

На правах рукописи



Доманов Сергей Константинович

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕНН КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Специальность 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск – 2018

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

Научный руководитель: **Гошин Геннадий Георгиевич**
доктор физико-математических наук,
профессор, ТУСУР, профессор кафедры
сверхвысокочастотной и квантовой
радиотехники

Официальные оппоненты: **Разинкин Владимир Павлович**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ
ВО «Новосибирский государственный техниче-
ский университет», профессор кафедры теорети-
ческих основ радиотехники

Суханов Дмитрий Яковлевич
доктор физико-математических наук, ФГАОУ ВО
«Национальный исследовательский
Томский государственный университет»,
старший научный сотрудник лаборатории
«Методы, системы и технологии безопасности»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное обра-
зовательное учреждение высшего образования
«Сибирский федеральный университет» (СФУ),
г. Красноярск

Защита диссертации состоится «25» декабря 2018 г. в 09 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.268.01, созданного на базе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники по адресу: г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ТУСУР:
<https://postgraduate.tusur.ru/ru/ob-yavleniya-o-zaschitah-dissertatsiy/vliyanie-tehnologicheskikh-faktorov-na-radiotekhnicheskie-harakteristiki-antenn-kosmicheskikh-apparatov>

Автореферат разослан «___» ноября 2018г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.268.01
доктор физ.-мат. наук, проф-р



А. Е. Мандель

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Увеличению возможностей для потребителей услуг спутниковых информационных систем прямо пропорционально ужесточение требований к техническим характеристикам космических аппаратов (КА) и прежде всего к радиотехническим характеристикам (РТХ) бортовых антенн. В связи с этим, усложняются конструкции антенных систем, увеличивается число транспондеров, обеспечивается пространственно-временное, частотное, поляризационное уплотнение информационных каналов, создаются антенны с многолучевыми диаграммами направленности (ДН), с контурными ДН и т.д. Следствием этого является необходимость контроля множества параметров, что, в свою очередь, ведет к постоянному совершенствованию методов и аппаратуры контроля. Современными средствами измерения характеристик и параметров антенн являются автоматизированные измерительно-вычислительные комплексы (АИВК), реализующие методы измерения в дальней, промежуточной и ближней зонах излучения.

Несмотря на то, что теоретические аспекты антенных измерений разрабатываются с прошлого века, современная их реализация активно развивается только в последние два десятилетия – с появлением современных векторных анализаторов цепей (ВАЦ), прецизионных позиционеров и высокопроизводительных ЭВМ. Актуальность выбранной темы исследования обуславливается, во-первых, недостаточной освещённостью ряда вопросов в области ближнепольных измерений антенн на плоской поверхности сканирования. Во-вторых, тем обстоятельством, что в настоящее время в Российской Федерации отсутствует современный государственный стандарт по обеспечению единства измерений в области ближнепольных антенных измерений, что обосновывает актуальность проведения частных исследований в рамках конкретного предприятия и антенных автоматизированных измерительных комплексов, имеющих в их распоряжении.

Объектами исследования являются радиотехнические характеристики антенн КА.

Цель работы – провести экспериментальную оценку влияния актуальных факторов производственного процесса на результаты измерений РТХ антенн КА, дать рекомендации по минимизации их влияния, а также выявить практические методы, позволяющие повысить эффективность процесса измерений РТХ антенн КА.

Задачи диссертационного исследования заключаются в следующем:

1. Провести экспериментальную оценку влияния на результаты измерений факторов, связанных с методическими аспектами антенных измерений, с учетом технологических процессов изготовления антенн КА в АО «ИСС»;

2. Сравнить результаты измерений РТХ антенн КА, полученных посредством использования различных измерительных средств;

3. Провести экспериментальную оценку сокращения времени измерения за счет использования многопортовых измерений и увеличения шага ближнепольного сканирования.

Научная новизна полученных в диссертации результатов заключается в следующем:

1. Впервые показана согласованность отклонений электрических осей ДН, полученных по результатам аналитической оценки, электродинамического моделирования и измерений амплитудно-фазового распределения (АФР) в ближней зоне (БЗ) бортовой антенны Q -диапазона с эллиптической поляризацией при отклонении проекции оси зондовой антенны (ЗА) в пределах четверти длины волны от нормали к плоскости сканирования.

2. Впервые экспериментально подтверждена возможность использования шага сканирования, превышающего в два раза рекомендуемый шаг, для восстановления ДН до уровня минус 35 дБ в пределах погрешности АИВК БЗ на примере осесимметричной двухзеркальной бортовой антенны Ka -диапазона, что позволило сократить время измерений в два раза.

3. Впервые экспериментально подтверждено совпадение результатов измерений коэффициента усиления (КУ) в БЗ на плоскости, полученных посредством однопортового и двухпортового методов, на примере бортовой многолучевой антенны (МЛА) Q -диапазона, позволившем более чем в 1,6 раза сократить время измерений.

4. Впервые показана высокая согласованность определения направления электрической оси на примере двухзеркальной осесимметричной антенны K -диапазона по результатам измерений в ближней зоне на плоскости при различных углах отклонения ЗА от нормали к плоскости сканирования и отмечены уровни ДН, восстанавливаемые с точностью, не превышающей погрешность АИВК БЗ для соответствующего отклонения ЗА.

5. Впервые представлены результаты о влиянии корпуса КА на результаты измерений ДН МЛА Q -диапазона.

Практическая значимость

1. Показана возможность взаимозаменяемости АИВК дальней и ближней зон для измерения амплитудной ДН зеркальных антенн Ku - и K -диапазона в пределах главного и первых боковых лепестков.

2. Показана нецелесообразность использования антенных рефлекторов, прошедших технологический ремонт, для анализа РТХ антенн, когда размер поврежденных участков превышает длину волны.

3. Экспериментально подтверждена возможность использования как ЗА, входящих в состав АИВК БЗ, так и ЗА производства АО «ИСС» для измерения амплитудных ДН узконаправленных антенн.

4. Экспериментально подтверждена возможность сокращения времени измерений за счет увеличения шага сканирования до размера длины волны без потери точности измерений при восстановлении ДН до уровня минус 35 дБ, а также за счет использования двухпортовых измерений АФР МЛА Q -диапазона с

использованием современного ВАЦ, обеспечивающих точность измерений в пределах погрешности АИВК БЗ.

5. Показано, что смещение проекции оси ЗА от нормали к поверхности сканирования, достигающей в линейном выражении 3-х длин волн, не приводит к погрешности восстановления электрической оси исследуемой антенны (ИА), превышающей погрешность АИВК.

6. Результаты диссертационной работы были использованы в производственном процессе АО «ИСС» при наземной экспериментальной отработке перспективных КА серии «Благовест», «Луч», «ГЛОНАСС К2» и др.

Методология и методы исследования

Для решения поставленных задач применялись сертифицированные автоматизированные измерительно-вычислительные комплексы, реализующие методы измерений в ближней и дальней зонах, аналитическая оценка и системы электродинамического моделирования с методами расчета в приближениях физической оптики и геометрической теории дифракции.

Положения, выносимые на защиту

1. При измерении характеристик направленности многолучевой антенны Q -диапазона в составе технологической панели космического аппарата установлено, что наличие технологической панели приводит к увеличению более, чем на 2 дБ уровня боковых лепестков и к уменьшению КНД в осевом направлении на величину порядка 0,15 дБ.

2. Смещение проекции оси зондовой антенны от нормали к плоскости сканирования, достигающее в линейном выражении трёх длин волн, не приводит к искажению результатов измерений направления электрической оси исследуемой зеркальной антенны и позволяет гарантированно измерять диаграмму направленности до уровней минус 23 дБ в пределах погрешности автоматизированного измерительно-вычислительного комплекса ближней зоны при динамическом диапазоне измерительной системы порядка 70 дБ и взаимного расстояния между зондовой и исследуемой антенной порядка размера радиуса исследуемой антенны.

3. Двухпортовые измерения коэффициента усиления методом замещения многолучевых антенн Q -диапазона в ближнем излученном поле совпадают по точности с однопортовыми измерениями в пределах погрешности измерений автоматизированного измерительно-вычислительного комплекса ближней зоны и позволяют сократить время измерений в более чем 1,6 раз.

4. При увеличении шага сканирования до одной длины волны (в два раза по сравнению с рекомендуемым действующим стандартом) диаграмма направленности узконаправленных антенн определяется в пределах погрешности автоматизированного измерительно-вычислительного комплекса ближней зоны до уровня минус 35 дБ при динамическом диапазоне измерительной системы порядка 70 дБ, при этом процесс измерений может быть ускорен до двух раз.

Степень достоверности результатов

Достоверность полученных результатов основывается на применении

современного сертифицированного и поверенного оборудования, физически обоснованных экспериментальных методик, согласованности результатов аналитической оценки, моделирования в специализированном ПО и результатов эксперимента, воспроизводимости полученных результатов, совпадением с результатами других авторов. Верификация результатов измерений антенн обеспечивалась путем использования различных методов измерений (методы ближней и дальней зоны), частотного и времяимпульсного оборудования, различных зондовых антенн, схем с преобразованием частоты и с использованием волоконно-оптической линии передачи.

Использование результатов исследований

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

2. Акт внедрения в программу производственного обучения в АО «ИСС» по программе «Обучение персонала на право работы с автоматизированными измерительно-вычислительными комплексам (АИВК) ближней зоны в частотной области со сканированием на плоскости».

3. Акт внедрения в производственный процесс компании ООО «НПП «ТРИМ сверхширокополосные измерительные системы» («ТРИМ»).

Апробация результатов. Результаты исследований докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, 2016;

2. Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, 2017;

3. IV-й Научно-технической конференции молодых специалистов АО «ИСС» «Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем», г. Железногорск, 2017;

4. VII Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы радиофизики», г. Томск, 2017;

5. XIII Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2017.

Публикации

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 15 работах (4 без соавторов), из которых 4 публикации в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, 5 публикации в трудах международных конференций, 6 публикаций в трудах всероссийских конференций.

Личный вклад

Диссертация является итогом исследований автора, проводившихся совместно с сотрудниками АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва». Основные исследования, результаты которых представлены в диссертационной работе, были выполнены по инициативе автора. Совместно с научным руководителем обсуждались цели работы и пути их достижения, а также результаты работы. Личный вклад автора

включает планирование экспериментов, моделирование в САПР, обработку экспериментальных результатов.

Структура и объём диссертации. В состав диссертации входят введение, 5 разделов, заключение, список литературы из 137 наименований, приложения из 10 страниц. Объём диссертации с приложениями – 144 с., в т.ч. 61 рис. и 10 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, отмечены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы; описаны методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту; приведены сведения об апробации работы, публикациях, структуре диссертации и внедрении результатов. Отмечено, что под технологическими факторами автором подразумеваются те факторы, которые оказывают влияние на результаты измерений РТХ бортовых антенн КА на этапе наземной экспериментальной отработки.

В **первом разделе** проведён обзор современных методов измерения РТХ антенн. Приведен краткий исторический экскурс по амплифазометрическим методам измерений. На сегодняшний день наибольшее распространение получили АИВК, работающие в различных зонах излучения ИА, а также реализуемых с помощью как импульсного, так и монохроматического (частотного) оборудования.

На АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» (АО «ИСС»), в котором проводились экспериментальные исследования, реализованы два метода измерений РТХ антенн. Первым является метод вышки в дальней зоне (ДЗ) на открытом полигоне в частотной области, а также в безэховой экранированной камере (БЭК) как в частотной, так и во временной областях. Вторым – амплифазометрический метод, в частности метод измерений в БЗ на плоской поверхности сканирования как в частотной, так и во временной областях. Описаны суть данных методов, особенности их реакции и используемые математические алгоритмы. Отмечается актуальность исследований по взаимной верификации на предприятии методов БЗ и ДЗ, использующих различное измерительное оборудование. Описываются различные зоны излучения антенн. Отмечается, что на сегодняшний день существуют разные трактовки и, соответственно, разные аналитические выражения для определения внешней границы ближнего излученного поля.

Помимо этого, в разделе отмечается высокая роль ведущих отечественных предприятий в развитии теории и техники антенных измерений на АИВК. Отмечаются вопросы, которые не достаточно исследованы в современных публикациях. Отмечено, что на сегодняшний день отсутствует современный отечественный ГОСТ по антенным измерениям в БЗ. Описаны основные источники методических и инструментальных погрешностей при измерениях в БЗ на плоскости.

На основе проведенного анализа ставятся цель и задачи исследования.

Второй раздел посвящен исследованию влияния технологического стенда, корпуса КА и технологического ремонта на характеристики направленности бортовых офсетных зеркальных антенн.

В подразделе 2.1 решаются задачи по экспериментальному определению влияния корпуса КА, а также технологического стенда на характеристики направленности МЛА, работающей в перспективном Q -диапазоне при измерениях на АИВК БЗ. Результаты измерений антенны, установленной на корпусе КА, а также антенны, установленной на технологическом стенде, сопоставляются с результатами численного моделирования (рис. 1). Исследования проводились применительно для одного из облучателей, находящегося в непосредственной близости от корпуса КА.

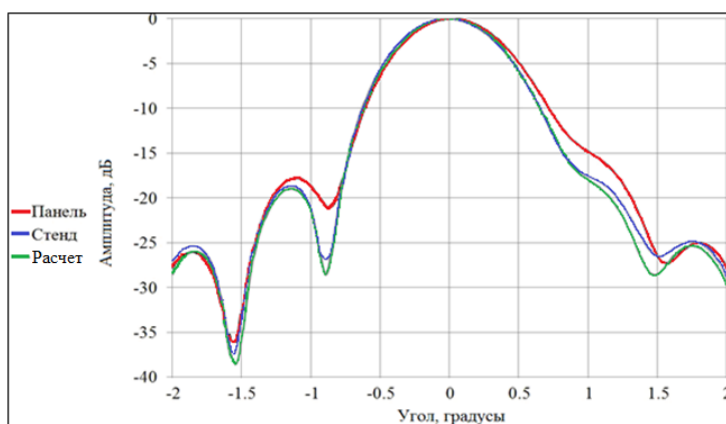


Рис. 1. Сравнительные ДН

Результаты анализа показывают, что измеренные ДН антенны на технологическом стенде, укрытом высокоэффективным пирамидальным радиопоглощающим материалом, имеют высокую степень согласованности с расчетными ДН. Наличие антенной технологической панели оказывает заметное влияние на уровни боковых лепестков (УБЛ) преимущественно в плоскости, перпендикулярной поверхности антенной панели, в которой УБЛ (на уровнях минус 14 ÷ минус 17 дБ) выше в среднем по рабочему диапазону антенны на 2 дБ при погрешности измерений амплитудной ДН АИВК не более 0,3 дБ. Ширина диаграммы направленности (ШДН) на уровне минус 3 дБ при измерениях на антенной панели превышает ШДН при измерениях на технологическом стенде на 0,015 – 0,02 град. при погрешности комплекса (по статистике) не более 0,01 градуса. Коэффициент направленного действия (КНД) в осевом направлении антенны, вблизи которой находится сотопанель, ниже в среднем по диапазону на 0,15 дБ.

В подразделе 2.2 проведено экспериментальное исследование влияния технологического ремонта на характеристики направленности офсетной зеркальной антенны Q -диапазона. Результаты измерений антенны, прошедшей технологический ремонт (рис. 2 а), сопоставляются с результатами измерений антенны, не имеющей повреждений (рис. 2 б). Из результатов сканирования

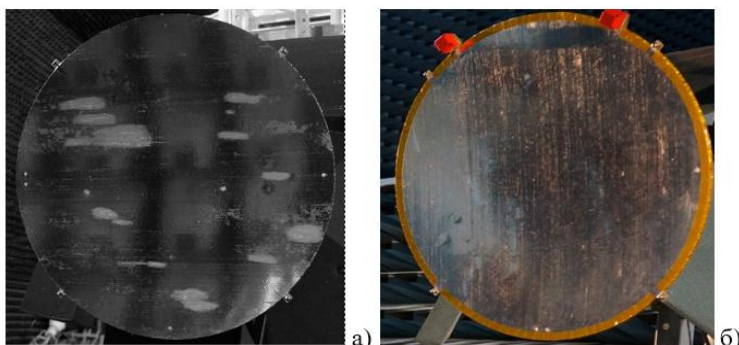


Рис. 2. Внешний вид рефлекторов: а) после ремонта, б) не требующего ремонта

поверхности рефлектора, прошедшего технологический ремонт, следует, что максимальное отклонение профиля не превышает 0,094 мм при требованиях 0,1 мм. На рисунке 3 приведены сравнительные ДН обоих рефлекторов.

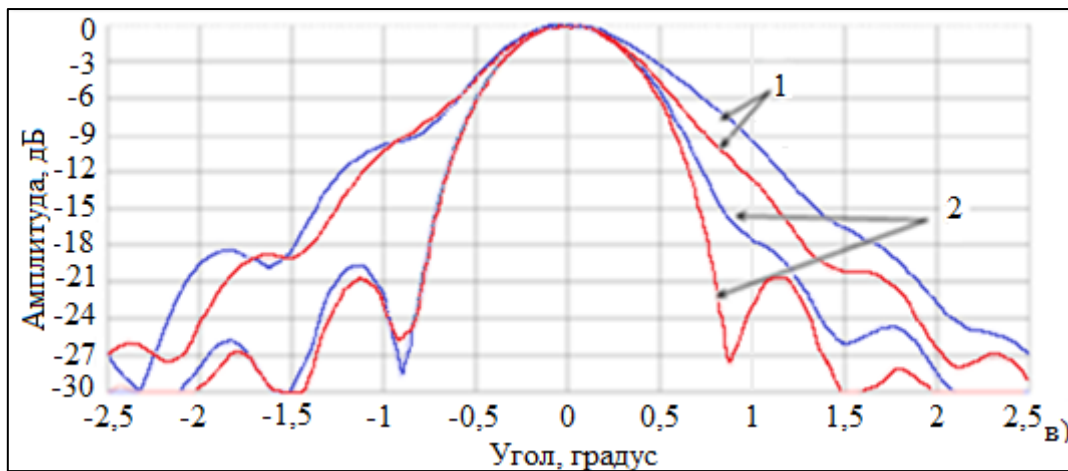


Рис.3 Сравнительные ДН в азимутальной (красный) и угломестной (синий) плоскостях антенн с рефлектором: после технологического ремонта (1); без повреждений (2)

На основе полученных результатов сделано заключение о нецелесообразности применения антенных рефлекторов, прошедших технологический ремонт, в случаях, когда размеры ремонтируемых участков сравнимы или превышают длину рабочей волны. В таких случаях соответствие формы профиля поверхности рефлектора требуемым значениям не гарантирует необходимых характеристик направленности антенны. Ухудшение КНД может превышать 2 дБ. Также отмечено, что для антенных рефлекторов более низкого K -диапазона подобные повреждения не оказывают большого влияния на результаты измерений.

В третьем разделе приведены результаты измерений РТХ антенн при использовании различных измерительных средств в технологическом процессе производства антенн. В подразделе 3.1 приводятся результаты, полученные при измерениях на АИВК, работающих в дальней и ближней зонах излучения (рис. 4).

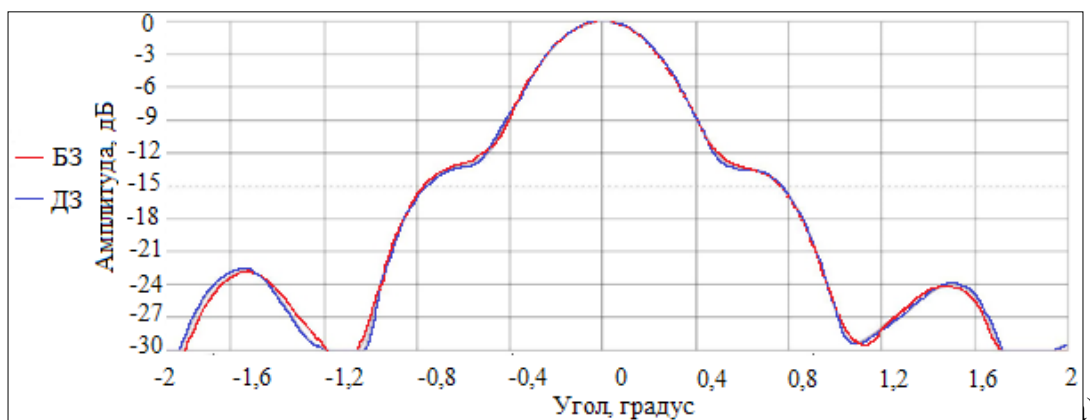


Рис. 4. Измеренные сечения ДН на комплексах ближней и дальней зон: для антенны Ku -диапазона

По результатам проведенных экспериментов получено, что разница в ШДН для результатов измерений ДН антенны Ku -диапазона пренебрежимо

мала ($0,008^\circ$) и не превышает инструментальную погрешность измерительных комплексов ($\pm 0,02^\circ$). Несогласованность УБЛ составила не более 0,3 дБ на относительных уровнях ДН минус 16 дБ, что соответствует инструментальной погрешности определения амплитудных ДН. Разница в ШДН для результатов измерений ДН антенны *K*-диапазона составляет $0,019^\circ$, что так же не превышает инструментальную погрешность АИВК. Несогласованность УБЛ составила порядка 0,8 дБ на относительных уровнях ДН минус 15 – минус 16 дБ, что превышает заявленную производителем инструментальную погрешность АИВК на 0,3 дБ. Данная несогласованность обуславливается влиянием трассы распространения радиосигнала в измерительном комплексе ДЗ, являющимся открытым полигоном. Также, это объясняется увеличенным затуханием сигнала на трассе распространения в более высоком частотном диапазоне, что приводит к росту погрешности измерений на тех же уровнях сигнала, что и в более низком частотном диапазоне.

В качестве вывода отмечено, что результаты измерений амплитудных ДН двухзеркальных антенн Кассегрена, работающих в *Ku* и *K*-диапазонах, на двух различных измерительных комплексах показали высокую степень сходимости. Точность измерения основного и первых боковых лепестков приближается к инструментальной погрешности измерительных комплексов.

В подразделе 3.2 решается задача сравнительного анализа результатов измерений с помощью двух схемных решений: с использованием внешних СВЧ-смесителей (рис.5 а) и с использованием оптоволоконного оборудования (рис. 5 б).

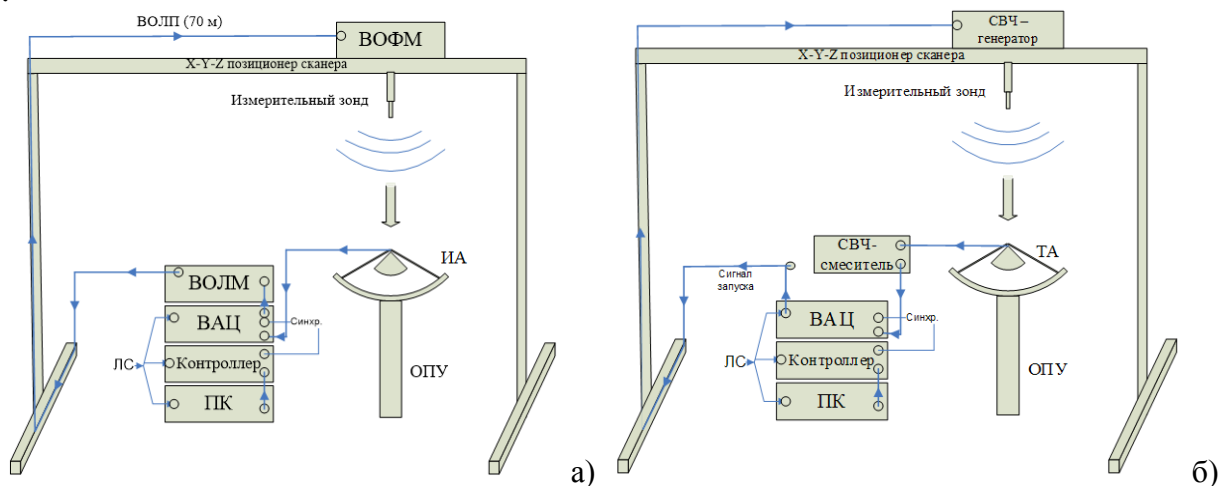


Рис. 5. Упрощенные структурные схемы АИВК с использованием:

а) волоконно-оптического оборудования, б) СВЧ-смесителя и внешнего СВЧ-генератора

Центральным звеном измерительной схемы для обоих случаев является ВАЦ.

Одним из наиболее распространенных решений для измерений в БЗ на крупногабаритных планарных АИВК является использование в приемном тракте внешних СВЧ-смесителей, предназначенных для переноса сигнала от ИА на промежуточную частоту (ПЧ) с целью уменьшения потерь в измерительных кабелях. Подход имеет свои недостатки. Поэтому применяют

альтернативное решение в виде использования широкополосной волоконно-оптической линии передачи (ВОЛП), предназначенной для передачи измерительного сигнала от выхода ВАЦ к ЗА. Предлагаемое решение имеет ряд преимуществ. Установлено, что за счет использования опорных каналов ВОЛМ в сочетании с несколькими приемниками ВАЦ имеется возможность практически полного учета фазовых искажений, возникающих за счет температурного дрейфа, подвижных кабелей и вращающихся коаксиальных соединителей. В целом использование ВОЛП в сочетании с волоконно-оптическим лазерным модулем (ВОЛМ) и волоконно-оптическим фотодиодным модулем (ВОФМ) разработки компании «ТРИМ» позволяют практически полностью исключить ошибки измерения фазы.

Ниже представлены ДН, измеренные различными схемными решениями.

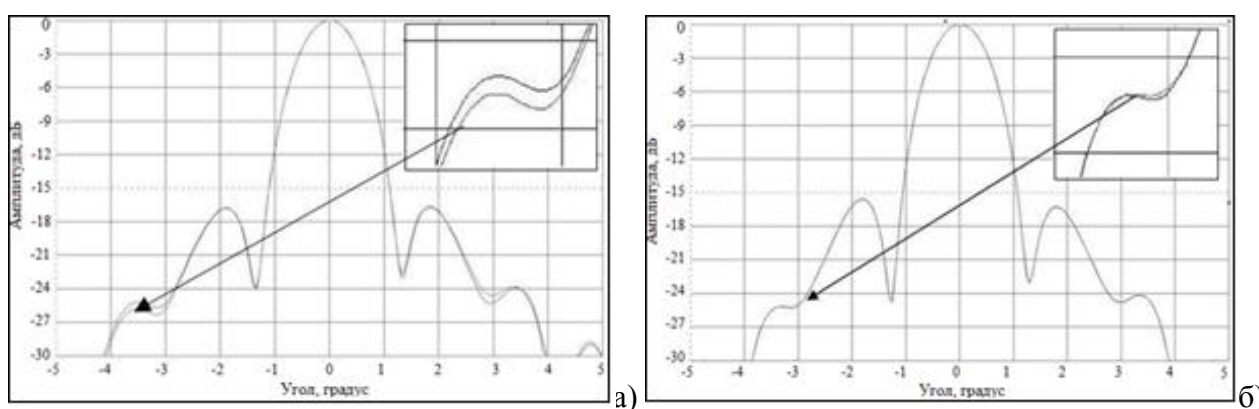


Рис. 6. Сечения ДН при различных измерительных схемах на частоте 20 ГГц в азимутальной (а) и угломестной плоскостях (б) с увеличенными фрагментами

Из рисунка 6 видно, что максимальное расхождение ДН (вблизи уровня минус 26 дБ) составляет 0,5 дБ в азимутальной плоскости и 0,1 дБ – в угломестной, что не превышает инструментальной погрешности (0,5 дБ), заявленной производителем АИВК. Несогласованность ШДН составляет $0,002^\circ$, что значительно меньше погрешности измерений ($0,02^\circ$). Максимальное расхождение КНД составляет 0,022 дБ, что также значительно меньше инструментальной погрешности измерений (0,2 дБ).

Таким образом, оба схемных подхода дают идентичные результаты при измерениях характеристик направленности антенн и могут использоваться при наземной экспериментальной отработке антенн К-диапазона в АО «ИСС».

В подразделе 3.3 представлены результаты измерений КУ методом двух одинаковых антенн с помощью времяимпульсного и частотного оборудования в ДЗ в БЭК (рис.7).

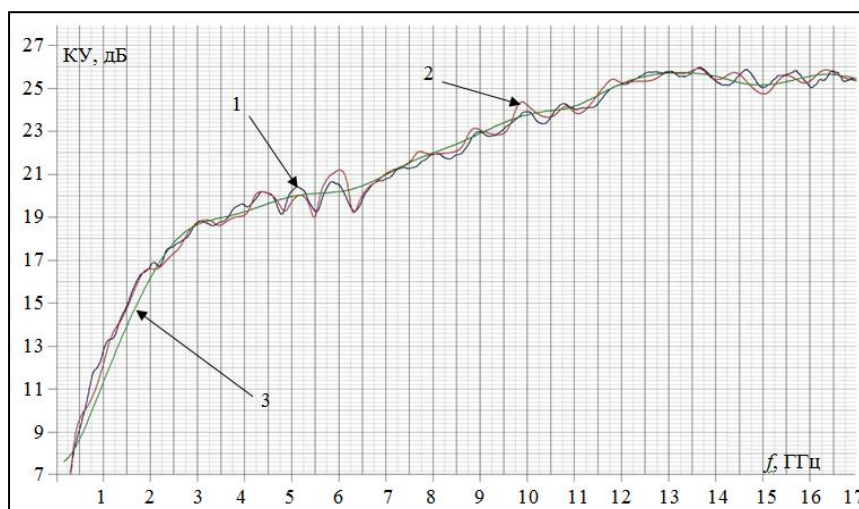


Рис. 7. Сравнение частотных зависимостей измеренных КУ: 1) частотным методом; 2) временным методом с окном 2 нс; 3) временным методом с окном 0,6 нс

По результатам проведенного сравнительного анализа получена высокая согласованность результирующего КУ для обоих методов. Несовпадение характеристик не превышает 0,6 дБ во всем диапазоне, что соответствует современному уровню измерений КУ антенн данным методом. Отмечается важность выбора размеров временного окна, являющегося критически важным аспектом в определении характеристик излучения антенн при измерениях во временной области.

Таким образом, экспериментально подтверждено, что для достаточно точного измерения КУ рупорных антенн, работающих в диапазоне до 17 ГГц, пригодны как частотный метод измерений, так и времяимпульсный. Вопрос выбора оптимальной длительности импульса во временном окне, при котором результаты измерений КУ будут максимально приближены к истинному — предмет дальнейших исследований.

В подразделе 3.4 решается задача сравнительного анализа результатов измерений РТХ с помощью ЗА различных производителей (рис.8).

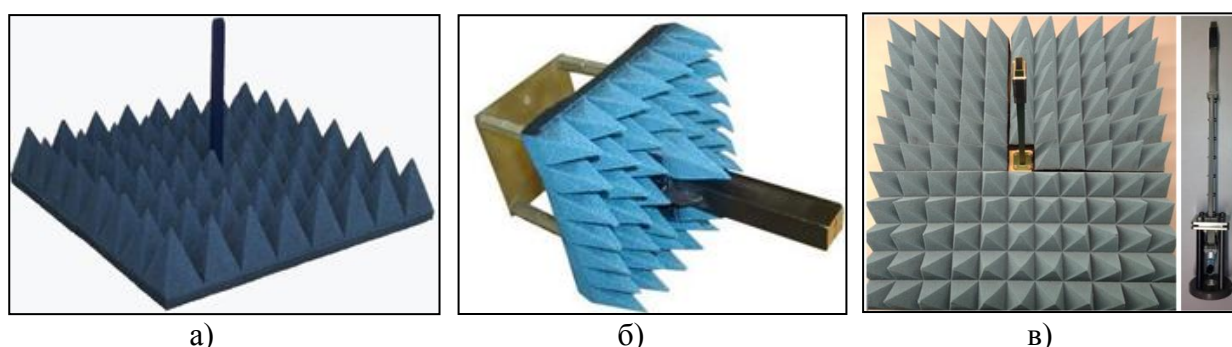


Рис. 8. Внешний вид зондовых антенн производства: а) SATIMO *Ka*-диапазона, б) сверхширокополосная (18 – 40 ГГц) зондовая антенна производства «ТРИМ» в) зондовой антенны *Ka*-диапазона производства АО «ИСС»

Ниже в таблице 1 представлены измеренные РТХ при использовании различных ЗА.

Таблица 1. Измеренные РТХ антенны при использовании различных зондовых антенн

РТХ	Плоскость измерения	Зондовая антенна «ТРИМ»	Зондовая антенна «ИСС»	Зондовая антенна «SATIMO»
ШДН _{-3дБ} , град	Азимут	0,394	0,39	0,394
	Угол места	0,385	0,381	0,389
ШДН _{-10дБ} , град	Азимут	0,710	0,697	0,701
	Угол места	0,667	0,662	0,67
УБЛ	Азимут	-13,5	-13,9	-13,7
	Угол места	-13,7	-13,6	-13,9
КНД (по объемной ДН), дБ	-	51,54	51,72	51,67
Кросс-поляризационная развязка (КПР) в зоне обслуживания (ЗО), дБ	-	22	25,59	24,83

По результатам сравнительного анализа результатов измерений РТХ зеркальной антенны Кассегрена *Ka*-диапазона с помощью ЗА различных производителей установлено, что несогласованность измеренного КНД составила 0,18 дБ, ШДН по уровням минус 3 и минус 10 дБ – 0,013°, значений УБЛ – не более 0,4 дБ, что находится в пределах заявленной погрешности измерительного комплекса с вертикальной поверхностью сканирования. Разница КПР для ЗА производства «ИСС» и SATIMO не превысила 0,8 дБ на уровне минус 25 дБ, что так же находится в пределах погрешности измерений. Значение КПР для ЗА производства «ТРИМ» отличается более чем на 2,8 дБ, что заметно превышает заявленную погрешность измерительного комплекса.

Таким образом, можно заключить, что для измерения амплитудных ДН зеркальных антенн *Ka*-диапазона подходят все вышеуказанные ЗА. Для антенн, требующих измерения КПР в ЗО под углами $\pm 0,2^\circ$ более 24 дБ в узкой полосе частот рекомендуется использовать ЗА производства «SATIMO» и «ИСС».

В **четвертом разделе** приводятся экспериментальные исследования актуальных особенностей методик измерений, влияющих на результаты измерений РТХ антенн.

В **подразделе 4.1** приведены результаты экспериментальных исследований характеристик направленности антенны *Ku*-диапазона с контурной зоной обслуживания, полученных по результатам измерений на планарном сверхширокополосном (СШП) АИВК БЗ с вертикальной поверхностью сканирования времяимпульсным методом в БЭК на различных расстояниях от ЗА. Ставилась задача по оценке степени согласованности ДН по уровням минус 3 и минус 10 дБ, а также уровней первых боковых лепестков ИА. На рисунке 9 показаны сравнительные сечения ДН в главных плоскостях для различных расстояний от ЗА.

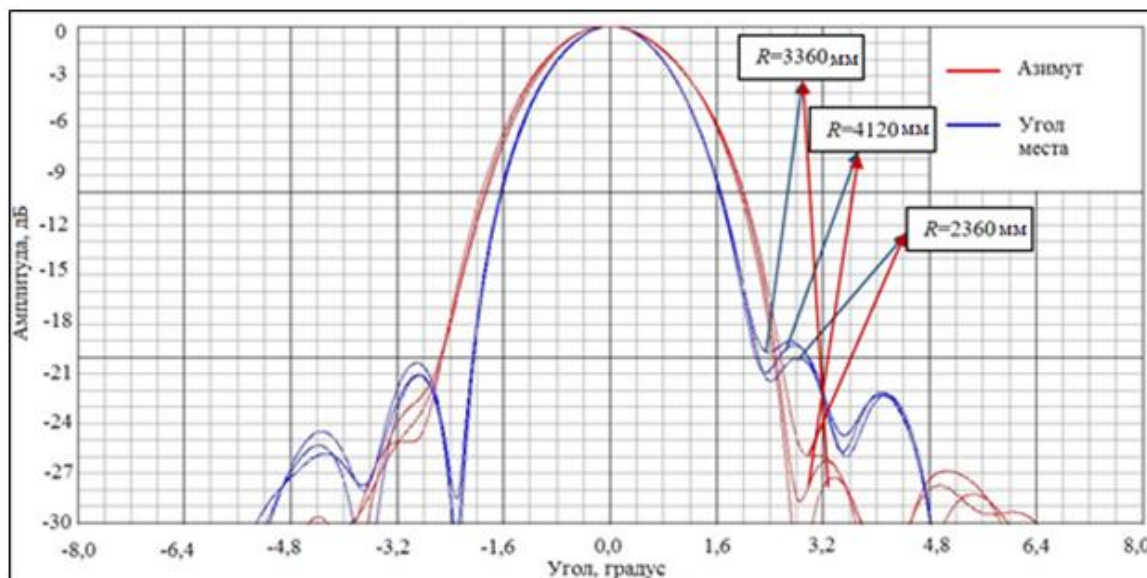


Рис. 9. Сечения ДН в главных плоскостях для различных расстояний от зондовой антенны

Сравнительный анализ полученных результатов показал, что для всех анализируемых характеристик несогласованность результатов измерений находится в пределах инструментальной погрешности СШП АИВК БЗ с вертикальной поверхностью сканирования за исключением УБЛ в азимутальной плоскости. Разница превышает заявленную погрешность на 1,4 дБ. Данный факт объясняется тем, что АФР ИА измерено недостаточно корректно, а именно – наблюдается усечение требуемой области сканирования, что приводит к погрешности восстановления ДН за пределами главного лепестка ДН. По мере увеличения расстояния между ЗА и ИА амплитудное распределение БЗ имеет характер расходящегося прожекторного луча. При этом область сканирования оставалась неизменной. Неизменность области сканирования объясняется исключительно техническими сложностями, обусловленными невозможностью на момент проведения эксперимента расположить ИА на необходимой высоте и обеспечить возможность увеличения области сканирования.

Таким образом, можно сделать следующие выводы: измерение основных параметров амплитудной ДН времяимпульсным методом в БЗ возможно в пределах инструментальной погрешности СШП АИВК до относительных уровней ДН, соответствующих порядка минус 20 дБ, на различных расстояниях до ЗА, в том числе и в зоне Френеля. Для повышения точности восстановления ДН на более низких уровнях необходимо обеспечивать требуемую область сканирования для исключения погрешности, связанной с ограничением.

В подразделе 4.2 исследуется отклонение ДН в плоскости ортогональной оси симметрии офсетной антенны Q -диапазона эллиптической поляризации. Проведен сравнительный анализ углов отклонений ДН при правом и левом направлениях вращения вектора напряженности электрического поля антенны. Сравняются результаты, полученные с помощью аналитического выражения, а также методами численного моделирования и натурального эксперимента (рис. 10). При измерениях на АИВК БЗ устанавливалось отклонение ЗА от нормали к

плоскости сканирования. С целью проверки влияния данного отклонения на итоговое измерение направления электрической оси ИА проекция угла отклонения на плоскость сканирования составляла около $\lambda/4$.

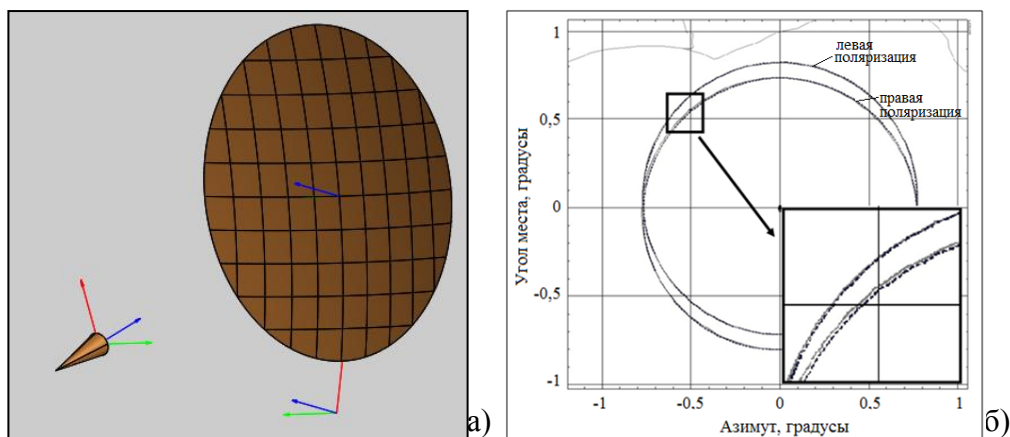


Рис.10. а) модель антенны в программном пакете Grasp, б) картографические проекции ДН, полученные в результате моделирования (---) и измеренные (—) по уровню минус 3 дБ для левой и правой эллиптической поляризации

В результате проведенного исследования получены три значения отклонения электрической оси ДН антенны: по аналитическому выражению, численным моделированием и посредством измерений. Значения, рассчитанные по аналитическому выражению и по результатам моделирования, полностью совпадают и составляют $0,045^\circ$. Значение, полученное в результате измерений на АИВК БЗ, составляет $0,042^\circ$.

Таким образом, отклонение теоретических и практических значений составило $0,003^\circ$, что значительно меньше инструментальной погрешности измерительного комплекса $0,02^\circ$. Полученный результат позволяет сделать вывод о том, что отклонение проекции ЗА от нормали к поверхности сканирования в пределах $\lambda/4$ не влияет на результаты измерения направления электрической оси антенны, а также что аналитическое выражение позволяет с высокой точностью провести априорную оценку отклонения ДН офсетной зеркальной антенны с эллиптической поляризацией.

В подразделе 4.3 решается задача по экспериментальной оценке влияния различного угла отклонения ЗА от нормали к плоскости сканирования на характеристики направленности зеркальной антенны K -диапазона.

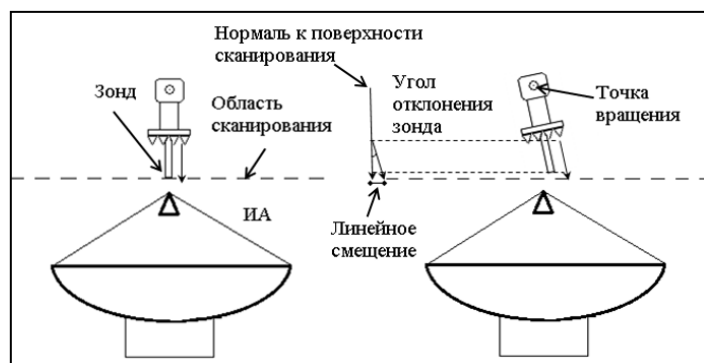


Рис.11. Отклонение зондовой антенны от нормали к поверхности сканирования

В качестве выводов отмечается, что отклонение продольной оси ЗА в виде открытого конца прямоугольного волновода на угол, проекция которого на плоскость сканирования в линейном отношении составляет $0,2 \lambda$ от нормали к плоскости сканирования, не приводит к увеличению погрешности восстановления ДН, превышающей заявленную погрешность АИВК вплоть до уровня минус 40 дБ. Отклонение на величину, превышающую длину рабочей волны в 3 раза, не приводит к искажению результатов измерения направления электрической оси антенны и позволяет восстанавливать ДН до уровня минус 23 дБ с точностью, не превышающей погрешность АИВК БЗ. Для минимизации отклонения ЗА от нормального положения автор рекомендует использовать прецизионные лазерные радары в сочетании со специализированными оптическими сферами, закрепляемыми на поверхности ЗА (рис. 12).

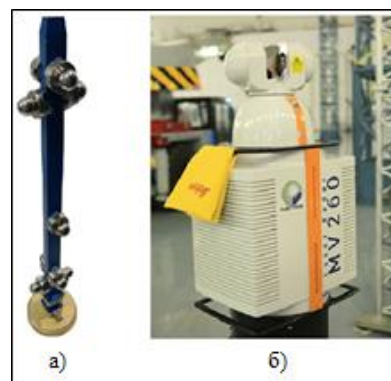


Рис. 12. а) зондовая антенна, применявшаяся в эксперименте; б) лазерный радар

Подраздел 4.4 посвящен особенностям измерений коэффициента эллиптичности (КЭ) АИВК ДЗ в автоматизированном режиме при измерении объемной ДН. Отмечается важность предварительной корректной выставки ИА относительно плоскости колебаний линейно-поляризованного вектора \mathbf{E} вспомогательной антенны (рис. 13).

Таким образом, проведена оценка влияния корректного выбора первоначального положения ИА, которое в значительной степени определяет результат измерения КЭ. В данном случае максимальная разница в расчете КЭ составила 0,16. При некорректном выборе первоначального положения итоговый результат определения КЭ может стать причиной принятия к следующему этапу производства антенны, заведомо неудовлетворяющую требованиям технических условий. Данные особенности измерения КЭ в автоматизированном режиме рекомендованы к включению в руководство по эксплуатации АИВК ДЗ.

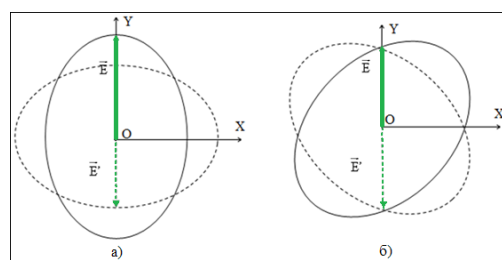


Рис. 13. Поляризационный эллипс исследуемой антенны и плоскость колебаний вектора \mathbf{E} вспомогательной антенны с линейной вертикальной поляризацией

Пятый раздел посвящен повышению эффективности процесса измерений. В подразделе 5.1 приводятся методика и результаты измерений КУ антенны Q -диапазона методом замещения с использованием планарного АИВК БЗ. Измерения проводились двухпортовым методом, то есть два значения комплексного коэффициента передачи системы измерялись одновременно двумя приемниками ВАЦ. Отмечена степень влияния рассогласований на результирующий КУ. Приведены сравнительные амплитудно-частотные характеристики КУ для однопортовой и двухпортовой схем измерения.

В качестве выводов отмечается: учёт рассогласований при измерении КУ методом замещения имеет смысл проводить только для устранения влияния неидентичных схем подключения эталонной и исследуемой антенн (использование различных коаксиально-волноводных переходов с отличающимися значениями коэффициента стоячей волны по напряжению или других вспомогательных аксессуаров СВЧ-тракта). Результаты измерений с различными схемными подходами (однопортовым и двухпортовым) показывают, что разница в отдельно взятых точках не превышает 0,1 дБ, что позволяет применять двухпортовое подключения для значительного сокращения времени измерений. Отмечается, что для антенн с одиночным облучателем двухпортовый метод позволит сократить время измерений в два раза.

В качестве заключительной задачи данного раздела и диссертации в целом (подраздел 5.2) приводятся результаты восстановления ДН двухзеркальной осесимметричной антенны *Ka*-диапазона по результатам сканирования АФР поля на плоскости в условиях БЭК при использовании различного шага сканирования: $0,5\lambda$; λ ; $1,5\lambda$; 2λ . Целью проведенного исследования являлось подтверждение возможности увеличения шага сканирования без потери точности измерений для ряда практических задач.

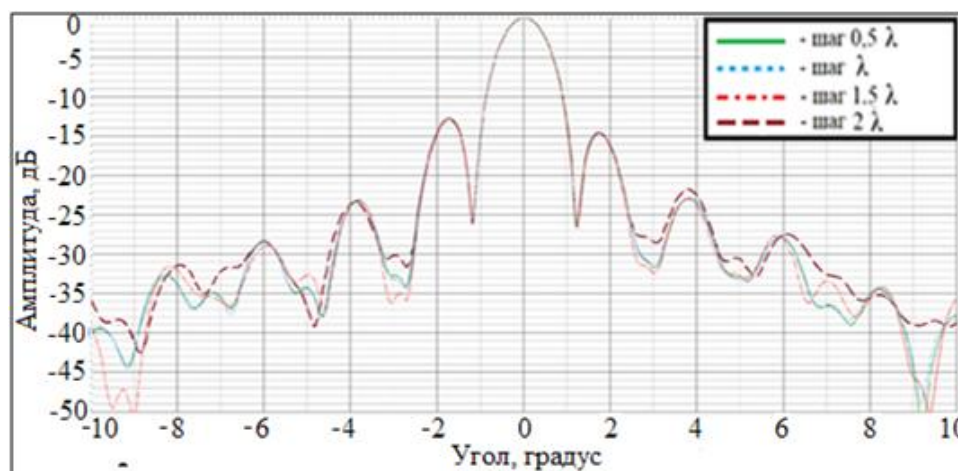


Рис. 14 – Сечения ДН для различных шагов сканирования

На основе полученных результатов сделаны следующие выводы: 1) выбор шага сканирования до 2λ не приводит к ухудшению восстановления ДН в пределах основного и первых боковых лепестков; 2) ошибки восстановления ДН начинают превышать заявленную погрешность АИВК на уровнях сигнала: для шага в λ – минус 35 дБ; для шага в $1,5\lambda$ – минус 23 дБ; для шага в 2λ – минус 16 – минус 17 дБ.

Таким образом, выявлено, что в задачах восстановления ДН шаг сканирования можно увеличить с $\lambda/2$ до λ без потери точности результатов до уровня минус 35 дБ, что позволит сократить время измерений в два раза. На настоящий момент данный уровень восстановления ДН позволяет измерять большинство антенн КА, находящихся на стадии изготовления в АО «ИСС».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основе экспериментальных исследований качественно и количественно определены актуальные технологические факторы, влияющие на результаты измерений РТХ антенн КА.

2. Показана возможность взаимозаменяемости находящихся в АО «ИСС» АИВК различного типа, в составе которых используется различное измерительное оборудование. Приведены количественные оценки по степени взаимной верификации данных АИВК.

3. Выявлены и экспериментально апробированы способы повышения эффективности измерений на АИВК БЗ.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

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

2. Антенна с контурной диаграммой направленности производства АО «ИСС» / **С.К. Доманов**, А.В. Мухин, Е.Ю. Узолин, А.Г. Романов. // Научные технологии (Москва). – 2015. – Т. 16, № 3. С. 44–47.

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

4. **Доманов С.К.** Анализ влияния антенной сотопанели космического аппарата на радиотехнические характеристики антенны Q -диапазона / Материалы докладов XXII Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР – 2017» – Томск: Издательство «В – Спектр». – 2017. – С. 15–20.

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

6. **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 ученых «Научная сессия ТУСУР-2014». – Томск. – 2014. – С. 11–14.

7. **Доманов С.К.** Сравнительный анализ результатов измерений радиотехнических характеристик антенны K -диапазона в измерительном комплексе ближней зоны 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 ученых «Научная сессия ТУСУР – 2016» -

Томск: Издательство «В – Спектр».– 2016.– С. 32– 35.

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

9. **Доманов С.К.** Экспериментальное исследование влияния отклонения измерительного зонда от нормали к плоскости сканирования на характеристики направленности зеркальной антенны. Материалы докладов XIII-й Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2017. – С. 139–142.

10. **Доманов С.К.** Особенности измерения коэффициента эллиптичности на автоматизированном измерительном комплексе дальней зоны в частотной области. Материалы докладов XIII-й Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2017. – С. 142-144.

11. Гошин Г.Г., **Доманов С.К.** Ближнеполевые измерения коэффициента усиления зеркальных антенн. Материалы докладов VII Международной науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы радиофизики». – Томск. – 2017. – С.43–47.

12. 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.

13. **Доманов С.К.** Исследование влияния увеличения шага ближнеполевого сканирования на точность восстановления диаграммы направленности бортовой антенны космического аппарата / **С.К. Доманов**, Г.Г.Гошин // Доклады ТУСУРа. – 2017. – Т.20. – №4. – С. 20–22.

14. **Доманов С.К.** Перспективы применения комплексов для измерения характеристик антенн в зоне Френеля в АО «ИСС». – Сборник тезисов IV научно-техн. конф. молодых специалистов АО «ИСС». – Железногорск, 2017. – С. 37– 39.

15. Мухин А.В. Сравнительный анализ радиотехнических характеристик антенны Ka -диапазона при измерениях в ближнем поле с использованием антенн-зондов различных производителей / А.В. Мухин, **С.К. Доманов**. – Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Современные технологии в науке и образовании». – Рязань. – 2016. – С. 103–107.