk Incoherent Scattering Radar for space debris studies / V. P. Lebedev, V. V. Khakhinov, A. V. Medvedev, K. G. Ratovsky // *Proceedings of the ESA/ESOC Fifth European Conference on Space Debris*. Darmstadt, Germany. — 2009. — ESA SP-672. — 1 CD. — p6_5khak.pdf

5. Chau, J. L. Observations of meteor-head echoes using the Jicamarca 50MHz radar in interferometer mode / J. L. Chau, R. F. Woodman // *Atmos. Chem. Phys.* — 2004. — Vol. 4. — P. 511–521. — doi: 10.5194/acp-4-511-2004.

6. Вакман, Д. Е. Вопросы синтеза радиолокационных сигналов / Д. Е. Вакман, Р. М. Седлецкий. — М.: Советское радио, 1973. — 312 с.

7. Иркутский радар некогерентного рассеяния / Г. А. Жеребцов, А. В. Заворин, А. В. Медведев, В. Е. Носов, А. П. Потехин, Б. Г. Шпынев // *Радиотехника и электроника*. — 2002. — Т. 47, № 11. — С. 1339–1345.

8. Курикша, А. А. Перспективы радиолокации космических объектов / А. А. Курикша, В. Д. Шилин // *Вопросы радиоэлектроники*. — Серия РЛТ. — 2001. — № 2. — С. 42–45.

9. Landgraf, M. Comparison of EISCAT radar data on space debris with model predictions by the master model of ESA / M. Landgraf, R. Jehn, W. Flury // *Advances in Space Research*. — 2004. — Vol. 34. — P. 872–877.

10. Markkanen, J. EISCAT Space debris during the IPY – A 5000-Hour Campaign / J. Markkanen, R. Jehn, H. Krag // Proceedings of the Fifth European Conference on Space Debris. 30 March – 2 April 2009, Darmstadt, Germany. – 2009. – ESA SP-672. – 1 CD. – p5_3mark.pdf

11. Лебедев, В. П. Учет эффекта Фарадея при измерении эффективной площади рассеяния низкоорбитальных космических объектов на Иркутском радаре некогерентного рассеяния / В. П. Лебедев, А. В. Медведев, В. В. Хахинов, Б. Г. Шпынев // IX Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж: ВГУ, 2003. – Т. 3. – С. 1717–1723.

12. Развитие диагностических возможностей Иркутского радара некогерентного рассеяния / А. П. Потехин, А. В. Медведев, А. В. Заворин Д. С., Кушнарев, В. П. Лебедев, Б. Г. Шпынев // Космические исследования. – 2008. – Т. 46, № 4. – С. 356–362.

13. Ванштейн, Л. А. Электромагнитные волны / Л. А. Ванштейн. – М.: Радио и связь, 1988. – 440 с.

14. Цейтлин, Н. М. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / Н. М. Цейтлин. – М.: Радио и связь, 1985. – 368 с.

15. Лебедев, В. П. Методика калибровки диаграммы направленности Иркутского радара НР / В. П. Лебедев, А. В. Медведев, Д. С. Кушнарев // Труды IX конференции молодых ученых «Физические процессы в космосе и околоземной среде». – Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2006. – С. 185–188.

16. Лебедев, В. П. Особенности спектров радиолокационных сигналов, отраженных от спутников сферической формы / В. П. Лебедев, А. В. Медведев, В. В. Хахинов // LXIII научная сессия, посвященная Дню радио. – М., 2003. – Т. 1. – С. 217–219.

17. Исследование методами радиозондирования характеристик плазменного окружения низкоорбитальных космических аппаратов / В. П. Лебедев, В. В. Хахинов, Ф. Ф. Габдуллин, А. Г. Корсун, Е. М. Твердохлебова, Е. А. Лалетина, А. И. Манжелей // Космонавтика и ракетостроение. – 2008. – № 1 (50). – С. 51–60.

Отпечатано в издательском отделе ИСЗФ СО РАН
Заказ № 164 от 23 июня 2015 г.
Объем 28 с. Тираж 150 экз.