

*На правах рукописи*



Мухин Александр Васильевич

**Исследование радиотехнических характеристик  
зеркальных антенн космических аппаратов**

Специальность 05.12.07 –  
Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

**Автореферат**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Томск–2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования (ФГБОУ ВО) «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР).

**Научный руководитель:** **Газизов Тальгат Рашитович**  
доктор технических наук, старший научный сотрудник, ТУСУР, г. Томск

**Официальные оппоненты:** **Маслов Олег Николаевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», г. Самара

**Буянов Юрий Иннокентьевич**, кандидат физико-математических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск

Защита диссертации состоится 22 ноября 2016 г. в 9 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д212.268.01, созданного на базе ФГБОУ ВО ТУСУР, по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться на официальном сайте <http://www.tusur.ru/ru/science/education/dissertations> и в библиотеке ФГБОУ ВПО ТУСУР по адресу: 634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 146.

Автореферат разослан \_\_\_\_ сентября 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д212.268.01  
доктор физико-математических наук



Мандель А.Е.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

Актуальность работы. В настоящее время производство космических аппаратов (КА) является важной и конкурентоспособной отраслью современной экономики, имеющей существенную поддержку со стороны государства и являющейся неотъемлемой частью различных сфер деятельности общества. Так, потребители заинтересованы в качественном и непрерывном доступе к спутниковому телевидению, высокоскоростном доступе к интернету, высокоточной спутниковой навигации. Две трети российских КА спроектированы и произведены на предприятии АО «ИСС», являющемся ведущим российским предприятием по созданию КА. Важной частью КА является его полезная нагрузка, в которую входят антенные системы.

На КА широко применяют зеркальные многолучевые антенны (МЛА), способные вести прием/передачу сигналов по нескольким лучам, используя для этого одно главное зеркало. В проектировании таких антенн важным вопросом является локализация мощности сигнала в зоне обслуживания (ЗО) и уменьшение вне неё. Этот вопрос исследовали Калошин В.А., Пластикова А.Н., Фролова Е.В., Akagawa M., Chang S., Dragone C., Mizuguchi Y., Prata A., Yokoi H. Однако недостаточно внимания уделено оценке искажения формы диаграммы направленности (ДН) при выносе облучателя из фокуса, характерного для МЛА. Поэтому актуален предварительный анализ предполагаемой ЗО для поиска наиболее подходящей конфигурации антенны, позволяющей минимизировать затраты полезного сигнала на сопредельные с ЗО территории.

Неотъемлемой частью производства КА является проведение наземной экспериментальной отработки полезной нагрузки, в частности, антенных систем. В связи с их постоянным усовершенствованием, как в части эффективности работы, так и в части точности изготовления, необходимо использовать современные методы и средства измерения радиотехнических характеристик (РТХ) антенн. В исследование этих вопросов внесли вклад Бахрах Л.Д., Воронин Е.Н., Захарьев Л.Н., Курочкин А.П., Корбуков Г.Е., Кулаков С.В., Леманский А.А., Нечаев Е.Е., Турчин В.И., Шашенков В.Ф. и др. Однако ряд вопросов, связанных со спецификой измерения РТХ, влиянием различных факторов на РТХ и сравнением результатов измерений, полученных различными средствами, не исследован. Между тем их исследование актуально.

Важна разработка методик измерения РТХ. В нее внесли вклад Аносов А.М., Бей Н.А., Вечтомов В.А., Виноградов Ю.А., Жомов Ю.В., Никитин В.А., Соколов Б.Б., Щербаков В.В., Adatia N.A., Balanis C.A., Chakrabarty S.B., Pujara D.A., Rudge A.W., Sharma S.B., Singh V.K. и др. Значителен вклад компаний-разработчиков измерительного оборудования, например ООО «НПП «ТРИМ СШП». Однако разнообразие и специфика конкретных антенн требуют совершенствования этих методик. Поэтому оно актуально.

Цель работы – усовершенствовать создание зеркальных антенн КА. Для этого надо решить следующие задачи: выполнить моделирование ряда зеркальных антенн, усовершенствовать измерения их РТХ, разработать методику измерения РТХ.

### Научная новизна

1. Выполнено моделирование трех типов зеркальных многолучевых антенн космических аппаратов с оценкой искажения диаграммы направленности при выносе облучателя из фокуса.

2. Показаны возможность измерения и согласованность радиотехнических характеристик контурных антенн в ближней зоне на различных расстояниях до антенны-зонда, для создания условий имитации космического аппарата.

3. Впервые измерены радиотехнические характеристики контурной антенны производства АО «ИСС».

4. Впервые показана возможность измерений с использованием антенны-зонда производства АО «ИСС».

5. Показано влияние технологического ремонта и оснастки антенны на её радиотехнические характеристики.

6. Оценено влияние эллиптической поляризации облучателя офсетной антенны на отклонение её диаграммы направленности.

7. Выполнен сравнительный анализ радиотехнических характеристик зеркальных антенн, измеренных в ближней и дальней зонах.

8. Разработана методика измерения радиотехнических характеристик антенн, отличающаяся использованием частотного и временного методов, применимостью для различных типов антенн космических аппаратов, рекомендациями по выставке антенн и контролю измерительного оборудования, а также учетом особенностей измеряемых антенн.

### Теоретическая значимость

1. Показано, что в Q-диапазоне частот для оценки качества проведенного технологического ремонта недостаточно применять контрольно-измерительные машины и целесообразно использовать сканеры ближнего поля.

2. Изучены особенности влияния технологического ремонта рефлектора и технологической оснастки на радиотехнические характеристики антенн.

3. Разработанная методика воплотила в себе накопленный опыт измерения радиотехнических характеристик антенн.

### Практическая значимость

1. Обоснована возможность применения частотного и временного методов измерения радиотехнических характеристик антенн в ближней зоне для космических аппаратов «Луч», «Енисей», «Благовест».

2. Показана согласованность радиотехнических характеристик антенн, измеренных в ближней и дальней зонах.

3. Экспериментально подтверждена непригодность технологического ремонта рефлекторов антенн, работающих в Q-диапазоне частот.

4. Показана согласованность измерений коэффициента усиления частотным и времяимпульсным методами.

5. Показана согласованность измерений радиотехнических характеристик антенны с использованием антенн-зондов различных производителей, в том числе АО «ИСС».

6. Показана согласованность радиотехнических характеристик антенн, измеренных частотным методом и с использованием широкополосной

волоконно-оптической линии передачи.

7. Даны практические рекомендации для измерений радиотехнических характеристик антенн.

Методология и методы исследования. В работе применены: компьютерное моделирование методом физической оптики, частотный и временной методы измерений радиотехнических характеристик антенн, аналитические оценки.

Положения, выносимые на защиту

1. Переход от однозеркальной к двухзеркальным офсетным антеннам позволяет уменьшить потери коэффициента усиления при выносе облучателя из фокуса до 2 дБ на краю зоны обслуживания видимой поверхности земли с геостационарной орбиты.

2. Измерение радиотехнических характеристик зеркальных контурных антенн К-диапазона частот в ближней зоне возможно на расстояниях до антенны-зонда до 4-х м.

3. В Q-диапазоне частот для оценки качества технологического ремонта рефлектора недостаточно применять контрольно-измерительные машины и целесообразно использовать сканеры ближнего поля, а антенна после ремонта может иметь на 2 дБ меньший коэффициент усиления.

4. Влияние эллиптической поляризации облучателя офсетной антенны на отклонение её диаграммы направленности контролируется аналитически, моделированием и экспериментом, при необходимости может уменьшаться и должно учитываться при прицеливании антенны на зону обслуживания.

5. Измерение радиотехнических характеристик зеркальных антенн с заданными требованиями в АО «ИСС» гарантируется использованием альтернативных средств: комплексов ближнего и дальнего поля; частотного и времяимпульсного методов; с преобразованием частоты и использованием волоконно-оптической линии передачи; антенн-зондов различных производителей.

Использование результатов исследований

1. Акт внедрения в производственный процесс АО «ИСС» по проведению наземной экспериментальной отработки антенн космических аппаратов «Луч», «Енисей», «Благовест».

2. Акт внедрения в учебный процесс Томского государственного университета по дисциплинам: «Электромагнитная совместимость», «Основы надежности и технической диагностики электронных систем», «Космическое приборостроение».

3. Акт внедрения в учебный процесс Томского университета систем управления и радиоэлектроники по дисциплине «Электромагнитная совместимость бортовой радиоэлектронной аппаратуры».

Апробация результатов. Доклады и представление результатов в материалах конференций: Всерос. научно-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, 2013, 2014, 2016 гг.; Межд. научно-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2013, 2015 гг.; Всерос. научно-техн. конф. молодых ученых и студентов с международным участием «Современные проблемы радиоэлектроники»,

г. Красноярск, 2014, 2015, 2016 гг.; Межд. Научно-техн. и научно-методич. конф. «Современные технологии в науке и образовании», г. Рязань, 2016 г.

Публикации: 12 работ (2 без соавторов), 3 статьи в журналах из перечня ВАК, 9 докладов в трудах отечественных конференций.

Достоверность результатов основана на использовании современного сертифицированного оборудования, согласованности результатов аналитической оценки, моделирования и эксперимента, согласованности результатов, полученных разными средствами измерений, высокой повторяемости результатов.

Личный вклад. Все результаты получены автором лично или при непосредственном его участии. Сравнительный анализ частотного, временного методов и с использованием широкополосной ВОЛП, сравнительный анализ измерений РТХ антенны в ближней и дальней зонах, измерения с имитацией КА проведены совместно с С.К. Домановым. Обработка результатов выполнена лично автором. Часть результатов получена совместно с соавторами публикаций.

Структура и объём диссертации. В состав диссертации входят введение, 4 главы, заключение, список литературы из 75 наим., приложение из 7 с. Объём диссертации с приложением – 140 с., в т.ч. 85 рис. и 6 табл. Во введении представлена краткая характеристика работы. В гл. 1 выполнен обзор актуальных задач. В гл. 2 представлены результаты по моделированию зеркальных антенн для поиска наиболее эффективной конфигурации антенны. В гл. 3 представлены измерения РТХ антенн, приведены сравнительные результаты РТХ антенн, полученных на различном оборудовании и различными методами, приведен анализ влияния различных факторов производственного процесса на РТХ антенн. В гл. 4 приведена методика измерения РТХ антенн, даны практические рекомендации по измерению РТХ. Далее приведён список литературы. В приложении представлены копии документов (дипломов, грамот, актов внедрения).

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **1. ОБЗОР АКТУАЛЬНЫХ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

В разделе 1.1 показана актуальность совершенствования антенн КА. В разделе 1.2 рассмотрены условия выбора антенн, в частности для использования в составе КА. В разделе 1.3 описаны существующие, наиболее востребованные методы измерения РТХ антенн КА. Среди них особое внимание уделено традиционному методу измерения в дальней зоне (ДЗ) (метод вышки) и амплифазометрическому методу измерения РТХ антенн КА. Рассмотрен комплекс для измерения антенн КА в ближней зоне, установленный в АО «ИСС». В разделе 1.4 показано влияние различных факторов производственного процесса при изготовлении и техническом контроле на РТХ антенн КА, обоснована необходимость применения сверхширокополосных автоматизированных измерительно-вычислительных комплексов (СШП АИВК)

для контроля точности изготовления поверхности рефлекторов зеркальных антенн, в том числе антенн, прошедших технологический ремонт. В разделе 1.5 рассмотрена актуальность измерения РТХ антенн КА различными средствами, а в разделе 1.6 – разработка методики измерения РТХ антенн КА частотным и временным методами. В разделе 1.7 сформулированы цель и задачи работы.

## 2. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

### 2.1 Многолучевая антенна для заданной зоны обслуживания

Представлены результаты моделирования МЛА, покрывающей заданную ЗО: территорию от западной границы РФ до озера Байкал, которая может быть покрыта лучом эллиптического поперечного сечения, например,  $3^\circ \times 10^\circ$ , либо набором узких лучей круглого поперечного сечения. Как показал предварительный анализ, при формировании луча  $3^\circ \times 10^\circ$  в ЗО обеспечивается значение КУ не более 25,5 дБ. Поэтому для покрытия ЗО использовался набор узких лучей круглого поперечного сечения с более высокой энергетикой, которая может быть обеспечена МЛА.

Для заданного КУ рассчитаем необходимый диаметр апертуры рефлектора

$$D = \sqrt{\frac{\lambda^2 \cdot 10^{\frac{Ku}{10}}}{\pi^2}} = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \sqrt{10^{\frac{Ku}{10}}} = \frac{0,0375}{3,14} \cdot \sqrt{10^{45}} \approx 2,1 \text{ м}, \quad (2.1)$$

где  $\lambda$  – длина волны;  $D$  – диаметр апертуры рефлектора;  $Ku$  – требуемый КУ центрального облучателя. (Длина волны выбрана в соответствии с нижней границей диапазона частот, поскольку на ней обеспечивается наименьший КУ. Значение КУ взято с запасом в 5 дБ, чтобы учесть потери в трактах питания и в антенне, а также ЗО). Угол наклона облучающей решетки

$$\theta = 2 \cdot \arctg\left(\frac{\frac{D}{2} + C}{2 \cdot F}\right) = 2 \cdot \arctg\left(\frac{2,1}{2 \cdot 2,1} + 1\right) = 52,03^\circ, \quad (2.2)$$

где  $C$  – клиренс (выбран равным 1 м);  $F$  – фокусное расстояние (выбрано равным апертуре рефлектора 2,1 м). В качестве элемента облучающей решетки выбран гофрированный рупор. Геометрия облучающей решетки выбрана для обеспечения покрытия заданной зоны обслуживания набором лучей. На рисунке 2.1 приведены проекции лучей МЛА на заданную ЗО на частоте 9 ГГц, контуры ДН всех лучей построены по уровню минус 3 дБ.

*Таким образом, в результате моделирования показано, что полное покрытие сигналом требуемой ЗО может быть обеспечено применением МЛА однозеркальной конструкции. Эта ЗО может быть также покрыта антенной с контурной ДН, но конфигурация такой антенны намного сложнее и, как следствие, цена значительно выше.*

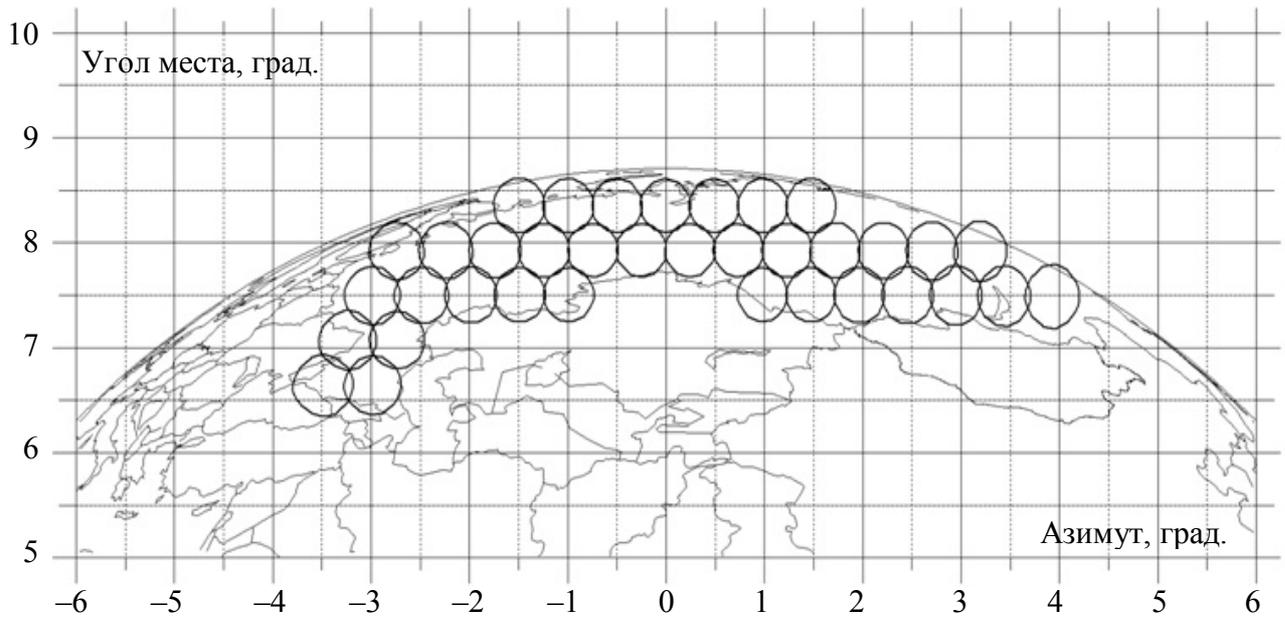


Рисунок 2.1 – Проекция лучей МЛА на заданную ЗО на частоте 9 ГГц

## 2.2 Сравнительный анализ многолучевых зеркальных антенн

Проведен сравнительный анализ моделей зеркальных антенн трех типов (рисунок 2.2). Анализ проводился для выбора наиболее эффективной и оптимальной конструкции для конкретной задачи, в частности, оценивалось искажение крайнего луча, вынесенного из фокуса параболоида, а также снижение КУ для крайнего облучателя по сравнению с центральным (рисунок 2.3).

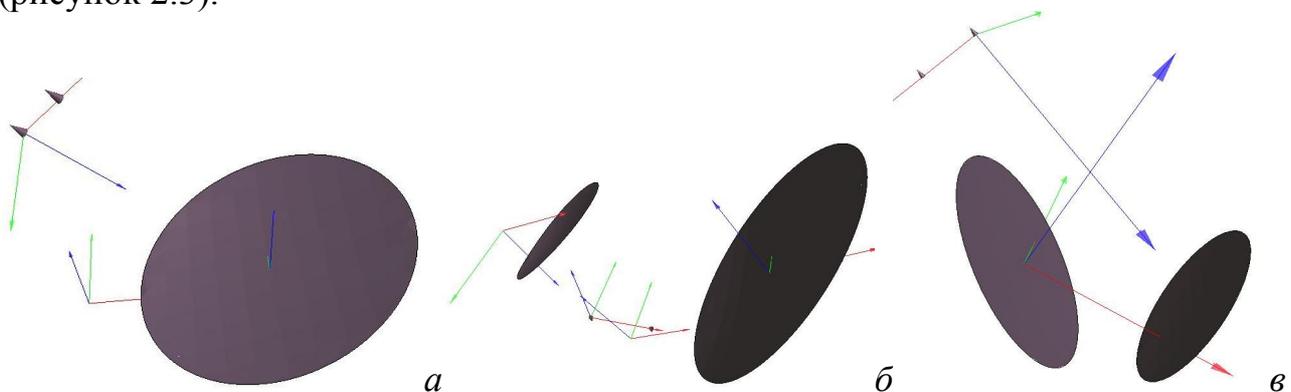


Рисунок 2.2 – Модели зеркальных антенн: неосесимметричной (офсетной) однозеркальной (а); офсетной двухзеркальной, Кассегрена (б); двухзеркальной Кассегрена с верхней запиткой (схема Драгонэ) (в)

У однозеркальной антенны КУ крайнего облучателя снижается на 3,7 дБ относительно центрального, форма крайнего луча сильно искажается и значительно вырастает уровень боковых лепестков. Кроме того, данная антенна имеет довольно низкую кросс-поляризационную развязку (25 дБ). Двухзеркальная антенна, выполненная по схеме Кассегрена, в сравнении с однозеркальной, обладает лучшими характеристиками. КУ крайнего облучателя снизился относительно центрального на 3,3 дБ (у однозеркальной антенны – на 3,7 дБ). Также видно, что форма крайнего луча искажилась значительно меньше,

чем у однозеркальной антенны. Уровень боковых лепестков (УБЛ) для крайнего облучателя поднялся незначительно (1 дБ) по сравнению с однозеркальной антенной (4 дБ). Кросс-поляризационная развязка (КПР) у данной антенны значительно выше (47 дБ), чем у однозеркальной (25 дБ). У антенны по схеме Драгонэ искажение луча при его отклонении минимально, КУ крайнего луча относительно центрального снижается всего на 2 дБ. УБЛ крайнего облучателя относительно центрального увеличивается незначительно (3 дБ), а КПР максимальна (67 дБ). *Данная антенна имеет наилучшие характеристики из рассмотренных и более удобную схему компоновки зеркал в составе КА.*

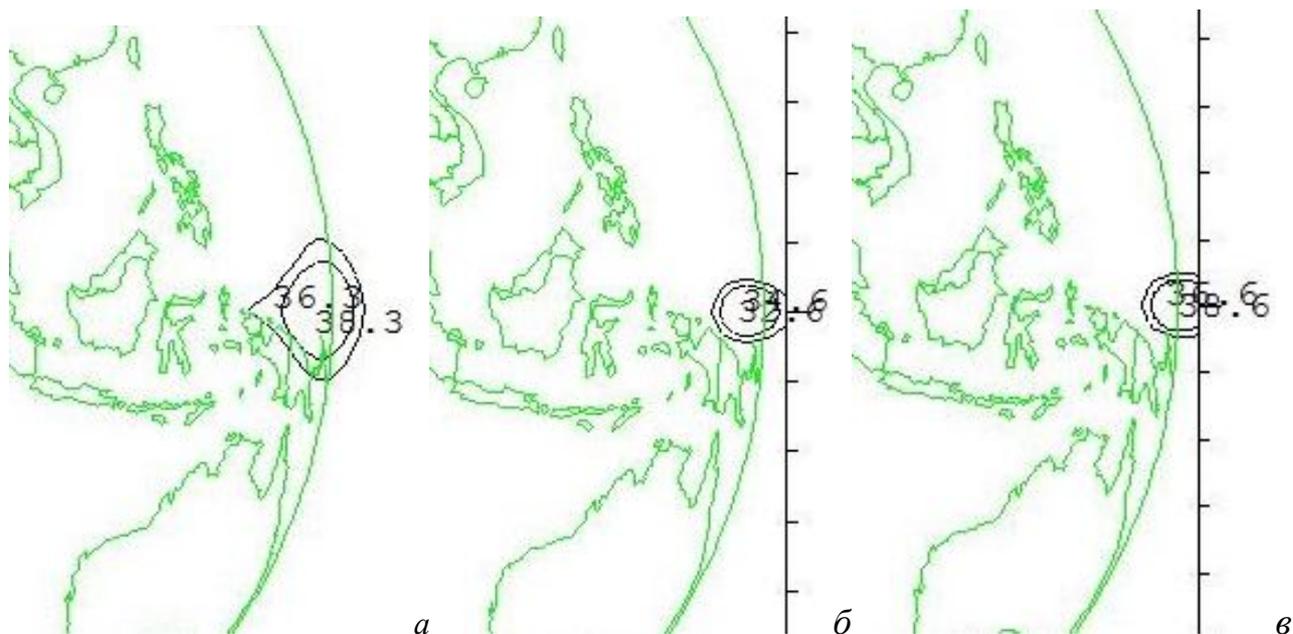


Рисунок 2.3 – Проекция ДН на 30 для антенн из рисунка 2.4

### 3. ИЗМЕРЕНИЕ РТХ АНТЕНН КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

#### 3.1 Зарубежная антенна с имитацией космического аппарата

Представлены результаты измерений РТХ контурной антенны: с учетом её габаритов и условий компоновки на КА, измерены уровни сигнала, принимаемого антенной, при различных расстояниях зонда до нее. Ввиду отсутствия реальной конструкции изделия и корпуса КА в эксперименте в качестве испытуемой антенны использована аналогичная по конструкции и габаритам контурная антенна К-диапазона частот, были имитированы условия удаленности антенны от измерительного зонда. Испытания проводились в безэховой камере (БЭК) при различных расстояниях от апертуры зонда до нижней кромки рефлектора. Максимальное расстояние от измеряемой антенны до антенны-зонда выбрано равным 4120 мм из соображений недопустимости физического контакта антенны-зонда и КА. В реальном КА расстояние от антенны до передней панели составляет 4 м. Всего было проведено три измерения РТХ антенны в ближней зоне времяимпульсным методом на расстояниях:  $S=2360, 3360, 4120$  мм с целью проверки согласованности результатов измерений. Результаты приведены на рисунке 3.1 и в таблице 3.1.

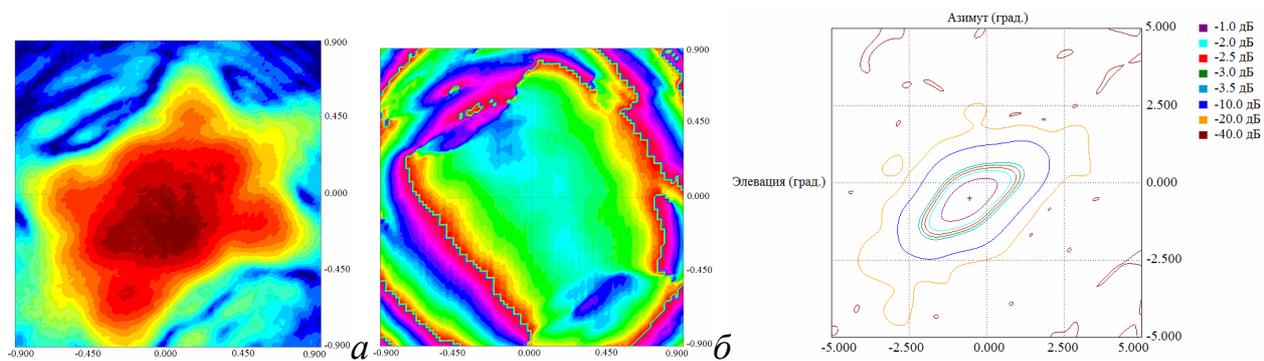


Рисунок 3.1 – Амплитудное (а) и фазовое (б) распределения и проекция ДН на ЗО (в)

Таблица 3.1 –  
Значения  
амплитуды  
сигнала  
исследуемой  
антенны при  
разных  $S$

$S$ , мм	$U$ , мВ
2360	180
3360	145
4120	140

*Результаты эксперимента показали, что картографические проекции ДН, формируемые антенной, соответствуют требуемой ЗО. Существует некоторая неравномерность в фазовом распределении поля в раскрыве антенны, объяснимая недостаточной точностью выставки её элементов и юстировки относительно плоскости сканирования. Проекция ДН на ЗО при различных расстояниях от зонда до измеряемой антенны полностью идентичны и не искажаются, так что амплитуда сигнала достаточна даже при удалении зонда на 4120 мм от измеряемой антенны.*

### 3.2 Антенна производства АО «ИСС»

Представлены результаты разработки антенны с контурной ДН в АО «ИСС» (рисунок 3.2), а также ее результирующие РТХ (рисунок 3.3). Для формирования ЗО и анализа рассчитанных ДН использовалась программа SatSoft производства компании Satellite Software. На первом этапе рассчитывалась антенна с ДН простой формы, круглого или эллиптического сечения, охватывающей требуемую ЗО. Далее осуществлялось формирование контура ЗО в программном пакете SatSoft путем расстановки точек по площади заданной территории. Каждому контуру присваивалось требуемое значение КУ. Следующим шагом является импорт полученного массива точек в программный пакет, предназначенный для синтеза поверхности рефлектора на основании заданной ДН. Это достигается путем внесения в базовый профиль поверхности различных деформаций, которые описываются рядом функций с радиальными деформациями в виде полиномов Цернике.

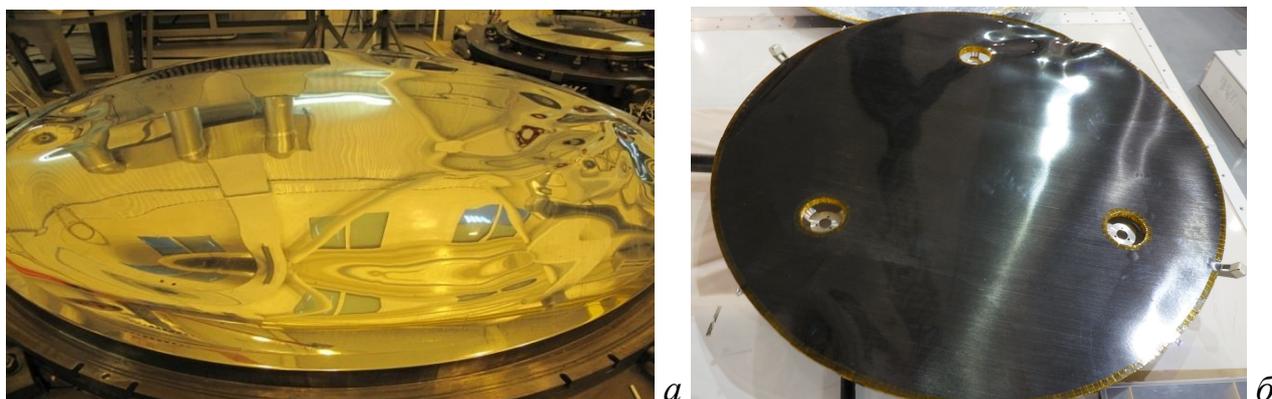


Рисунок 3.2 – Оправка (а) и рефлектор антенны (б)

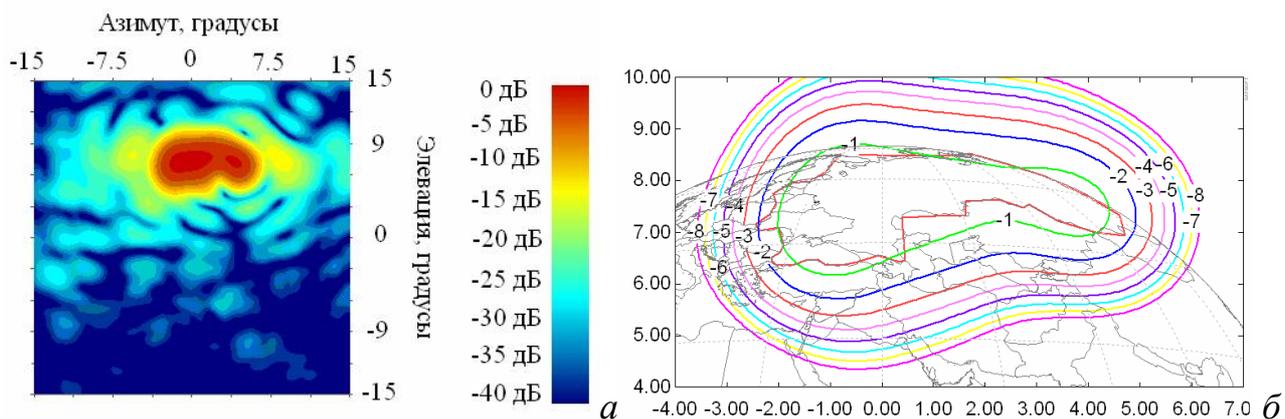


Рисунок 3.3 – ДН антенны в дальней зоне (а) и проекция контурной ДН на 3О (б)

Наземная экспериментальная обработка изделия показала, что РТХ контурной антенны полностью отвечают техническим требованиям. Оценка картографических проекций ДН на 3О подтвердила высокое качество изготовления контурного рефлектора. Таким образом, российская спутникостроительная отрасль способна обеспечить свою продукцию современными антеннами с контурной ДН. Этот факт важен для независимости производства перспективных полезных нагрузок от импорта и для укрепления обороноспособности страны.

### 3.3 Технологический ремонт антенны Q-диапазона из композитных материалов

Показаны последствия проведенного технологического ремонта рефлектора антенны, непригодность такого ремонта для антенн Q-диапазона частот и необходимость использования сканеров ближнего поля для оценки качества этого ремонта. Внешний вид рефлектора представлен на рисунке 3.4 а, где отчетливо видны неоднородности поверхности: трещины и расслоения структуры рефлектора, заполненные клеем ВК-9 с углеродом техническим К359 для устранения отклонений профиля от требуемого. В процессе производства рефлекторов из композитных материалов подобные неоднородности возникают при отделении рефлектора от формующей оправки. На рисунке 3.4 б приведены результаты сканирования поверхности рассматриваемого рефлектора на контрольно-измерительной машине (КИМ) бесконтактным методом сбора данных. Из результатов сканирования следует, что максимальное отклонение профиля не превышает 0,0939 мм при требованиях 0,1 мм. Для объективного анализа РТХ проведены измерения антенны с рефлектором, поверхность которого не имела повреждений и не подвергалась ремонту (рисунок 3.5). Сравнение КУ приведено в таблице 3.2.

Антенна с рефлектором, прошедшим технологический ремонт, имеет заметно худший КУ (на 2–2,1 дБ меньше), в сравнении с антенной, в которой установлен рефлектор без повреждений. Таким образом, соответствие формы профиля поверхности рефлектора требуемым значениям не гарантирует необходимых радиотехнических показателей в Q-диапазоне. Практика показывает, что при работе на относительно невысоких частотах, например в С, Ку, Ка-диапазонах, требования по отклонению профиля рефлектора не более 0,1 мм корректны. Однако при переходе в более высокий (Q) частотный

диапазон, ранее являющиеся не существенными для РТХ повреждения, такие как трещины и расслоения на поверхности антенных рефлекторов, выполненных из композитного материала, существенно влияют на РТХ всей антенны. Это связано с тем, что размеры неоднородностей становятся сопоставимыми с длиной волны, на которой работает антенна.

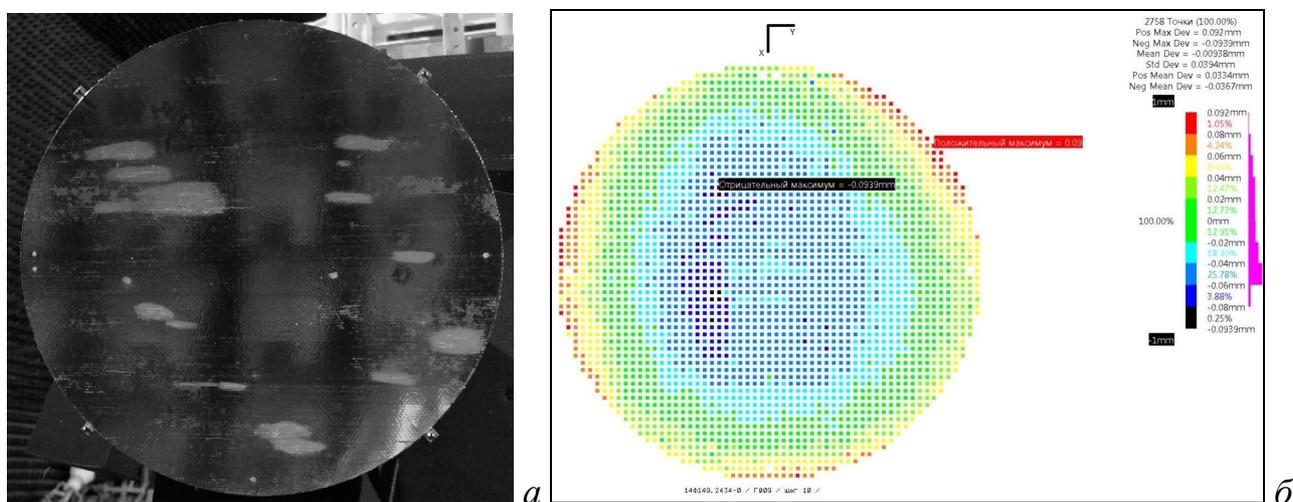


Рисунок 3.4 – Внешний вид рефлектора с неоднородностями поверхности (а), цветограмма поверхности рефлектора по результатам сканирования на КИМ (б)

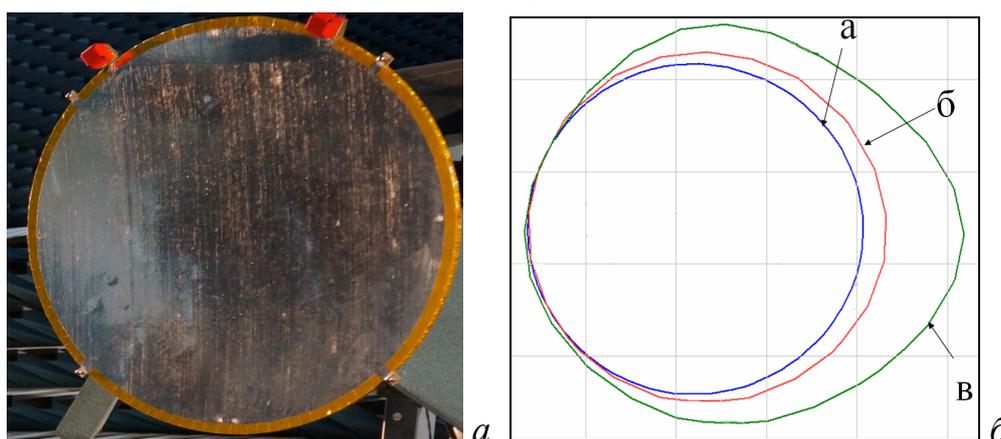


Рисунок 3.5 – Внешний вид рефлектора без повреждений (а), контур равного усиления по кополярной поляризации на средней частоте рабочего диапазона антенны: теоретический (а); рефлектор без повреждений (б); рефлектор после технологического ремонта (в) (б)

Таблица 3.2 – Сравнение значений КУ (дБ) по уровню минус 3,2 дБ для разных частот

Номер частоты	Требуемое значение	Рефлектор без повреждений	Рефлектор после ремонта	Уменьшение КУ
1	41,8	42	39,97	2,03
2	41,8	42	39,94	2,06
3	41,8	41,99	39,91	2,08
4	41,8	41,97	39,87	2,1
5	41,8	42	39,9	2,1
6	41,8	41,99	39,9	2,09
7	41,8	41,97	39,88	2,09

Таким образом, в Q-диапазоне недостаточно проверки рефлектора на КИМ, а СШП АИВК позволяет получить исчерпывающие сведения о состоянии антенны. Антенна после ремонта может иметь на 2 дБ меньший КУ.

### 3.4 Технологическая оснастка зеркальной антенны

Исследовано влияние технологической оснастки, посредством которой антенна крепится к посадочной плоскости, на РТХ антенны. Основной рефлектор исследуемой антенны диаметром 1,8 м выполнен из композитного материала. Антенна имеет 4 точки крепления к посадочной плоскости. Выявлено, что всплески бокового излучения связаны с этими точками. Поэтому принято решение ослабить крепление в одной из точек, не изменив крепление 3-х других, и повторить цикл измерения. Результаты приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Измеренные РТХ антенны (дБ) на 4-х и 3-х точках крепления для 7-и частот

№ частоты	Число точек	КНД	КПР	УБЛ (Аз)	УБЛ (Ум)
1	4	51,81	25,1	-10,0	-8,3
	3	52,97	27,2	-12,5	-13
2	4	51,99	24,8	-10,2	-8,4
	3	53,17	31,2	-12,8	-13,4
3	4	51,99	25,0	-10,1	-8,5
	3	53,22	31,2	-12,8	-13,4
4	4	52,09	23,7	-10	-8,4
	3	53,33	30,4	-12,7	-13,3
5	4	52,18	27,0	-10,2	-8,1
	3	53,47	28,6	-13,1	-13,6
6	4	52,23	27,9	-10	-8,4
	3	53,52	28,8	-12,8	-13,6
7	4	52,28	27,9	-9,9	-8,1
	3	53,62	29,4	-12,7	-13,3

Антенна с 4-я точками крепления, имеет худшие РТХ, а именно: КНД и КПР в среднем меньше на 1,25 и 3,6 дБ соответственно, УБЛ в среднем выше на 2,7 дБ по углу азимута и на 5,1 дБ по углу места. Максимальные различия по КНД, КПР и УБЛ составляют: 1,34; 6,7; 5,5 дБ. *Ликвидировано влияние оснастки на РТХ антенны, а именно: ДН стала равноширокой в двух плоскостях, появились провалы между основным и боковым лепестками, КНД и КПР увеличились в среднем по рабочему диапазону на 1,25 дБ и 3,6 дБ, УБЛ упал в среднем на 2,7 дБ по углу азимута и на 5,1 дБ по углу места.*

### 3.5 Отклонение ДН офсетной антенны эллиптической поляризации

Исследовано отклонение ДН офсетной антенны эллиптической поляризации, сравнены теоретические и измеренные проекции ДН для левосторонней поляризации по уровню половинной мощности (рисунок 3.6).

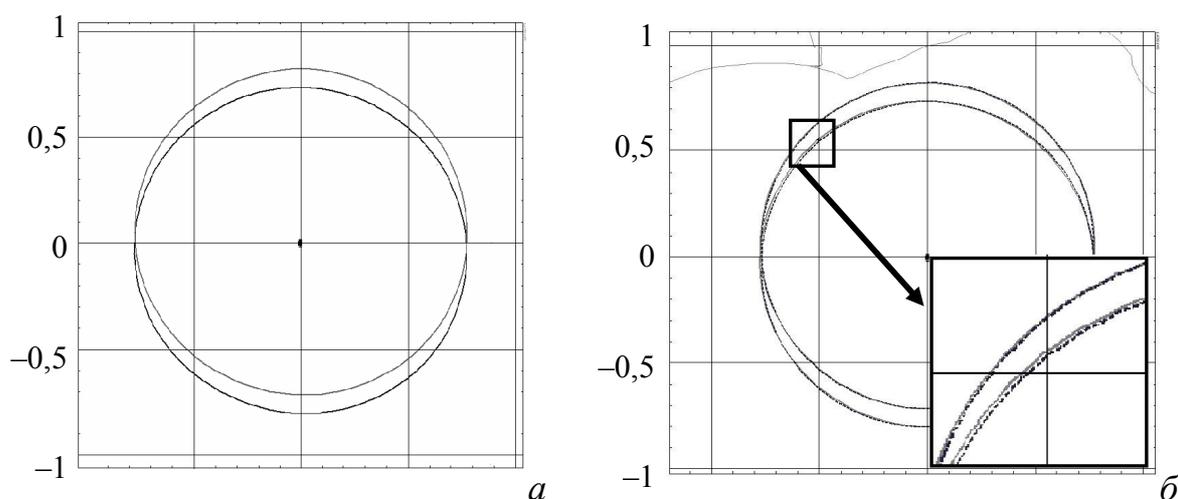


Рисунок 3.6 – Проекции ДН, измеренные (а), смоделированные (--) и измеренные (—) (б) для левой и правой эллиптической поляризации

Зависимость между углом ( $\theta$ ) отклонения ДН от нормального положения и параметрами антенны можно определить как

$$\sin(\theta) = \pm \frac{\sin(\theta_0) \cdot \lambda}{4\pi \cdot F}, \quad (3.1)$$

где  $\theta_0$  – угол между оптической осью облучателя и осью параболы;  $\lambda$  – длина волны;  $F$  – фокусное расстояние. В результате проведенного исследования получены 3 значения отклонения луча ДН антенны при круговой поляризации: по (3.1), моделированием, измерением. Значения, полученные по (3.1) и моделированием, совпали, составив  $0,045^\circ$ . Значение, измеренное на СШП АИВК, равно  $0,042^\circ$ , так что отклонение составило  $0,003^\circ$ . Таким образом, расчетные и экспериментальные данные по оценке отклонения ДН от номинального положения согласуются.

Приведены следующие рекомендации по компенсации эффекта отклонения ДН в офсетных антеннах эллиптической поляризации:

1. Уменьшение угла между оптической осью облучателя и осью параболы. Однако в космической технике этот метод имеет ограниченное применение, поскольку резко увеличиваются габариты антенны.

2. Использование рупора в виде трехмодовой конструкции. Существенным недостатком является крайне узкая частотная полоса трехмодового рупора и сложность его изготовления и настройки.

3. Использование в качестве облучателя решетки из трёх излучателей, в которой периферийные излучатели, ортогональные по поляризации центральному, компенсируют кросс-поляризацию центрального излучателя.

4. Применение двухзеркальной офсетной конструкции схемы Грегори с углом между фокальной осью рефлектора и большой осью эллипсоида вращения контррефлектора, определяемым уравнением Мизугучи – Драгоне, а также двухзеркальных схем Кассегрена типов «Top-fed» и «Side-fed», которые нашли применение в современных КА.

### **3.6 КУ рупорной антенны, измеренный в дальней зоне с помощью частотного и времяимпульсного облучения**

Обоснована возможность применимости как частотного, так и времяимпульсного методов измерения КУ. Оно проводилось в БЭК. Расстояние между вспомогательной и исследуемой антеннами выбиралось из условий ДЗ. Результаты показаны на рисунке 3.7. Видна хорошая согласованность КУ антенн, измеренных обоими методами. Различие характеристик не превышает 1 дБ, что приемлемо для измерений КУ антенн КА. На рисунке 3.7 для кривых 1 (частотный метод) и 2 (временной метод с окном 2 нс) заметны флуктуации КУ. Они связаны с паразитными переотражениями сигнала от стен, пола, элементов несущих конструкций антенны и т.д. Отсутствие флуктуаций КУ на кривой 3 (временной метод с окном 0,6 нс) получено корректным выбором размера временного окна, позволившим минимизировать влияние паразитных переотражений сигнала. Таким образом, экспериментально доказано, что для точного измерения КУ антенн, устанавливаемых на КА, пригодны как частотный метод, так и времяимпульсный, но последний позволяет за счет выбора временного окна уменьшить флуктуации КУ из-за переотражений.

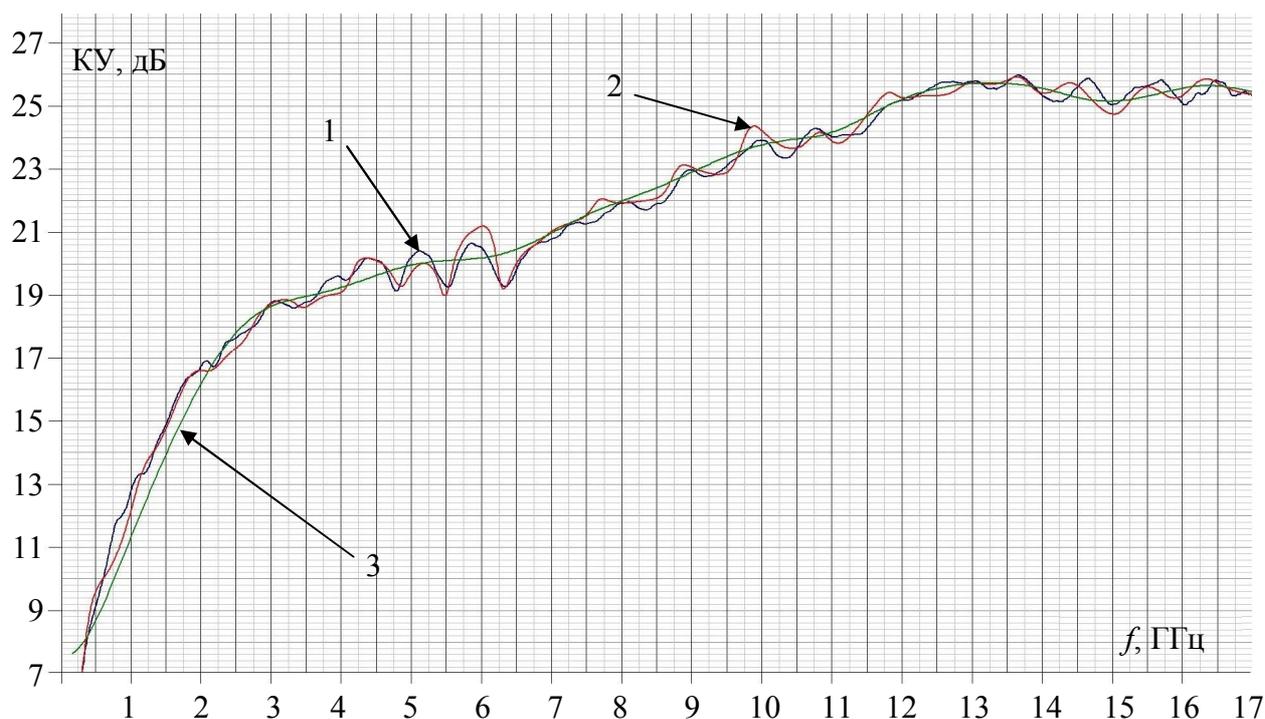


Рисунок 3.7 – Сравнение частотных зависимостей КУ рупорной антенны

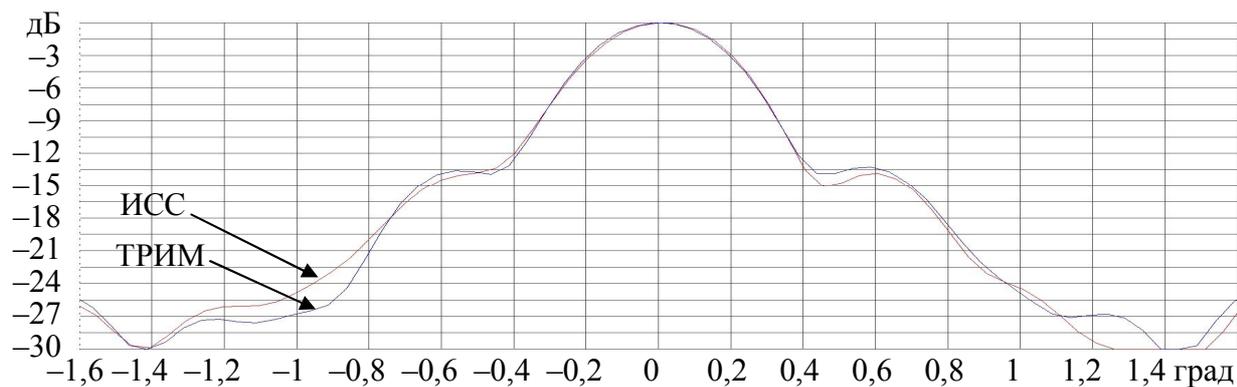
### 3.7 РТХ антенны Ка-диапазона, измеренные в ближнем поле с использованием антенн-зондов различных производителей

Измерены РТХ антенны Ка-диапазона с использованием зондовых антенн АО «ИСС», НПП «ТРИМ» и Satimo (таблица 3.4). На рисунке 3.8 представлены ДН в азимутальной плоскости для трех рассматриваемых зондов. Их смена проводилась в неизменных условиях в БЭК.

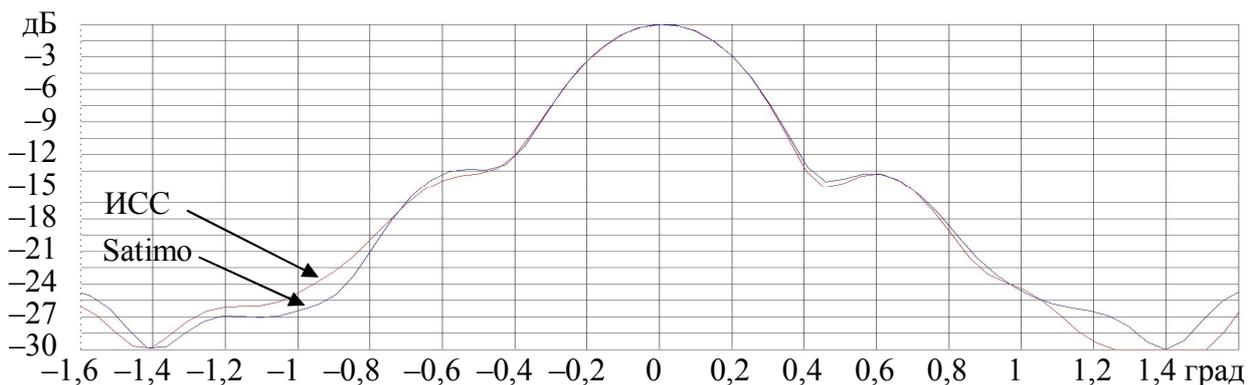
Таблица 3.4 – РТХ антенны, полученные с помощью различных зондов

РТХ	Зонд ТРИМ	Зонд ИСС	Зонд Satimo	
ШДН (-3дБ), °	Аз	0,394	0,39	0,394
	Ум	0,385	0,381	0,389
ШДН (-10дБ), °	Аз	0,710	0,697	0,701
	Ум	0,667	0,662	0,67
КНД, дБ	51,54	51,72	51,67	
КПР, дБ	22	25,59	24,83	
КУ, дБ	50,97	51,07	51,01	

Результаты измерений РТХ исследуемой антенны с помощью зонда производства АО «ИСС» близки к результатам измерений РТХ с помощью зондов других производителей, но отличаются на 2 дБ вблизи уровня минус 27 дБ и на 1 дБ на уровне первого бокового лепестка. Однако, эти незначительные расхождения не повлияли на измерение КНД антенны. Максимальное расхождение КНД составило 0,2 дБ, это значение не является критическим при измерении РТХ антенн КА. Кроме того, максимальное расхождение измеренных ширин ДН по уровням в минус 3 и минус 10 дБ составляет 0,013° и не превышает погрешности измерения, заявленной производителем СШП АИВК (0,02°). По результатам этого исследования в АО «ИСС» начата работа над комплектом собственных антенн-зондов, для полного покрытия полосы частот излучающих устройств перспективных КА.



а



б

Рисунок 3.8 – Сечения ДН антенны в азимутальной плоскости, полученные с помощью зондов ИСС и ТРИМ (а), ИСС и Satimo (б)

### 3.8 РТХ антенны К-диапазона, измеренные в ближнем поле с преобразованием частоты и с ВОЛП

Представлен сравнительный анализ результатов измерения РТХ антенны К-диапазона на СШП АИВК двумя методами: с преобразованием частоты и с использованием широкополосной ВОЛП. Одним из наиболее распространенных при измерении РТХ антенн в БП является использование в приемном тракте СВЧ-смесителей, предназначенных для переноса частоты вниз, с целью уменьшения потерь в кабелях. Данное решение позволяет существенно повысить уровень сигнала от тестируемой антенны, резко убывающий на частотах свыше 18 ГГц. Это решение имеет альтернативу в виде использования широкополосной ВОЛП, предназначенной для передачи сигнала от выхода векторного анализатора цепей к антенне-зонду посредством ВОЛП. Результаты анализа приведены на рисунке 3.9 и в таблице 3.5.

Максимальное расхождение ДН (вблизи уровня минус 26 дБ) составляет 0,5 дБ в азимутальной плоскости и 0,1 дБ – в угломестной, что соответствует аппаратной погрешности комплекса (0,5 дБ). Из таблицы 3.5 видно, что максимальное расхождение ШДН составляет  $0,002^\circ$ , что значительно меньше погрешности измерений ( $0,02^\circ$ ). Максимальное расхождение КНД составляет 0,011 дБ, что также значительно меньше погрешности измерений (0,2 дБ). Таким образом, оба схемных подхода дают практически идентичные результаты при измерениях характеристик направленности антенн и могут использоваться при наземной экспериментальной отработке.

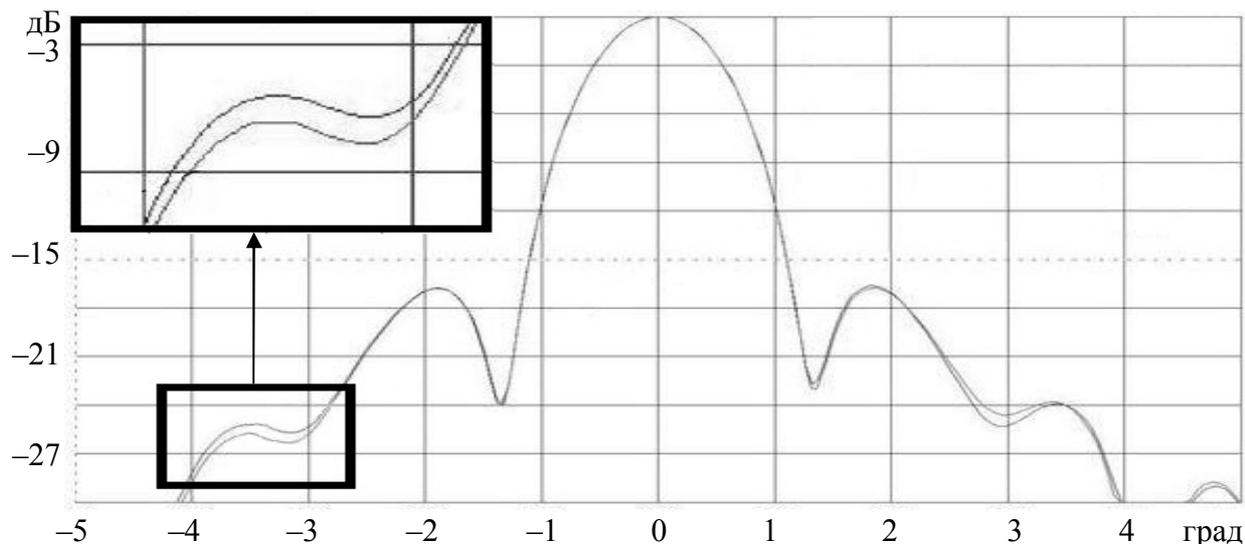


Рисунок 3.9 – Сечения ДН в азимутальной плоскости на частоте 20 ГГц при различных схемных решениях

Таблица 3.5 – РТХ антенны при измерениях с СВЧ-смесителем и ВОЛП

Частота, ГГц	Схема	КНД, дБ	ШДН (-3 дБ), °		ШДН (-10 дБ), °	
			Азимут	Угол места	Азимут	Угол места
20,0	Смеситель	44,027	1,102	1,072	1,891	1,830
	ВОЛП	44,023	1,103	1,074	1,892	1,832
20,5	Смеситель	43,935	1,084	1,077	1,856	1,851
	ВОЛП	43,944	1,084	1,078	1,855	1,851
21,0	Смеситель	44,285	1,051	1,031	1,797	1,754
	ВОЛП	44,292	1,051	1,031	1,797	1,754
21,5	Смеситель	44,351	1,034	1,008	1,784	1,729
	ВОЛП	44,362	1,034	1,010	1,784	1,730
22,0	Смеситель	44,563	1,019	0,986	1,782	1,693
	ВОЛП	44,585	1,019	0,985	1,782	1,692

### 3.9 РТХ антенны Ку-диапазона, измеренные в ближней и дальней зонах

Измерены РТХ антенны в комплексах ДЗ и БП (таблица 3.6). Максимальное расхождение ДН вблизи уровня минус 27 дБ составляет 0,5 дБ в азимутальной плоскости и 0,4 дБ – в угломестной, что соответствует аппаратной погрешности комплексов (0,5 дБ для уровней ДН от минус 10 дБ до минус 30 дБ). Из таблицы 3.6 следует, что максимальное расхождение ШДН составляет 0,08°, что превышает погрешность измерений (0,02° для комплексов ДЗ и БП). Максимальное расхождение КНД составляет около 0,3 дБ, что незначительно превышает погрешность измерений (0,2 дБ для комплексов ДЗ и БП). Поскольку антенна измерялась в разных условиях (в БЭК для БП и на полигоне для ДЗ), сказалось влияние рабочего места, а именно, при измерениях на полигоне в ДЗ появляются мешающие переотражения сигнала от подстилающей поверхности. Поэтому заметен небольшой рост УБЛ антенны при измерениях в ДЗ, что приводит к расширению ДН и спаду КНД. Однако можно считать, что оба измерительных комплекса дают практически

*идентичные результаты при измерениях характеристик направленности антенн, и, соответственно, могут использоваться при наземной экспериментальной обработке антенн подобного типа.*

Таблица 3.6 – РТХ антенны при измерениях в ДЗ и БП для разных частот

№ частоты	Зона	КНД, дБ	ШДН (-3 дБ), °		ШДН (-10 дБ), °	
			Азимут	Угол места	Азимут	Угол места
1	ДЗ	49,822	0,478	0,458	0,898	0,793
	БП	50,063	0,475	0,455	0,890	0,791
2	ДЗ	49,654	0,481	0,473	0,909	0,826
	БП	49,991	0,484	0,47	0,903	0,822
3	ДЗ	50,296	0,462	0,452	0,830	0,802
	БП	50,567	0,462	0,456	0,825	0,800
4	ДЗ	50,366	0,451	0,442	0,857	0,769
	БП	50,482	0,449	0,438	0,854	0,767
5	ДЗ	49,81	0,464	0,446	0,895	0,78
	БП	50,111	0,466	0,45	0,890	0,776

#### **4. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ РТХ АНТЕНН**

Представлена единая методика измерения РТХ антенн. Рассмотрены вопросы использования различных видов измерительного оборудования, сравнены их характеристики, показаны основные особенности частотного и времяимпульсного методов измерения РТХ антенн. Даны практические рекомендации по измерению РТХ антенн, представлены основные особенности настройки рабочего места и при работе с различными типами антенн. Освещено выполнение обработки измерений и визуализации полученной информации, проведен обзор ПО для обработки результатов измерений РТХ антенн.

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В заключении диссертации перечислены ее результаты, показавшие, что цель работы достигнута, и они имеют значение для технических наук в области «Исследование характеристик антенн и СВЧ устройств для их оптимизации и модернизации, что позволяет осваивать новые частотные диапазоны, обеспечивать электромагнитную совместимость, создавать высокоэффективную технологию» по п. 2 паспорта специальности 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии.

#### **ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ**

##### **Статьи в журналах из перечня ВАК**

1. Доманов С.К. Антенна с контурной диаграммой направленности производства АО «ИСС» / С.К. Доманов, А.В. Мухин, Е.Ю. Узолин, А.Г. Романов // Научные технологии. – 2015. – №3. – С. 44–47.

2. Мухин А.В. Измерения радиотехнических характеристик антенны Ку-диапазона в измерительных комплексах ближнего и дальнего поля / А.В. Мухин, С.К. Доманов // Инфокоммуникационные технологии. – 2016. – Т. 14. – №2. – С. 184–187.

3. Мухин А.В. Исследование отклонения диаграммы направленности офсетной антенны эллиптической поляризации / А.В. Мухин, С.К. Доманов // Доклады ТУСУРа. – 2016. – Т. 19. – №2. – С. 28–30.

#### **Доклады в материалах отечественных конференций**

4. Мухин А.В. Использование радиотехнических сканеров в ОАО «ИСС» // Материалы докладов всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2013» – Томск. – 2013. – С. 20–22.

5. Мухин А.В. Сравнительный анализ зеркальных антенн в ПО GRASP // Материалы докладов IX Межд. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления» – Томск. – 2015. – ч. 1. – С. 146–150.

6. Мухин А.В. Исследование влияния передающего тракта на приемный тракт, оценка величины пассивной интермодуляционной составляющей в приемном тракте // Материалы докладов IX Межд. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления» – Томск. – 2013. – ч. 1. – С. 64–67.

7. Мухин А.В. Определение возможности измерения радиотехнических характеристик контурных антенн в составе космического аппарата методом ближнего поля // А.В. Мухин, С.К. Доманов, И.В. Коньшев. – Материалы докладов всерос. науч.-техн. конф. «Современные проблемы радиоэлектроники» – Красноярск. – 2014. – С. 342–346.

8. Доманов С.К. Анализ влияния технологического ремонта на радиотехнические характеристики антенны из композитных материалов в Q-диапазоне // С.К. Доманов, А.В. Мухин, И.В. Коньшев. – Материалы докладов всерос. науч.-техн. конф. «Современные проблемы радиоэлектроники» – Красноярск. – 2015. – С. 387–390.

9. Мухин А.В. Анализ влияния технологической оснастки на радиотехнические характеристики зеркальной антенны // А.В. Мухин, С.К. Доманов. – Материалы докладов всерос. науч.-техн. конф. «Современные проблемы радиоэлектроники» – Красноярск. – 2016. – С. 338–341.

10. Доманов С.К. Измерение коэффициента усиления рупорной антенны в дальней зоне с помощью частотного и времяимпульсного оборудования в диапазоне до 17 ГГц // С.К. Доманов, А.В. Мухин, И.В. Коньшев. – Материалы докладов всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2014» – Томск. – 2014. – С. 11–14.

11. Мухин А.В. Сравнительный анализ радиотехнических характеристик антенны Ka-диапазона при измерениях в ближнем поле с использованием антенн-зондов различных производителей / А.В. Мухин, С.К. Доманов. – Межд. науч.-техн. и науч.-метод. конф. «Современные технологии в науке и образовании» – Рязань. – 2016. – С. 103–107.

12. Доманов С.К. Сравнительный анализ результатов измерений радиотехнических характеристик антенны K-диапазона в измерительном комплексе ближнего поля в схемах с преобразованием частоты и с использованием широкополосной волоконно-оптической линии передачи / С.К. Доманов, А.В. Мухин. – Материалы докладов всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2016» – Томск. – 2016. – С. 32–35.