Министерство образования и науки Российской Федерации Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

На правах рукописи

An

Мухин Александр Васильевич

Исследование радиотехнических характеристик зеркальных антенн космических аппаратов

Специальность 05.12.07 Антенны, СВЧ устройства и их технологии

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель д.т.н., с.н.с. Газизов Тальгат Рашитович

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Обзор актуальных задач исследования зеркальных антенн космических	
аппаратов1	0
1.1 Актуальность совершенствования антенн 1	0
1.2 Выбор антенн 12	2
1.3 Измерение радиотехнических характеристик 1	5
1.4 Влияние различных факторов на радиотехнические характеристики 22	2
1.5 Сравнение радиотехнических характеристик, полученных разными	
средствами измерения 2	5
1.6 Разработка методик измерения радиотехнических характеристик 27	7
1.7 Постановка задач исследования 2	8
2. Компьютерное моделирование зеркальных антенн космических аппаратов 3	1
2.1 Многолучевая антенна для заданной зоны обслуживания 3	1
2.2 Сравнительный анализ многолучевых зеркальных антенн	5
2.2.1 Однозеркальная антенна	6
2.2.2 Двухзеркальная антенна Кассегрена 3	9
2.2.3 Двухзеркальная антенна Драгонэ 4	4
2.3 Основные результаты главы 4	8
3. Измерение радиотехнических характеристик антенн космических	
аппаратов	9
3.1 Измерение радиотехнических характеристик контурных антенн в	
ближней зоне	9
3.1.1 Зарубежная антенна с имитацией космического аппарата 4	.9
3.1.2 Антенна производства АО «ИСС» 5	5
3.2 Анализ влияния различных факторов на радиотехнические	
характеристики антеннб	3
3.2.1 Технологический ремонт антенны Q-диапазона из композитных	
материалов 6	3
3.2.2 Технологическая оснастка зеркальной антенны 6	8

3.2.3 Отклонение диаграммы направленности офсетной антенны
эллиптической поляризации74
3.3 Сравнение радиотехнических характеристик антенн, полученных на
различном измерительном оборудовании78
3.3.1 Коэффициент усиления рупорной антенны, измеренный в дальней
зоне с помощью частотного и времяимпульсного оборудования
3.3.2 Радиотехнические характеристики антенны Ка-диапазона,
измеренные в ближнем поле с использованием антенн-зондов различных
производителей
3.3.3 Радиотехнические характеристики антенны К-диапазона,
измеренные в ближнем поле с преобразованием частоты и с волоконно-
оптической линией передачи 86
3.3.4 Радиотехнические характеристики антенны Ки-диапазона,
измеренные в ближней и дальней зонах
3.4 Основные результаты главы 96
4. Методика измерения радиотехнических характеристик антенн
4.1 Устройство и принцип работы измерительного оборудования
4.2 Практические рекомендации по измерению 112
4.3 Обработка результатов измерений 122
4.4 Основные результаты главы 125
Заключение
Список сокращений и условных обозначений 127
Список литературы 129
Приложения 130

ВВЕДЕНИЕ

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 качественном и непрерывном доступе К СПУТНИКОВОМУ телевидению, В 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.

В 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 (30) и уменьшение вне неё. В эту область внесли вклад Калошин В.А., Пластиков А.Н., Фролова Е.В., Akagawa M., Chang S., Dragone C., Mizuguchi Y., Prata A., Yokoi H. Однако недостаточно внимания уделено оценке искажения формы ДН при выносе МЛА. облучателя фокуса, характерного Поэтому ИЗ для 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.

Важной является 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. Важен вклад компаний-разработчиков измерительного оборудования, например ООО «НПП «ТРИМ СШП». Однако разнообразие и специфика конкретных антенн требуют совершенствования этих методик. Поэтому эта работа актуальна.

Цель работы – усовершенствовать создание зеркальных антенн КА.

Для достижения поставленной цели необходимо 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 КА.

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

4. Впервые показана возможность измерений с использованием антеннызонда 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 волоконнооптической линии передачи.

7. Даны практические рекомендации для измерений радиотехнических характеристик антенн.

<u>Методология и методы исследования</u>. 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 антеннызонда 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 «ИСС» требованиями В AO гарантируется заданными 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.

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

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».

<u>Апробация результатов.</u> 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 гг.

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

<u>Личный вклад.</u> Все результаты получены автором лично или при непосредственном его участии. Сравнительный анализ частотного, временного методов и с использованием широкополосной волоконно-оптической линии передачи, сравнительный анализ измерений радиотехнических характеристик 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.

<u>Структура и объем диссертации</u>. В состав диссертации входят введение, 4 главы, заключение, список литературы из 75 наименований, приложение из 7 страниц. Объем диссертации с приложением – 140 с., в т.ч. 85 рис. и 6 табл.

Обзор актуальных задач исследования зеркальных антенн космических аппаратов

1.1 Актуальность совершенствования антенн

В настоящее время производство КА является важной и конкурентной отраслью современной экономики, имеющей существенную поддержку со стороны государства и являющейся неотъемлемой частью различных сфер деятельности общества. Так, потребители заинтересованы в предоставлении качественного И непрерывного доступа к спутниковому телевидению, высокоскоростному доступу в интернет, высокоточной спутниковой навигации. Две трети российских КА спроектированы и произведены на предприятии АО «ИСС», являющемся ведущим российским предприятием по созданию КА. Сегодня в АО «ИСС» освоено несколько спутниковых орбит [1]: низкая околоземная, средняя круговая и геостационарная.

Низкая околоземная орбита (1500 км) привлекательна тем, что не требует установки на КА мощных передатчиков. Таким образом, КА имеет относительно небольшие размеры и невысокую стоимость изготовления. Представителем семейства таких КА является ГОНЕЦ-М, способный решать множество прикладных задач:

• контроль состояния и местоположения подвижных транспортных средств и грузов;

- экологический, промышленный и научный мониторинг;
- связь в удаленных регионах с неразвитой инфраструктурой;
- связь в чрезвычайных ситуациях;

• организация глобальных ведомственных и корпоративных сетей передачи данных;

• создание пейджинговых систем.

Представителем средней круговой орбиты является семейство перспективных КА ГЛОНАСС [2, 3]. Навигационная система ГЛОНАСС состоит

из 24-х рабочих и 2-х резервных КА, располагающихся на высоте 19100 км и обеспечивающих высокоточную навигацию для гражданских и военных нужд.

Наибольшее внимание уделяется освоению геостационарной орбиты (35798 км). Представителями КА, базирующихся на геостационаре, являются семейства ЭКСПРЕСС, ЯМАЛ, ЛУЧ, предоставляющие услуги президентской и правительственной связей, теле- и радиовещания, доступ к сети интернет на территориях России, в странах Европы, Африки, Южной и Северной Америки.

В связи с постоянным ростом числа КА, усложняется помеховая обстановка на земле. Поэтому актуален предварительный анализ предполагаемой ЗО для наиболее конфигурации поиска подходящей антенны, позволяющей минимизировать затраты полезного сигнала на сопредельные с 30 территории. решается моделированием антенных систем в специальном Эта задача программном обеспечении (ПО) [4–7]. Здесь наиболее распространенными являются контурные и многолучевые (МЛА) антенны. Антенны, формирующие контурную ДН, являются одними из самых сложных и требуют высокой точности изготовления рефлектора, как следствие, цена их очень высока. МЛА позволяют покрыть требуемую ЗО набором парциальных лучей [8]. В этой связи необходимо обеспечивать точное прицеливание антенны на требуемую ЗО, для обеспечения качественного приема сигнала потребителем. Отклонение ДН на 0,1° для геостационарной орбиты дает смещение на 62,5 км на земле, что может быть недопустимо. Таким образом, важно точное измерение РТХ таких антенн. Для этих целей в АО «ИСС» установлены сверхширокополосные автоматизированные измерительно-вычислительные комплексы (СШП АИВК) (сканеры) ближнего поля (БП), позволяющие проводить измерения РТХ антенн с высокой точностью. Кроме того, СШП АИВК позволяют проводить анализ влияния на РТХ различных факторов и особенностей производственного процесса, а также конструкции антенн и КА в целом.

Для обеспечения непрерывности производственного процесса и высокой производительности, сканеры БП в АО «ИСС» загружены круглосуточно. СШП АИВК позволяет проводить измерения РТХ антенн частотным и временным

методами. Ранее в АО «ИСС» не проводился сравнительный анализ этих методов. Таким образом, актуально сравнить эти методы и оценить их применимость для измерения РТХ антенн. В состав СШП АИВК, помимо прочего оборудования, входит излучающая антенна-зонд. В АО «ИСС» используются антенны-зонды различных производителей, покрывающих широкую полосу частот. В этой связи актуально провести сравнительный анализ РТХ антенны, полученных при помощи антенн-зондов различных производителей, так как ранее этот анализ не проводился. Помимо СШП АИВК БЗ, в АО «ИСС» проводятся измерения РТХ антенн в дальней зоне (ДЗ). Результаты измерений на измерительных комплексах в БП и ДЗ могут отличаться для различных типов антенн и условий их измерения. Между тем в рамках предприятия АО «ИСС» сравнение РТХ антенн в БП и в ДЗ, применяемых для обеспечения космической связи, ранее не выполнялись. В этой связи актуально провести измерения и сравнительный анализ РТХ антенны в БЗ и ДЗ.

В процессе измерений РТХ антенн нередко возникают факторы, существенно влияющие на РТХ антенн. В этой связи актуально учесть эти факторы в методиках проведения измерений РТХ и обработки результатов и дать практические рекомендации.

В приведенном анализе показано, что наиболее актуальными являются вопросы моделирования антенн для поиска наиболее оптимальной конструкции, точного измерения РТХ антенн перспективных КА, влияния на РТХ различных факторов производственного процесса и особенностей конструкции антенн, сравнения измерительных комплексов БЗ и ДЗ, позволяющих проводить измерения РТХ антенн двумя методами, а также сравнения измерения РТХ антенн при помощи антенн-зондов различных производителей. Эти вопросы будут освещены ниже.

1.2 Выбор антенн

На стадии проектирования КА, в частности его антенных систем, важной задачей является выбор оптимальной конструкции, отвечающей всем заявленным требованиям [9–15]. Значительную роль играет масса антенны: для использования

в составе КА она должна быть минимальна. Однако вместе с тем антенная система должна иметь высокую прочность и противостоять резким перепадам температур в условиях космоса, сохраняя при этом заявленные РТХ. Для этого необходимо определить подходящие под конкретную задачу варианты, а затем осуществить их анализ и сравнение. Для этой цели используют различное ПО. Хорошо зарекомендовал себя программный пакет GRASP производства компании TICRA, позволяющий рассчитывать РТХ однозеркальных и двухзеркальных осесимметричных и офсетных антенн. В качестве облучателей может выступать как единичный рупор, так и набор рупоров, образующих собой решетку излучателей [16].

Широкое применение в составе ретрансляторов современных КА получили зеркальные (апертурные) антенны [17–19]. Анализ современных технических решений показывает, что большое распространение получили апертурные антенны зонтичного типа [20]. Зеркала таких антенн образованы отражающим электромагнитные волны гибким материалом, натянутым на каркас ИЗ радиальных ребер, закрепленных в центральной ступице и складываемых по принципу зонтика. Материал, из которого состоит поверхность рефлектора, представляет собой сетку с мелкой ячейкой (<0,2 λ), образованной тонкими вольфрамовыми нитями с позолоченным покрытием. Помимо антенн зонтичного типа, в спутникостроении широко применяются зеркальные антенны со сплошным рефлектором, выполненным из углепластика. Рефлектор крепится к КА на специальный привод (мотор), с помощью которого осуществляется раскрытие антенны в рабочее положение на орбите. Кроме однозеркальных антенн используются двухзеркальные антенны, обладающие рядом преимуществ [17–21]. Вспомогательное зеркало облегчает подбор наиболее благоприятного амплитудного распределения в раскрыве параболоида (трансформация амплитуд поля источника происходит только на малом зеркале, а большое зеркало выравнивает фазовое распределение), тем достигается высокий самым коэффициент использования поверхности (КИП), доходящий до 0,7. Кроме того, в двухзеркальной антенне значительно выше кросс-поляризационная развязка, чем

в однозеркальной, что объясняется тем, что кросс-поляризационные токи, возникающие на поверхности раскрыва контррефлектора частично компенсируются после отражения сигнала от основного рефлектора. Также укорачивается линия питания и система подводки к облучателю из-за того, что его можно расположить вблизи основного рефлектора.

Обычно ставится задача покрыть ЗО полезным сигналом с высокой энергетикой. 30 представляет собой заданную поверхность Земли при расположении КА на геостационарной орбите (ГСО). Рассмотрим в качестве примера ЗО, представляющую собой всю видимую с ГСО поверхность земли. Такая ЗО может быть покрыта одним лучом круглого поперечного сечения, например, 17°×17°, либо набором узких лучей круглого поперечного сечения. По предварительным оценкам, при формировании луча 17°×17° в 30 можно обеспечить значение КУ не более 16 дБ. Используют антенны со специальным профилем рефлектора, формирующие контурный луч, но они не позволяют значительно увеличить энергетику сигнала в заданной зоне обслуживания по сравнению с лучом 17°×17°. Другим решением является набор узких лучей круглого поперечного сечения с более высокой энергетикой, которая может быть обеспечена многолучевой антенной.

Для обеспечения высокой энергетики сигнала в заданной ЗО необходима антенна с большой площадью излучающей поверхности. В общем случае это может быть ФАР с большим количеством излучающих элементов, линзовая антенна, зеркальная антенна. При использовании ФАР с большой апертурой она будет иметь порядка десятка тысяч излучателей и, следовательно, недопустимо большую массу для использования на борту КА. Гораздо меньшее количество излучателей, чем в ФАР, (десятки штук против тысяч) для формирования набора лучей, покрывающих ту или иную область обслуживания, требуется в гибриднозеркальной антение (ГЗА). При этом она может иметь однозеркальную или Кассегрена двухзеркальную (по схеме или Грегори) конструкцию, осесимметричную, при которой ее центральная часть «затеняется» облучающей

системой, или неосесимметричную, с вынесенной из апертуры облучающей системой, обычно называемую офсетной.

Наличие центрального затенения в антенне осесимметричной конструкции приводит к снижению ее энергетики по сравнению с офсетной из-за рассеяния части мощности на элементах конструкции облучающей системы, а также к росту УБЛ, тем большему, чем больше габариты области затенения относительно габаритов апертуры рефлектора. Как показывает практика, при спадающем к кромке апертуры рефлектора амплитудном распределении при отношении d/D=0,1 (d – диаметр тени, D – диаметр апертуры) по сравнению с отсутствием тени наблюдается рост УБЛ на 2 дБ, а при d/D=0,2 – на 5 дБ. В связи с тем, что облучателем ГЗА является решетка излучателей, имеющая относительно большие размеры и создающая при расположении перед раскрывом зеркала неприемлемо большое затенение, целесообразен выбор системы с неосесимметричным (офсетным) главным зеркалом. Тем не менее, важно моделирование зеркальных офсетных антенн и сравнение их РТХ.

1.3 Измерение радиотехнических характеристик

В настоящее время в области ракетно-космической техники предъявляются все более жесткие требования к бортовой радиоэлектронной аппаратуре (РЭА), системам связи и ретрансляции. Поэтому необходимы измерения РТХ их антенн с использованием самой современной аппаратуры, подтверждающие удовлетворение этим требованиям [22, 23].

Сегодня проявляется все больший интерес к современным методам антенных измерений, таких как радиоастрономические, радиометрические, амплифазометрические (радиоголографические), коллиматорный, фокусировки, зондовый метод (измерение амплитудно-фазового распределения (АФР) по раскрыву). Между тем используются и традиционные методы антенных измерений такие как облетный и метод вышки, которые усовершенствованы к настоящему времени.

Амплифазометрический метод тесно связан с методом оптической голографии [24–27]. Оптическая голограмма фиксирует амплитудно-фазовое

распределение поля в плоскости установки фотопластинки, далее воссоздается поле во всем пространстве вне плоскости голограммы при последующем просвечивании. Измерители мощности фиксировали амплитудно-фазовое распределение СВЧ поля в виде голограммы, затем пленка с голограммой просвечивалась в когерентном свете для получения диаграммы направленности (ДН). Позже были разработаны измерители амплитуды и фазы сигнала, вытеснившие оптическую обработку. П.М. Геруни [28] была предложена методика измерения антенн и расчета их ДН, которая основывалась на измерении амплитуд и фаз в апертуре антенны, вследствие чего измерялось распределение поля на плоском раскрыве, которое связано с ДН преобразованием Фурье (амплитуднозондовый метод). В настоящее время данный метод усовершенствован в области аппаратной части (методика измерений осталась прежней) и реализован в АО «ИСС».

Рассмотрим одно из самых современных и перспективных средств измерения РТХ антенн – сверхширокополосный (СШП) автоматизированный измерительно вычислительный комплекс (АИВК) [29]. Он позволяет проводить измерения РТХ в ближней зоне и визуализировать результаты полученных измерений.

На настоящий момент АИВК для измерений РТХ антенн в ближней зоне находят все большее применение на наукоемких предприятиях. Их основные преимущества в сравнении с традиционным методом измерения в дальней зоне заключаются в следующем: 1) появляется возможность полного исключения влияния сторонних источников и отражений от подстилающей поверхности, а также от погодных условий и смены дня и ночи, за счет использования БЭК; 2) малые размеры полигона, в связи с чем упрощается доступ к измерительному оборудованию и, как следствие, получается экономия временных и человеческих ресурсов; 3) возможность пересчета поля на апертуру измеряемой антенны, что позволяет проанализировать состояние излучающей поверхности антенны. На данный момент в АО «ИСС» установлено два СШП АИВК (вертикальный и

горизонтальный сканеры ближнего поля), а также освоено и внедрено два основных метода измерения РТХ антенн – частотный и временной.

Общий принцип измерений РТХ антенн заключается в последовательном перемещении сканера (рисунок 1.1) в заранее заданной области сканирования (сканирование на плоскости) [30]. При движении сканера антенна-зонд посылает программируемого СВЧ-генератора радиоимпульсы, поступающие ОТ В направлении исследуемой антенны. Далее принятый исследуемой антенной сигнал поступает в векторный анализатор цепей (ВАЦ), который затем передает данные на персональный компьютер (ПК) для дальнейшего расчета ДН (рисунок 1.2) и обработки (частотный метод). Временной метод несколько отличается от частотного: вместо диапазона частот, здесь оперируют размерами временного окна. После того, как измеряемая антенна примет зондирующий сигнал, она подает его на СШП приемное устройство, предназначенное для масштабно-временного преобразования сигналов, их оцифровки и передачи в ПК для обработки.



Рисунок 1.1 – Структурная схема СШП АИВК



Рисунок 1.2 – Объемная ДН антенны

При измерениях в частотной области в состав оборудования входят: ВАЦ, программируемый СВЧ генератор, планарный сканер, контроллер движения сканера, антенна-зонд, исследуемая антенна, опорно-поворотное устройство. Для области ВАЦ СВЧ проведения измерений BO временной вместо И программируемого генератора используются цифровой стробоскопический [31]. осциллограф генератор сверхкоротких импульсов Основным И преимуществом метода измерений во временной области является возможность пространственной селекции мешающих отражений путем изменения размеров временного окна. В ряде случаев это позволяет размещать АИВК в обычных помещениях или на открытых полигонах без применения дорогостоящих БЭК и радиопоглощающих материалов (РПМ).



Рисунок 1.3 – СШП АИВК (горизонтальный сканер)

СШП АИВК позволяет проводить точные измерения сложных антенных систем, таких как фазированные антенные решетки (ФАР), антенны с контурной ДН, крупногабаритные антенные системы и пр. В связи с постоянным уплотнением частотного диапазона, современные антенны ориентированы на более высокие частоты, например в К, Ка, Q-диапазонах. СШП АИВК позволяет проводить точные измерения в этих диапазонах частот вплоть до 50 ГГц. Более того, помимо измерения РТХ антенны, СШП АИВК позволяет оценить точность изготовления рефлекторов зеркальных антенн. СШП АИВК можно использовать также для оценки излучаемой мощности внутри блоков РЭА, чтобы избежать возникновения помех в смежном оборудовании. Естественно, такие сканеры могут (рисунок 1.3), а гораздо меньшие размеры, а такие большие иметь не следовательно и стоимость. Причем, измерение уровня излучаемой мощности определяется с точностью до 0,1 дБ, что в дальнейшем поможет в выборе

радиопоглощающих материалов, экранов и т.п. Таким образом, СШП АИВК сегодня является самым перспективным средством измерения, которое обеспечивает очень точное измерение РТХ любых типов антенн.

Важным вопросом является использование радиотехнических сканеров для измерений РТХ антенн в составе КА. Для успешного измерения РТХ антенн на СШП АИВК и получения достоверных результатов необходимо, помимо прочего множества факторов, иметь определенные параметры измеряемого сигнала. В частности, колебания и амплитуда полезной части измеряемого сигнала являются решающими факторами для успешного проведения испытаний антенно-фидерных устройств (АФУ). Основной проблемой является уменьшение амплитуды полезного сигнала из-за существенного расстояния в пространстве между передающей и приемной частями. Большое расстояние, которое требуется пройти в пространстве импульсным сигналам от излучающего зонда сканера до приемной части антенны, обусловлено, прежде всего, габаритами антенн и особенностями монтажа измерительного стенда с учетом конструкции самого КА.

Отдельного внимания заслуживают антенны с контурной ДН. Такие антенны, состоящие из вырезки параболического рефлектора специального профиля и одиночного облучателя, уже получили признание в мире как наиболее эффективные в вопросах обслуживания территорий со сложной формой границ [32]. Данный тип антенн является модификацией однозеркальных антенн и позволяет локализовать энергию сигнала на 30 и минимизировать вне 30, увеличивая его энергетику в 30 и улучшая помеховую обстановку на сопредельных с ЗО территориях. Антенны с контурной ДН сводятся к трем классам: 1) несимметричные однозеркальные и двухзеркальные антенны с профилированным основным рефлектором и (или) контррефлектором, у которых в используется одиночный рупор; качестве облучателя 2) несимметричные однозеркальные параболические антенны с облучателем в виде малоэлементной ΦAP ; 3) многоэлементные активные ΦAP (A ΦAP) [33].

В АО «ИСС» до недавнего времени использовались такие антенны импортного производства. В настоящее время, когда развитие собственной

производственной базы стало особенно актуальным для страны, разработка контурных антенн отечественного производства явилась очень важным шагом на пути к импортозамещению полезных нагрузок КА. Снижение зависимости от иностранных поставщиков повышает гарантии реализации проекта. Возможность производства такой высокотехнологичной продукции повышает конкурентоспособность отечественного предприятия на мировом рынке. Кроме того, освоение данной технологии открывает дополнительные возможности в области создания новых перспективных антенных систем.

При работе связного КА на ГСО для обслуживания определенной территории, имеющей сложную форму границ, и для исключения попадания значительной доли мощности на сопредельные территории необходимо, чтобы антенная система формировала ДН со сложной формой поперечного сечения, совпадающей по заданному уровню мощности с границами заданной территории. Данная задача может быть решена тремя основными способами: 1) применением параболического рефлектора, облучаемого системой облучателей (гибриднозеркальная антенна) [34]; 2) применением ΦAP [35]; 3) применением параболического рефлектора со специальной формой профиля, облучаемого одиночным облучателем. Достоинством первых двух является возможность изменять форму контурного луча в процессе эксплуатации КА, а недостатками – относительно высокая сложность конструирования и настройки системы, большие массогабаритные параметры и значительные потери полезного сигнала в диаграммо-образующей схеме, а также высокая стоимость разработки данного вида антенн. Третий способ не имеет вышеназванных недостатков и наиболее эффективен для формирования контурной ДН, если не требуется изменения формы контурного луча в процессе эксплуатации КА, однако отличается сложностью реализации заданной формы рефлектора, что до недавнего времени было основной проблемой в производстве антенн данного типа на собственной производственной базе предприятия. На данный момент эти проблемы решены.

1.4 Влияние различных факторов на радиотехнические характеристики

В АО «ИСС» успешно освоена технология производства антенных рефлекторов из композитных материалов для КА различного назначения. Однако, в связи со сложностью производственного процесса, происходят деформации выпускаемых изделий. В частности, при отделении рефлектора антенны от формующей оправки, на его поверхности могут появиться трещины и расслоения, требующие технологического ремонта. Он включает заполнение этих трещин клеем ВК-9 и углеродом техническим К359. Для использования рефлектора на КА необходимо исследовать влияние проведенного технологического ремонта на РТХ антенны. Часто это делается с помощью контрольно-измерительной машины (КИМ), позволяющей проводить измерения поверхности рефлектора с высокой точностью [36]. Однако, как показала практика, с ростом частот его может не хватать. В частности полезен сравнительный анализ РТХ офсетных антенн Qдиапазона с целью оценки влияния технологического ремонта на поверхности рефлектора, выполненного из композитного материала, на РТХ антенны.

Другим аспектом является технологическая оснастка и её влияние на РТХ антенн [37]. Так, широко используется двухзеркальная осесимметричная антенна Ка–диапазона частот, построенная по схеме Кассегрена. Иногда после проведения цикла измерений, выявляются большие всплески бокового излучения в ДН, нехарактерные для данной конструкции. Таким образом, актуален анализ полученных РТХ, выявление и устранение причины появления больших уровней боковых лепестков ДН антенны.

Отдельного внимания заслуживает эффект деполяризации в офсетных зеркальных антеннах. Как уже отмечалось, зеркальные офсетные антенны получили широкое распространение, как в наземных, так и в бортовых информационных комплексах благодаря своей конструкции (рисунок 1.4 *a*), основным достоинством которой является отсутствие затенения апертуры зеркала и, как следствие, более высокий коэффициент использования поверхности и более низкий уровень боковых лепестков ДН в сравнении с осесимметричными (прямофокусными) параболическими антеннами (рисунок 1.4 *б*).



Рисунок 1.4 – Схематичное изображение распространения сигнала для офсетной (*a*) и осесимметричной (*б*) спутниковых антенн в приближении геометрической оптики [38]

б

В космической технике данный тип антенн незаменим и с точки зрения компоновки. Конструкция офсетной антенны позволяет сложить рефлектор вдоль корпуса КА, тем самым обеспечивая компактное размещение в обтекателе ракетыносителя (рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 – Схематичное изображение КА в рабочем положении и размещенного в головном обтекателе ракеты-носителя

Одним из основных недостатков данного типа антенн (помимо более кросс-поляризационного излучения высокого уровня В сравнении С осесимметричными антеннами) является отклонение ДН луча от фокальной оси в плоскости, ортогональной плоскости симметрии антенны, при излучении эллиптически поляризованного поля [39 - 43].Это явление обусловлено особенностью протекания токов на поверхности рефлектора офсетной антенны. векторов Кросс-поляризационные составляющие электромагнитного поля ориентированы так, что оказывают влияние на фазу результирующего поля и, как следствие, отклоняют ДН в плоскости, ортогональной плоскости симметрии антенны. Отклонение луча от номинального положения приводит к снижению коэффициента усиления (КУ) на краях требуемой зоны облучения, что может быть критичным. Близкую к истинной зависимость между углом (θ) отклонения ДН от нормального положения и параметрами антенны можно определить [43] как

$$\sin(\theta) = \pm \frac{\sin(\theta_0) \cdot \lambda}{4\pi \cdot F},\tag{1.1}$$

где θ_0 – угол меду оптической осью облучателя и осью параболы; λ – длина волны; *F* – фокусное расстояние. Таким образом, чем меньше θ_0 и больше рабочая частота и фокусное расстояние, тем меньше отклонение ДН.

1.5 Сравнение радиотехнических характеристик, полученных разными средствами измерения

Как отмечалось выше, в АО «ИСС» создана и успешно эксплуатируется мощная экспериментальная база, являющаяся неотъемлемой частью производства КА. В нее входят СШП АИВК БП. Кроме того, в АО «ИСС» создан полигон для проведения измерений РТХ антенн в ДЗ. Однако каждый измерительный комплекс по-своему уникален и имеет как достоинства, так и недостатки.

Помимо измерений направленных свойств антенн, проводят измерения КУ антенных систем в БП и ДЗ. Для этого используют два основных вида измерений по типу приемо-передающего оборудования – с использованием частотного оборудования, излучающего и принимающего СВЧ сигнал на заданной частоте и времяимпульсного оборудования, включающего себя СШП В генератор импульсов, излучающий пространство зондирующих В сверхкороткий электромагнитный импульс, И СШП программно-управляемое приемное устройство. КУ измеряется методом сравнения с эталонной антенной. Значение КУ определяется соотношением

$$K_A = \frac{D_A}{D_{\Im T}} K_{\Im T},$$

где K_A и $K_{\Im T}$ – коэффициенты усиления исследуемой и эталонной антенн, D_A и $D_{\Im T}$ – значения ненормированных ДН в направлении главного максимума для исследуемой и эталонной антенн.

Помимо прочего оборудования, входящего в состав СШП АИВК, важной его частью является излучающее устройство (антенна-зонд) с как можно более плоской ДН в широком секторе углов, чтобы обеспечить равномерное распределение амплитуд сигнала на исследуемой антенне во всем секторе сканирования. Кроме того, оно должно оказывать как можно меньшее воздействие на результаты измерений РТХ антенн в ближнем поле. Для измерений РТХ антенн в АО «ИСС» используются зонды компаний Satimo и ТРИМ, покрывающие полосу частот от 1 до 50 ГГц. Зонды Satimo представляют собой отрезок прямоугольного волновода со встроенным коаксиально-волноводным переходом (КВП) [44] и имеют площадку для крепления РПМ (рисунок 1.6 *a*) [45].



Рисунок 1.6 – Внешний вид антенн-зондов компаний Satimo (*a*) и ТРИМ (б)

Антенны-зонды компании ТРИМ представляют собой коньковый волновод, встроенный в пирамидальный рупор, и являются сверхширокополосными (рисунок 1.6 б) [46].

Конструкция зонда АО «ИСС» представляет собой открытый конец прямоугольного волновода, собранный из двух частей, закрепленных болтовыми соединениями между собой (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Внешний вид антенны-зонда ИСС

Около среза волновода размещена небольшая пластина, минимизирующая излучение антенны-зонда в задней полусфере. Этот зонд не является широкополосным и работает в полосе частот характерной для конкретного сечения волновода.

Как было отмечено выше, измерения РТХ проводятся двумя методами – временным и частотным. Однако отдельного внимания заслуживает метод измерения антенн, основанный на использовании широкополосной волоконнооптической линии передачи (ВОЛП). При проведении длительных измерений частотным методом в БП, происходит набег фазы сигнала. Причем, чем дольше длится измерение, тем больше изменяется фаза. На практике выявлено, что стабильность фазы сигнала в значительной степени влияет на кросс-Компанией ТРИМ поляризационную развязку. разработан И внедрен В производство метод измерения РТХ антенн на основе широкополосной ВОЛП, особенностью которого является преобразование СВЧ сигнала в оптический передача его по ВОЛП с последующей диапазон с помощью лазера, трансформацией в СВЧ сигнал при помощи фотодиода непосредственно перед антенной-зондом. Кроме того, еще одной особенностью данного метода является оценка набега фазы и его компенсация. Таким образом, данный метод измерений позволяет обойтись без использования автономного генератора сигналов и исключить набег фазы, возникающий в процессе длительных измерений.

1.6 Разработка методик измерения радиотехнических характеристик

К настоящему времени довольно полно изучены методы измерения РТХ антенн в ближней и дальней зонах [57, 47]. Кроме того, некоторые из них реализованы в промышленных измерительных комплексах [29, 48]. Комплекс СШП АИВК позволяет проводить антенные измерения в ближней зоне (методами планарного, цилиндрического и сферического сканирований) следующих РТХ антенн:

- объемных ДН (амплитудно-фазовых распределений) по основной и кроссполяризации;
- сечений амплитудных и фазовых ДН по основной и кросс-поляризации;
- КУ по оси и в ЗО;
- коэффициента направленного действия (КНД);
- коэффициента эллиптичности (КЭ);
- ширины ДН по уровню (ШДН);

• отклонения электрической оси антенны от нормали к плоскости перемещения зонда сканера.

Измерения на СШП АИВК возможны двумя методами – временным и частотным. Они различаются составом аппаратуры, подключаемой к АИВК, способом сбора данных о характере распределения поля в раскрыве антенны и некоторыми особенностями в проведении измерений, однако эти методы близки по точности, как было показано в [62, 66, 67, 70], и позволяют получить согласующиеся между собой результаты.

1.7 Постановка задач исследования

Как видно из обзора, представленного в п. 1.2, для покрытия требуемой ЗО может быть использовано несколько типов антенных систем, в то время как вопросам моделирования антенных систем уделяется мало внимания. Между тем, разработанные модели антенных систем могут показать конкретные различия в КУ, обеспечиваемого в ЗО. Поэтому для успешного выбора антенной системы, отвечающей конкретной задаче, целесообразно проводить анализ и моделирование антенных систем, подходящих под поставленную задачу.

Как следует из п. 1.3, сегодня предъявляются очень жесткие требования к КА и их полезным нагрузкам. Кроме того, растет точность изготовления современных антенных систем. Неотьемлемой частью при проведении испытаний является проведение наземной экспериментальной отработки антенн в составе КА. Из практики известно, что измерение антенны времяимпульсным методом в ближнем поле имеет смысл лишь в том случае, если сигнал, прошедший через пространство и тракты до приемного устройства будет иметь достаточную и стабильную амплитуду и стабильную фазу. Кроме негативного влияния большого расстояния, которое вынужден преодолевать сигнал, существенное влияние оказывает конструкция КА, а также возможное взаимовлияние самих антенн. Поэтому данные факторы тоже необходимо учитывать. В частности, если КА имеет большие габариты, приходится располагать антенну-зонд на большом удалении от исследуемой антенны. Таким образом, актуально исследовать вопрос применяемости временного и частотного методов измерений к антенным системам, установленным на КА.

Из п. 1.4 КА следует, что процесс производства постоянно совершенствуется, применение новые находят материалы, В частности композитные, применяемые для изготовления рефлекторов зеркальных антенн с уменьшенной массой. Как отмечалось, иногда в процессе производства антенн перспективных КА, в результате отделения рефлектора антенны от формующей оправки, появляются трещины и расслоения на его поверхности, требующие ремонта. После него проводят анализ влияния ремонта антенны на её РТХ.

Из обзора п. 1.5 следует, что для проведения качественной наземной отработки экспериментальной антенн используют несколько видов измерительных устройств, позволяющих измерять РТХ антенн в БЗ различными методами. Также используется модификация частотного метода в аппаратной части, а именно для передачи СВЧ сигнала на большие расстояния (порядка 15 м), его преобразуют в оптический диапазон для передачи по ВОЛП с последующим обратным преобразованием в СВЧ сигнал. Кроме того, помимо комплексов БЗ, используют измерительное оборудование ДЗ. Однако не уделено должного внимания вопросам согласованности РТХ, полученных вышеперечисленными методами. Таким образом, необходимо провести анализ и сравнение РТХ антенн, полученных разными методами. Как отмечалось, в состав измерительного оборудования в БЗ входят антенны-зонды. В АО «ИСС» используются зонды компаний Satimo и ТРИМ. Чтобы покрыть широкую полосу частот (до 50 ГГц) необходимо обладать целым комплектом антенн-зондов, но их стоимость весьма высока. В этой связи в АО «ИСС» налажено собственное производство антеннзондов. Однако выполнены оценки согласованности РТХ, полученных с использованием вышеперечисленных антенн-зондов. Таким образом, необходимо провести сравнение и анализ измеряемых РТХ антенн при помощи различных антенн-зондов и оценить согласованность полученных РТХ.

Из обзора п. 1.6 следует, что для проведения качественного измерения РТХ антенн используют частотный и временной методы измерения. Однако

приведенные методики раскрыты не в полной мере. Кроме того, для разных типов антенн эти методы могут различаться. Таким образом, необходимо провести анализ существующих методов измерения и дать практические рекомендации по их применению для различных антенн КА.

2. Компьютерное моделирование зеркальных антенн космических аппаратов

В данном разделе рассмотрены вопросы моделирования зеркальных антенн. Проведен расчет РТХ антенны с использованием лицензионного ПО GRASP (разработчик и обладатель прав – компания TICRA), используемого большинством компаний-разработчиков космической и наземной антенной техники. Расчет проводился методом физической оптики [24].

2.1 Многолучевая антенна для заданной зоны обслуживания

В данном разделе проведен анализ выбора антенны для покрытия ЗО, представляющей собой часть территории РФ. Спроектирована многолучевая антенна (МЛА), набор лучей которой покрывает часть территории РФ, в соответствии с заданными требованиями:

- диапазон рабочих частот 8-9 ГГц;
- поляризация линейная;
- КУ по оси ДН 40 дБ;
- КУ в ЗО З7 дБ;
- ЗО часть территории РФ;
- точка стояния на геостационарной орбите (ГСО) 70° в.д.

В соответствии с заданными требованиями ЗО представляет собой территорию от западной границы РФ до озера Байкал, которая, как следует из анализа рисунка 2.1, может быть покрыта лучом эллиптического поперечного сечения, например, 3°×10°, либо набором узких лучей круглого поперечного сечения.



Рисунок 2.1 – Зона обслуживания. Вид с КА на ГСО в позиции 70° в.д.

Как показал предварительный анализ, при формировании луча 3°×10° в 30 обеспечивается значение КУ не более 25,5 дБ. Поэтому для покрытия 30 использовался набор узких лучей круглого поперечного сечения с более высокой энергетикой, которая может быть обеспечена многолучевой антенной. Для обеспечения высокой энергетики сигнала в заданной 30 необходима антенна с большой площадью излучающей поверхности. В общем случае это может быть ФАР с большим количеством излучающих элементов, линзовая антенна, зеркальная антенна. При использовании ФАР с большой апертурой она будет иметь порядка десятка тысяч излучателей и, следовательно, недопустимо большую массу для использования на борту КА.

Реализация антенны в виде двухзеркальной осесимметричной конструкции предполагает наличие второго зеркала, которое в МЛА, имеющей многолучевой облучатель, должно иметь соизмеримые размеры с основным рефлектором. Это обстоятельство требует два механизма развертывания зеркал в рабочее положение из транспортного и взаимную юстировку зеркал и облучающей системы. При этом увеличиваются массо-габаритные параметры антенны и снижается общая

надежность системы. Поэтому, если заданные требования могут быть обеспечены МЛА однозеркальной конструкции, то предпочтительнее ее использование, по сравнению с двухзеркальной. В связи с приведенным выше анализом, для реализации заданных требований использовалась крупногабаритная однорефлекторная МЛА с небольшим количеством облучателей, которая обеспечит высокую энергетику в заданной зоне обслуживания.

Для обеспечения заданного коэффициента усиления рассчитаем необходимый диаметр апертуры рефлектора [19]

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

где λ – длина волны; D – диаметр апертуры рефлектора; Ku – требуемый коэффициент усиления центрального облучателя. (Длина волны выбрана в соответствии с нижней границей диапазона частот, поскольку на ней обеспечивается наименьший КУ. КУ взят с запасом в 5 дБ, чтобы учесть потери в трактах питания и в антенне, а также 30). Угол наклона облучающей решетки [19]

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

где *С* – клиренс (выбран равным 1 м); *F* – фокусное расстояние (выбрано равным апертуре рефлектора 2,1 м). В качестве элемента облучающей решетки выбрана для обеспечения гофрированный рупор. Геометрия облучающей решетки выбрана для обеспечения покрытия заданной зоны обслуживания набором лучей. КУ лучей на частотах 8 и 9 ГГц приведены на рисунке 2.2. На рисунках 2.3, 2.4 приведены проекции лучей МЛА на заданную 30 на частотах 8 и 9 ГГц соответственно, контуры ДН всех лучей построены по уровню минус 3 дБ.





Рисунок 2.2 – Коэффициенты усиления лучей на частотах 8 ГГц и 9 ГГц



Рисунок 2.3 – Проекция лучей МЛА на заданную ЗО на частоте 8 ГГц



Рисунок 2.4 – Проекция лучей МЛА на заданную ЗО на частоте 9 ГГц

Таким образом, в результате моделирования показано, что полное покрытие сигналом требуемой 30 может быть обеспечено применением МЛА однозеркальной конструкции. Эта 30 может быть также покрыта антенной с контурной ДН, но конфигурация такой антенны намного сложнее и, как следствие, цена значительно выше.

2.2 Сравнительный анализ многолучевых зеркальных антенн

В разделе проведен сравнительный анализ моделей зеркальных антенн трех типов: неосесиметричная (офсетная) однозеркальная антенна, офсетная двухзеркальная антенна по схеме Кассегрена, двухзеркальная антенна Кассегрена с верхней запиткой (схема Драгонэ) [49]. 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.

2.2.1 Однозеркальная антенна

В данном разделе спроектирована однозеркальная антенна, приведены её РТХ. На рисунке 2.5 показана модель однозеркальной антенны. Диаметр рефлектора [50]

$$D = \frac{(60 \div 70)^{\circ} \cdot \lambda}{2\Theta_{-3\partial E}} = \frac{60^{\circ} \cdot 0,014}{1} = 0,85 \approx 0,9 \text{ M}, \tag{2.3}$$

где 2 $\Theta_{3,ab}$ ширина луча по уровню минус 3 дБ. Фокусное расстояние рефлектора выбрано равным половине диаметра рефлектора. В качестве облучателя выбран конический рупор, диаметр раскрыва которого равен $p = (0,8 \div 1,2)\lambda = 14$ мм. На рисунках 2.6–2.9 приведены итоговые ДН центрального и крайнего облучателей в азимутальной и угломестной плоскостях, а также проекции ДН на 3О.



Рисунок 2.5 – Модель однозеркальной антенны


Рисунок 2.6 – ДН антенны в азимутальной и угломестной плоскостях, а также кросс-поляризационная составляющая для центрального облучателя



Рисунок 2.7 – ДН антенны в азимутальной плоскости для крайнего облучателя



Рисунок 2.8 – ДН антенны в угломестной плоскости для крайнего облучателя

Проанализировав рисунки 2.6–2.8, можно сказать, что однозеркальная антенна имеет достаточно высокий уровень кросс-поляризационной составляющей. Для облучателя, вынесенного из фокуса (крайний облучатель), существенно искажается форма ДН: ширина луча ДН увеличивается в 2 раза в азимутальной и угломестной плоскостях, как следствие, существенно снижается КУ. Кроме того, уровень боковых лепестков сильно возрастает: разница между уровнем первого бокового лепестка и главного максимума ДН составляет порядка 10 дБ, что неприемлемо для использования на КА.



Рисунок 2.9 – Проекция ДН на ЗО

Как видно, 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).

2.2.2 Двухзеркальная антенна Кассегрена

В данном разделе спроектирована двухзеркальная антенна по схеме Кассегрена, показаны её РТХ. Диаметр основного рефлектора выбран по (2.3) и равен 1160 мм. Диаметр контррефлектора [51]

$$D_{\mathcal{M}} = \frac{D_{\tilde{0}} \cdot v_a}{\lambda} = 660 \quad \text{MM}, \tag{2.4}$$

где D_{δ} – диаметр большого зеркала, v_a – коэффициент использования поверхности (0,8 ÷ 0,9).

Фокусное расстояние большого рефлектора

$$f = (0,3 \div 0,5) \cdot D_{\tilde{0}} = 435$$
 MM. (2.5)

Расстояние между фокусами

$$2C = \frac{D_{M} \cdot \sin(\psi_{0} + \varphi_{0})}{\sin\psi_{0} \cdot \sin\varphi_{0}} = 1480 \text{ MM.}$$
(2.6)

В качестве облучателя используется конический рупор с диаметром раскрыва 14 мм. На рисунке 2.10 представлена модель двухзеркальной антенны по схеме Кассегрена. На рисунках 2.11–2.14 приведены итоговые ДН центрального и крайнего облучателей в азимутальной и угломестной плоскостях, а также проекции ДН на 30.



Рисунок 2.10 – Модель двухзеркальной антенны по схеме Кассегрена







Рисунок 2.12 – ДН антенны в азимутальной плоскости для крайнего облучателя



Рисунок 2.13 – ДН антенны в угломестной плоскости для крайнего облучателя

Проанализировав рисунки 2.11–2.13, можно сказать, что модель двухзеркальной антенны Кассегрена имеет хорошую кросс-поляризационную развязку (47 дБ), это обусловлено взаимным влиянием основного рефлектора и контррефлектора. Токи основного рефлектора, отвечающие за кросс-поляризацию, компенсируются на контррефлекторе. ДН, формируемая крайним облучателем, исказилась только в плоскости азимута, в угломестной плоскости практически не изменилась форма ДН.



Рисунок 2.14 – Проекция ДН на ЗО

Двухзеркальная антенна, выполненная по схеме Кассегрена, в сравнении с однозеркальной антенной обладает лучшими характеристиками. КУ крайнего облучателя снизился относительно центрального на 3,3 дБ (а у однозеркальной антенны – на 3,7 дБ). Также видно, что форма крайнего луча исказилась значительно меньше, чем у однозеркальной антенны. Уровень боковых лепестков для крайнего облучателя поднялся незначительно (1 дБ) по сравнению с однозеркальной антенной (4 дБ). Кросс поляризационная развязка у данной антенны значительно выше (47 дБ), чем у однозеркальной (25 дБ).

2.2.3 Двухзеркальная антенна Драгонэ

В данном разделе представлена модель двухзеркальной антенны по схеме Кассегрена с верхней запиткой (схема Драгонэ) (рисунок 2.15) [52]. Диаметры основного рефлектора и контррефлектора выбраны по (2.3) и (2.4) соответственно. Фокусное расстояние основного рефлектора выбрано равным половине диаметра основного зеркала. Расстояние между фокусами рассчитано по 2.6). В качестве облучателя выбран конический рупор с диаметром раскрыва 14,5 мм.

В результате получена двухзеркальная антенна с параметрами:

- диаметр основного рефлектора 1160 мм;
- диаметр контррефлектора 1040 мм;
- фокусное расстояние основного рефлектора 580 мм;
- расстояние между фокусами 3225 мм.

На рисунках 2.16–2.19 приведены итоговые ДН центрального и крайнего облучателей в азимутальной и угломестной плоскостях, а также проекции ДН на 30.



Рисунок 2.15 – Модель двухзеркальной антенны Кассегрена с верхней запиткой







Рисунок 2.17 – ДН антенны в азимутальной плоскости для крайнего облучателя



Рисунок 2.18 – ДН антенны в угломестной плоскости для крайнего облучателя



Рисунок 2.19 – Проекция ДН на ЗО

Анализ полученных данных показал следующее. Искажение луча при его минимально, КУ крайнего отклонении луча относительно центрального снижается всего на 2 дБ. Уровень боковых лепестков крайнего облучателя (3 дБ). относительно центрального увеличивается незначительно Уровень кроссполяризационной развязки минимален и равен – 67 дБ. Таким образом, обладает данная антенна наилучшими характеристиками из всех вышеперечисленных. Кроме того, она обладает более удобной схемой компоновки зеркал и может использоваться в составе КА.

2.3 Основные результаты главы

1. Проведено моделирование зеркальных офсетных антенн трех типов: однозеркальной, двухзеркальной Кассегрена, двухзеркальной Драгонэ.

2. Выполнено сравнение РТХ указанных антенн, показавшее, что при выносе облучателя из фокуса параболоида искажается форма ДН, снижается КУ и увеличивается УБЛ.

3. Показано, что наибольшие искажения формы ДН, снижение КУ (на 3,7 дБ) и рост УБЛ наблюдаются у однозеркальной антенны, а наименьшие – у двухзеркальной антенны Драгонэ.

4. Установлено, что при выносе облучателя из фокуса параболоида, в ДН двухзеркальной антенны Драгонэ сохраняются характерные провалы между основным лепестком ДН и первыми боковыми лепестками, тогда как у однозеркальной антенны эти провалы отсутствуют, и имеет место сильное затекание бокового излучения в основной лепесток ДН.

5. Показано, что такой подход к моделированию может использоваться на стадии проектирования антенн и позволяет найти наилучшую конфигурацию зеркальной антенны, отвечающую заданным требованиям.

3. Измерение радиотехнических характеристик антенн космических аппаратов

3.1 Измерение радиотехнических характеристик контурных антенн в ближней зоне

3.1.1 Зарубежная антенна с имитацией космического аппарата

В данном разделе приведены результаты измерений контурной антенны: с учетом её габаритов и условий компоновки на КА, измерены уровни сигнала, принимаемого антенной, при различных расстояниях зонда до нее [53].

В виду отсутствия реальной конструкции изделия и корпуса КА в эксперименте в качестве испытуемой антенны использована аналогичная по габаритам антенна К-диапазона конструкции И контурная 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 (рисунок 3.1). 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_n=2360, 3360, 4120 мм с целью проверки согласованности результатов измерений. Измерения проводились на СШП АИВК.



Рисунок 3.1 – Положение антенны относительно излучающего зонда

На рисунках 3.2-3.7 приведены амплитудные и фазовые распределения поля в раскрыве, а также объемные ДН исследуемой антенны в картографических координатах для сектора углов $\pm 5^{\circ}$ при различных расстояниях от апертуры зонда до нижней кромки рефлектора. В таблице 3.1 представлены значения амплитуды сигнала исследуемой антенны. Из анализа амплитудного распределения рисунка 3.2 видно, что полезный сигнал равномерно распределен в области сканирования, а уровень шумов по отношению к максимуму сигнала составляет минус 35 дБ. На фазовой диаграмме из рисунка 3.2 видны отклонения. Они обусловлены некачественной выставкой антенны в плоскость сканирования, что приводит к TOMV, что поверхность равных фаз сигнала не параллельна плоскости сканирования антенны. Это не является критичной ошибкой, потому что в данном исследовании не стояла задача точной выставки антенны, однако при проведении летных испытаний, ориентацию антенн необходимо подвергать строгому контролю с помощью лазерных систем слежения. Из рисунка 3.3 видно, что картографические проекции ДН не искажены, видны ровные контуры ДН вплоть до уровня в минус 10 дБ. При увеличении расстояния до зонда происходит

небольшое расширение амплитудного распределения (порядка 100 мм) и падает уровень сигнала. Уровень шумов по отношению к максимуму сигнала составляет уже минус 30 дБ. Однако это не влияет на ДН в дальней зоне, по прежнему видны ровные контуры до уровня в минус 10 дБ. Более того, при наложении картографических проекций для разных расстояний друг на друга, можно убедиться в их полной идентичности.



Рисунок 3.2 – Амплитудное и фазовое распределения поля в раскрыве исследуемой антенны при *Sn*=2360 мм





в картографических координатах для сектора углов $\pm 5^{\circ}$ при Sn = 2360 мм



в раскрыве исследуемой антенны при Sn=3360 мм



Рисунок 3.5 – Объемная ДН исследуемой антенны

в картографических координатах для сектора углов $\pm 5^{\circ}$ при Sn=3360 мм



Рисунок 3.6 – Амплитудное и фазовое распределения поля в раскрыве исследуемой антенны при *Sn*=4120 мм



Рисунок 3.7 – Объемная ДН исследуемой антенны в картографических координатах для сектора углов ±5° при *Sn*=4120 мм

Таблица 3.1 – Значения амплитуды сигнала исследуемой антенны

<i>S</i> , мм	<i>U</i> , мВ
2360	180
3360	145
4120	140

Для наибольшего расстояния *Sn*=4120 мм амплитуда измеряемого сигнала составила 140 мВ, сигнал при этом довольно стабилен. Предполагаемые опасения о недостаточной амплитуде измеряемого сигнала из-за значительного удаления антенны от апертуры излучающего зонда сканера не подтвердились.

Анализ эксперимента показывает, что картографические проекции ДН, формируемые антенной, соответствуют требуемой зоне обслуживания антенны. Существует некоторая неравномерность в фазовом распределении поля в раскрыве антенны – это объясняется недостаточной точностью выставки её элементов и юстировки относительно плоскости сканирования. Проекции ДН на 30 при различных расстояниях от зонда до измеряемой антенны

полностью идентичны и не искажаются, отсюда следует, что амплитуда сигнала является достаточной даже при большом удалении зонда от измеряемой антенны.

3.1.2 Антенна производства АО «ИСС»

В данном разделе представлены результаты разработки антенны с контурной ДН в АО «ИСС», а также ее результирующие РТХ [54]. Технология производства рефлекторов со сложным профилем поверхности разрабатывалась и поэтапно внедрялась в АО «ИСС» в течение ряда лет. Для этого закупалось и осваивалось различное оборудование, в том числе высокоточные обрабатывающие станки, контрольно-измерительные машины, автоклавы для полимеризации углеродных волокон и т.д.

Расчет антенны осуществлялся в специализированном программном комплексе, разработанном в АО «ИСС». 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. На данном этапе рефлектор антенны имеет правильную форму и гладкую поверхность и принимается в качестве базового. Далее осуществлялось формирование контура ЗО в программном пакете SatSoft путем расстановки точек по площади заданной территории. Каждому контуру присваивалось требуемое значение КУ. На рисунке 3.8 показан контур ЗО из набора точек внутри границ требуемой территории.



Следующим шагом является импорт полученного массива точек в программный пакет, предназначенный для синтеза поверхности рефлектора (рисунок 3.9) 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 [55]. Синтез происходит в несколько итераций до тех пор, пока ДН антенны с синтезированным рефлектором не будет соответствовать требуемой ДН по критерию минимизации среднеквадратичного отклонения реализуемой ДН от заданной.



Рисунок 3.9 – Синтезированная поверхность рефлектора антенны

После синтеза поверхности рефлектора полученная модель анализировалась в совместимом программном пакете Catia производства компании Dassault Systems, где выполнялась процедура создания модели оправки для формования рефлектора Для производства современных размеростабильных антенны. рефлекторов из полимерных композитных материалов с контурной ДН должна изготавливаться технологическая оснастка, выполненная из материала с низким коэффициентом линейного термического расширения отклонением С ОТ теоретических значений не более 0,03 мм. Для изготовления формообразующей оснастки высокоточных рефлекторов применяется прецизионный инварный сплав. На рисунке 3.10 представлен внешний вид оправки для изготовления рефлекторов со сложным профилем поверхности.



Рисунок 3.10 – Оправка для изготовления рефлектора антенны с контурной ДН

Конструктивное исполнение готового рефлектора представляет собой вырезку из поверхности специального профиля в виде трехслойной конструкции из двух оболочек: углепластикового композиционного материала толщиной 0,32 мм и алюминиевого сотового заполнителя высотой 19,1 мм. На рисунке 3.11 представлен внешний вид антенны с контурной ДН, изготовленной в АО «ИСС».



Рисунок 3.11 – Изготовленный образец рефлектора антенны

Размеры рефлектора – 1300×1332 мм, требуемое среднеквадратичное отклонение формы отражающей поверхности от теоретической не более 0,115 мм, фактически полученное значение – 0,092 мм (среднее значение по итогам изготовления двух рефлекторов), отражающая поверхность – поверхность специальной формы, масса рефлектора 3,65 кг, рабочий диапазон частот антенны – С.

Для проверки работоспособности разработанной антенны проведены измерения ее РТХ на специализированном АИВК ближнего поля. Основной смысл измерения РТХ антенн в ближней зоне заключается в нахождении параметров измеряемой антенны, характерных для ее дальней зоны.

У рассматриваемой антенны основная часть излучаемого поля сосредоточена на участке плоскости вблизи апертуры. Измерения РТХ проводились методом сканирования на плоскости, адаптированном для измерения апертурных антенн. Измеряемая антенна устанавливается стационарно, а небольшая слабонаправленная вспомогательная зондовая антенна механически перемещается вблизи раскрыва измеряемой антенны вдоль плоской поверхности по двум взаимно перпендикулярным координатам Х и Ү, измеряя поле в узлах заданной равномерной прямоугольной сетки. В каждом узле сетки фиксируются значения амплитуды и фазы поля антенны, после чего этот массив данных пересчитывается в ПО NFcalc производства ООО СШП «ТРИМ» в ДН для дальней зоны. На рисунке 3.12 представлены амплитудное распределение и ДН в вышеописанной антенны. На дальней зоне рисунке 3.13 представлена картографическая проекция контурной ДН по различным уровням. Как видно из рисунка, антенна выставлена достаточно точно, о чем свидетельствует полное покрытие требуемой ЗО сигналом по уровню минус 2 дБ.



Рисунок 3.12 – Амплитудная ДН в ближней зоне (*a*) и ДН в дальней зоне (*б*) антенны с контурной ДН



Требования, предъявляемые к РТХ антенны:

- КУ по оси ДН, не менее, дБ ~ 29;
- КУ в зоне обслуживания, не менее, дБ ~ 27;
- кросс-поляризационная развязка в ЗО, не менее, дБ: ~ 25;

Полученные РТХ антенны:

- КУ по оси ДН, дБ > 30;
- КУ в зоне обслуживания, дБ > 28;
- кросс-поляризационная развязка в зоне обслуживания, дБ > 30.

В результате проведенной наземной экспериментальной отработки изделия установлено, что полученные РТХ контурной антенны полностью отвечают заявленным техническим требованиям. В результате проведенной оценки картографических проекций ДН на ЗО можно сделать вывод о высоком качестве изготовления контурного рефлектора. Подводя итог, можно утверждать, что российская спутникостроительная отрасль способна обеспечить свою продукцию современными антеннами с контурной ДН. Этот факт является важным звеном в создании независимости производства

перспективных полезных нагрузок от импорта и укрепления обороноспособности страны.

3.2 Анализ влияния различных факторов на радиотехнические характеристики антенн

3.2.1 Технологический ремонт антенны Q-диапазона из композитных материалов

Объектом исследования в данном разделе является рефлектор офсетной антенны Q-диапазона, изготовленный из препрега M55J/EX1515 методом вакуумного формования [56]. Внешний вид рефлектора представлен на рисунке 3.14, где отчетливо видны неоднородности поверхности, представляющие из себя трещины и расслоения структуры рефлектора, заполненные клеем ВК-9 с углеродом техническим K359 для устранения отклонений профиля от требуемого. В процессе производства рефлекторов из композитных материалов подобные неоднородности возникают при отделении рефлектора от формующей оправки.



Рисунок 3.14 – Внешний вид рефлектора с неоднородностями поверхности

На рисунке 3.15 приведены результаты сканирования поверхности рассматриваемого рефлектора на КИМ бесконтактным методом сбора данных [36].



Рисунок 3.15 – Цветограмма поверхности рефлектора по результатам сканирования на КИМ

Из результатов сканирования поверхности рефлектора следует, что максимальное отклонение профиля не превышает 0,0939 мм при требованиях 0,1 мм. Для анализа РТХ использовался АИВК ближнего поля [57]. Для объективного анализа РТХ антенны с рефлектором, показанным на рисунке 3.14, проведены измерения антенны с рефлектором, поверхность которого не имела повреждений, а следовательно, не подвергалась технологическому ремонту (рисунок 3.16). На рисунках 3.17, 3.18 приведены сравнительные РТХ обоих рефлекторов. В таблице 3.2 приведено сравнение значений КУ по уровню минус 3,2 дБ.



Рисунок 3.16 – Внешний вид рефлектора без повреждений



Рисунок 3.17 – Контур равного усиления по кополярной поляризации на средней частоте рабочего диапазона антенны: теоретический (*a*); рефлектор без повреждений (б); рефлектор после технологического ремонта (*в*)



67

Рисунок 3.18 – Сравнительные ДН в азимутальной (красный) и угломестной (синий) плоскостях антенн с рефлектором: после технологического ремонта (*a*); без повреждений (б)

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

Таблица 3.2 – Сравнение значений КУ по уровню минус 3,2 дБ

Как видно из рисунков 3.17, 3.18 и таблицы 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 отражающей поверхности. Таким образом, повреждений можно сделать следующий вывод: соответствие формы профиля поверхности рефлектора необходимых требуемым не гарантирует радиотехнических значениям показателей в Q-диапазоне. Практика показывает, что при работе на относительно невысоких частотах, например в С, Ки, Ка-диапазонах, требования по отклонению профиля рефлектора не более 0,1 мм являлись корректными. Однако при переходе во всё 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, становятся существенным фактором, влияющим на РТХ всей антенны. Это связано с тем, что размеры неоднородностей становятся сопоставимы с длиной волны, на которой работает антенна.

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.

3.2.2 Технологическая оснастка зеркальной антенны

В данном разделе проведено исследование влияния технологической оснастки, посредством которой антенна крепится к посадочной плоскости, на РТХ зеркальной антенны [58]. Основной рефлектор исследуемой антенны диаметром 1,8 м выполнен из композиционного материала. Антенна имеет 4 точки крепления к посадочной плоскости (рисунок 3.19).



Рисунок 3.19 – Крепление антенны к посадочной плоскости

После проведения анализа полученных РТХ и визуального осмотра антенны выявлено, что всплески бокового излучения связаны с местами крепления антенны к посадочной плоскости. На основании этого было принято решение ослабить одну из точек крепления антенны, не изменив крепление 3-х других и повторить цикл измерения. На рисунках 3.20–3.21 приведены результирующие ДН в двух плоскостях (азимут (Аз) и угол места (УМ)) и объемные ДН. В таблице 3.3 представлены КНД, КПР, уровень первых боковых лепестков (УБЛ) антенны, закрепленной на 4 и 3 опоры.



Рисунок 3.20 – ДН антенны, закрепленной на 4 (а) и 3 (б) опоры



Рисунок 3.21 – Сечения ДН антенны, закрепленной на 4 (*a*) и 3 (б) опоры, в двух плоскостях

№ частоты	Точки крепления	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

Таблица 3.3 – Результаты измерения РТХ антенны на 4-х и 3-х точках крепления

Из анализа РТХ, приведенных в таблице 3.3, следует, что антенна, закрепленная на 4 точки имеет заметно худшие РТХ, а именно: КНД и КПР в среднем меньше на 1,25 дБ 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 дБ, 6,7 дБ и 5,5 дБ соответственно.Из полученных результатов следует, что высокие уровни бокового излучения ДН исследуемой антенны являются следствием деформации профиля рефлектора посредством затяжки болтовых креплений. Таким образом, отклонения формы поверхности зеркала от параболической приводят к нарушению синфазности поля в раскрыве антенны и ухудшают её РТХ.

Обычно считают достаточным, если синфазность поля в раскрыве антенны находится в пределах $\pm \pi/8$. При этом потери КУ антенны не более нескольких процентов. Рассмотрим связь между неточностью выполнения поверхности зеркала и нарушением синфазности поля в его раскрыве. На рисунке 3.22 представлен параболоид, часть поверхности которого смещена на величину $\delta_{\vec{n}}$. Путь луча, отраженного от смещенной части поверхности зеркала, увеличивается на величину [59]
$$\Delta \rho = 2\delta_{\vec{n}} \cos\frac{\psi}{2},\tag{3.1}$$

где ψ – угол сдвига фаз между фокальной осью антенны и направлением к неоднородности рефлектора. Тогда из условия $|\phi| < \pi/8$ получается



$$\left|\delta_{\vec{n}}\right| < \frac{\lambda}{32\cos\frac{\psi}{2}}.\tag{3.2}$$

Рисунок 3.22 – Параболоид с деформированной поверхностью

Из формулы (3.2) видно, что вблизи центра параболоида (ψ =0) требуемая точность изготовления профиля рефлектора максимальна. Таким образом, отступление от идеальной поверхности параболоида не должно превышать ± λ /32. У кромки параболоида требуемая точность выполнения профиля минимальна. Кроме того, периферия зеркала возбуждается с меньшей интенсивностью, чем центр, что дополнительно смягчает требования к точности выполнения профиля на периферии.

В результате проведенного исследования выявлена причина искажения ДН антенны. Из рекомендаций можно выделить следующие: при появлении ярко выраженных всплесков бокового излучения ДН антенны необходимо проверить состояние профиля параболоида при помощи лазерного радара либо на КИМ на предмет наличия деформаций. Рекомендуется использовать 3-х точечную схему крепления антенны на посадочную плоскость. Кроме того, для выравнивания уровней боковых лепестков необходимо осуществлять коррекцию фокусировки антенны путем последовательного перемещения контррефлектора и проведения контрольных замеров РТХ. Следуя этим рекомендациям, удалось ликвидировать влияние технологической оснастки на РТХ антенны, а именно: ДН стала равноширокой в двух плоскостях, появились ярко выраженные провалы между основным и первым боковым лепестками, КНД и КПР увеличились в среднем по рабочему диапазону на 1,25 дБ и 3,6 дБ соответственно, УБЛ упал в среднем на 2,7 дБ по углу азимута и на 5,1 дБ по углу места.

3.2.3 Отклонение диаграммы направленности офсетной антенны эллиптической поляризации

В данном разделе исследовано отклонение ДН офсетной антенны эллиптической поляризации [71]. Для анализа использовалась офсетная антенна К-диапазона со следующими основными геометрическими параметрами: F = 800 мм, диаметр = 700 мм, $\theta = 30^{\circ}$. Моделирование выполнялось в ПО Grasp, а отображение результатов в картографической проекции – в ПО Satsoft. Измерения проводились на горизонтальном сканере БП. На рисунке 3.23 сравнены теоретические и измеренные проекции ДН для левосторонней поляризации по уровню половинной мощности.



Рисунок 3.23 – Теоретическая (--) и измеренная (-) проекции ДН по уровню минус 3 дБ с увеличенным фрагментом

На рисунке 3.24 показаны проекции измеренных ДН для правой и левой эллиптической поляризации. Отклонение от номинального положения составило ±0,042°.



Рисунок 3.24 – Проекции ДН, измеренные по уровню минус 3 дБ для левой и правой эллиптических поляризаций

В результате проведенного исследования получены 3 значения отклонения луча ДН антенны при круговой поляризации: по формуле (1.1), моделированием, измерением. Значения, рассчитанные по формуле (1.1) и по результатам моделирования, полностью совпадают и составляют 0,045°. Значение, полученное в результате измерений на СШП АИВК, составляет 0,042°. Таким образом, отклонение теории и практики составило 0,003°. На рисунке 3.25 показаны проекции ДН для правой и левой эллиптической поляризаций, полученные в результате моделирования (--) и измерения (--).



Рисунок 3.25 – Проекции ДН, смоделированные (--) и измеренные (--) по уровню минус 3 дБ для левой и правой эллиптической поляризации

В качестве рекомендаций по компенсации эффекта отклонения ДН в офсетных антеннах эллиптической поляризации можно выделить следующие:

1. Для уменьшения эффекта отклонения луча можно уменьшить угол между оптической осью облучателя и осью параболы в соответствии с (1.1). Это достигается увеличением фокусного расстояния антенны. В космической технике этот метод неприменим, поскольку резко увеличиваются габариты антенны.

2. Альтернативой является усложнение облучающей системы. Так. облучающий рупор выполняют в виде трехмодовой конструкции, которая позволяет скомпенсировать кросс-поляризационные составляющие высокочастотных электрических токов на поверхности рефлектора посредством трансформации векторной картины поля, создаваемой рупором традиционного исполнения [41, 43]. Данное техническое решение может применяться для установки на КА, однако существенным недостатком является крайне узкая частотная полоса трехмодового рупора. Кроме того, трехмодовый рупор имеет множество составных частей, нуждающихся в точной настройке, что приводит к сложностям его изготовления.

3. В качестве облучателя используют решетку из трёх излучателей, в которой периферийные излучатели, ортогональные по поляризации центральному излучателю, компенсируют кросс-поляризацию центрального излучателя путем подбора фазы. Этот метод позволяет уменьшить уровень сигнала на кроссполяризации антенны в целом и, таким образом, уменьшить отклонение ДН. Такая конструкция облучающей системы находит применение в современных коллиматорных комплексах. Кроме того, она может применяться в современных КА, для обеспечения максимальной кросс-поляризационной развязки.

4. Хорошо известным способом является использование 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 [60, 61].

Таким образом, расчетные и экспериментальные данные по оценке отклонения ДН от номинального положения согласуются. Использование методов измерения на планарном сканере БП является одним из наиболее точных для тестирования зеркальных антенн. Существуют эффективные способы устранения эффекта отклонения ДН в офсетных антеннах с эллиптической поляризацией, однако их целесообразность определяется конкретными задачами.

3.3 Сравнение радиотехнических характеристик антенн, полученных на различном измерительном оборудовании

3.3.1 Коэффициент усиления рупорной антенны, измеренный в дальней зоне с помощью частотного и времяимпульсного оборудования

В данном разделе обоснована возможность применимости как частотного, так и времяимпульсного методов измерения КУ [62]. Измерение КУ проводилось в условиях БЭК. Расстояние между вспомогательной и исследуемой антеннами выбиралось в соответствии с условиями дальней зоны [63, 64]:

$$R = \frac{2D^2}{\lambda},\tag{3.3}$$

где D – диаметр апертуры исследуемой антенны; λ – наименьшая длина волны в рабочей полосе частот.

Для измерения КУ с помощью частотного оборудования использовался векторный анализатор цепей Agilent PNA E8363B, в котором измерительные порты могут участвовать как в качестве приемника, так и генератора. Для измерения КУ на времяимпульсном оборудовании, в качестве генератора зондирующих импульсов и программно-управляемого приемного устройства, использовались приборы ТМГ 010020 P01 и ТМР 8150 соответственно, производства компании ООО «НПП «ТРИМ СШП Измерительные Системы». При измерениях времяимпульсным методом проводят измерения отклика СВЧ тракта на сверхкороткий импульс, вычисляется спектр отклика. Эта операция необходима для того, чтобы исключить спектральные составляющие СВЧ тракта из спектра полезного сигнала антенны при измерениях через эфир. Сначала выполнялись измерения в соответствии со схемами, представленными на рисунке 3.26, и регистрировались отклики на сверхкороткий импульс, вычислялись их спектры. Затем в специализированном ПО рассчитывался КУ

$$G = 10 \lg \left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)^2 - \left(\frac{U_{\vartheta \phi} - U_{np}}{2}\right), \qquad (3.4)$$

где λ – рабочая длина волны.



Рисунок 3.26 – Схема для измерения КУ рупорной антенны напрямую (*a*) и через эфир (б)

Особенность применения времяимпульсного оборудования состоит в том, что регистрация сигналов на выходе измеряемой антенны осуществляется только на определенном отрезке времени, называемым временным окном. Это обстоятельство является главным преимуществом измерений данным методом, т.к. появляется возможность селекции мешающих отражений.

Размер временного окна выбирается таким образом, чтобы в его границах находился полезный сигнал, а вне окна – сигналы, отраженные от окружающих предметов (пол, потолок, стены и т.д.). Таким образом, временное окно определяет зону абсолютной безэховости. Размер зоны безэховости определяется по формуле [65]

$$\Delta R = \sqrt{R^2 + 4H^2} - R, \qquad (3.5)$$

где *H* – высота расположения антенн над отражающей поверхностью, *R* – расстояние между передающей и измеряемой антеннами.

На рисунках 3.27, 3.28 представлены временные импульсные отклики во временных окнах 2 нс и 0,6 нс, измеренные напрямую и через эфир. При измерениях напрямую для защиты приемного тракта от мощного сверхкороткого импульса использовался аттенюатор на 30 дБ.







измеренный напрямую (а) и через эфир (б)

На рисунке 3.29 представлены результирующие частотные зависимости КУ для трех случаев: 1) частотного оборудования; 2) времяимпульсного оборудования во временном окне 2 нс; 3) времяимпульсного оборудования во временном окне 0,6 нс.



Рисунок 3.29 – Сравнение частотных зависимостей КУ

Видна хорошая согласованность КУ антенн, измеренных с использованием частотного и времяимпульсного оборудования. Различие характеристик не превышает 1 дБ, что приемлемо для измерений КУ антенн КА. На рисунке 3.29 для кривых 1 (частотный метод) и 2 (временной метод с окном 2 нс) заметны флуктуации КУ. Они связаны с тем, что в результате проведения измерений появляются паразитные переотражения 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 (0,6 нс), позволившим минимизировать влияние паразитных переотражений сигнала. Таким образом, экспериментально доказано, что для точного измерения *КУ антенн, устанавливаемых на КА, пригодны как частотный метод измерений, так и времяимпульсный, но последний позволяет за счет выбора временного окна уменьшить флуктуации КУ из-за переотражений*.

3.3.2 Радиотехнические характеристики антенны Ка-диапазона, измеренные в ближнем поле с использованием антенн-зондов различных производителей

В данном разделе [66] представлены сравнительные результаты РТХ антенны Ка-диапазона, полученных с использованием зондовых антенн АО «ИСС», НПП «ТРИМ» и Satimo.

Исследования проводились в Ка-диапазоне частот на этапе лабораторных отработочных испытаний (ЛОИ). Исследуемая антенна собрана по двухзеркальной осесимметричной схеме Кассегрена. Цикл измерений проводился на СШП АИВК БП, регистрирующем АФР на плоскости. Последовательная смена зондов проводилась в неизменных условиях в БЭК. На рисунках 3.30 – 3.34 представлены ДН в двух плоскостях, а также проекции ДН на зону обслуживания (30) по кросс-поляризации для трех рассматриваемых зондов.



Рисунок 3.30 – ДН антенны в азимутальной плоскости, полученные с помощью зондов ИСС и ТРИМ



Рисунок 3.31 – ДН антенны в угломестной плоскости, полученные с помощью зондов ИСС и ТРИМ



Рисунок 3.32 – ДН антенны в азимутальной плоскости, полученные с помощью зондов ИСС и Satimo



Рисунок 3.33 – ДН антенны в угломестной плоскости, полученные с помощью зондов ИСС и Satimo



Рисунок 3.34 – КПР антенны в ЗО с использованием зондов ТРИМ (*a*), ИСС (*б*) и Satimo (*в*)

На основании результатов, представленных на рисунках 3.30 – 3.33, можно сделать вывод, что ДН антенны, измеренные с помощью вышеописанных зондов, согласуются. Однако, проанализировав проекции КПР 30 хорошо на (рисунок 3.34), можно заключить, что антенна-зонд компании ТРИМ имеет более высокий кросс-поляризационной составляющей сигнала. Кросс уровень поляризация является очень тонкой характеристикой, на которую оказывает влияние множество факторов в процессе измерений РТХ антенн. На практике, при неизменных условиях измерений, более широкая полоса частот антенны-зонда влечет за собой увеличение уровня кросс-поляризации. Чтобы минимизировать

возможность ошибки, проведено по 5 измерений для каждого зонда. В таблице 3.4 приведены усредненные РТХ антенны по всем измерениям.

PTX	Зонд ТРИМ		Зонд ИСС	Зонд Satimo	
ШДН _{-3дБ} , град	Az 0.394		0.39	0.394	
	El	0.385	0.381	0.389	
ШДН _{-10дБ} , град	Az	0.710	0.697	0.701	
	El	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	

Таблица 3.4 – РТХ антенны, полученные с помощью различных зондов

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 по изготовлению комплекта собственных антенн-зондов, для полного покрытия полосы частот излучающих устройств перспективных космических аппаратов.

3.3.3 Радиотехнические характеристики антенны К-диапазона,

измеренные в ближнем поле с преобразованием частоты и с волоконно–оптической линией передачи

В данном разделе [67] представлен сравнительный анализ результатов измерения РТХ антенны К-диапазона на СШП АИВК двумя методами: с преобразованием частоты и с использованием широкополосной ВОЛП. АИВК БП, находящийся в составе испытательной базы АО «ИСС», представляет собой горизонтальный сканер, состоящий из силовой основы в виде 6-координатного (X,

Y, Z, P, Θ , φ) позиционера, управляющих контроллеров, ВАЦ и ЭВМ, и имеет различные варианты измерительных схем и методов сканирования. 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, но оно имеет недостатки, подробно описанные в [68]. Поэтому это решение имеет альтернативу в виде использования широкополосной ВОЛП, предназначенной для передачи измерительного сигнала от выхода ВАЦ к антенне-зонду. Предлагаемое решение имеет ряд преимуществ, которые подробно описаны в [69]. На рисунке 3.35 представлены схемы измерительных решений в АИВК БП, наглядно показывающих их структуру.



Рисунок 3.35 – Упрощенная структурная схема АИВК с использованием СВЧсмесителя (*a*), ВОЛП (б). ВОЛМ – волоконно-оптический лазерный модуль, ВОФМ – волоконно-оптический фотодиодный модуль, ОПУ – опорно-поворотное устройство, ТА – тестируемая антенна, ЛС – локальная сеть.

Для сравнительного анализа двух схемных решений проведены измерения двухзеркальной антенны Кассегрена К-диапазона на плоскости в БП. Результаты измерений представлены в виде сечений ДН в главных плоскостях (рисунок 3.36) и некоторых РТХ (таблица 3.5).



Рисунок 3.36 – Сечения ДН при различных схемных решениях на частоте 20 ГГц в азимутальной (*a*) и угломестной плоскостях (*б*)

Частота, ГГц	Схема		ШДН (-3 дБ)		ШДН (-10 дБ)	
		КНД	Аз	Ум	Аз	Ум
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

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

Как видно из рисунка 3.36, 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°, что значительно меньше погрешности измерений (0,02°). 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, соответственно, могут использоваться при наземной экспериментальной отработке.*

3.3.4 Радиотехнические характеристики антенны Ки-диапазона,

измеренные в ближней и дальней зонах

В данном разделе представлены сравнительные результаты РТХ антенны, полученные в измерительных комплексах ближнего и дальнего поля [70]. Метод вышки является одним из традиционных методов измерения антенн в ДЗ. Антенны располагают высоко от земли, чтобы исключить её влияние, в зоне прямой видимости друг напротив друга на большом расстоянии. При измерениях в ДЗ в состав оборудования входят: измеряемая антенна, вспомогательная антенна, генератор сигнала, ВАЦ. Исследуемая антенна имеет круговую

поляризацию, располагается на опорно-поворотном устройстве, с помощью которого осуществляется сканирование путем поворота антенны в плоскости азимута, после чего исследуемая антенна поворачивается на 90° по поляризации и вновь сканируется в плоскости азимута. В результате формируются две ДН, характерные для азимутальной и угломестной плоскостей исследуемой антенны. Вспомогательная антенна закрепляется неподвижно и, как правило, является передающей. В AO «ИСС» преобладают остронаправленные антенны, использующиеся на КА, поэтому полигон представляет собой две поднятые высоко над землей вышки с падающим рельефом между ними (рис. 3.37) [24]. Такой полигон позволяет уменьшить нежелательные переотражения сигнала. В АО «ИСС» на полигоне для измерений в ДЗ расстояние между вышками для вспомогательной и исследуемой антенн составляет 2500 м.



Рисунок 3.37 – Полигон с падающим рельефом [5]

При ДH определении сечений измеряется главных комплексный коэффициент передачи $K(\omega, \theta)$ высокочастотного тракта, включающего в себя Она измеряемую антенну. поворачивается В заданном секторе **УГЛОВ** $\theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max}$, а частота гармонического сигнала меняется в заданном диапазоне $\omega_{\min} \le \omega \le \omega_{\max}$. Вспомогательная и измеряемая антенны устанавливаются так, чтобы измерять требуемую поляризационную компоненту поля в требуемой плоскости сечения.

По окончании измерений накапливается массив измерительной информации в виде значений модуля и фазы комплексного коэффициента передачи по мощности на заданных частотах. Далее, для требуемой частоты ω_k определяется максимальное значение $|K(\omega_k, \theta_0)|_{\max}$, соответствующее направлению главного максимума θ_0 , и вычисляется ДН:

$$F_{(\partial E)}(\omega_k, \theta) = 10 \lg \frac{|K(\omega_k, \theta)|}{|K(\omega_k, \theta_0)|_{\max}}.$$

Для сравнительного анализа двух измерительных комплексов проведены измерения двухзеркальной антенны Кассегрена Ки-диапазона в ДЗ на полигоне и на плоскости в БП в БЭК по методике, описанной в работах [29, 71]. Антенна такого типа хорошо зарекомендовала себя и наиболее часто используется в полезной нагрузке перспективных космических аппаратов, поскольку позволяет добиться более высокой кросс-поляризационной развязки, имеет более компактную схему построения, в результате чего упрощается подводка питания к облучателю. Результаты измерений представлены в виде сечений ДН в главных плоскостях (рисунок 3.38) и некоторых основных РТХ (Таблица 3.6).



Рисунок 3.38 – Сечения ДН для БП и ДЗ в азимутальной (*a*) и угломестной (б) плоскостях

№ частоты	Зона	кнд	ШДН (-3 дБ), °		ШДН (-10 дБ), °	
			Азимут	Угол места	Азимут	Угол места
1	Д3	49,822	0,478	0,458	0,898	0,793
	БП	50,063	0,475	0,455	0,890	0,791
2	Д3	49,654	0,481	0,473	0,909	0,826
	БП	49,991	0,484	0,47	0,903	0,822
3	Д3	50,296	0,462	0,452	0,830	0,802
	БП	50,567	0,462	0,456	0,825	0,800
4	Д3	50,366	0,451	0,442	0,857	0,769
	БП	50,482	0,449	0,438	0,854	0,767
5	Д3	49,81	0,464	0,446	0,895	0,78
	БП	50,111	0,466	0,45	0,890	0,776

Таблица 3.6 – РТХ антенны при измерениях в ДЗ и БП

Из рисунка 3.38 следует, что 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), сказывается влияние рабочего места, а именно, при измерениях на полигоне в ДЗ появляются мешающие переотражения сигнала от подстилающей поверхности [72]. Поэтому заметен небольшой рост уровней боковых лепестков 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 отработке антенн подобного типа.

3.4 Основные результаты главы

1. Выполнены измерения КУ рупорной антенны в диапазоне частот до 17 ГГц, с применением частотного и времяимпульсного оборудования, показавшие высокую согласованность. Выявлено снижение флуктуаций КУ за счет корректного выбора размеров временного окна, возникающих из-за переотражений сигнала. Экспериментально доказано, что для точного измерения КУ антенн, устанавливаемых на КА, пригодны как частотный метод измерений, так и времяимпульсный.

2. Проведено исследование по измерению РТХ зарубежной контурной антенны с имитацией КА, с использованием времяимпульсного подхода для измерения РТХ на больших расстояниях от зонда до измеряемой антенны. Показано, что проекции ДН на ЗО при различных расстояниях от зонда до измеряемой антенны полностью идентичны и не искажаются. Таким образом, экспериментально подтверждена пригодность времяимпульсного метода измерения РТХ антенн с имитацией КА.

3. Исследовано влияние технологического ремонта на РТХ зеркальной антенны Q-диапазона, с применением для этих целей СШП АИВК. Показано, что Q-диапазоне применять КИМ для измерения поверхности рефлектора В недостаточно. Показана непригодность такого ремонта для Q-диапазона, поскольку трещины и расслоения на поверхности рефлектора становятся соизмеримыми с длиной волны и вносят существенный негативный вклад в формирование ДН. Обоснована необходимость использования СШП АИВК в Q-PTX диапазоне частот ДЛЯ оценки отклонений антенн. прошедших технологический ремонт. Показано, что антенна после ремонта может иметь на 2 дБ меньший КУ.

4. Приведены результаты испытания контурной антенны производства АО «ИСС» на СШП АИВК. Показано, что данная антенна позволяет покрыть требуемую ЗО высокой энергетикой сигнала. Подтверждено высокое качество изготовления контурного рефлектора.

5. Проведены измерения РТХ антенны, с применением антенн-зондов различных производителей. Показана высокая согласованность РТХ, полученных при использовании антенн-зондов компаний ТРИМ, Satimo, ИСС: максимальные расхождения КНД и ШДН составили 0,2 и 0,013 дБ соответственно. Доказана возможность использования антенн-зондов производства АО «ИСС» для измерений РТХ антенн, устанавливаемых на КА.

6. Проведены измерения РТХ антенны К-диапазона в измерительном комплексе ближнего поля с преобразованием частоты и с ВОЛП. Показана высокая согласованность РТХ: максимальные расхождения ДН (вблизи уровня минус 26 дБ), ШДН, КНД составили 0,5 дБ, 0,002°, 0,011 дБ соответственно, что не превышает погрешностей измерения. Обоснована возможность использования рассмотренных методов измерения РТХ антенн при наземной экспериментальной отработке изделий.

7. Выявлена и устранена причина искажения ДН антенны из-за влияния технологической оснастки. Даны рекомендации по использованию методов контроля профиля рефлектора. Рекомендовано использовать вместо четырехточечной, трехточечную систему крепления антенны к посадочной плоскости.

8. Проведены измерения РТХ антенны, отличающиеся применением СШП АИВК ближней и дальней зон. Показана высокая согласованность результатов: максимальное расхождение ДН (вблизи уровня минус 27 дБ) не превышает погрешности измерений. Показано влияние рабочего места в ДЗ: появляются мешающие переотражения, что приводит к небольшому росту боковых лепестков, расширению ДН и спаду КНД. Экспериментально подтверждена пригодность СШП АИВК ближней и дальней зон для измерения РТХ антенн.

9. Предложена методика прицеливания зеркальной офсетной антенны с эллиптической поляризацией, отличающаяся учетом эффекта отклонения ДН. Она позволяет точно прицеливать антенну на заданную ЗО при минимизации потерь полезного сигнала за пределы ЗО. Проведено моделирование и измерение офсетной зеркальной антенны. Показано, что измеренные ДН согласуются с

теоретическими с точностью до 0,01°. Даны рекомендации по уменьшению отклонения ДН. Обоснована необходимость учета отклонения ДН при наземной экспериментальной отработке антенн, устанавливаемых на КА.

4. Методика измерения радиотехнических характеристик антенн

В данном разделе представлена единая методика измерения РТХ антенн.

4.1 Устройство и принцип работы измерительного оборудования

Рассмотрены вопросы использования различного измерительного оборудования, приведены их сравнительные характеристики, показаны основные особенности частотного и времяимпульсного методов измерения РТХ антенн [73]. Измерения на СШП АИВК необходимы для наземной экспериментальной отработки изделий, в частности антенных систем, и проверки их РТХ. Структурная схема СШП АИВК для измерения РТХ антенн в ближней зоне частотным методом представлена на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 - Структурная схема горизонтального сканера в АО «ИСС»

Частотный метод характерен применением программно-управляемого СВЧ генератора, формирующего синусоидальные сигналы в заданном частотном диапазоне работы комплекса, которые поступают на вход зондовой антенны. Зондовая антенна излучает их в направлении измеряемой антенны. Принятые измеряемой антенной сигналы подаются на вход анализатора сигналов (AC), где они преобразуются в цифровой код и поступают в память ПК для последующей обработки. АС является центральным звеном АИВК.

Зонд механически перемещается вблизи раскрыва измеряемой антенны вдоль плоской поверхности по координатам *X* и *Y*, излучая синусоидальные сигналы в узлах заданной равномерной прямоугольной сетки (рисунок 4.2) с шагом $\Delta x = \Delta y \le \lambda/2$.



Рисунок 4.2 – Равномерная прямоугольная сетка с шагом $\Delta x = \Delta y$

В ходе одного цикла измерений формируется набор сигналов S_{mn} . Эти сигналы соответствуют *m*,*n*-му положению зонда при сканировании в плоскости раскрыва антенны по двум координатам. В общем случае, (для антенн с произвольной поляризацией) измерения проводятся при горизонтальной и вертикальной ориентациях вектора *E* зондовой антенны. Однако в некоторых случаях, например для проведения пробного измерения, рекомендуется проводить

измерения при горизонтальной или вертикальной ориентации вектора E зондовой антенны (в зависимости от поляризации исследуемой антенны), что позволяет сэкономить время в два раза. Проведение пробного измерения необходимо для того, чтобы осуществить корректную выставку зонда в центр амплитудного распределения антенны. Для каждого *m*,*n*-го положения зонда на выходе антенны получается два сигнала $\dot{s}_{mn}^{x}, \dot{s}_{mn}^{y}$. Этот набор комплексных чисел описывает амплитудно-фазовое распределение поля на плоскости вблизи раскрыва антенны. Для вычисления ДН антенны требуется выполнить суммирование комплексных амплитуд *S_{mn}*. Такое суммирование может быть выполнено с помощью алгоритма БПФ

$$S_{kl} = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} s_{nm} \exp\left[j2\pi\left(\frac{nk}{N} + \frac{ml}{M}\right)\right],\tag{4.1}$$

где *k*=0, 1, ..., *N*-1; *l*=0, 1, ..., *M*-1, (*N*, *M* – число сигналов, измеренных по координатам *X* и *Y*).

Полученный после двумерного преобразования Фурье массив комплексных чисел S_{kl} определяет распределение вертикальной или горизонтальной компоненты поля в дальней зоне (рисунок 4.3, 4.4).



-40.0 дБ

Рисунок 4.3 – ДН антенны в дальней зоне



Рисунок 4.4 – Фазовая ДН антенны

АИВК позволяет определить угол отклонения электрической оси антенны от нормали к плоскости сканирования, с точностью до одной тысячной доли градуса. Результаты измерения РТХ антенны с механическим сканированием приведены на рисунках 4.5, 4.6. Точность наземной отработки сканирующей антенны [74] по определению отклонения луча и сравнению его с заявленными требованиями является немаловажным этапом и обеспечивает точность прицеливания антенны на борту КА. В случае сканирующей антенны подготовка и проведение измерений ничем не отличаются от измерений антенн без отклонения луча.



Рисунок 4.5 – ДН сканирующей антенны в дальней зоне



Рисунок 4.6 – Фазовая ДН сканирующей антенны

Фазовая ДН выглядит как набор разноцветных линий, поскольку поверхность равных фаз не параллельна плоскости сканирования из-за отклонения луча антенны на определенный угол.

Временной метод измерений характерен применением СШП генератора зондирующих импульсов (ГЗИ). СШП ГЗИ предназначен для формирования сверхкоротких импульсов, обеспечивающих перекрытие требуемой рабочей полосы частот. Выходные импульсы СШП ГЗИ подаются на вход антенны-зонда, которая излучает их в направлении измеряемой антенны. На приемной стороне во временном окне можно увидеть отклик антенны на сверхкороткий импульс. Помимо полезного сигнала в антенну могут попасть паразитные переотражения сигнала, которые также будут видны во временном окне. Основное достоинство временного метода заключается в том, что имеется возможность отфильтровать переотражения мешающие сигнала, изменяя размер временного окна (рисунок 4.7).



Рисунок 4.7 – Временное окно и сигнал с антенны

Измеряемая антенна принимает зондирующие сигналы, излучаемые антеннойзондом, и подает их на вход СШП приемника, для масштабно-временного преобразования, оцифровки и передачи в ПК для дальнейшей обработки. ΠК Контроллер выполняет функции интерфейса сканера межли И исполнительными механизмами приводов осей сканера X, Y, Z и поляризатора Р. антенны-зонда Кроме этого, обеспечивает ручное OH управление пространственным положением антенны-зонда посредством пульта дистанционного управления (ПДУ). Измерительный комплекс в целом работает под управлением специального ПО (рисунок 4.8).



Рисунок 4.8 – Структурная схема вертикального сканера в АО «ИСС»

В результате прохода антенной-зондом заданной области сканирования в памяти ПК формируется массив сигналов, принятых измеряемой антенной. Сверхкороткие импульсные сигналы позволяют за один цикл измерений получить информацию о характеристиках антенны во всем рабочем диапазоне частот. Это обстоятельство определяет особенности алгоритмов обработки сигналов. В ходе одного цикла измерений формируется набор сигналов $S_{mn}(t)$. Эти сигналы соответствуют *m*,*n*-му положению зонда при сканировании в плоскости раскрыва антенны по двум координатам. Сканирование осуществляется в плоскости *XY*, параллельной плоскости раскрыва антенны. Измерения проводятся при горизонтальной и вертикальной ориентациях вектора *E* зондовой антенны. Тогда для каждого *m*,*n*-го положения зонда имеем два сигнала $S_X(t)$, $S_Y(t)$.

Для каждого сигнала $S_{mn}(t)$ вычисляется его комплексный спектр $W_{mn}(\omega) = F\{S_{mn}(t)\}$, где $F\{\bullet\}$ – символ операции преобразования Фурье. Особенностью обработки при вычислении комплексных спектров сигналов является использование расширенного преобразования Фурье и сглаживающих временных функций.

При выполнении преобразования Фурье массива дискретных отсчетов сигнала $S(t_i)$, $(t_i=i\Delta t; i=1, 2, ..., N_t)$, взятых с шагом дискретизации Δt , получаем массив комплексных коэффициентов Фурье с шагом $\Delta f = 1/(N_t - 1)\Delta t$, занимающий в частотной области интервал $[0, ..., 1/\Delta t]$. При некоторой фиксированной размерности массива N_t уменьшение временного шага дискретизации Δt приводит к пропорциональному увеличению шага дискретизации по частоте Δf . Поэтому в случае, если полезный обрабатываемый сигнал занимает примерно более 2/3 используемого временного окна длительностью $(N_t-1)\Delta t$, его представление в частотной области становится неудовлетворительным (полезный спектр сигнала содержит мало точек И отображается ломаными линиями, неадекватно характеризующими его форму). Таким образом, существует противоречие между стремлением максимально использовать размер временного окна И. соответственно, получить как можно больше информации о сигнале во временной области, и возможностью его адекватного представления в частотной области.

Для разрешения этого противоречия используется так называемое расширенное преобразование Фурье, суть которого состоит в том, что используемое реальное временное окно длительностью $(N_t-1)\Delta t$ искусственно

расширяется путем добавления нулей в обрабатываемый массив до N_t^1 отсчетов. При увеличении размерности массива в $k=N_t^1/Nt$ раз шаг дискретизации реального спектра $\Delta f I=1/(N_t^1-1)\Delta t$ соответственно уменьшается в k раз.

Другой особенностью вычисления спектров комплексных является использование сглаживающих временных функций. Как правило, в спектре измерительного сигнала присутствуют относительно низкочастотные размерами составляющие, период которых соизмерим с используемого временного окна. Вследствие этого сигнал во временном окне конечных размеров, как правило, не является финитной временной функцией и имеет разрыв в конце рассматриваемого временного интервала. Наличие этого разрыва приводит к двум неприятным последствиям:

- возникновению паразитных флуктуаций формы сигнала вблизи его участков с наибольшей крутизной (эффект Гиббса);
- изменению формы и абсолютных значений спектра сигнала даже при незначительном смещении сигнала по времени.

Очевидно, что оба эти эффекта приводят к погрешностям измерения ДН антенны. Чтобы исключить их влияние, используются сглаживающие временные функции. В программном обеспечении предусмотрена возможность использования различных типов сглаживающих функций: Хана, Хэмминга, Блэкмана, Ланцоша или Каппелини. После выполнения преобразования Фурье для каждой дискретной частоты рабочего диапазона ωq имеем набор комплексных чисел $Wqmn=Wmn(\omega q)$. Этот набор комплексных чисел описывает амплитуднофазовое распределение поля на плоскости вблизи раскрыва антенны на частоте ωq .

Помимо различий в построении измерительной схемы (частотный, временной), имеются различия в типах поверхностей сканирования – на плоскости, цилиндрическое, сферическое. Корректный выбор того или иного типа сканирования зависит от исследуемой антенны. Для узконаправленных антенн, таких как зеркальные, рупорные, формирующих ДН в небольшом секторе углов, предпочтительно использовать сканирование на плоскости. Цилиндрическое
сканирование предназначено для антенн, имеющих широкую ДН в одной плоскости и узкую в другой. Антенны с широкой ДН во всех плоскостях измеряются методом сферического сканирования. Рассмотрим эти типы подробнее.

Цилиндрическое сканирование используется для измерения антенн с ДН веерного типа (широкими в одной плоскости и узкими в другой). Широкой ДН, как правило, соответствует малый электрический размер антенны в этой плоскости и сильное затекание поля в область дальних боковых лепестков и задней полусферы. При цилиндрическом сканировании измеряемая антенна вращается на опорно-поворотном устройстве с шагом $\Delta \psi$, зонд перемещается линейно в вертикальном направлении с шагом Δy (рисунок 4.9). Таким образом формируется цилиндрическая поверхность обзора.



Рисунок 4.9 – Схема цилиндрического сканирования

Антенна на опорно-поворотном устройстве располагается таким образом, что ее вращение осуществляется в плоскости с широкой ДН. Шаг вращения по углу $\Delta \psi \leq \lambda/2r_0$, r_0 – радиус цилиндра (расстояние от зонда до оси вращения), шаг перемещения зонда $\Delta y \leq \lambda/2$. Диапазон вращения антенны по углу ψ задается, исходя из требуемого сектора восстановления ДН в азимутальной плоскости и характера распределения ближнего поля. Область перемещения зонда по оси *Y* определяется аналогично плоскому сканированию. Цилиндрическое сканирование веерных антенн позволяет получить полную ДН по азимуту, но ограниченную диаграмму по углу места из-за ограничения области сканирования в направлении *Y*.

Сферический способ сканирования является, в принципе, универсальным, однако наиболее сложным как с точки зрения построения сканера (особенно для измерения крупногабаритных антенн), так и с точки зрения алгоритмов обработки. Поэтому он применяется в тех случаях, когда нельзя обойтись плоским или цилиндрическим сканером. Как правило, сферическое сканирование используется для измерения слабонаправленных неапертурных антенн и с малыми электрическими размерами. Сферическая поверхность обзора может быть реализована различными способами. Наиболее простой является схема измерений с неподвижным зондом и двухкоординатным опорно-поворотным устройством (ОПУ) типа азимут-поляризация (нижняя платформа вращает антенну по азимуту, а верхняя – вокруг электрической оси) (рисунок 4.10). Угловой шаг измерений должен удовлетворять условию: $\Delta \phi = \Delta \theta \leq \lambda/2a$ (*a* – минимальный радиус сферы, в которую может быть вписана исследуемая антенна).



Рисунок 4.10 – Схема сферического сканирования

Данная схема измерений предъявляет высокие требования (порядка десятых-сотых долей длины волны) к точности выставления осей вращения ОПУ, электрической оси зонда и электрической оси измеряемой антенны. Оси вращения ОПУ должны пересекаться в одной точке, электрические оси зонда и измеряемой антенны должны совпадать, электрическая ось измеряемой антенны должна находиться на оси вращения по поляризации. Центр сферической поверхности сканирования должен располагаться в области фазового центра измеряемой антенны постоянно меняется, во всех случаях (в том числе и для антенн с линейной поляризацией) необходимо измерять две ортогональные компоненты поля – при двух взаимно перпендикулярных положениях вектора *E* линейно-поляризованного зонда.

Возможны и другие способы построения механической части комплекса, обеспечивающие сбор данных на сферической поверхности вокруг исследуемой антенны. Вариант комплекса с использованием плоского горизонтального сканера и азимутального ОПУ показан на рисунке 4.11.



Рисунок 4.11 – Схема комплекса сферического сканирования на основе плоского горизонтального сканера и азимутального ОПУ

4.2 Практические рекомендации по измерению

В данном разделе приведены практические рекомендации по измерению РТХ антенн, представлены основные особенности и нюансы по настройке рабочего места и при работе с различными типами антенных систем.

СШП АИВК является полностью программно управляемым устройством. Управление производится посредством ПО Frequency Domain Antenna Measurement (производства компании СШП ТРИМ) (рисунок 4.12). Эта программа позволяет перемещать сканер в нужную координату, выставлять необходимые частоты на генераторе, выбирать режим измерения, проводить мониторинг сигнала и управлять процессом измерений в автоматическом режиме.





Во всех случаях необходимо предварительно выставить плоскость раскрыва антенны и плоскость сканирования параллельно друг другу (для планарного сканирования), с точностью 10÷30". Выставка осуществляется с помощью высокоточных лазерных радаров (ЛР) с программным управлением. ЛР оценивает отклонение плоскости антенны от плоскости сканирования. Затем это отклонение компенсируется ОПУ. Чтобы привязаться к плоскости антенны, по её раскрыву (рисунок 4.13), закрепляются металлические шары (пины) на которые направляется луч ЛР, работающего по принципу отражения направленного луча от пинов, измеряется расстояние, затем в специализированном ПО Spatial Analyzer строится плоскость расположения пинов. Закрепление пинов на антенне производится на высокотехнологичном оборудовании, специальные В технологические отверстия.

Кроме того, необходимо периодически контролировать плоскость сканирования при помощи ЛР. Для этого на зонд закрепляется металлический шар (пин), сканер максимально передвигают по всем степеням свободы движения.

113



Рисунок 4.13 – Расположение металлических шаров (пинов) на антенне

Кроме ЛР еще используется лазерный трекер (ЛТ), который входит в состав оборудования СШП АИВК. Основной функцией ЛТ является функция слежения. Необходима она для того, чтобы в случае механических отклонений зонда или исследуемой антенны вовремя оповестить об этом оператора. ЛТ работает по тому же принципу, что и ЛР, для него используется аналогичное ПО (Spatial Analyzer).

Необходимо периодически проводить проверку и контроль отклонения зонда при помощи ЛР. Особенно важен контроль поляризации зонда, поскольку в процессе эксплуатации ввиду неидеальной установки зонда по угловым координатам, угол поворота постепенно меняется. Хотя эти изменения незначительны (порядка 0,01 ÷ 0,05°), необходимо их устранять. Делается это при помощи устройства контроля поляризации (УКП), представляющего собой небольшую эталонную рупорную антенну линейной поляризации. Фотографии устройств для С и Ки-диапазонов показаны на рисунках 4.14, 4.15





Рисунок 4.14 – УКП С-диапазона частот



Рисунок 4.15 – УКП Ки-диапазона частот

Перед выставкой зонда при помощи УКП, необходимо произвести юстировку УКП с помощью ЛР. После юстировки, антенну-зонд необходимо подвести максимально близко к УКП, далее один выход с АС подключается к УКП (генератор), второй к зонду (приемник) и, вращая зонд по крену, необходимо зафиксировать максимум сигнала. Он будет соответствовать взаимно параллельным плоскостям поляризации зонда и УКП. После этого доворот облучателя на определенный угол необходимо обнулить в программе проведения измерений (рисунок 4.12).

Для сканирования на плоскости (планарного) необходимо сначала установить зондовую антенну в центр апертуры исследуемой антенны. Сделать это можно либо по сигналу, который измеряется в динамике (рисунок 4.16), либо предварительно визуально установив зонд в центр апертуры и проведя пробное измерение с последующим программным обнулением линейных координат положения зонда (рисунок 4.12). Однако для офсетных антенн весьма трудно визуально определить направление излучения и, тем более центр амплитудного распределения. В этой связи необходимо пользоваться выставкой по сигналу в динамике, затем провести пробное измерение.

Частота		
3.7000 ГГц		
Мощность генератора	IF Bandwidth	
10.0000 dBm	500.0000 Гц	
Амплитуда 6.6 dBm	Фаза -69.7 град	

Рисунок 4.16 – Окно мониторинга сигнала в реальном времени

Выставка зонда в центр апертуры по сигналу в динамике является грубой, однако она нужна для приблизительного прицеливания перед проведением пробного измерения. Предварительное прицеливание по сигналу в динамике позволит уменьшить область сканирования пробного измерения и, как следствие, сэкономит время. Выставка зонда в центр апертуры по результатам пробного измерения является более точной, поскольку при выставке по сигналу довольно сложно зафиксировать максимум амплитудного распределения, ввиду, например, его пологости (рисунок 4.17).



Рисунок 4.17 – Примеры некорректной (а) и корректной (б) выставки зонда

После выставки зонда в центр апертуры исследуемой антенны приступают к измерениям. Для этого необходимо задать исследуемые частоты, мощность излучения и область сканирования. При вводе исследуемых частот доступно два метода измерения: в полосе частот (режим свипирования); на отдельных частотах (режим списка частот). Мощность генератора варьируется в пределах $10 \div 30$ мВт. Минимальные размеры области сканирования должны удовлетворять условию $L>D+2h*tg\theta_{max}$, где D — максимальный размер измеряемой антенны; h расстояние от плоскости сканирования до раскрыва антенны; θ_{max} — максимальный требуемый угол восстановления ДН. Таким образом, измеряемая антенна должна полностью находиться в плоскости сканирования. Для исключения измерения реактивной составляющей поля и взаимного влияния зонда и измеряемой антенны, как правило, задается $h=3...10\lambda$.

Вышеописанная методика является общим подходом к проведению измерений, однако для некоторых типов антенн характерны свои особенности. Современные КА комплектуются сканирующими офсетными зеркальными антеннами, позволяющими перемещать направление излучения с одной ЗО на другую. В этой связи возникает необходимость дополнительного контроля корректного смещения антенны при помощи СШП АИВК. Более того, как показала практика, в процессе смещения луча сканирующей антенны, эффект расхождения лучей, описанный выше, усиливается. Так при отклонении ДН на 4° расхождение лучей увеличивается дополнительно на 0,05°. Это происходит из-за того, что управление ДН антенны происходит путем смещения только рефлектора антенны и приводит к тому, что увеличивается угол выноса облучателя из фокальной оси рефлектора, что в свою очередь приводит к увеличению отклонения ДН согласно формуле (1.1). Факт смещения ДН подтвержден на практике в работе [71]. Таким образом, эти дополнительные смещения нужно учитывать и корректировать.

Отдельного внимания заслуживают МЛА [75]. При работе с МЛА после выставки ЛР необходимо убедиться в том, что антенна прицелена на заданную ЗО. Для этого недостаточно провести измерение РТХ одного из входов антенны. В

120

этой связи необходимо измерить как минимум два входа антенны. Измерению следует подвергнуть два крайних порта в решетке. Делается это для того, чтобы убедиться в том, что решетка собрана корректно, а также что она не повернута и не смещена относительно ЗО. На практике встречаются более сложные МЛА системы, например, антенная система, представляющая собой три рефлектора одинаковых размеров и формы, каждый из которых облучается решеткой излучателей. В данном случае задача усложняется тем, что необходимо оценить взаимное расположение лучей, формируемых антенной. Для этого приходится проводить пробные измерения двух крайних лучей на каждой облучающей системе. В таких случаях, как показывает практика, лучи имеют не совсем корректное взаимное расположение (рисунок 4.18), таким образом, приходится искать компромисс и выставлять антенну так, чтобы максимально покрыть требуемую ЗО с учетом трех антенн.



Рисунок 4.18 – Проекции ДН многолучевой антенны на ЗО

Похожая ситуация может возникнуть и в зеркальных офсетных антеннах, имеющих один облучатель с двумя входами (прямой и боковой), формирующими круговую поляризацию сигнала с левым и правым вращением. Например, после проведения измерений и расчета РТХ одной из таких антенн выяснилось, что лучи с прямого и бокового входов расходятся на 0,09°. Таким образом, для корректной выставки антенны необходимо провести измерения РТХ с обоих входов. Отклонение в 0,09° с геостационарной орбиты составляет 56,2 км на земле, что довольно существенно, поэтому данный факт нужно учитывать. Стоит отметить, что максимальное расхождение лучей происходит на нижней рабочей частоте антенны. Таким образом, рекомендуется проводить оценку и учет расхождения лучей на нижней рабочей частоте.

Процесс измерений РТХ контурных антенн практически ничем не отличается от общих случаев, за исключением выставки амплитудного распределения в центр области сканирования. В общих случаях необходимо выставить максимум амплитудного распределения в центр области сканирования. Однако, как показывает практика, максимум амплитудного распределения контурной антенны смещен относительно центра апертуры рефлектора. В этой связи возникает необходимость выставки области сканирования не в максимум амплитудного распределения, а визуально в его центр по результатам пробного измерения.

4.3 Обработка результатов измерений

В данном разделе освещена методика обработки измерений и визуализации полученной информации, проведен обзор ПО, предназначенного для обработки результатов измерений РТХ антенн. Как отмечено выше, на СШП АИВК проводятся измерения в соответствии с указанными параметрами в автоматическом режиме. По окончанию измерения в папке Frequency domain на ПК формируются файлы, описывающие распределение поля в частотной области (рисунок 4.19).



Рисунок 4.19 – Файлы, описывающие распределение поля

в частотной области

Файлы Description.txt и measurement.dat содержат информацию о параметрах измерения на сканере ближнего поля (область сканирования, частота, шаг сканирования, тип зонда). Чтобы произвести расчет ДН, необходимо воспользоваться программой NFcalc (производства компании СШП ТРИМ) (рисунок 4.20).

💭 Расчет параметров антенн	
Рабочая папка:	
f:\2_вх2ku_30.05.13	🔄 Обзор
Описание измерения:	Графики:
Ближнее поле: сканирование на плоскости Данные собраны вдоль вертикальной (Y) оси Режим измерения - непрерывный с реверсом Поляризация зонда Зллиптическая Верт./гориз. Тип зонда TMAZ1_21 Серийный номер зонда 1111124 Модель приемника сигналов Серийный номер Данные при вертикальной поляризации зонда (ИА): Имя файла Частота Y(X=1250.00 - 1250.00 мм)_Freq Y(X=-1250.00 - 1250.00 мм)_Freq	С Амплитудное распределение С Амплитудное распределение Текущий сигнал: У/деление: 200.00 мВ/дел. Сохранить на диск Отправить в Plots Viewer
Данные при горизонтальной поляризации зонда (ИА):	Расчет распределения поля и объемных диаграмм
Y(X=-1250.00 - 1250.00 мм]_Freq Y(X=-1250.00 - 1250.00 мм]_Freq Y(X=-1250.00 - 1250.00 мм]_Freq Y(X=-1250.00 - 1250.00 мм]_Freq	Расчет сечений диаграммы направленности
	Расчет коэффициента усиления

Рисунок 4.20 – Главное окно ПО NFcalc

Данная программа позволяет выполнять обработку результатов измерений на сканере ближнего поля (перерасчет распределения из ближней в дальнюю зону), а также получить всю необходимую информацию, например, КНД, КЭ, УБЛ, ШДН, по различным уровням, направление главного максимума. В данной программе предварительно отображены: параметры проведенного измерения, типы файлов для горизонтальной и вертикальной поляризации зонда, а также амплитудное и фазовое распределения. Для расчета объемных ДН следует ввести необходимые параметры: исследуемые частоты, выбрать систему координат, выбрать сектор углов для ДН, а также шаг по углу (рисунок 4.21).

Расчет диаграмм и	распределений	×			
Список частот					
	-	🛉 Добавить			
		— Удалить			
		📊 Удалить все			
		📊 Сохранить			
 Система координа:	r				
ОК-пространств	Система координат				
 Азимут над эле 	вацией (Ludvig II) 🔲	в круговом базисе			
О Элевация над а	азимутом (Ludvig II)				
🔘 Сферическая (t	О Сферическая (theta - phi)				
С Ко- и кросс ком	ипоненты (Ludvig III, th	eta - phi)			
С Ко- и кросс ком	ипоненты (азимут - эли	евация)			
Размер диаграммы					
	Азимут	Элевация			
	-80 +80 град	-80 +80 град			
Сектор	160.00 град	160.00 град			
Начальный угол	-80.00 град	-80.00 град			
Шаг по углу	1.00 град				
П Разрешить ввод начального угла					
√ Продолжить 🗱 Закрыть					

Рисунок 4.21 – Расчет распределения поля и объемных ДН

В том случае, если исследуемая антенна работает на круговой поляризации, необходимо установить галочку для пересчета из линейной поляризации в круговую. Делается это путем сдвига по фазе на $\pi/2$ двух волн, поляризованных во взаимно перпендикулярных направлениях. В результате формируется два файла, содержащих в себе информацию по основной и кросс-поляризации.

4.4 Основные результаты главы

1. Описано проведение измерений РТХ антенн в БЗ.

2. Приведены достоинства и недостатки частотного и временного методов измерений.

3. Показаны особенности проведения измерений РТХ для различных типов антенн.

4. Приведены виды поверхностей обзора, применяемых для различных антенн в зависимости от их направленных свойств.

5. Даны практические рекомендации по измерению РТХ антенн.

6. Обоснована необходимость применения средств оптического контроля (ЛР, ЛТ) для оценки точности выставки антенн в плоскость сканирования.

7. Установлено, что периодически требуется проводить корректировку излучающей антенны-зонда при помощи УКП, а также устранять его биения.

8. Приведена методика выставки антенны-зонда в центр амплитудного распределения (АР) антенны.

9. Приведено условие выбора размера области сканирования, исходя из необходимого сектора восстановления ДН.

10. Показано, что для сканирующих зеркальных антенн эффект деполяризации ДН усиливается в процессе перемещения ДН.

11. Показано, что для точного прицеливания МЛА на заданную ЗО недостаточно измерить один из портов антенны.

12. Обоснована необходимость поиска компромисса при прицеливании зеркальной антенны, состоящей из трех рефлекторов, на заданную ЗО.

13. Описаны обработка и визуализация РТХ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнен ряд исследований по совершенствованию создания зеркальных антенн КА: выполнено моделирование ряда антенн, усовершенствованы измерения их РТХ, разработана методика измерения РТХ. Результаты апробированы, опубликованы и внедрены. Таким образом, в работе решена задача исследования РТХ зеркальных антенн КА, имеющая значение для развития спутникостроительной отрасли.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АИВК	автоматизированный измерительно вычислительный комплекс
AP	амплитудное распределение
AC	анализатор сигналов
АФАР	активная фазированная антенная решетка
АФР	амплитудно-фазовое распределение
АФУ	антенно-фидерное устройство
БП	ближнее поле
БЭК	безэховая камера
ВАЦ	векторный анализатор цепей
ВОЛП	волоконно-оптическая линия передачи
ГЗА	гибридно-зеркальная антенна
ГЗИ	генератор зондирующих импульсов
ГСО	геостационарная орбита
ДЗ	дальняя зона
ДН	диаграмма направленности
30	зона обслуживания
КА	космический аппарат
КВП	коаксиально-волноводный переход
КИМ	контрольно-измерительная машина
КИП	коэффициент использования поверхности
КНД	коэффициент направленного действия
КУ	коэффициент усиления
КЭ	коэффициент эллиптичности
ЛОИ	лабораторные отработочные испытания
ЛР	лазерный радар
ЛТ	лазерный трекер
МЛА	многолучевая антенна
ОПУ	опорно-поворотное устройство

ния
H

- ПК персональный компьютер
- ПО программное обеспечение
- РПМ радиопоглощающий материал
- РТХ радиотехнические характеристики
- РЭА радиоэлектронная аппаратура
- СШП сверхширокополосный
- УБЛ уровень боковых лепестков
- УКП устройство контроля поляризации
- ФАР фазированная антенная решетка
- ШДН ширина диаграммы направленности
- ЭВМ электронная вычислительная машина

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Космические аппараты, производства АО «ИСС». [электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.iss-reshetnev.ru/projects, свободный (дата обращения 14.06.2016).
- 2. Поваляев Е. Системы спутниковой навигации ГЛОНАСС и GPS. / Е. Поваляев, С Хуторной. М.: НПК «ТИМ», в 5 ч., 2002, 43 с.
- 3. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации. М.: Эко-трендз, 2000, 260 с.
- 4. Банков С.Е. Проектирование СВЧ устройств и антенн с ansoft HFSS / С.Е. Банков, А.А Курушин. М., 2009, 736 с.
- 5. Банков С.Е. Электродинамика и техника СВЧ для пользователей САПР / С.Е. Банков, А.А. Курушин. М., 2008, 276 с.
- 6. Банков С.Е. Анализ и оптимизация СВЧ структур с помощью HFSS / С.Е. Банков, А.А. Курушин, В.Д. Разевиг. М., 2004, 283 с.
- 7. Гончаренко И.В. Компьютерное моделирование антенн. М.: Радиософт, журнал «радио», 2002, 80 с.
- 8. Бахрах Л.Д. Проблемы антенной техники / Л.Д. Бахрах, Н.А. Бей, Д.И. Воскресенский. М.: Радио и связь, 1989, 368 с.
- 9. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. М.: Советское радио, 1962, 480 с.
- 10. Баскаков С.И. Основы электродинамики. М.: Советское радио, 1973, 248 с.
- Ерохин Г.А. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн / Г.А. Ерохин, О.В. Чернышев, Н.Д. Козырев, В.Г. Кочержевский. М.: Горячая линия–Телеком, 2004, 491 с.
- 12. Драбкин А.Л. Антенны / А.Л. Драбкин, Е.Б. Коренберг. М.: Радио и связь, 1992, 144 с.
- 13. Домбровский И.А. Антенны. М.: Связьиздат, 1951, 323 с.
- 14. Ротхаммель К. Антенны. М.: ДМК пресс., В 2 т., Т. 1, 2013, 225 с.
- 15. Ротхаммель К. Антенны. М.: ДМК пресс., В 2 т., Т. 2, 2013, 408 с.
- 16. Пистолькорс А.А. Антенны. М.: Радио и связь, 1982, 215 с.
- 17. Кочержевский Г.Н. Антенно-фидерные устройства / Г.Н. Кочержевский, Г.А. Ерохин, Н.Д. Козырев. М.: Радио и связь, 1989, 352 с.
- Марков Г.Т. Антенны. Изд. 2-е перераб. и доп. / Г.Т. Марков, Н.Д. Сазонов. М.: Энергия, 1975, 528 с.
- 19. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. М.: Высшая школа, 1988, 432 с.
- 20. Гряник М.В. Развертываемые зеркальные антенны зонтичного типа / М.В. Гряник, В.И. Ломан. М.: Радио и связь, 1987, 70 с.
- 21. Антенны спутниковые, ТВ, РВ, СИ-БИ, КВ, УКВ / Ю.А. Виноградов, Ю.В. Жомов, В.А. Никитин, Б.Б. Соколов, В.В. Щербаков. М.: ДМК, 1999, 320 с.
- 22. Куммер В.Х. Антенные измерения / В.Х. Куммер, Э.С. Джиллеспи. ТИИЭР, т. 66, №4, 1978, С. 143 173

- 23. Фрадин А.З. Измерение параметров антенно-фидерных устройств / А.З. Фрадин, Е.В. Рыжков. М.: Связь, 1972, 352 с.
- 24. Захарьев Л.Н. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / Л.Н. Захарьев, А.А. Леманский, В.И. Турчин и др. М.: Радио и связь, 1985. 368 с.
- 25. Бахрах Л.Д. Голография в микроволновой технике / Л.Д. Бахрах, А.П. Курочкин. М.: Советское радио, 1979, 320 с.
- 26. Григорьев А.Д. Электродинамика и техника СВЧ. М.: Высшая школа, 1990, 335 с.
- Белов Ю.И. Экспериментальное исследование характеристик направленности зеркальной антенны амплифазометрическим методом / Ю.И. Белов, Н.В. Векслер, Н.С. Коротков. Радиотехника и электроника. 1981, т. 26, №5.
- 28. Корбуков Г.Е. Радио и акустическая голография / Г.Е. Корбуков, С.В. Кулаков. Л.: Наука, 1976, С. 85–98.
- 29. 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.
- ООО НПП «СШП ТРИМ», Сверхширокополосный автоматизированный измерительно-вычислительный комплекс СШП АИВК ТМСА-50Б1 (ближнее поле): Руководство по эксплуатации ТМСА.000.000.000 РЭ. СПб., 2007. – 134 с.
- ООО НПП «СШП ТРИМ». Матер. семинара «Современные методы и средства измерений РТХ антенн» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.trimcom.ru/seminar/ant.pdf, свободный (дата обращения: 10.07.2015). СПб., 2012. – 71 с.
- 32. Шишлов А.В. Зеркальные антенны с контурными диаграммами направленности эффективность и предельные возможности // Радиотехника. 2006. №4. С. 45–50.
- 33. Должиков В.В. Активные передающие антенны / В.В. Должиков А.И. Лучанинов, С.Н. Сакало. и др. М.: Радио и связь, 1984, 144 с.
- 34. Аносов А.М. Применение бортовых многолучевых антенн в системах спутниковой связи / А.М. Аносов, Н.А. Бей, В.А. Вечтомов. Антенны, 2005. № 10.
- 35. Воскресенский Д.И. Антенны и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решеток. М.: Радио и связь. 1994. 592 с.
- 36. Зубарев Ю.М. Автоматизация координатных измерений: учебное пособие / Ю.М. Зубарев, С.В. Косаревский, Н.Н. Ревин. СПб.: ПИМаш, 2011. 160 с.
- Фролов О.П. Зеркальные антенны для земных станций спутниковой связи / О.П. Фролов, В.П. Вальд. М.: горячая линия – Телеком, 2008, 496 с.

- 38. Виды спутниковых антенн. [электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.kitsystem.ru/kak-vybrat-sputnikovuyu-antennu, свободный (дата обращения 19.05.2016).
- 39. Adatia N.A. Beam squint in circularly polarised offset reflector antenna / N.A. Adatia, A.W. Rudge. Leatherhead: ERA. 1975. Vol. 11, P. 513–515.
- 40. Balanis. C.A. Modern antenna handbook // Wiley. 2008. 1680 p.
- Removal of beam squinting effects in a circularly polarized offset parabolic reflector antenna using a matched feed / S.B. Sharma, D.A. Pujara, S.B. Chakrabarty and V.K. Singh. // Progress in electromagnetics research letters(Urbana). 2009. Vol. 7. P. 105–114.
- 42. Balanis C.A. Antenna theory // Wiley. 1997. 959 p.
- 43. П. Вуд. Анализ и проектирование зеркальных антенн / Перевод с английского Г.Б. Звороно, под редакцией О. П. Фролова. М.: Радио и связь, 1984, 208 с.
- 44. Радиоизмерительная аппаратура СВЧ и КВЧ. Узловая и элементная базы / А.М. Кудрявцев, И.Г. Мальтер, А.Е. Львов, О.П. Павловский, В.А. Шумилов, А.М. Щитов. М.: Радиотехника, 2006, 208 с.
- 45. Антенна-зонд Satimo [Электронный ресурс]. режим доступа: http://www.mvg-world.com/products/field_product_family/antenna-1/openended-waveguide, свободный (дата обращения 24.02.16).
- 46. Антенна-зонд ТРИМ [Электронный pecypc]. режим доступа: http://trimcom.ru/index.php?level=russian_nextchild_of_1177748854&time=117 7749262, свободный (дата обращения 24.02.16).
- 47. Воронин Е.Н. Реконструктивные антенные измерения / Е.Н. Воронин, Е.Е. Нечаев, В.Ф. Шашенков. М.: Наука, Физматлит, 1995. 352 с.
- 48. Agilent Technologies. Испытания антенн [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.unitest.com/pdf/antenna_measurements_ru.pdf, свободный (дата обращения 12.05.2016).
- 49. Мухин А.В. Сравнительный анализ зеркальных антенн в ПО GRASP // Материалы докладов IX Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» Томск. 2015. ч. 1 С. 146–150.
- 50. Шифрин Я.С. Антенны. Харьков: Вирта, 1976. 408 с.
- 51. Заикин И.П. Проектирование антенных устройств радиорелейных линий связи / И.П. Заикин, А.В. Троцкий, С.К. Абрамов. Харьков: ХАИ, 2006, 90 с.
- 52. Галимов Г.К. Апланаты. Апланатические телескопы и антенны. М.: Адвансед солюшнз, 2011, 483 с.
- 53. 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. Конышев. Материалы докладов всерос. науч.-техн. конф. «Современные проблемы радиоэлектроники» Красноярск. 2014. С. 342–346.

- 54. Доманов С.К. Антенна с контурной диаграммой направленности производства АО «ИСС» / С.К. Доманов, А.В. Мухин, Е.Ю. Узолин, А.Г. Романов. Наукоемкие технологии. 2015. № 3. С. 44–47.
- 55. Узолин Е.Ю. Синтез профиля поверхности рефлекторов однозеркальных контурных антенн с использованием полиномов Цернике / Е.Ю. Узолин, И.Г. Крюков. Доклады ТУСУРа. 2012. № 2. С. 92–95.
- Анализ 56. Доманов С.К. влияния технологического ремонта на радиотехнические характеристики антенны из композитных материалов в Q-диапазоне // С.К. Доманов, А.В. Мухин, И.В. Конышев. – Материалы «Современные докладов всерос. науч.-техн. конф. проблемы радиоэлектроники» - Красноярск. - 2015. - С. 387-390.
- 57. Методы измерения параметров излучающих систем в ближней зоне / Л.Д. Бахрах, С.Д. Кременецкий, А.П. Курочкин, В.А. Усин, Я.С. Шифрин. Л.: Наука. 1985. 272 с.
- 58. Мухин А.В. Анализ влияния технологической оснастки на радиотехнические характеристики зеркальной антенны // А.В. Мухин, Материалы С.К. Доманов. – докладов всерос. науч.-техн. конф. проблемы радиоэлектроники» – Красноярск. – «Современные 2016. – C 338-341.
- 59. Айзенберг Г.З. Антенны УКВ, Ч.2. М.: Связь. 1977. 377 с.
- 60. TRW Space & Electronics. [электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/228606794_Ka-Band_Communications_Satellite_Antenna_Technology, платный (дата обращения 16.05.2016).
- 61. Исследование возможностей сканирования двух многолучевых зеркальных антенн, построенных по схеме Драгоне. [электронный ресурс]. Режим доступа: http://jre.cplire.ru/mac/feb12/14/text.html, свободный (дата обращения 12.05.2016).
- 62. 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. Конышев. – Материалы докладов всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2014» – Томск. – 2014. – С. 11– 14.
- 63. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Высшая школа, 1992, 416 с.
- 64. Пименов Ю.В. Техническая электродинамика / Ю.В. Пименов, В.И. Вольман, А.Д. Муравцов. М.: Радио и связь, 2000, 536 с.
- 65. ООО НПП «СШП ТРИМ», Сверхширокополосный автоматизированный измерительно-вычислительный комплекс для измерения СВЧ параметров СШП АИВК ТМСА-12Д (дальняя зона): Руководство по эксплуатации ТМСА 12Д 11 РЭ. СПб. 2007. 103 с.

- 66. Мухин А.В. Сравнительный анализ радиотехнических характеристик антенны Ка-диапазона при измерениях в ближнем поле с использованием антенн-зондов различных производителей / А.В. Мухин, С.К. Доманов. – Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Современные технологии в науке и образовании» – Рязань. – 2016. – С. 103–107.
- 67. Доманов С.К. Сравнительный анализ результатов измерений радиотехнических характеристик антенны К-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.
- 68. A. Newell. Error analysis techniques for planar near-field measurements // IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 36, n. 6. pp. 754–768, Jun. 1988.
- 69. Wideband planar near-field antenna measurement technique using ananalog fiberoptic link / A. Chizh, S. Malyshev, K. Mikitchuk, A. Milyaev, M. Popikov // Proceedings of 45th European MicrowaveConference (EuMC) –Paris, France. – 6–11 September, 2015. – P. 1148–1151.
- Мухин А.В. Измерения радиотехнических характеристик антенны Кидиапазона в измерительных комплексах ближнего и дальнего поля / А.В. Мухин, С.К. Доманов // Инфокоммуникационные технологии. – 2016. – Т.14, – №2, – С 184–187.
- 71. 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.
- 72. Бекетов В.И. Измерения и испытания при конструировании и регулировке радиолюбительских антенн / В.И. Бекетов, К.П. Харченко. М.: Связь, 1971, 302 с.
- 73. Кремер И.Я. Пространственно-временная обработка сигналов / И.Я. Кремер, А.И. Кремер, В.М. Петров и др. М.: Радио и связь, 1984, 244 с.
- 74. Марков Г.Т. Сканирующие антенные системы СВЧ / Г.Т. Марков, А.Ф. Чаплин. М.: Советское радио, 1966, 536 с.
- 75. Принципы построения многолучевой антенны для проектируемой Российской спутниковой системы высокоскоростного доступа / В.А. Вечтомов, В.Н. Зимин, А.Н. Кузенков, Д.В. Дронов, А.А. Козлов // IV Всероссийская конференция «радиолокация и связь». ИРЭ РАН, 2010.

ПРИЛОЖЕНИЕ

УТВЕРЖДАЮ К по разработке КС, OFPH 1082 общему проектированию и управлению КА ELLET Ю.Г. Выгонский 2016 г.

Об использовании результатов диссертационной работы Мухина А.В. в производственном процессе АО «ИСС» им. Академика М.Ф. Решетнева

АКТ

Настоящим актом подтверждается внедрение в производственный процесс акционерного общества «Информационные спутниковые системы» им. Академика М.Ф. Решетнева результатов диссертационной работы Мухина А.В.

В период с 30.09.12 аспирантом ТУСУР Мухиным А.В. проведена проработка методик измерения радиотехнических характеристик (РТХ) антенн на сверх широкополосных автоматизированных измерительно-вычислительных комплексах (сканерах) ближнего поля и дальней зоны, на этапе наземной экспериментальной отработки изделия.

А.В. Мухиным проведено практическое сравнение результатов измерений РТХ антенн на сканерах ближнего поля с использованием частотного, времяимпульсного оборудования и с использованием широкополосной волоконно-оптической линии передачи. Выполнен сравнительный анализ измерений РТХ антенн в ближней и дальней зонах, показана высокая согласованность результатов измерений. Проведен сравнительный анализ измерений РТХ антенн с использованием антенн-зондов различных производителей, обоснована возможность использования антенн-зондов производства АО «ИСС». Проведена оценка возможности измерения РТХ контурных антенн в составе космического аппарата (КА). Выполнен анализ влияния технологического ремонта и технологической оснастки на РТХ антенн. Приведены основные вопросы, возникающие при работе с измерительным оборудованием АО «ИСС».

Исследования, проведенные А.В. Мухиным, имеют практическую значимость, в частности, позволяют расширить практические навыки сотрудников, занятых на измерениях РТХ антенн, минимизировать вероятность возникновения ошибок и ускорить процесс обучения молодых специалистов методам работы с измерительным оборудованием АО «ИСС».

Результаты диссертационной работы использованы в производственном процессе АО «ИСС» им. Академика М.Ф. Решетнева при проведении наземной экспериментальной отработки антенн, устанавливаемых на перспективные космические аппараты «Луч», «Енисей», «Благовест».

Заместитель главного конструктора отделения 100 Начальник отдела 115 ин Романов А.Г. Данилов И.Ю.

УТВЕРЖДАЮ Генеральный директор ООО «НПП «ТРИМ СШП» П.В. Миляев «У» шоне 2016 г.

AKT

об использовании результатов диссертационной работы Мухина А.В. в производственном процессе ООО «НПП «ТРИМ СШП»

Настоящим актом подтверждается внедрение в производственный процесс общества с ограниченной ответственностью «научно-производственное предприятие «ТРИМ СШП измерительные системы» результатов диссертационной работы Мухина А.В.

Приведенные В диссертационной работе практические рекомендации, следующие из методики измерения радиотехнических характеристик антенн в ближней и дальней зонах, конструктивные особенности и технологии изготовления антенн космических аппаратов, использованы в производственном процессе компании по разработке и производству сверхширокополосных комплексов и программного обеспечения для измерения радиотехнических характеристик антенн в ближней и дальней зонах частотным и временным методами и с использованием широкополосной волоконно-оптической линии передачи. Указанные результаты позволили повысить технические характеристики комплексов и усовершенствовать процесс измерения. Они отражены в соответствующей технической документации.

Нацчно главный конструктор, Миляев А.П. оизводственя предприятие генеральный директор, к.т.н., Миляев П.В ИМ СШП

136

«УТВЕРЖДАЮ» оректор по учебной работе ТУСУР д.т.н., проф. Троян П.Е. 2016 г.

АКТ

внедрения в учебный процесс результатов диссертационной работы Мухина Александра Васильевича

Мы, нижеподписавшиеся, заместитель заведующего кафедрой телевидения и управления (ТУ) по учебной работе, к.т.н. Булдаков А.Н., доцент кафедры ТУ, к.т.н. Салов В.К. настоящим актом подтверждаем факт внедрения результатов диссертационной работы Мухина А.В. в учебный процесс кафедры ТУ.

Результаты приведенных в диссертационной работе методов измерений радиотехнических характеристик антенн космических аппаратов, особенностей технологии изготовления антенн и принципов работы горизонтального и вертикального сканеров ближнего поля, применяемых в АО «ИСС», использованы в учебном процессе по дисциплине «Электромагнитная совместимость бортовой радиоэлектронной аппаратуры» для магистрантов группы 115М магистерской программы «Электромагнитная совместимой аппаратуры».

Заместитель заведующего каф. ТУ по учебной работе

А.Н. Булдаков

Доцент каф. ТУ

В.К. Салов

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе ТГУ

Aug 2016 r 6 АКТ

о внедрении (использовании) в учебный процесс результатов диссертационной работы Мухина Александра Васильевича

Настоящим актом подтверждается внедрение в учебный процесс федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» результатов диссертационной работы Мухина А.В.

Результаты приведенных в диссертационной работе методов измерений радиотехнических характеристик антенн космических аппаратов, особенностей технологии изготовления антенн, и принципов работы горизонтального и вертикального сканеров ближнего поля, применяемых в АО «ИСС», использованы в учебном процессе по дисциплинам: «Электромагнитная совместимость», «Основы надежности и технической диагностики электронных систем», «Космическое приборостроение» для целевой подготовки магистрантов гр. 10510 физико-технического факультета по программе «Космические промышленные системы» для предприятия «Газпром космические системы» (г. Королев) в весеннем семестре 2016 г.

Декан ФТФ ТГУ

Шрагер Э.Р.







