

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
(ТУСУР)**

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
Гошин Геннадий Георгиевич,
доктор физико-математических наук,
профессор

Томск–2018

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧЕНИЯ АНТЕНН С ПОМОЩЬЮ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ.....	13
1.1 Обзор методов измерений	13
1.2 О зонах излучения антенны.....	18
1.3 Использование автоматизированных измерительно-вычислительных комплексов на АО «ИСС».....	23
1.4 Роль ведущих отечественных предприятий в области антенных измерений	25
1.5 Погрешности измерений в ближней зоне на плоскости	28
1.6 Восстановление диаграмм направленности по измерениям в ближней зоне на плоскости с помощью частотного и времяимпульсного оборудования	29
1.7 Методика измерений радиотехнических характеристик антенн на автоматизированных комплексах дальней зоны	33
1.8 Выводы по главе	36
2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОРПУСА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕМОНТА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРАВЛЕННОСТИ БОРТОВЫХ АНТЕНН.....	39
2.1 Оценка влияния корпуса космического аппарата на характеристики направленности многолучевой антенны Q -диапазона	39
2.2 Анализ влияния технологического ремонта на характеристики направленности офсетной антенны Q -диапазона	45
2.3 Основные результаты главы.....	50
3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕНН ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ.....	51

3.1 Сравнительный анализ характеристик направленности антенны <i>Ku</i> -диапазона при измерениях в дальней и ближней зонах излучения	51
3.2 Сравнительный анализ характеристик направленности антенны при использовании линии передачи с волоконно-оптическим оборудованием и линии передачи с преобразованием частоты	56
3.3 Сравнительный анализ результатов измерения коэффициента усиления рупорной антенны при использовании времяимпульсного и частотного оборудования	62
3.4 Сравнительный анализ измерений радиотехнических характеристик антенны <i>Ka</i> -диапазона при использовании различных зондовых антенн	66
3.5 Основные результаты главы.....	71
4. ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ МЕТОДИК ИЗМЕРЕНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕНН	73
4.1 Исследование влияния на характеристики направленности расстояния между зондовой и исследуемой антенной <i>Ku</i> -диапазона с контурной диаграммой направленности времяимпульсным методом	73
4.2 Сравнительный анализ отклонения оси ДН офсетной зеркальной антенны с эллиптической поляризацией по результатам аналитической, численно-модельной и экспериментальной оценки с учетом отклонения зондовой антенны от нормали к плоскости сканирования	81
4.3 Экспериментальное исследование влияния отклонения зондовой антенны от нормали к плоскости сканирования на характеристики направленности антенн <i>KA</i>	88
4.4 Особенности измерения коэффициента эллиптичности на автоматизированном измерительном комплексе дальней зоны в частотной области	93
4.5 Основные результаты главы.....	99
5. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЙ.....	101

5.1 Ближнепольные измерения коэффициента усиления многолучевой антенны Q -диапазона.....	101
5.2 Исследование влияния увеличения шага сканирования в ближней зоне на результаты измерений характеристик направленности антенн	108
5.3 Основные результаты главы.....	112
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	114
Список сокращений и условных обозначений	117
Список литературы	119
Приложение А	133
Приложение Б.....	135
Приложение В	136
Приложение Г	137

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день в Российской Федерации в области создания космических аппаратов (КА) навигации, связи, телевидения, ретрансляции и геодезии, ведущим предприятием является Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» (АО «ИСС»), на долю которого приходится примерно 2/3 орбитальной группировки страны. АО ИСС выполняет полный цикл работ по созданию КА, от этапа проектирования до этапа изготовления и проведения лётных испытаний изделий [1].

Одним из важнейших этапов жизненного цикла КА является наземная экспериментальная отработка (НЭО) [2, 3]. В ее задачи входит отработка изделия в условиях, максимально приближенных к условиям эксплуатации и доведение его систем до полного соответствия требованиям технического задания. Как известно, антенно-фидерные устройства (АФУ) являются ключевыми элементами КА, обеспечивающими выполнение им своего целевого назначения. Поэтому очевидную важность представляет точное определение радиотехнических характеристик (РТХ) АФУ, и в частности антенн, поскольку они определяют потенциал радиолинии в целом. Во время проведения НЭО антенн проводятся как проверки прочностных характеристик конструкции изделий на воздействие различных видов нагрузок, таких как ударные, термовакуумные, вибрационные, акустические [4] и др., так и проверки на работоспособность по целевому назначению. К последним можно отнести измерения РТХ антенн. Объем измерений определяется тактико-техническими требованиями и теми задачами, которые будут решаться антеннами впоследствии.

К числу наиболее важных характеристик и параметров, которые проверяются на большинстве антенн КА, относятся:

- амплитудные и фазовые диаграммы направленности (ДН);
- коэффициент эллиптичности (КЭ) для антенн с круговой и эллиптической поляризацией и угол наклона поляризационного эллипса;

- ширина ДН по уровням минус 3 и минус 10 дБ;
- уровни боковых лепестков (УБЛ);
- кросс-поляризационная развязка (КПР) и уровни кросс-поляризации (УКП);
- направление отклонения электрической оси ДН;
- коэффициент направленного действия (КНД);
- коэффициент усиления (КУ) и др.

Под технологическими факторами, исследованию которых посвящена диссертация, понимаются те факторы, которые оказывают влияние на результаты измерений РТХ бортовых антенн КА на этапе НЭО. К данным факторам следует относить технологические особенности изготовления антенн, в том числе выполненных из композитных материалов [5 , 6], влияние технологических оснасток при проведении измерений [7 , 8], использование различных измерительных средств [9 – 12], а также особенности методик проведения радиотехнических измерений [13 – 18], которые являются частью НЭО антенн.

Актуальность темы исследования и степень её разработанности

Увеличению возможностей для потребителей услуг спутниковых информационных систем прямо пропорционально ужесточение требований к техническим характеристикам космических аппаратов и прежде всего к 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 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 начала прошлого века, современная их реализация активно развивается только в последние два десятилетия – с появлением современных векторных анализаторов цепей (ВАЦ), прецизионных позиционеров и высокопроизводительных электронно-вычислительных машин (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 РТХ 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 КУ в БЗ на плоскости, полученных посредством однопортового и двухпортового методов, на примере бортовой многолучевой антенны (МЛА) Q -диапазона, позволившим 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, 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.

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 в 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».

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 г.

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 автора

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 объем диссертации

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

1. ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧЕНИЯ АНТЕНН С ПОМОЩЬЮ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ

1.1 Обзор методов измерений

В настоящее время достаточно хорошо разработана и продолжает развиваться теория и техника измерений характеристик и параметров антенн. К наиболее известным методам измерений характеристик направленности антенн относятся: метод вышки (также: метод вращающейся антенны, наземный полигонный метод, метод дальней зоны) [19 – 22] метод перефокусировки [21, 23], облетный [20, 21], радиоастрономический [21, 24 – 26], комбинированный [27 – 29] амплифазометрический (так же часто называемый: голографическим, зондовым, ближнепольным, реконструктивным) [21, 30 – 51], коллиматорный [21, 53 – 58].

На современном этапе формируется тенденция к переходу от использования традиционных методов измерений в ДЗ к методам измерения на сокращенных расстояниях [59]. Это обусловлено тем, что усложняются конструкции антенных систем, повышается рабочая частота (что, в свою очередь, приводит к увеличению расстояния, которое удовлетворяет условию ДЗ), увеличивается число контролируемых параметров (поскольку, как правило, современные антенные системы должны обеспечивать частотное и поляризационное уплотнение информационных каналов), повышаются требования к помехозащищенности, чувствительности аппаратуры и в целом – точности измерений, растут требования к сокращению времени на отработку изделий и т.д. [60]. Как следствие, повышается спрос на разработку специальных помещений, таких как безэховые экранированные камеры (БЭК), в которых создаются необходимые температурно-влажностные режимы, обеспечивается необходимый класс чистоты и, разумеется, требуемый уровень экранировки и безэховости [61 – 63]. Реализация методов измерения на сокращенных расстояниях в БЭК позволяет практически исключить источники паразитного радиоизлучения, обеспечить высокую стабильность статистических измерений. Тем не менее, традиционные методы измерений антенн, такие как метод вышки, не утратили свою

актуальность и продолжают использоваться не только в закрытых помещениях, но и на открытых измерительных полигонах [64].

К другим тенденциям развития методов тестирования антенн относится освоение все более высоких частотных диапазонов, максимальная автоматизация процесса измерений, реализация программной постобработки измеренной информации, обеспечение безфазовых измерений распределения поля в БЗ антенны [65] и др.

Большое многообразие существующих методов измерений антенн можно в достаточно общем варианте представить в виде структуры, показанной на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Классификация современных методов измерений антенн

В данной диссертационной работе отражены результаты, полученные при помощи двух методов измерений, используемых в настоящее время на АО «ИСС». Первым является метод вышки в ДЗ (зоне Фраунгофера) на открытом полигоне в частотной области [15], а так же в БЭК как в частотной, так и во временной областях [11]. Вторым – амплифазометрический метод, в частности метод

измерений в БЗ на плоской поверхности сканирования как в частотной [5–12, 14, 16], так и во временной областях [13].

Метод вышки

Одним из первых доступных отечественных литературных источников является [19], в котором достаточно подробно рассматривается данный метод, и физически обосновываются условия для снижения методической погрешности при измерениях в ДЗ. Данный метод антенных измерений является наиболее распространенным, что обусловлено использованием минимального количества радиооборудования и относительной простотой его реализации. Исследуемая и вспомогательная антенны располагаются на расстоянии, удовлетворяющем условию ДЗ:

$$R \geq 2 \frac{D^2}{\lambda}, \quad (1.1)$$

где D – максимальный размер ИА (размер вспомогательной антенны часто не учитывается, т.е. предполагается что её размеры много меньше размеров ИА);

λ – рабочая длина волны.

При выполнении условия (1.1) разность фаз падающего электромагнитного поля не превышает в пределах апертуры ИА величины $22,5^\circ$ ($\pi/8$), при этом погрешность измерения КУ антенны по мощности не превышает 2% [19–21]. Угловое позиционирование ИА осуществляется посредством опорно-поворотного устройства (ОПУ). На протяжении радиолинии стараются максимально исключить влияние подстилающей поверхности за счет выбора ниспадающего рельефа или конфигурации измерительного полигона специальной формы [66]. Применяется данный метод как на открытых, так и в закрытых полигонах, если они обеспечивают необходимое взаимное удаление вспомогательной и ИА друг от друга. Данный метод обладает рядом существенных достоинств, таких как: возможность непосредственной регистрации амплитуды и фазы электромагнитного поля без проведения математических преобразований, относительная простота измерительной схемы и возможность оперативной настройки ИА, ограничиваясь измерением только нескольких сечений ДН.

Очевидными недостатками метода являются: невозможность корректного измерения достаточно крупноапертурных остронаправленных антенн (может потребоваться измерительный полигон, имеющий протяженность в десятки километров), отражения от подстилающей поверхности, влияние погодных условий, внешних помех, а также взаимная удаленность антенн, следствием чего является затрата временных, финансовых и человеческих ресурсов, необходимых для эксплуатации полигона.

Современные реализации метода вышки представлены АИВК ДЗ, использующие как времяимпульсное радиооборудование (в данном случае к наименованию комплекса добавляется словосочетание «сверхширокополосный» или, сокращенно, «СШП»), так и радиооборудование с монохроматическим излучением (частотное радиооборудование). В качестве времяимпульсного оборудования используются стробоскопические приемники и генераторы сверхкоротких импульсов. В частотном методе, когда измерительный полигон имеет относительно небольшую протяженность (длина кабелей позволяет обеспечить необходимый динамический диапазон), в качестве как генератора, так и амплифазометра (приемника), используются ВАЦ, а в случаях достаточно больших измерительных полигонов – используется внешний генератор гармонических сигналов.

Амплифазометрический метод

С середины прошлого века начали активно развиваться методы измерений на сокращенных расстояниях (расстояниях меньше расстояния до ДЗ) [47]. К данным методам относят амплифазометрический (измерения в ближней зоне излучения и зоне Френеля), комбинированный, коммутационный (для измерения РТХ фазированных антенных решеток), коллиматорный (метод с использованием компактного антенного полигона), метод моделирования и метод перефокусировки.

Амплифазометрический метод принципиально схож с методами оптической голографии. Отечественными корифеями в области амплифазометрических измерений являются: Бахрах Л.Д., Курочкин А.П., Захарьев Л.Н., Леманский А.А.,

Корбуков Г.Е, Цейтлин Н.М., Геруни П.М., Арутюнян Д.С. и другие. Авторским коллективом во главе с Л.Д. Бахрахом были разработаны и подробно описаны электродинамические основы трансформации поля из ближней зоны в дальнюю, а также теория и практика реализации метода измерения антенн в БЗ. Позднее Л.Н. Захарьевым были изложены принципы сферического и цилиндрического сканирования в БЗ. Авторами Д.С. Арутюняном и П.М. Геруни в 1978 году был разработан ГОСТ, посвященный методике измерений параметров остронаправленных антенн по полю в раскрыве [67].

Зарубежные авторы также внесли значительный вклад в развитие науки и техники методов измерений антенн на сокращенных расстояниях. Эффективная теория трансформации поля из ближней зоны в дальнюю на плоской поверхности сканирования впервые была предложена Д. М. Кернсом (D. M. Kerns) и Е. С. Дэйхофом (E. S. Dayhoff) из Национального бюро стандартов (National Bureau of Standards) [68]. Позже Д. М. Кернсом были разработаны алгоритмы коррекции влияния зондовой антенны [69, 70]. В течении ряда лет были сформулированы преобразования для сферической поверхности Ф. Дженсеном (F. Jensen) [71, 72] и Ф. Ларсеном (F. Larsen) [73] из Технического университета Дании (Technical University of Denmark). Теорию трансформации поля для цилиндрической поверхности развивали В. М. Личем (W. M. Leach) и Д. Т. Пэрисом (D. T. Paris) из Технологического института Джорджии (Georgia Institute of Technology) [74, 75]. Так же важно отметить многих других зарубежных ученых, внесших большой вклад в развитие науки и техники амплифазометрических измерений: Gregson S. F., McCormick J, Parini C [76, 77], Hansen J.E. [78], Balanis C.A. [79], Newell A.C. [80], Slater D. [81], Yaghjian A.D. [82] и другие. Особенно стоит отметить К. А. Баланиса (C.A. Balanis), чьи методики трансформации поля из ближней в дальнюю зону при измерениях на плоской поверхности используются в настоящее время во многих современных зарубежных предприятиях, специализирующихся на измерениях в БЗ, и А. К. Ньюэлла (A.C. Newell), подробно описавшего основные источники погрешностей при измерениях в БЗ на плоскости.

Суть амплифазометрических методов состоит в определении амплитуд и фаз тангенциальных (касательных) составляющих векторов напряженности электрического или магнитного полей на заданной поверхности в относительной близости от антенны. Затем осуществляются математические преобразования измеренных данных по алгоритмам, соответствующим виду поверхности сканирования, на которой проводились измерения. В качестве вспомогательной антенны участвует так называемая зондовая антенна (или просто – зонд), амплитуды и фазы сигнала от ИА измеряются посредством ВАЦ. На сегодняшний день предпочтительными являются поверхности сканирования на плоскости, на цилиндре и на сфере – в связи с относительной простотой реализации кинематических схем перемещения ЗА и относительной простотой математических алгоритмов (по сравнению с более сложными видами поверхностей сканирования). Кроме того, в последнее время в зарубежной литературе появились публикации по методам сканирования на спиральных поверхностях. Авторство данных способов измерений принадлежит Renato Cicchetti, Francesco D'Agostino, Flaminio Ferrara [83] и др. Данный вид измерительных поверхностей позволяет значительно сократить время измерений за счет меньшего количества тестовых точек, более короткой траектории перемещения зондирующей антенны, а также за счет специального алгоритма сбора измеренной информации. Однако на настоящий момент метод измерения на спиральных поверхностях не получил широкого распространения в нашей стране.

1.2 О зонах излучения антенны

В диссертации рассматривается частный случай амплифазометрических измерений: метод измерений в БЗ на плоской поверхности сканирования. Поэтому такие методы измерений на сокращенных расстояниях как коллиматорный, метод перефокусировки, метод моделирования и др. описываться не будут. Однако стоит уделить внимание следующему вопросу. В настоящее время в литературе нет единства мнений по поводу четкого разграничения по представлению электромагнитных полей в зоне Френеля и в БЗ. Современные авторы [29, 84] придерживаются разделения промежуточной области излучения

антенны на «ближнюю излученную зону» (или зону раскрыва антенны) и «зону Френеля», в то время как в советской литературе данного разграничения не проводилось [21] и говорилось о единой «промежуточной зоне», включающей как излученное ближнее поле, так и поле зоны Френеля. В соответствии с этим и выражения для нижней границы зоны Френеля определяется по-разному:

$$R_{\text{фр}} \geq 0,6D\sqrt{(D/\lambda)}, [29, 85]; \quad (1.2)$$

$$R_{\text{фр}} \geq 0,62(D^{3/2}/\sqrt{\lambda}), [51]; \quad (1.3)$$

$$R_{\text{фр}} \geq D^2/4\lambda, [66]; \quad (1.4)$$

$$R_{\text{фр}} \geq 0,5(D^{4/3}/\lambda^{1/3}), [86]; \quad (1.5)$$

$$R_{\text{фр}} \geq (D^2/10 \dots 20\lambda), [21]. \quad (1.6)$$

На основе литературных источников [29, 85] приведем пример значения ближней границы зоны Френеля для офсетной антенны с контурной ДН, диаметром 1590 мм, работающей на частоте 11,35 ГГц, рассматриваемой в подразделе 4.1 составит около 7,4 м. На основе источника [21] расстояние составит примерно 4,8 м, источника [51] – около 7,6 м, на основе источника [66] расстояние составит около 24 м, источника [86] – около 3,1 м. При проведении измерений антенн на АИВК БЗ подобные расстояния являются нецелесообразными, поскольку увеличение взаимного расстояния исследуемой и зондовой антенн приводит к увеличению области сканирования и значительному увеличению времени измерений, а также к возможному увеличению источников погрешности измерений. В связи с этим, в дальнейшем рассматривая процесс проведения измерений на плоской поверхности сканирования, будем иметь в виду, что расстояние от апертуры ЗА до апертуры ИА соответствует условию:

$$R_{\text{бз}} \approx 3..5\lambda \quad (1.7)$$

и измерения будут проводиться в области ближней излученной зоны (далее – ближней зоны). Разумеется, условие (1.7) не всегда реализуемо, ввиду особенностей конструктива ИА и, строго говоря, подходит преимущественно для рупорных антенн и фазированных антенных решеток. На рисунке 1.2

представлены антенны, измеряемые на АИВК БЗ на плоской поверхности сканирования.

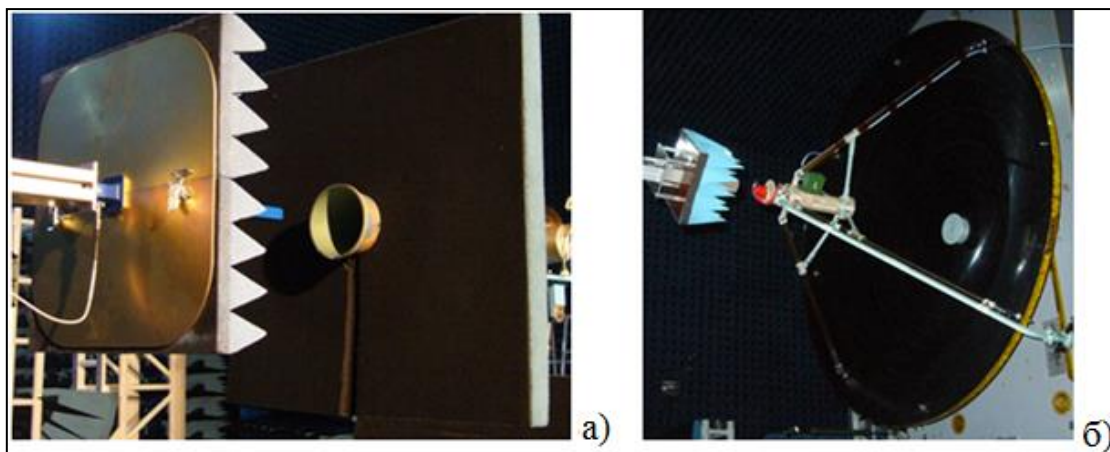


Рисунок 1.2 – Измерение на АИВК ближней зоны на плоскости: а) конической рупорной антенны, б) осесимметричной зеркальной антенны

Как видно из рисунка 1.2, апертура осесимметричной зеркальной антенны диаметром 1 м, работающей в *C*- (3,4 – 5,25 и 5,725–7,075 ГГц, $\lambda=0,088 – 0,057$ и $\lambda=0,052– 0,042$ м) и *Ku*- (10,70 – 12,75 и 12,75 – 14,8 ГГц, $\lambda=0,028 – 0,024$ м и $\lambda=0,024 – 0,02$ м) диапазонах частот [87], находится на расстоянии, превышающем условие (1.7). На данном рисунке расстояние составляет порядка 0,9 м. В связи с этим проведение исследований по влиянию различного расстояния на РТХ антенн КА при измерениях в БЗ являются актуальными.

В качестве резюме, отметим, что в современной литературе поля излучения антенн подразделяют на:

- Ближнюю реактивную зону или область индукции, расположенную в непосредственной близости от антенны, в которой поле имеет чисто реактивный характер. Физическая природа реактивных полей отличается быстрым убыванием их напряженности обратно пропорционально третьей степени расстояния [29].
- Ближнюю излученную зону, в которой на различном расстоянии наблюдается немонотонное изменение напряженности поля, другими словами начинаются флуктуации амплитуды электромагнитного поля.

Данная область простирается до нескольких геометрических размеров антенны [84].

- Промежуточную зону (зону Френеля). Область излучения антенны, в которой амплитуда напряженности электрического поля уже монотонно убывает обратно пропорционально увеличению расстояния. Однако ДН еще не сформирована окончательно, и с расстоянием ее форма изменяется.
- Дальнюю зону. Область, в которой амплитуда напряженности электрического поля убывает обратно пропорционально расстоянию, а форма ДН остаётся неизменной, наблюдается лишь угловая зависимость, не изменяющаяся для любого удаления от области, соответствующей условию (1.1).

Стоит отметить, что на сегодняшний день метод измерений параметров антенн в зоне Френеля, так же относящийся к амплифазометрическим методам измерения, стоит несколько обособленно от метода измерений в БЗ и реализуется в качестве так называемого метода измерений в зоне Френеля на разреженной сетке углов. Авторство данного способа измерений, принадлежит [88]. Метод обладает рядом преимуществ по сравнению с другими известными методами. В частности, при определенных условиях метод позволяет провести достаточно быструю настройку и предварительный анализ ДН достаточно крупноапертурных и высокочастотных антенных систем (рисунок 1.3 б) в пределах закрытого помещения, используя традиционные стенды для измерения РТХ антенн в ДЗ. В настоящее время развитию метода измерений на разреженной сетке углов посвящены работы Кривошеева Ю. В., Шишлова А. В., Тоболева А. К., Виленко И.Л., Инденбома М.В. и др. [86, 89 – 91]. В качестве иллюстрации потенциальных возможностей измерительных комплексов с реализацией алгоритмов пересчета поля из зоны Френеля на разреженной сетке углов в поле зоны Фраунгофера на рисунке 1.3 показаны зависимости максимальных размеров испытываемой антенны при фиксированном размере измерительного полигона [92, 93].

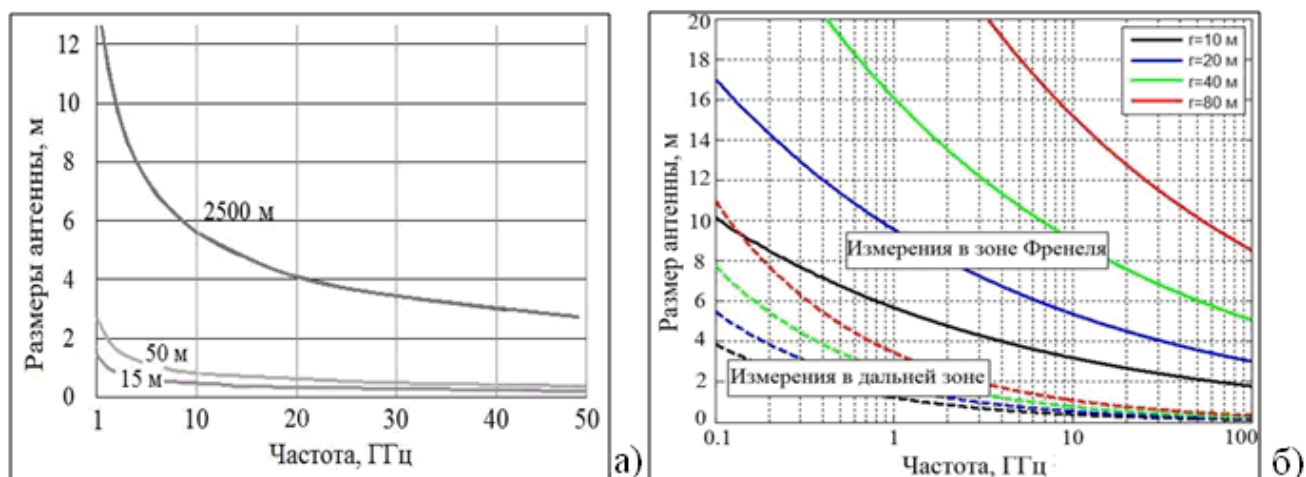


Рисунок 1.3 – а) Зависимость размера апертуры измеряемой антенны от частоты при фиксированном размере измерительного полигона на традиционных комплексах дальней зоны в АО «ИСС», б) Расширение возможностей измерительных комплексов дальней зоны в ПАО «Радиофизика». Пунктирные линии – измерения в дальней зоне, сплошные линии – измерения в зоне Френеля

Амплифазометрические методы позволяют избежать недостатков, которыми обладают традиционные методы измерений, а именно: обеспечить условия измерений внутри помещения (БЭЖ), в котором будет поддерживаться необходимый температурно-влажностный режим, тем самым исключив негативное влияние погодных условий, паразитных радиоисточников и увеличив статистическую повторяемость результатов измерений. Однако для реализации данного метода требуется создание специальных мехатронных позиционирующих систем – сканеров, а также специализированного программного обеспечения (ПО), осуществляющего управление механическими системами сканера, сбор и обработку измеренных данных, пересчет АФР в раскрыве антенны в комплексную ДН в ДЗ, расчет вторичных характеристик и параметров ДН ИА и т.д.

Примерно в один и тот же временной период вместе с методами измерения антенн на сокращенных расстояниях развивались наука и техника создания БЭЖ [94], позволившие обеспечить благоприятные условия проведения тестирования антенн. На сегодняшний день существуют различные измерительных системы и комплексы, предназначенные для высокоточной оценки РТХ излучающих систем,

проведения анализа на электромагнитную совместимость, а также измерения эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) объектов, реализуемых в БЭК [95 – 97].

1.3 Использование автоматизированных измерительно-вычислительных комплексов на АО «ИСС»

Автором был проанализирован многолетний опыт проведения измерений РТХ на АО «ИСС», на основании которого сформулированы актуальные задачи для исследования.

В технологических процессах АО «ИСС» в качестве рабочих мест для измерения РТХ антенн КА указываются как АИВК БЗ, так и АИВК ДЗ, однако проверка согласованности результатов измерений на данных комплексах исследована недостаточно. Поэтому в число актуальных задач входит подтверждение взаимозаменяемости этих измерительных комплексов.

Для сохранения конкурентного преимущества на рынке спутниковых услуг АО «ИСС» требуется не только использование новейшей измерительной техники, но и сокращение времени производства продукции. Для этого необходимо обеспечить максимальную эффективность эксплуатации измерительных приборов и комплексов. Как известно, на антеннах КА реализуются различные способы уплотнения информационных каналов, в том числе частотное и поляризационное уплотнение. Это означает, что облучатели зеркальных антенн КА имеют несколько портов, отличающихся как рабочей частотой, так и видом поляризации. Прежний опыт измерений на АО «ИСС» на АИВК БЗ показывает, что каждый отдельно взятый порт многопортовых ИА измерялся по последовательной схеме. Использование же многопортовых измерений (измерение параметров нескольких портов ИА за одно сканирование) в технологическом процессе на этапе отработки РТХ антенн КА на АИВК БЗ является решением задачи повышения производственной эффективности.

Так же важно отметить, что к особенностям бортовых антенн относится их плотная компоновка на корпусе КА. В литературных источниках по антенным измерениям достаточно много внимания уделено влиянию корпуса летательного

аппарата при реализации облетного метода измерений [98, 99], а так же влиянию корпуса малых КА на характеристики излучения слабонаправленных антенн [100 – 103]. Однако, недостаточно внимания уделяется оценке влияния корпуса КА на РТХ бортовых зеркальных антенн при измерениях в БЗ, в частности МЛА в перспективном высокочастотном Q -диапазоне (40 – 50 ГГц), что создает предпосылки для проведения дополнительных исследований.

Важно отметить, что на АО «ИСС» реализуется серийное производство многих антенн и антенных систем. Серийность обуславливается, во-первых, необходимостью отработки ряда изделий, предназначенных для различных этапов НЭО, таких как лабораторно-отрабочные испытания (ЛОИ), конструкторско-доводочные испытания, предварительные испытания и др. То есть изготавливается определенный перечень изделий с одинаковыми геометрическими параметрами, но, как правило, отличающимися технологической комплектацией и, иногда, используемыми материалами. С электродинамической точки зрения характеристики вышеназванных изделий практически не отличаются. Во-вторых, серийность обуславливается изготовлением ряда антенн для спутниковых систем (орбитальных группировок), состоящих из N -го количества одинаковых КА.

Еще одним важнейшим аспектом при производстве бортовых антенн КА на АО «ИСС» стало освоение и совершенствование технологии создания рефлекторов из композиционных материалов (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Рефлектор антенны C -диапазона с контурной диаграммой направленности, выполненный из композиционного материала

Технология производства данных рефлекторов описана в [6]. При изготовлении антенн указанного типа в некоторых образцах возникают повреждения при отделении рефлектора от формирующей оправки. Как правило, данные образцы бракуются и не используются при дальнейшем производственном процессе. Однако для этапа ЛОИ, на котором требования к изготавливаемым единицам значительно более мягкие, поврежденные изделия могут быть допущены к проведению производственного этапа при условии соответствия всех геометрических параметров требуемым. Как показала практика данный подход имеет место быть, в том числе и для антенн, работающих в K -диапазоне (18 – 26.5 ГГц) – все требования по РТХ выполняются. Однако в перспективном Q -диапазоне подобные проверки ещё не проводились.

Вышеуказанные обстоятельства подтверждают актуальность частных экспериментальных исследований в конкретных условиях на предприятии на конкретных рабочих местах, результаты которых представлены в данной диссертационной работе.

1.4 Роль ведущих отечественных предприятий в области антенных измерений

На сегодняшний день на отечественном рынке лидером по разработке и реализации АИВК является ООО «НПП «ТРИМ СШП Измерительные Системы» («ТРИМ»), г. Санкт-Петербург [104 , 105]. Предприятие осуществляет весь

комплекс работ по интеграции, пуско-наладке и сертификации АИВК различных типов. Компанией разрабатываются импульсные генераторы серии *TMG* и стробоскопические приемники серии *TMR* для реализации времяимпульсного метода антенных измерений и многое другое. Для объединения компонентов измерительных комплексов в единую систему – осуществляется разработка собственного ПО. Научные разработки предприятия активно публикуются и внедряются в практику [106 – 111]. Важно отметить, что разрабатываемые предприятием измерительные комплексы непрерывно совершенствуются как в аппаратной, так и в программно-алгоритмической части. Поскольку на АО «ИСС» большинство АИВК разработаны и внедрены компанией «ТРИМ», данные комплексы так же претерпевают модернизацию. В настоящее время важна верификация двух измерительных решений: 1) с использованием внешних СВЧ-смесителей и 2) с использованием волоконно-оптической линии передачи с фотодиодным и лазерным оптическими модулями.

ПАО «Радиофизика» [112], входящее в Концерн ПВО «Алмаз-Антей», является (помимо многих других радиотехнических направлений деятельности) одним из ведущих предприятий по производству и испытаниям сложнейших антенных систем. На предприятии находится одна из самых больших в Европе безэховых камер с размерами 80x32x24 м, в которой имеется возможность проведения антенных измерений различными методами в ближней, дальней и в зоне Френеля. Ведётся активная работа по совершенствованию метода измерений в зоне Френеля на разреженной сетке углов. Это нашло отражение в публикациях [86, 90 – 92].

В области метрологических аспектов антенных измерений специализируется ФГУП «ВНИИФТРИ» [113]. Помимо широчайшего спектра задач, решаемого предприятием в области обеспечения единства и точности электромагнитных измерений в целом, ФГУП «ВНИИФТРИ» занимается глубоким анализом процессов, происходящих в том числе при ближнепольных измерениях, разрабатываются методы повышения точности проведения измерений (уменьшения погрешности), такие как метод параметрической

фильтрации при обработке амплитудного распределения в БЗ, метод уменьшения погрешности измерений КУ за счет учета поправочных коэффициентов и др., совершенствуется база антенных эталонов, разрабатывается собственное программное обеспечение для измерений, обработки и анализа РТХ антенн и т.д. [114].

Однако, несмотря на активность публикаций и заметный прогресс в области метрологического обеспечения измерений в БЗ, существует проблема отсутствия современного государственного стандарта в области обеспечения единства измерений. Советский ГОСТ 8.309-78 «Антенны остронаправленные. Методика выполнения измерений для определения параметров по полю в раскрыве» [67], разработанный отечественными учеными в области антенной техники П.М. Геруни и Д.С. Арутюняном, на сегодняшний день не в полной мере соответствует современным требованиям, поскольку с момента создания ГОСТа произошли существенные изменения в возможностях электронно-вычислительных машин, автоматизации оборудования, технического уровня радиооборудования и др. Таким образом, можно сделать вывод о том, что на сегодняшний день метрологическое обеспечение измерений в БЗ не получило должного развития в России, и новых отечественных стандартов в данной области не появилось (автору известны лишь отраслевые стандарты ОСТ 4Г0.209.204-77 и ОСТ 4Г0.209.213-84), в то время как международные стандарты обновляются достаточно часто (например, IEEE 1720:2012 «IEEE Recommended Practice for Near-Field Antenna Measurements» [115]).

Поэтому для многих отечественных предприятий, в том числе и для АО «ИСС», использующих современные АИВК для измерения РТХ антенн и современное оборудование, входящее в их состав, необходимым является проведение внутренних исследований, посвященных верификации результатов измерений и исследованию мало освещенных в литературе практических аспектов.

В доступных публикациях, в том числе в публикациях вышеназванных ведущих отечественных предприятий, недостаточно внимания уделено следующим вопросам:

- Оценке влияния отклонения ЗА от нормали к поверхности сканирования;
- Результатам выбора шага сканирования, превышающего половину длины рабочей волны;
- Проведению многопортовых измерений МЛА в БЗ с использованием ВАЦ;
- Сравнению результатов измерения КУ с использованием частотного и времяимпульсного оборудования.

1.5 Погрешности измерений в ближней зоне на плоскости

Погрешности измерения РТХ антенн в БЗ подразделяют на три основных группы [29, 30]: инструментальные, методические и погрешности обработки. Наиболее общий анализ погрешностей при измерениях в БЗ на плоскости представлен в труде [80]. Основными погрешностями данного метода измерений являются:

1. Погрешности ограничения области измерения (она имеет конечные размеры и незамкнута);
2. Погрешности дискретизации (поле измеряется в дискретных точках и не может не отличаться от непрерывных распределений);
3. Погрешности измерения АФР (нестабильность генератора, флуктуации коэффициентов передачи в соединительных трактах, среднеквадратичное отклонение ЗА по нормали от плоскости измерений, погрешности позиционирования ЗА по горизонтали и вертикали, отличие измерительных координат для начальной и конечной частот при свипировании по частоте);
4. Погрешности, обусловленные отличием ДН ЗА от изотропной, измерения в различных точках плоскости сканирования происходят в неэквивалентных условиях.

Метрологические характеристики АИВК, используемых при проведении экспериментальных исследований, приведены в Приложение Г.

1.6 Восстановление диаграмм направленности по измерениям в ближней зоне на плоскости с помощью частотного и времяимпульсного оборудования

В диссертации при обработке результатов измерений использовались программно-алгоритмические комплексы, разработанные компанией «ТРИМ». Отметим их общие положения.

Как правило, планарное сканирование используется для измерения антенн, КУ которых, по некоторым оценкам, превышает 15 дБ [116]. Для антенн такого типа характерна локализация излучаемого поля на некоторой плоскости вблизи апертуры.

Для восстановления поля излучения в ДЗ по полю, измеренному на плоскости в БЗ, достаточно знать распределение тангенциальной (касательной) составляющей только одного вектора поля – электрического или магнитного, измеренного ЗА, реагирующей на соответствующую компоненту.

Измерения проводятся, в декартовой системе координат, для чего ЗА устанавливается на механизме с двумя взаимно перпендикулярными прямолинейными направляющими (X и Y). Исследуемая антенна устанавливается стационарно и юстируется относительно плоскости сканирования.

Значения поля фиксируются в узлах прямоугольной сетки с соответствующими интервалами вдоль каждого из направлений. На рисунке 1.5 приведена схема перемещения T -сканера, реализующего плоскую поверхность сканирования в декартовой системе координат, а также результаты измерений АФР на плоскости.

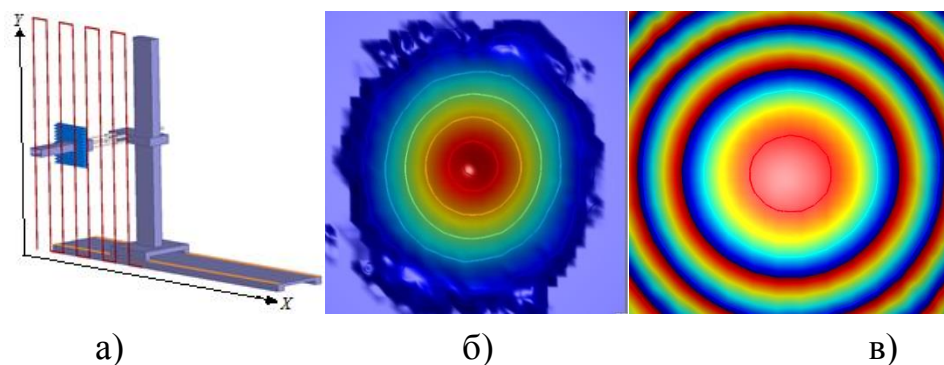


Рисунок 1.5 – Перемещение зондовой антенны при планарном сканировании (а), пример измерений амплитудного (б) и фазового (в) распределений ближнего поля

Минимальные размеры области сканирования зависят от размера антенны, расстояния от апертуры ЗА до апертуры ИА, а также от угла в котором необходимо восстановить ДН [51]:

$$L > D + 2h \cdot \operatorname{tg} \theta_{\max} \quad (1.8)$$

где D – максимальный размер исследуемой антенны; h – расстояние от плоскости сканирования до апертуры антенны; θ_{\max} – максимальный требуемый угол восстановления ДН.

На рисунке 1.6 представлено схематическое изображение, поясняющее выражение (1.8).



Рисунок 1.6 – Схематическое представление исследуемой антенны и плоскости сканирования, поясняющее выражение (1.8)

В руководстве по эксплуатации для АИВК компании «ТРИМ» [116], а также в других авторитетных источниках [51] максимальный угол восстановления ДН по измерениям в БЗ на плоскости составляет не более 60 – 70°.

В общем случае (для антенн с произвольной поляризацией) измерения проводятся при горизонтальной и вертикальной ориентации вектора \vec{E} ЗА. Тогда для каждого n, m -го положения ЗА формируется два сигнала S_{nm}^x, S_{nm}^y . Данный набор комплексных чисел описывает АФР поля на плоскости в БЗ антенны. АФР связано с компонентами поля в ДЗ преобразованием Фурье (ПФ). Поскольку в процессе измерения ближнего поля ИА формируется набор дискретных данных, проводится переход от обычного ПФ к быстрому преобразованию Фурье (БПФ) (1.9):

$$S_{kl} = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} S_{nm} \exp \left[j2\pi \left(\frac{nk}{N} + \frac{ml}{M} \right) \right], \quad (1.9)$$

где S_{nm} – модуль комплексных амплитуд, $k=0, \dots, N-1$; $l=0, \dots, M-1$, (N, M – число сигналов, измеренных по координатам X и Y).

Полученный после двумерного БПФ массив комплексных чисел S_{kl} определяет распределение вертикальной или горизонтальной компоненты поля в ДЗ в координатах пространственных частот u, v , которые связаны с координатами азимута (A) и угла места (E) соотношениями:

$$u = \sin A \cos E; \quad (1.10)$$

$$v = \sin E, \quad (1.11)$$

Шаг между отсчетами спектральной функции $S(u, v)$ в координатах пространственной частоты:

$$\Delta u = \lambda / L_x, \quad \Delta v = \lambda / L_y, \quad (1.12)$$

где L_x, L_y – размер области измерения распределения поля по координатам X и Y ;

В случае антенн с эллиптической поляризацией измеряются две ортогональные составляющие распределения ближнего поля и, соответственно, вычисляются две спектральные функции $S_x(u, v), S_y(u, v)$. Затем от спектров Фурье распределения поля на плоскости S_x, S_y осуществляется переход к тангенциальным составляющим поля в ДЗ E_h, E_e :

$$\begin{aligned} E_A(u, v) &= \sqrt{1-u^2-v^2} S_x(u, v); \\ E_E(u, v) &= \sqrt{1-u^2-v^2} S_y(u, v). \end{aligned} \quad (1.13)$$

Функции (1.12) описывают распределение тангенциальных компонент поля в координатах пространственных частот (u, v). Переход к координатам "азимут – угол места" (A, E) осуществляется на основе соотношений (1.10) и (1.11) путем двумерной интерполяции:

$$E_{A,E}(u, v) \rightarrow E_{A,E}(A, E). \quad (1.14)$$

Диаграмма направленности ЗА определяется путем предварительных измерений и учитывается на этапе обработки [69]. Коррекция осуществляется путем деления ДН ИА на ДН ЗА (в логарифмическом масштабе – вычитания) (справедливо для случая пренебрежения кросс-поляризацией ЗА) [81]:

$$F_0(\theta, \varphi) = \frac{F(\theta, \varphi)}{F_p(\theta, \varphi)}, \quad (1.15)$$

где $F_p(\theta, \varphi)$ – нормированная ДН ЗА.

В диссертационной работе все приведенные ДН, измеренные на АИВК БЗ, если это специально не оговаривается, рассчитаны с учетом ДН ЗА.

В отличие от методов, основанных на использовании гармонических сигналов с фиксированными амплитудами и на регистрации амплитудных и фазовых соотношений, которые называются методами исследования в частотной области, методы измерений, основанные на воздействии импульсных сигналов и на регистрации мгновенных значений импульсной реакции объекта, относятся к методам исследований во временной области [117]. Основным достоинством методов измерения во временной области является то, что регистрация сигналов на выходе ИА осуществляется только на определенном отрезке времени, называемым временным окном, позволяющее осуществить селекцию паразитных сигналов. Размер временного окна выбирается таким образом, чтобы в его границах находился полезный сигнал, а вне окна – сигналы, отраженные от окружающих предметов (стены, пол, потолок, и т.д.) [108].

Особенностью применения СШП АИВК БЗ с точки зрения обработки сигналов является то, что при соответствующем выборе параметров сверхкороткого импульса (СКИ) за одну измерительную итерацию можно получить характеристики антенны в заданном диапазоне частот и провести анализ на любой требуемой частоте. Другими словами, для каждого m , n -го положений ЗА измеряются сигналы $S_x(t)$, $S_y(t)$. Затем для каждого сигнала $S_{m,n}(t)$, вычисляется его комплексный спектр $W_{m,n}(\omega) = \text{FFT} \{S_{m,n}(t)\}$. Этот набор комплексных чисел описывает АФР поля на плоскости вблизи раскрыва антенны на конкретной частоте.

К особенностям обработки комплексных спектров сигналов во временной области так же относится использование расширенного преобразования Фурье и сглаживающих временных функций: Ханна, Хэмминга, Ланцоша, Блэкмана или Каппелини [118]. После вычисления комплексных спектров $W_{m,n}(\omega)$ алгоритмы обработки сигналов не отличаются от алгоритмов, используемых в узкополосных измерительных комплексах.

В качестве заключительного слова к данному подразделу важно отметить, что в настоящее время не имеется сведений о четко формализованном выборе размеров временного окна при измерениях времяимпульсным методом. Поэтому важность проведения экспериментальных исследований в части взаимной верификации как частотного, так и времяимпульсного метода измерений не вызывает сомнений.

1.7 Методика измерений радиотехнических характеристик антенн на автоматизированных комплексах дальней зоны

Метод ДЗ позволяет проводить наиболее оперативную (в пределах нескольких минут, в зависимости от размера и рабочей частоты ИА) оценку характеристик направленности антенн, проводя измерения только в главных сечениях ДН. В то же время, современная реализация измерительного полигона на базе АИВК позволяет проводить объемные измерения ДН и на основе измеренных данных рассчитывать следующие характеристики:

- КУ и КНД антенн;
- измерения поляризационных характеристик (ПХ) (КЭ, угла наклона оси поляризационного эллипса и направления вращения вектора поляризации);
- различные параметры ДН, такие как направление отклонения электрической оси ДН, ШДН по различным уровням и т.д.

Современные АИВК ДЗ отличаются использованием приемных и передающих устройств, работающих в широкой полосе частот, имеющих высокий динамический диапазон и, в целом, расширенный функционал; прецизионных позиционирующих устройств (точность углового шага ок. $\pm 0,01^\circ$); системой синхронизации по сигналу GPS/ГЛОНАСС, позволяющей синхронизировать по времени работу генератора и приемника, находящихся на большом удалении; беспроводной системой дистанционного управления ОПУ вспомогательной антенны; многофункциональным ПО, позволяющим организовать управление всеми основными составляющими измерительного комплекса с рабочего места оператора, а также провести обработку, анализ и обеспечить графическое представление измеренной информации. Упрощенная структурная схема ПО для АИВК ДЗ представлена на рисунке 1.7.

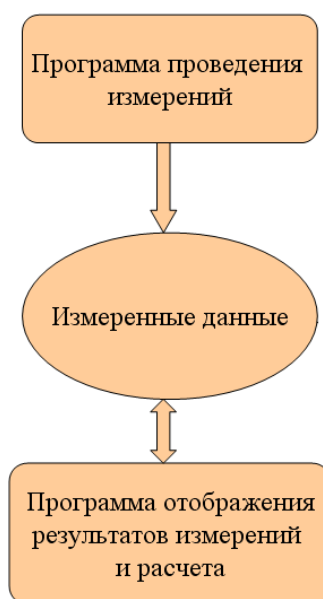


Рисунок 1.7 – Упрощенная структурная схема программного обеспечения автоматизированного измерительно-вычислительного комплекса дальней зоны

При работе с помощью частотного (монохроматического) оборудования в ходе измерений накапливается массив измерительной информации в виде значений комплексного коэффициента передачи $\dot{S}(\omega, \theta)$ на заданных частотах. Затем для требуемой частоты ω_k определяется максимальное значение $\dot{S}(\omega_k, \theta_0)$, соответствующее направлению главного максимума θ_0 и проводится вычисление нормированной ДН в требуемом представлении (как правило, в логарифмическом масштабе):

$$F(\omega_k, \theta) = 10 \log \frac{\left| \dot{S}(\omega_k, \theta) \right|^2}{\left| \dot{S}(\omega_k, \theta_0) \right|_{\max}^2}. \quad (1.16)$$

Для измерения объемных ДН тип используемого ОПУ определяет систему координат (Азимут – Крен (θ, φ) , Азимут над Углом места (A, E) , Угол места над Азимутом (α, β) и т.д.). Составляющие ДН при необходимости пересчитываются из одной системы координат в другую:

$$\begin{aligned} \sin(\theta) \cos(\varphi) &= \sin(A) \cos(E) = \sin(\alpha); \\ \sin(\theta) \sin(\varphi) &= \sin(E) = \cos(\alpha) \sin(\beta); \\ \cos(\theta) &= \cos(A) \cos(E) = \cos(\alpha) \cos(\beta). \end{aligned} \quad (1.17)$$

Объемная ДН рассчитывается как модуль векторной суммы ДН, измеренных для отдельных ортогональных компонент поля. Для системы координат (θ, φ) :

$$F(\theta, \varphi) = \sqrt{F_\theta^2(\theta, \varphi) + F_\varphi^2(\theta, \varphi)}. \quad (1.18)$$

Параметры поляризационного эллипса определяются соотношением амплитуд и фаз гармонических сигналов на ортогональных поляризациях [119]. Положим, что сигналы $\dot{S}(\omega, \theta)_1$ и $\dot{S}(\omega, \theta)_2$ соответствуют вертикальной и горизонтальной поляризации вспомогательной антенны. Тогда КЭ рассчитывается следующим образом:

$$K_s = \frac{1 + \left(\frac{|\dot{S}(\omega, \theta)_2|}{|\dot{S}(\omega, \theta)_1|} \right)^2 - \sqrt{1 + 2 \left(\frac{|\dot{S}(\omega, \theta)_2|}{|\dot{S}(\omega, \theta)_1|} \right)^2 \cdot \cos(2 \cdot \arg(\dot{S}(\omega, \theta)_{21})) + \left(\frac{|\dot{S}(\omega, \theta)_2|}{|\dot{S}(\omega, \theta)_1|} \right)^4}}{2 \cdot \left(\frac{|\dot{S}(\omega, \theta)_2|}{|\dot{S}(\omega, \theta)_1|} \right) \cdot \sin(\arg(\dot{S}(\omega, \theta)_{21}))} \quad (1.19)$$

В случае использования времяимпульсного оборудования методика измерений ДН антенн в ДЗ основывается на формировании и излучении в пространство СКИ, с последующим откликом на него ИА при различных углах ее ориентации. На выходе ИА формируются импульсные сигналы:

$$S_{i,j} = S_{i,j}(t, A_i, E_j, p_k), \quad (1.19)$$

где t – текущее время; A_i – i -тый азимутальный угол; E_j – j -тый угломестный угол; p_k – k -тый угол поляризации.

Затем сигналы $S_{i,j}$ оцифровываются и запоминаются в памяти ЭВМ.

Для расчёта комплексной ДН ИА выполняется операция быстрого преобразования Фурье над измеренными данными:

$$S_{i,j}(j\omega, A_i, E_j, p_k) = \text{FFT}(S_{i,j}(t, A_i, E_j, p_k)), \quad (1.20)$$

где $\text{FFT}\{\bullet\}$ – символ операции быстрого преобразования Фурье (Fast Fourier Transform).

В качестве итога данного подраздела важно отметить следующее: не смотря на все достоинства современных АИВК ДЗ, связанные с автоматизацией сбора большого количества измерительных данных и последующего расчета многих вторичных параметров важно учитывать особенности данных комплексов, а именно: корректную предварительную подготовку к измерениям. Стоит также отметить, что в руководстве по эксплуатации производителем учтены не все особенности работы АИВК ДЗ на АО «ИСС».

1.8 Выводы по главе

На основании проведенного аналитического обзора можно сделать заключение о том, что исследование актуальных факторов технологического процесса, таких как методические аспекты антенных измерений на АИВК, технологические особенности антенн КА при измерении их радиотехнических

характеристик, использование различных измерительных средств, использование многопортовых измерений и др., влияющих на результаты измерений РТХ антенн КА, является актуальной задачей. Актуальность подтверждается несколькими причинами, к которым в частности относятся:

- старение ГОСТа по методам измерений в БЗ;
- недостаточная освещенность в литературе ряда вопросов, посвященных:
 - оценке влияния отклонения ЗА от нормали к поверхности сканирования на восстановление амплитудной ДН;
 - результатам выбора шага сканирования, превышающего половину длины рабочей волны;
 - проведению многопортовых измерений МЛА в БЗ с использованием ВАЦ;
 - сравнению результатов измерения КУ с использованием частотного и времяимпульсного оборудования;
 - измерению характеристик направленности антенн методом БЗ на расстояниях, превышающих верхнюю границу ближнего излученного поля.

Таким образом, по результатам аналитического обзора была сформулирована цель диссертационного исследования – провести экспериментальную оценку влияния актуальных факторов производственного процесса антенн КА на результаты измерений их РТХ, дать рекомендации по минимизации их влияния, а также выявить практические методы, позволяющие повысить эффективность процесса измерений.

Для достижения сформулированной цели были поставлены следующие задачи:

- Провести экспериментальную оценку влияния на результаты измерений факторов, связанных с методическими аспектами антенных измерений, заложенных в основу технологических процессов в АО «ИСС»;

- Исследовать влияние на результаты измерений факторов, связанных с технологическими особенностями антенн КА при измерении их радиотехнических характеристик;
- Сравнить результаты измерений РТХ антенн КА, полученных посредством использования различных измерительных средств;
- Провести экспериментальную оценку сокращения времени измерения за счет использования многопортовых измерений и увеличения шага ближнепольного сканирования.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОРПУСА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕМОНТА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРАВЛЕННОСТИ БОРТОВЫХ АНТЕНН

В разделе рассматриваются задачи по экспериментальному определению влияния корпуса космического аппарата, а также технологического стенда на характеристики направленности многолучевой антенны, работающей в перспективном Q -диапазоне при измерениях на автоматизированном измерительно-вычислительном комплексе ближней зоны. Результаты измерений антенны, установленной на корпусе КА, а также антенны, установленной на технологическом стенде, сопоставляются с результатами численного моделирования. Исследование проводилось применительно для одного из облучателей, находящегося в непосредственной близости от корпуса космического аппарата.

Кроме того, проведено экспериментальное исследование влияния технологического ремонта на характеристики направленности офсетной зеркальной антенны Q -диапазона. Результаты измерений антенны, прошедшей технологический ремонт, сопоставляются с результатами измерений антенны, не имеющей повреждений.

На основе приведенных в разделе результатов сформулировано первое научное положение, выносимое на защиту диссертационной работы.

Материалы раздела опубликованы в работах [5, 8].

2.1 Оценка влияния корпуса космического аппарата на характеристики направленности многолучевой антенны Q -диапазона

В подразделе представлены результаты измерений амплитудных ДН для одного из облучателей МЛА офсетного типа [120 , 121], работающей в перспективном Q -диапазоне частот [122 , 123]. Выбранный облучатель конструктивно расположен ближе остальных к антенной панели. Анализ результирующих характеристик направленности МЛА, формируемых именно этим облучателем, обусловлен тем, что он создаёт наибольший уровень облучения антенной панели, а, следовательно, наблюдается и наибольший вклад в

итоговое АФР что, в свою очередь, представляет наибольший интерес для исследования.

Офсетная (неосесимметричная) схема построения параболической антенны является одной из наиболее востребованных в сфере производства КА. Зачастую, для создания сложной контурной зоны обслуживания, имеющей высокую энергетику сигнала, офсетная схема построения зеркальной антенны усложняется за счет увеличения количества излучателей и, таким образом, преобразуется в МЛА.

На этапе радиотехнических испытаний на АО «ИСС» антенны устанавливаются как на специализированные технологические стенды (автономные испытания), так и на антенные панели, изготовленные из трёхслойной сотовой конструкции (сотопанель) [124], являющиеся корпусом будущего КА или его имитирующие.

Оценка влияния как технологических стендов, так и сотопанелей на РТХ тестируемых изделий при измерении в БЗ является актуальной задачей. В особенности это важно для антенн, построенных по многолучевой схеме, поскольку значительная часть СВЧ-энергии от излучателей, находящихся на некотором отдалении от фокуса зеркала (в неоптимальном положении), попадает на поверхность сотопанели, вследствие чего имеет место отраженный сигнал, искажающий АФР и, как следствие, результирующую ДН антенны. В данном подразделе рассмотрены сравнительные результаты измерений МЛА Q -диапазона на этапе ЛОИ, установленной на технологическом стенде, а также на сотопанели. Геометрические параметры исследуемой антенны: диаметр 600 мм, фокусное расстояние 1200 мм, угол офсета $23,53^\circ$.

На рисунке 2.1 показано схематическое изображение ИА, расположенной на технологическом стенде, предназначенном для определения наилучшего взаимного положения облучателя и рефлектора с целью получения наиболее оптимальных РТХ. Металлические поверхности стенда и сканера укрыты пирамидальным радиопоглощающим материалом (РПМ) *WAVASORB VHP-18* бельгийской фирмы Emerson&Cuming. Рефлектор и облучатель установлены на

специализированные устройства – гексаподы, предназначенные для прецизионной юстировки взаимного положения элементов антенны.

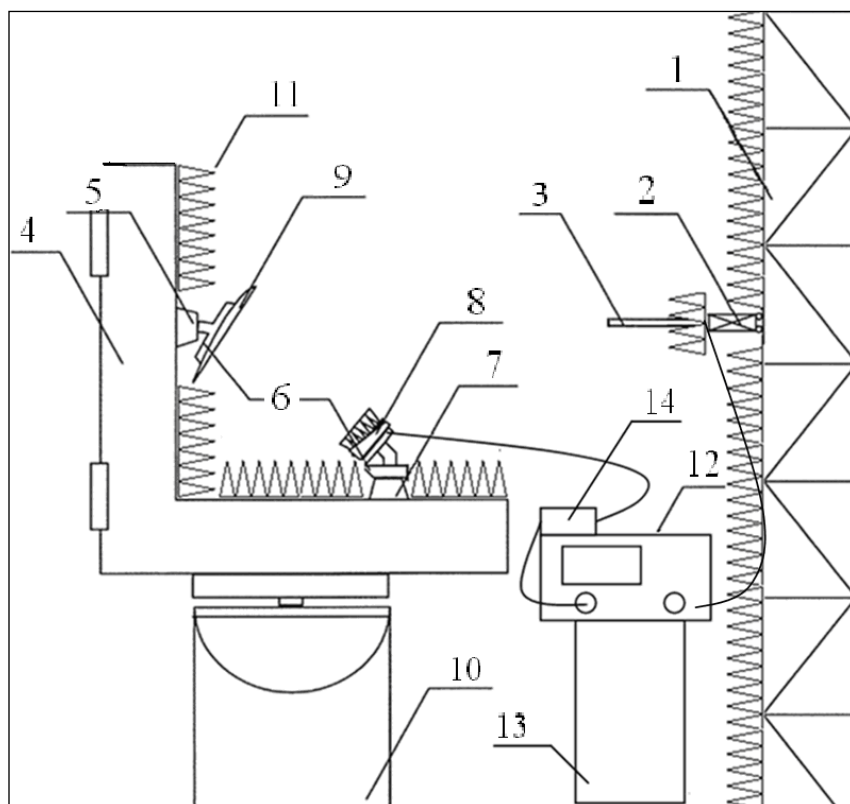


Рисунок 2.1 – Исследуемая антенна на технологическом испытательном стенде:

1– вертикальный сканер; 2– устройство перемещения зондовой антенны; 3 – зондовая антенна; 4 – технологический стенд для измерения РТХ; 5, 7 – гексапод; 6 – устройства крепления антенны на гексаподах; 8 – облучатель антенны; 9 – рефлектор антенны; 10 – ОПУ; 11– РПМ; 12– ВАЦ; 13 – вспомогательная оснастка; 14 – СВЧ-усилитель

Антенны, установленные на сотовые панели КА, показаны на рисунке 2.2. Приведены три идентичные антенны в соответствии со штатной комплектацией. В диссертации отражены результаты измерений одного облучателя МЛА, расположенного ближе остальных к антенной панели. Рефлекторы антенн укрыты радиопрозрачной полиимидной пленкой (каптоном) с напылением из германия и оксида индия, защищающей его от воздействия экстремальных условий космического пространства, способных вывести из строя радиоэлектронную аппаратуру КА (рефлекторы антенн, измеряемых на технологических стендах,

каптоном не укрываются). В диссертации не рассматривается непосредственное влияние защитной пленки на РТХ антенны при данных конкретных условиях. В [125] подробно описываются используемые материалы радиопрозрачных пленок и их характеристики. Показано, что потери радиоизлучения составляют не более 0,02 дБ, что позволяет считать материал пленки в достаточной степени радиопрозрачным.

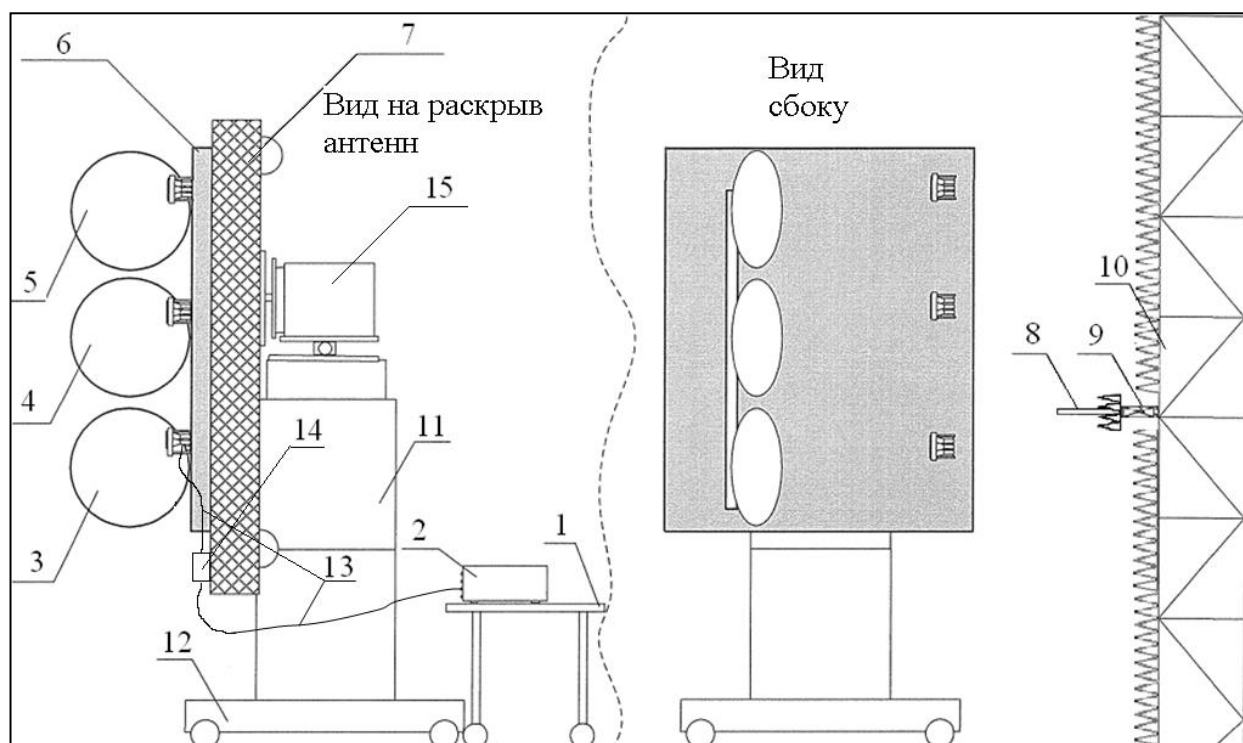


Рисунок 2.2 – Исследуемая антенна на панели КА: 1 – приборный стол; 2 – ВАЦ; 3,4,5 – измеряемые антенны; 6 – антенная панель; 7 – технологическая подставка; 8 – зондовая антенна; 9 – каретка зонда; 10 – вертикальный сканер; 11 – технологическая подставка; 12 – технологическая перекатная платформа; 13 – СВЧ-кабели; 14 – СВЧ-усилитель; 15 – ОПУ ORBIT AL-4572-1.

На рисунках 2.3 и 2.4 показаны сечения измеренных, а также теоретических (расчетных) ДН в азимутальной и угломестной плоскостях. Диаграммы направленности искусственно смещены в нулевое осевое направление для удобства их анализа. Теоретические ДН получены на основе моделей,

построенных в программе GRASP компании TICRA (модель не учитывает наличия панели вблизи антенны).

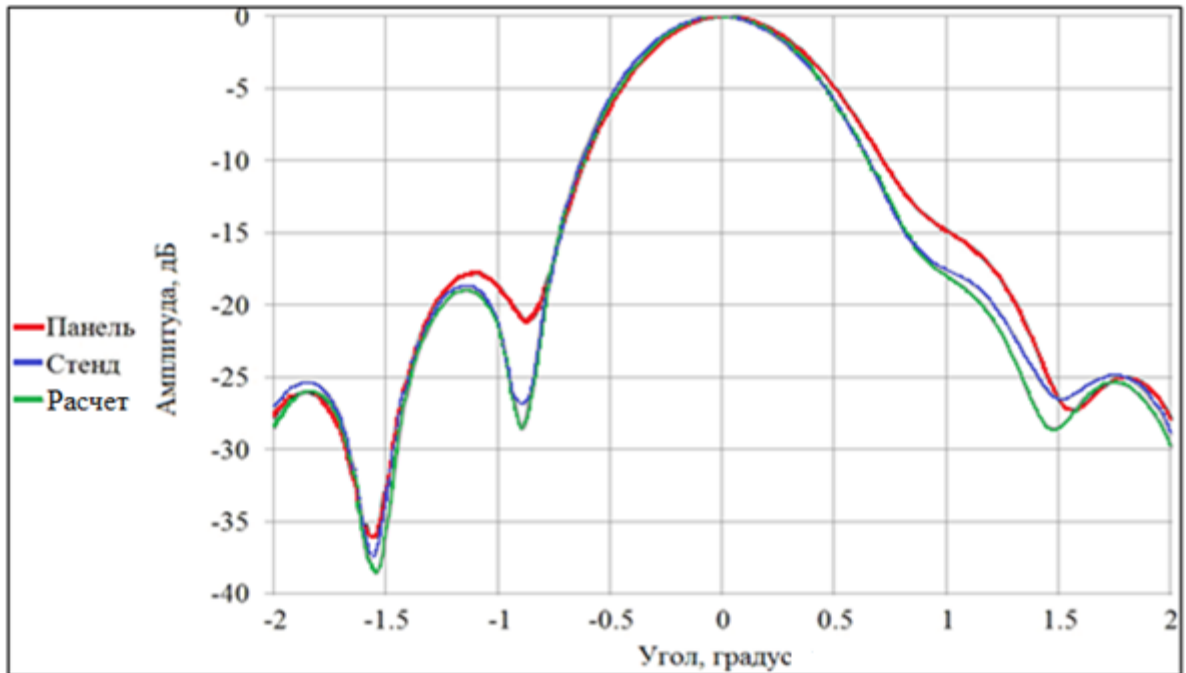


Рисунок 2.3 – Нормированные амплитудные ДН в логарифмическом масштабе на нижней частоте рабочего диапазона. Азимутальная плоскость

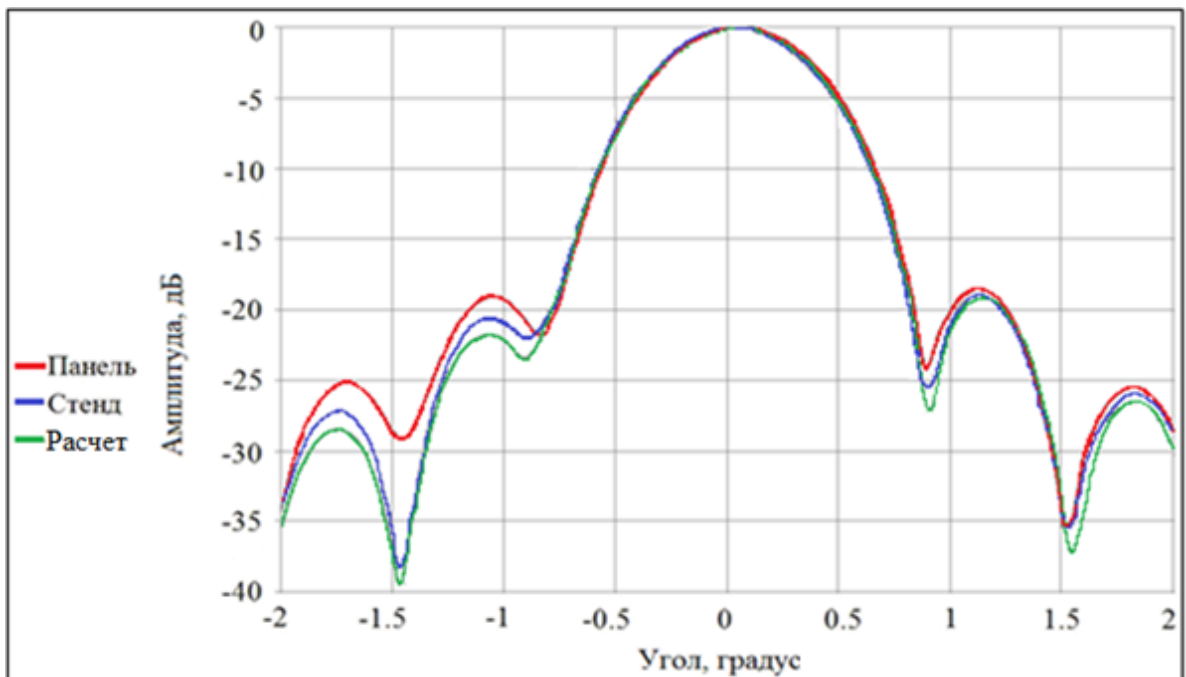


Рисунок 2.4 – Нормированные амплитудные ДН в логарифмическом масштабе на нижней частоте рабочего диапазона. Угломестная плоскость

Ниже приведены таблицы с характеристиками направленности ИА, такими как КНД, уровень 1-го бокового лепестка ДН (УБЛ), ШДН по уровню минус 3 дБ, в плоскостях азимута (Аз) и угла места (УМ) на нижней (f_H) и верхней (f_B) частотах рабочего диапазона (таблицы 2.1 – 2.3).

Таблица 2.1 – Характеристиками направленности ИА на антенной панели

Частота\параметр	КНД, дБ	УБЛ, дБ		ШДН, град.	
		Аз	УМ	Аз	УМ
f_H	48,17	-14,6	-18,8	0,753	0,720
		Аз	УМ	Аз	УМ
f_B	48,33	-15	-18,5	0,739	0,705
		Аз	УМ	Аз	УМ

Таблица 2.2 – Характеристиками направленности ИА на технологическом стенде

Частота\параметр	КНД, дБ	УБЛ, дБ		ШДН, град.	
		Аз	УМ	Аз	УМ
f_H	48,36	-17,3	-18,9	0,737	0,717
		Аз	УМ	Аз	УМ
f_B	48,47	-17	-19	0,730	0,705
		Аз	УМ	Аз	УМ

Таблица 2.3 – Характеристиками направленности теоретической модели

Частота\параметр	КНД, дБ	УБЛ, дБ		ШДН, град.	
		Аз	УМ	Аз	УМ
f_H	48,3	-17,8	-19,2	0,735	0,72
		Аз	УМ	Аз	УМ
f_B	48,4	-17,5	-19,3	0,732	0,7
		Аз	УМ	Аз	УМ

В результате анализа полученных данных можно сделать следующие выводы. Измеренные характеристики направленности антенны на технологическом стенде, укрытом высокоэффективным пирамидальным РПМ (относительный уровень отраженной мощности имеет порядок -50 дБ по нормали к направлению распространению волнового фронта), имеют высокую степень согласованности с теоретическими ДН. Наличие антенной панели оказывает заметное влияние на 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 по сравнению с измеренным на технологическом стенде при погрешности измерений амплитудной ДН АИВК БЗ не более 0,3 дБ. Ширина диаграммы направленности 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. КНД в осевом направлении антенны, вблизи которой находится технологическая сотопанель, ниже в среднем по диапазону на 0,15 дБ по сравнению с измеренным на технологическом стенде. Вышеуказанные обстоятельства следует учитывать при проектировании бортовых антенн КА. Необходимо создавать наиболее полные теоретические модели для электромагнитного анализа, учитывающие все элементы конструкции антенной системы, такие как сотопанель, кронштейны для крепления рефлекторов и другие вторичные источники излучения, потенциально способные повлиять на результирующие РТХ антенны.

2.2 Анализ влияния технологического ремонта на характеристики направленности офсетной антенны Q-диапазона

В данном подразделе оценивалась возможность использования рефлекторов, выполненных из композитного материала и прошедших технологический ремонт, на этапе лабораторно-отрабочных испытаний радиотехнических характеристик в перспективном Q-диапазоне радиочастот.

Рефлектор офсетной зеркальной антенны Q-диапазона изготовлен из препрега *M55J/EX1515* методом вакуумного формования. Внешний вид рефлектора представлен на рисунке 2.5, где отчетливо видны неоднородности поверхности, представляющие собой трещины и расслоения структуры рефлектора, заполненные клеем ВК-9 с углеродом техническим К359 для устранения отклонений профиля от заданного требованиями технического задания. В процессе производства рефлекторов из композитных материалов

подобные неоднородности возникают при отделении рефлектора от формирующей оправки.

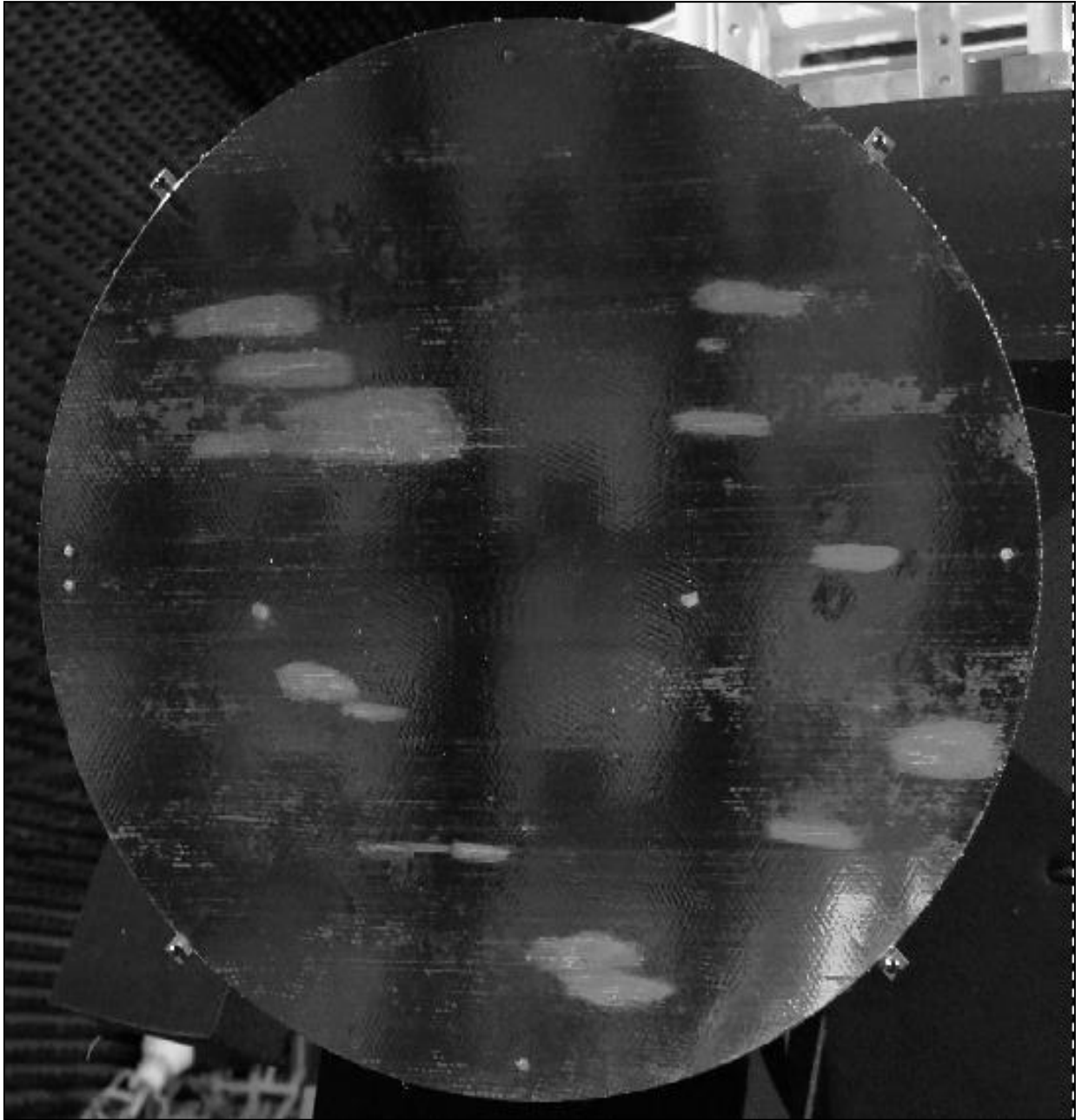


Рисунок 2.5 – Внешний вид рефлектора с неоднородностями поверхности

На рисунке 2.6 приведены результаты сканирования поверхности рассматриваемого рефлектора на контрольно-измерительной машине.

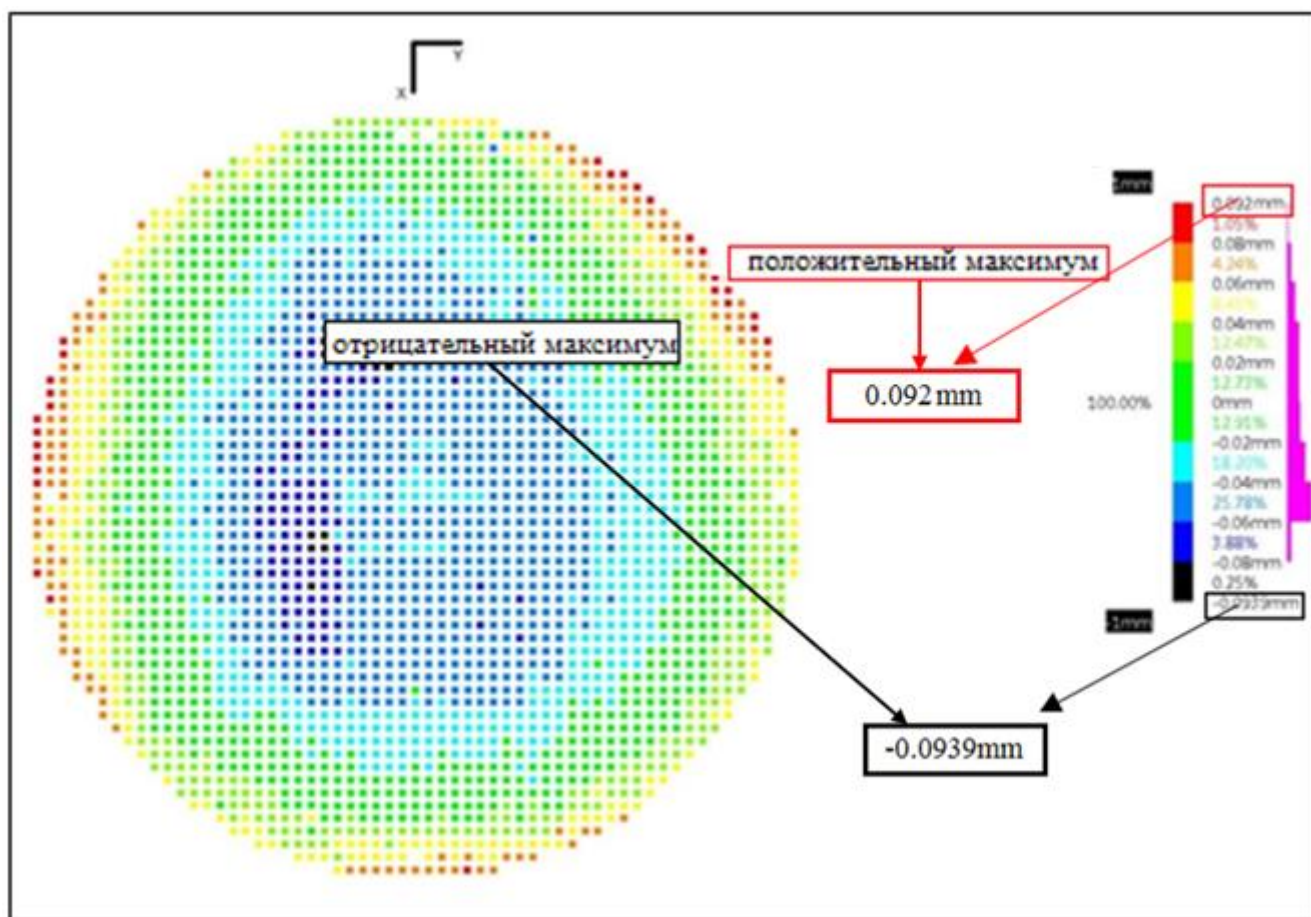


Рисунок 2.6 – Цветограмма поверхности рефлектора по результатам сканирования на контрольно-измерительной машине

Из результатов сканирования поверхности рефлектора следует, что максимальное отклонение профиля не превышает 0,094 мм при требованиях 0,1 мм. Для анализа характеристик направленности использовался АИВК БЗ с вертикальной поверхностью сканирования с монохроматическим оборудованием. Для сравнительного анализа ДН антенны с рефлектором, показанным на рисунке 2.5, были проведены измерения антенны с рефлектором, поверхность которого не имела повреждений и не подвергалась технологическому ремонту (рисунок 2.7). Профиль данного рефлектора так же полностью соответствовал требованиям по отклонению в 0,1 мм. На рисунке 2.8 приведены сравнительные ДН обоих рефлекторов. В таблице 2.4 приведено сравнение значений КНД по уровню минус 3,2 дБ.



Рисунок 2.7 – Внешний вид рефлектора без повреждений

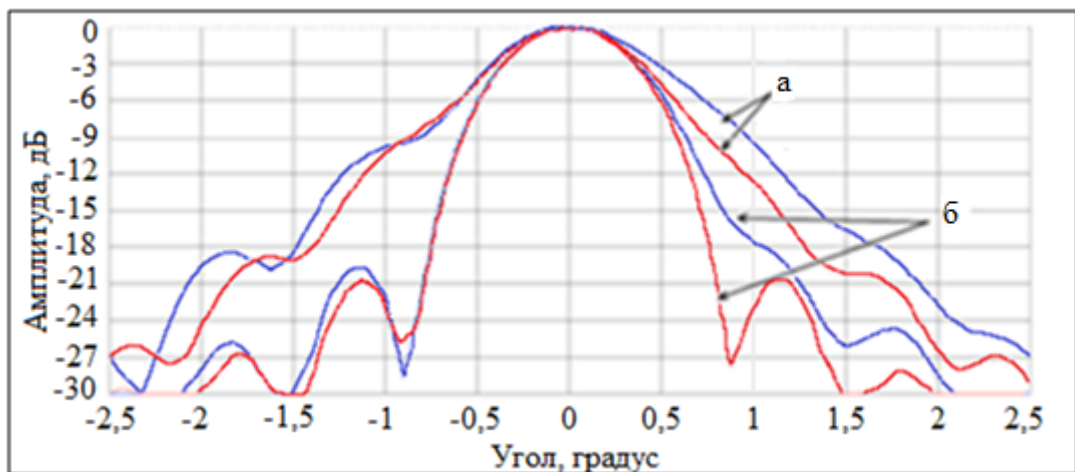


Рисунок 2.8 – Сравнительные ДН в азимутальной (красный) и угломестной (синий) плоскостях антенн с рефлектором: после технологического ремонта (а); без повреждений (б)

Таблица 2.4– Сравнение значений КНД по уровню минус 3,2 дБ

Номер частоты	Рефлектор после ремонта, дБ	Рефлектор без повреждений, дБ	Требуемое значение, дБ	Уменьшение КНД, 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

Как видно из рисунка 2.8 и таблицы 2.4, антенна с рефлектором, прошедшим технологический ремонт, имеет значительно меньший КНД (на 2–2,1 дБ), в сравнении с антенной, в которой установлен рефлектор, не имеющий повреждений. Таким образом, можно сделать вывод, что соответствие формы профиля поверхности рефлектора требуемым значениям не гарантирует необходимых радиотехнических характеристик в Q -диапазоне. Практика показывает, что при работе в более низком K -диапазоне, проведение технологического ремонта практически не коим образом не сказывалось на результирующих характеристиках направленности. Однако при переходе в более высокий 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 характеристики направленности 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 контроль-измерительной машине. АИВК БЗ позволяет получить наиболее полные сведения о работоспособности антенны. Антенны, работающие в данном диапазоне, рефлекторы которых прошли технологический ремонт, могут иметь на 2 дБ меньший КНД в сравнении с антеннами, рефлекторы которых не повреждены.

2.3 Основные результаты главы

1. Радиотехнические характеристики антенны, измеренные на технологическом стенде, укрытом высокоэффективным пирамидальным РПМ, имеют высокую степень согласованности с расчетными ДН. Наличие антенной панели оказывает заметное влияние на 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 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. КНД в осевом направлении антенны, вблизи которой находится сотопанель, ниже в среднем по диапазону на 0,15 дБ.

Таким образом, для наиболее точной оценки РТХ антенны на этапе проектирования необходимо создавать полные теоретические модели для электромагнитного анализа, учитывающие все элементы конструкции антенны, такие как наличие антенной панели, кронштейны для крепления рефлекторов и другие вспомогательные элементы, потенциально способные повлиять на результирующие характеристики направленности проектируемой антенны.

2. Применение антенных рефлекторов, прошедших технологический ремонт, в том числе для задач лабораторно-отрабочных испытаний, не целесообразно в случаях, когда размеры ремонтируемых участков сравнимы или превышают длину рабочей волны. Соответствие формы профиля поверхности рефлектора требуемым значениям не гарантирует необходимых характеристик направленности антенны. Ухудшение КНД в осевом направлении ДН может превышать 2 дБ.

3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕНН ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

В разделе решаются задачи по экспериментальному сравнению результатов измерений радиотехнических характеристик антенн, измеренных на автоматизированных измерительных комплексах ближней и дальней зон излучения; на различном измерительном оборудовании: монохроматическом и времяимпульсном; при использовании зондовых антенн различных производителей; при использовании оборудования, в состав которого входит внешний смеситель и волоконно-оптическое оборудование.

Материалы раздела опубликованы в работах [9 – 12].

3.1 Сравнительный анализ характеристик направленности антенны *Ku*-диапазона при измерениях в дальней и ближней зонах излучения

В АО «ИСС» на полигоне для измерений в ДЗ расстояние между вышками для вспомогательной и исследуемой антенн составляет 2500 м.

Для сравнительного анализа измерительных комплексов проведены измерения двух двухзеркальных антенн Кассегрена *Ku*- и *K*-диапазонов в ДЗ полигонным методом и амплифазометрическим методом в БЗ в БЭК. Для ИА, работающей в *Ku*-диапазоне, ДЗ составляет около 870 м при диаметре антенны 3 м и рабочей частоте 14,5 ГГц. Для ИА, работающей в *K*-диапазоне, ДЗ составляет около 103 м при диаметре антенны 0,9 м и рабочей частоте 19 ГГц. Выбор объектов испытаний именно такого типа обусловлен несколькими причинами. Во-первых, прямофокусные двухзеркальные антенны Кассегрена – одни из наиболее востребованных в телекоммуникационных КА, поскольку обладают низким уровнем кросс-поляризационного излучения, являются оптимальными с точки зрения компоновки, обладают низкой протяженностью подводящих СВЧ-энергию фидеров, что, в свою очередь, приводит к уменьшению потерь уровня сигнала и уменьшению шумовой температуры радиотракта. Во-вторых, данный тип антенн наиболее удобен при установке на ОПУ, поскольку не требует использования

дополнительного технологического оборудования, которое применяется, к примеру, при испытании длиннофокусных офсетных антенн.

Результаты измерений антенны *Ku*-диапазона представлены в виде сечений ДН в главных плоскостях (рисунки 3.1 и 3.2) и некоторых основных РТХ (таблица 3.1). В соответствии с требованиями заказчика сектор измерений ДН не превышал $\pm 2^\circ$.

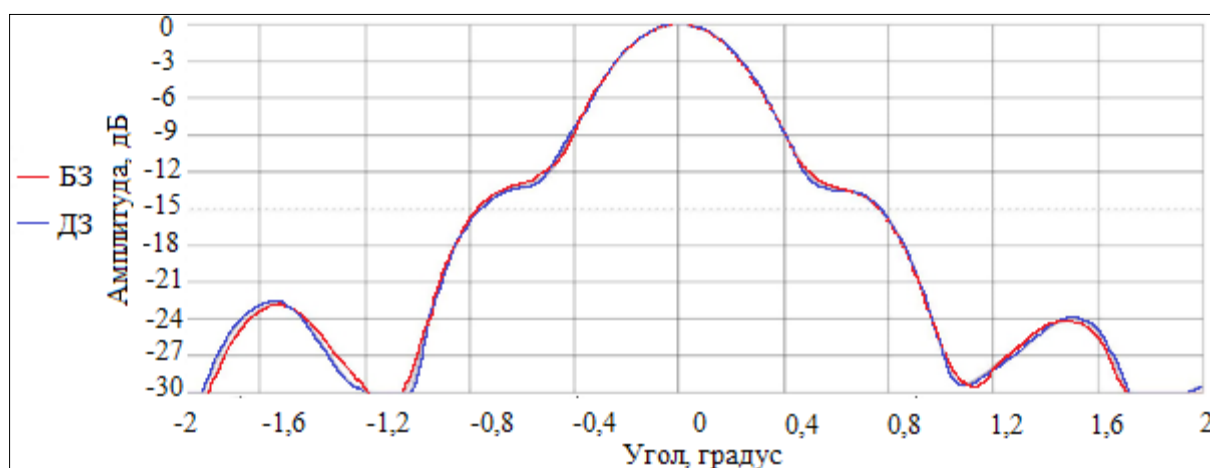


Рисунок 3.1 – Сечения ДН для БЗ и ДЗ на средней частоте рабочего диапазона антенны в азимутальной плоскости (антенна *Ku*-диапазона)

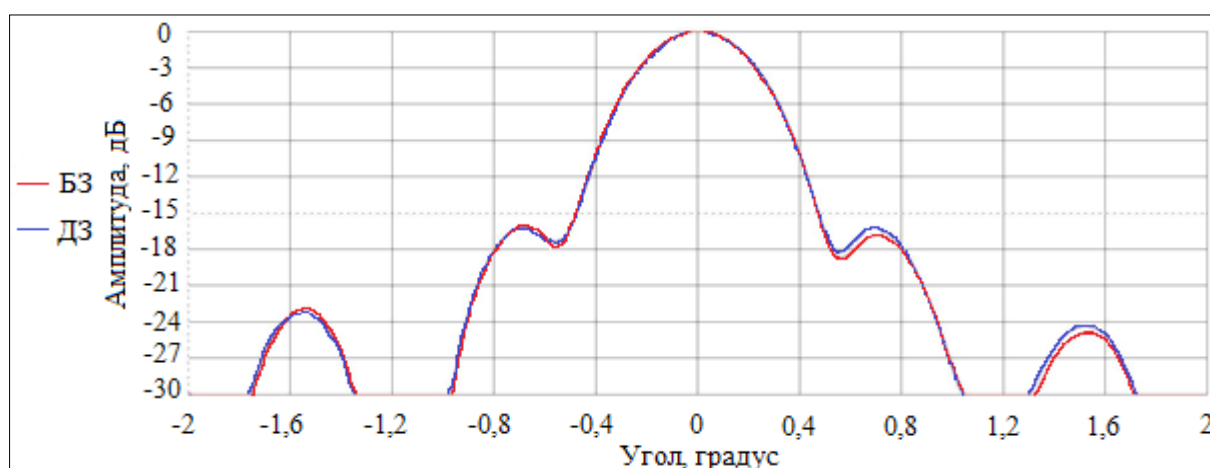


Рисунок 3.2 – Сечения ДН для БЗ и ДЗ на средней частоте рабочего диапазона антенны в угломестной плоскости (антенна *Ku*-диапазона)

Таблица 3.1– РТХ антенны при измерениях в ДЗ и БЗ (антенна *Ки*-диапазона)

№ частоты	Зона излучения	ШДН (-3 дБ)		ШДН (-10 дБ)		УБЛ (дБ)	
		Азимут	Угол места	Азимут	Угол места	Азимут	Угол места
1	ДЗ	0,478	0,458	0,898	0,793	-14,1	-16
	БЗ	0,475	0,455	0,890	0,791	-14,2	-16,3
2	ДЗ	0,481	0,473	0,909	0,826	-13,9	-16,1
	БЗ	0,484	0,47	0,903	0,822	-14	-16,2
3	ДЗ	0,462	0,452	0,830	0,802	-14	-16,5
	БЗ	0,462	0,456	0,825	0,800	-14	-16,4
4	ДЗ	0,451	0,442	0,857	0,769	-14,2	-16
	БЗ	0,449	0,438	0,854	0,767	-14,1	-15,8
5	ДЗ	0,464	0,446	0,895	0,78	-14,3	-16,4
	БЗ	0,466	0,45	0,890	0,776	-14,1	-16,1

Результаты измерений антенны *К*-диапазона представлены в виде сечений ДН в главных плоскостях (рисунки 3.3 и 3.4) и некоторых основных РТХ (таблица 3.2). В соответствии с требованиями заказчика сектор измерений ДН не превышал $\pm 4^\circ$.

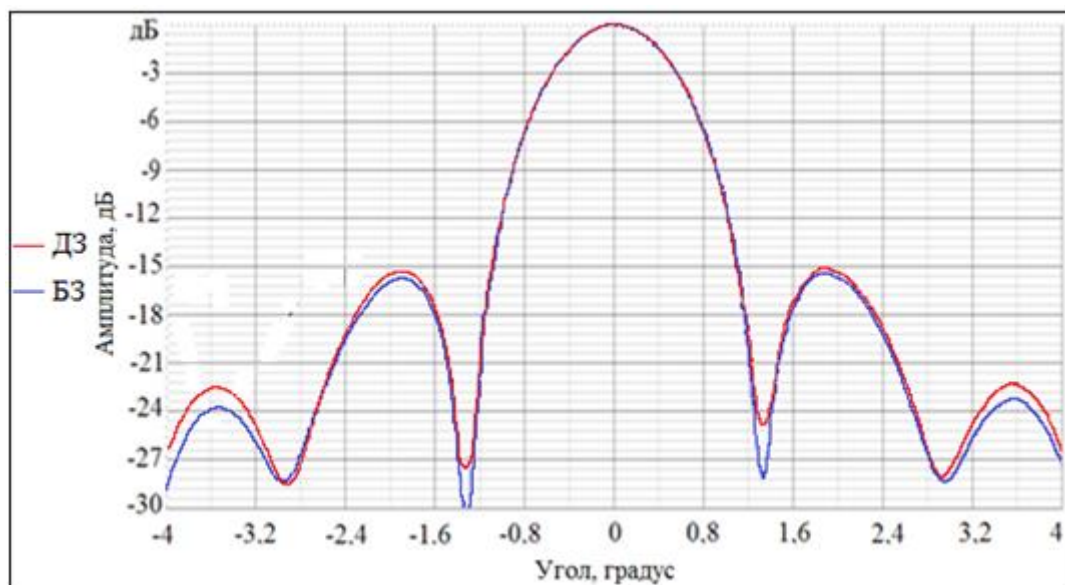


Рисунок 3.3 – Сечения ДН для БЗ и ДЗ на средней частоте рабочего диапазона антенны в азимутальной плоскости (антенна *К*-диапазона)

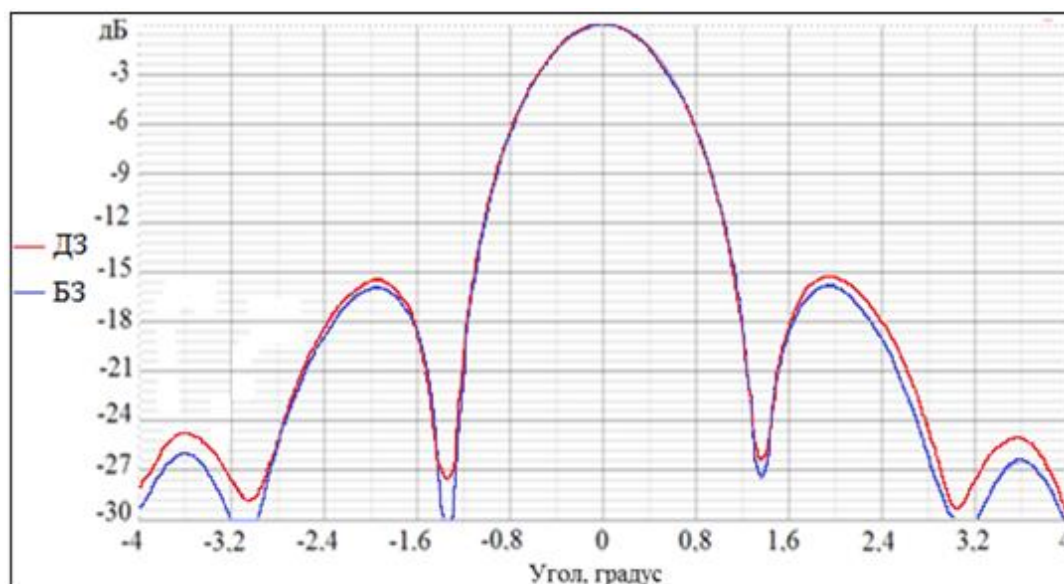


Рисунок 3.4 – Сечения ДН для БЗ и ДЗ на средней частоте рабочего диапазона антенны в угломерной плоскости (антенна К-диапазона)

Таблица 3.2 – РТХ антенны при измерениях в ДЗ и БЗ (антенна К-диапазона)

№ частоты	Зона излучения	ШДН (-3 дБ)		ШДН (-10 дБ)		УБЛ (дБ)	
		Азимут	Угол места	Азимут	Угол места	Азимут	Угол места
1	ДЗ	1,114	1,12	1,892	1,915	-15,4	-16
	БЗ	1,123	1,136	1,911	1,933	-15,8	-15,2
2	ДЗ	1,12	1,131	1,904	1,92	-15,2	-15,8
	БЗ	1,125	1,126	1,916	1,917	-15,3	-16,3
3	ДЗ	1,125	1,128	1,942	1,952	-15	-15
	БЗ	1,138	1,144	1,939	1,946	-15,5	-15,2
4	ДЗ	1,136	1,15	1,939	1,983	-15,6	-16
	БЗ	1,143	1,161	1,944	1,977	-16	-16,6
5	ДЗ	1,12	1,135	1,924	1,945	-16,2	-16,8
	БЗ	1,124	1,131	1,918	1,93	-16,4	-17

Из рисунков 3.1 и 3.2 и таблицы 3.1 видно, что разница в ШДН для результатов измерений ДН антенны *Ku*-диапазона пренебрежимо мала ($0,008^\circ$ на частоте № 1 в азимутальной плоскости) и не превышает инструментальную погрешность измерительных комплексов ($\pm 0,02^\circ$). Несогласованность УБЛ составила не более 0,3 дБ (на частотах № 1 и № 5 в угломерной плоскости) на относительных уровнях ДН минус 16 дБ, что соответствует инструментальной

погрешностью определения амплитудных ДН от минус 10 до минус 20 дБ (Приложение Г).

Из рисунков 3.3 и 3.4, а также таблицы 3.2 можно заключить, что разница в ШДН для результатов измерений ДН антенны *K*-диапазона составляет $0,019^\circ$ (на частоте № 1 в азимутальной плоскости), 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 (Приложение Г). Данная погрешность, очевидно, обуславливается влиянием трассы распространения радиосигнала в измерительном комплексе ДЗ, являющимся открытым полигоном. Также, это объясняется увеличенным затуханием сигнала на тракте распространения в более высоком частотном диапазоне [64], что приводит к более высокой погрешности измерений на тех же уровнях сигнала, что и в более низком частотном диапазоне. Стоит отметить, что полученные результаты, представленные на рисунках 3.1 – 3.4 являются следствием продолжительной подготовительной работы, которая включала в себя набор большого количества статистических измерений, итеративную юстировку (поиск соответствующего сечения для проведения корректного сравнительного анализа представляет достаточно сложную задачу после перемещения ИА от одного АИВК к другому), приемлемых погодных условий (отсутствие осадков, ветра и т.д.). В результате сбора большого объема измерительной информации, наилучшие по согласованности результаты представлены на вышеуказанных рисунках.

В качестве итогового вывода можно отметить, что результаты измерений амплитудных ДН двухзеркальных антенн Кассегрена, работающих в *Ku*- и *K*-диапазонах, на двух различных измерительных комплексах, установленных в АО «ИСС», показали высокую степень сходимости. Точность измерения основного и первых боковых лепестков практически может приближаться к инструментальной погрешности измерительных комплексов.

3.2 Сравнительный анализ характеристик направленности антенны при использовании линии передачи с волоконно-оптическим оборудованием и линии передачи с преобразованием частоты

В данном подразделе представлен сравнительный анализ результатов измерений РТХ двухзеркальной антенны Кассегрена *K*-диапазона на АИВК с горизонтальной поверхностью сканирования с помощью двух схемных подходов: с использованием внешних СВЧ-смесителей и с использованием оптоволоконного оборудования [12].

Использование крупногабаритных АИВК БЗ являются неотъемлемой частью НЭО антенн на АО «ИСС». Штатная комплектация данных измерительных комплексов подразумевает использование в своем составе СВЧ-кабелей, длина которых может достигать десятков метров (как на передачу, так и на прием). Данное обстоятельство создает предпосылки для применения соответствующих технических решений, позволяющих сохранить требуемый динамический диапазон измеряемых сигналов и, в целом, точность получаемых результатов. Одним из наиболее распространенных решений 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. Помимо этого, в качестве передатчика используется внешний генератор, работа которого синхронизируется с работой основного измерительного компонента АИВК – ВАЦ посредством сигналов запуска («тригов»). На рисунке 3.5 представлена механическая основа АИВК БЗ – крупногабаритный (габаритные размеры: 21x12,5x13 м, рабочая область порядка: 16x10 м) радиотехнический сканер с горизонтальной поверхностью сканирования, предназначенный для измерения РТХ антенн КА как автономно, так и в составе КА.



Рисунок 3.5 – Внешний вид радиотехнического сканера с горизонтальной поверхностью сканирования

На рисунке 3.6 представлены основные компоненты измерительной схемы при использовании схем с переносом частоты (в нашем случае использовалось оборудование компании Agilent Technologies).

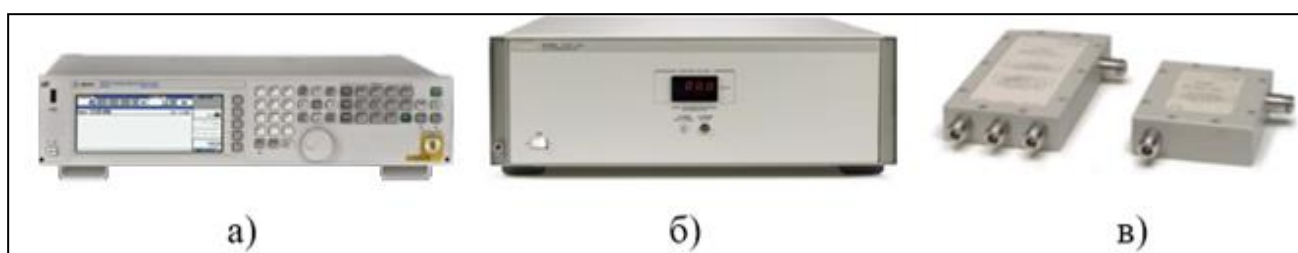


Рисунок 3.6 – Оборудование, используемое для измерительной схемы с преобразованием рабочей частоты: аналоговый генератор сигналов (а); распределительный модуль сигналов гетеродина и ПЧ (б); измерительный и опорный смесители (в)

Основные компоненты измерительной схемы, в состав которой входит волоконно-оптическое оборудование, представлены на рисунке 3.7.

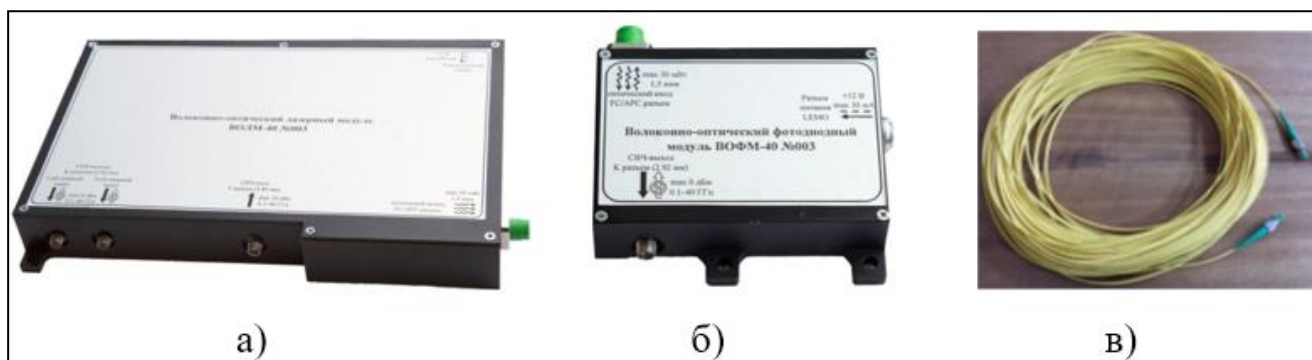


Рисунок 3.7 – Оборудование, используемое для измерительной схемы с волоконно-оптической линией передачи: а) Волоконно-оптический лазерный модуль; б) волоконно-оптический фотодиодный модуль; в) оптическое волокно

Центральным звеном измерительной схемы для обоих случаев является ВАЦ. Решение с использованием внешних смесителей позволяет существенно повысить уровень сигнала от ИА, который резко убывает на частотах выше 18 ГГц. Подход имеет свои недостатки [80], [126]. Поэтому применяют альтернативное решение в виде использования широкополосной ВОЛП, предназначенной для передачи измерительного сигнала от выхода ВАЦ к ЗА. Предлагаемое решение имеет ряд преимуществ. В [127] подробно описывается измерительная схема, включающая в себя оптическое оборудование. 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» [104]) позволяют практически полностью исключить ошибку измерения фазы за счет перегибов кабеля в подвижной части кабель-канала. На рисунке 3.8 представлены упрощенные структурные схемы для различных измерительных схем.

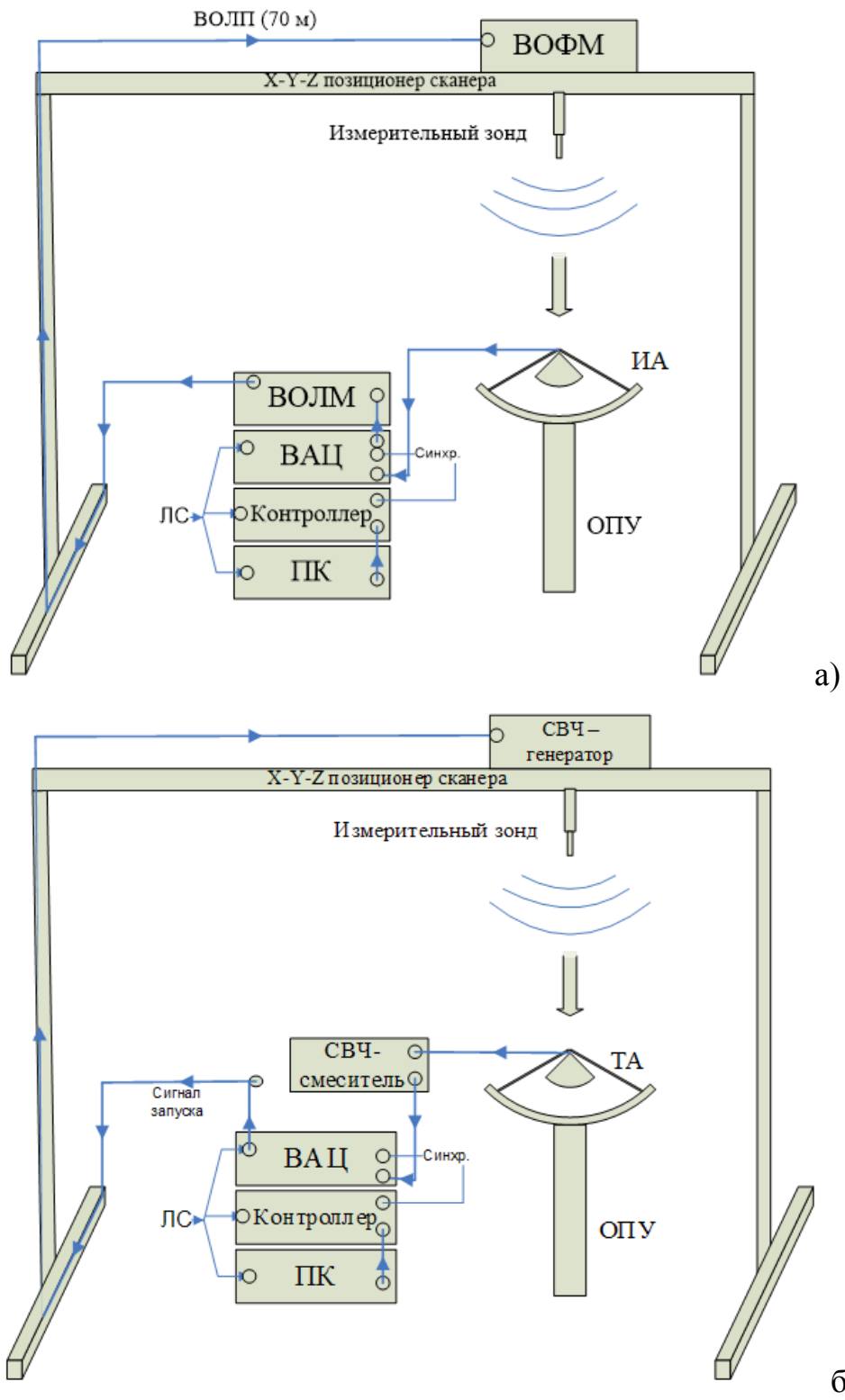


Рисунок 3.8 – Упрощенная структурная схема АИВК с использованием:
 а) волоконно-оптического оборудования, б) СВЧ-смесителя и внешнего СВЧ-генератора.

Результаты измерений представлены в виде сечений ДН в главных плоскостях (рисунок 3.9) и некоторых РТХ (таблица 3.3).

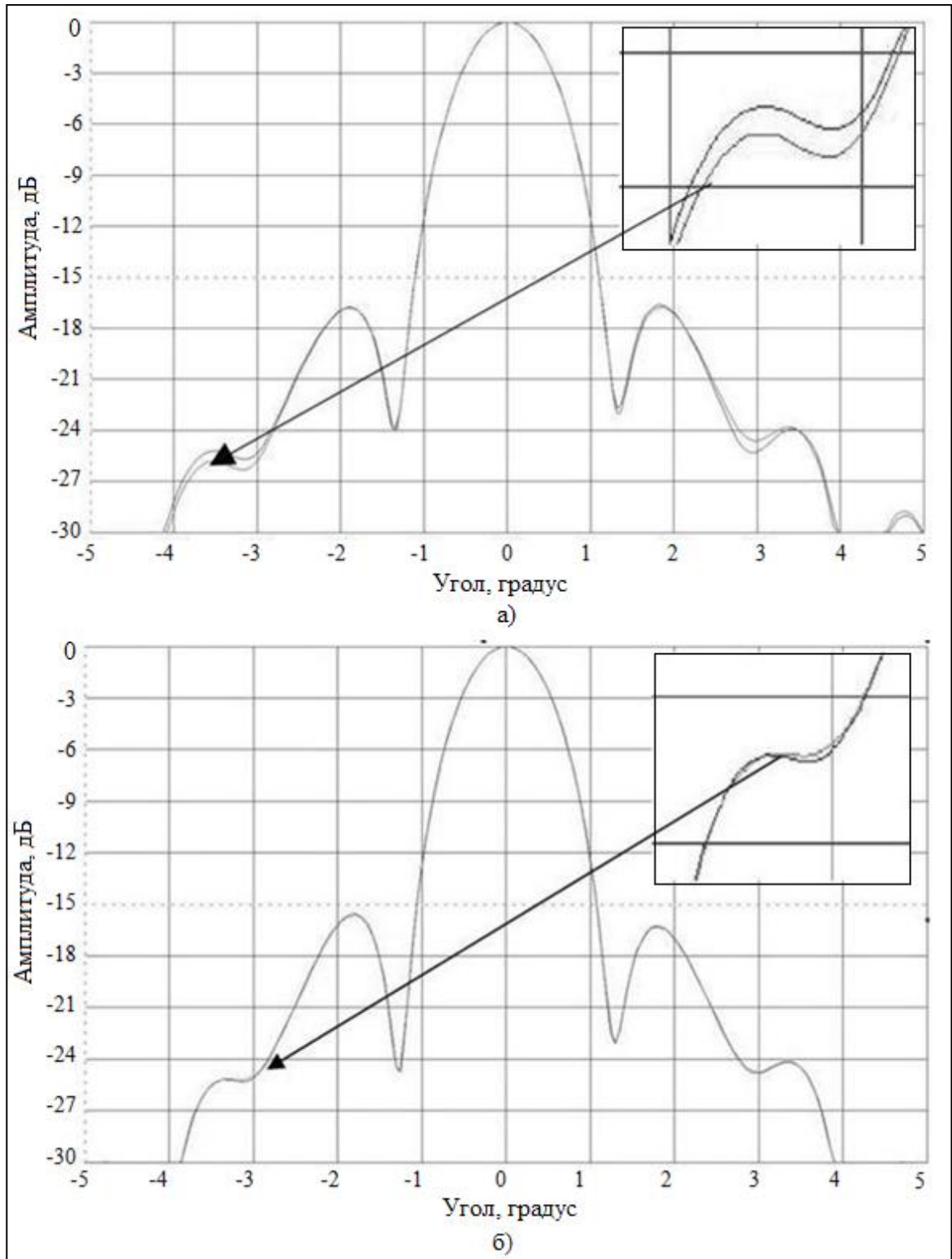


Рисунок 3.9 – Сечения ДН при различных измерительных схемах на частоте 20 ГГц в азимутальной (а) и угломестной плоскостях (б) с увеличенными фрагментами

Таблица 3.3 – РТХ антенны при измерениях с СВЧ-смесителем и ВОЛП

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

Как видно из рисунка 3.9, максимальное расхождение ДН (вблизи уровня минус 26 дБ) составляет 0,5 дБ в азимутальной плоскости и 0,1 дБ – в угломестной, что соответствует инструментальной погрешности АИВК (0,5 дБ), заявленной производителем АИВК (Приложение Г). Из таблицы 3.3 видно, что максимальное расхождение ШДН составляет 0,002°, что значительно меньше погрешности измерений (0,02°). 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 НЭО антенн *K*-диапазона. Стоит отметить, что данная степень совпадения результатов двух схемных решений была обеспечена стабильностью условий измерений (АИВК находится в лабораторном помещении с постоянно поддерживаемыми стабильными уровнями температуры, давления, запыленности и т.д.) новых СВЧ-кабелей. В случаях относительно продолжительного регулярного использования АИВК (порядка нескольких лет) отмечается, что надежность измерительной схемы в которой используется оптическое волокно выше, чем для случая с использованием СВЧ-кабелей. Это объясняется тем, что критический радиус изгиба СВЧ-кабелей значительно превышает таковой для волоконно-оптических кабелей. В связи с этим СВЧ-кабели значительно больше

подвергается механическому износу в сравнении с ВОЛП, что приводит к появлению характерных искажений в амплитудном и фазовом распределениях.

3.3 Сравнительный анализ результатов измерения коэффициента усиления рупорной антенны при использовании времяимпульсного и частотного оборудования

В данном подразделе обосновывается возможность применимости как частотного, так и времяимпульсного оборудования для измерения КУ [11]. Измерение КУ проводилось методом ДЗ в условиях БЭК.

В качестве объектов испытаний были выбраны две идентичные пирамидальные широкополосные рупорные антенны, работающие в диапазоне 0,85 до 17,44 ГГц, геометрические размеры антенн: 877x351x265 мм, размеры раскрывов: 342x256 мм. Данные антенны представляют собой рупоры, выполненные как единое целое с диапазонными коаксиально-волноводными переходами. Точка запитки антенн – коаксиальный 50-омный тракт с сечением 7/3,04 мм. Внутренняя структура рупоров выполнена в виде постепенно расширяющихся (коньковых) волноводов, что обеспечивает хорошее согласование со свободным пространством в широкой полосе частот. Выбор данного типа ИА основывался на нескольких факторах, к которым относятся: широкополосность, возможность проведения прямых измерений КУ в пределах БЭК (ДЗ для верхней частоты рабочего диапазона антенн не превышает 20 м, диагональные размеры БЭК – более 24 м), простота установки.

Для измерения КУ с помощью частотного оборудования использовался ВАЦ 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 «ТРИМ».

Для проведения измерений антенны располагались напротив друг друга с совмещением плоскостей поляризации. Первоначально выполнялись измерения в соответствии со схемами, представленными на рисунке 3.10 (схемы представлены

максимально упрощенно, исключительно для иллюстрации сути процесса) как при использовании частотного так и времяимпульсного оборудования. При использовании времяимпульсного оборудования регистрировались отклики на СКИ, вычислялись их спектры по мощности. Затем в специализированном ПО рассчитывался КУ по формуле:

$$G = 10 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 - \left(\frac{B_{эф} - B_{пр}}{2} \right), \quad (3.1)$$

где $B_{эф}$ – мощность сигнала (либо коэффициент передачи в случае использования частотного оборудования), зарегистрированная при измерении через пространство, дБм;

$B_{пр}$ – мощность сигнала, зарегистрированная при измерении через СВЧ – кабель, дБм.

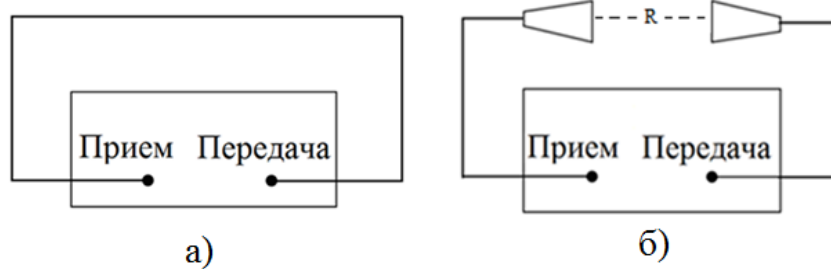


Рисунок 3.10 – Упрощенная схема для измерения КУ рупорной антенны а) в закрытом тракте, б) через пространство

При использовании частотного оборудования, т.е. ВАЦ, регистрировались соответствующие значения коэффициентов передачи. КУ рассчитывался аналогично (вместо уровней мощности в формулу 3.1 подставлялись значения коэффициентов передачи).

На рисунках 3.11 и 3.12 представлены импульсные отклики во временных окнах 2 нс и 0,6 нс, измеренные по закрытой схеме и через пространство. При измерениях по закрытой схеме для защиты приемного тракта от мощного СКИ использовался аттенюатор на 30 дБ.

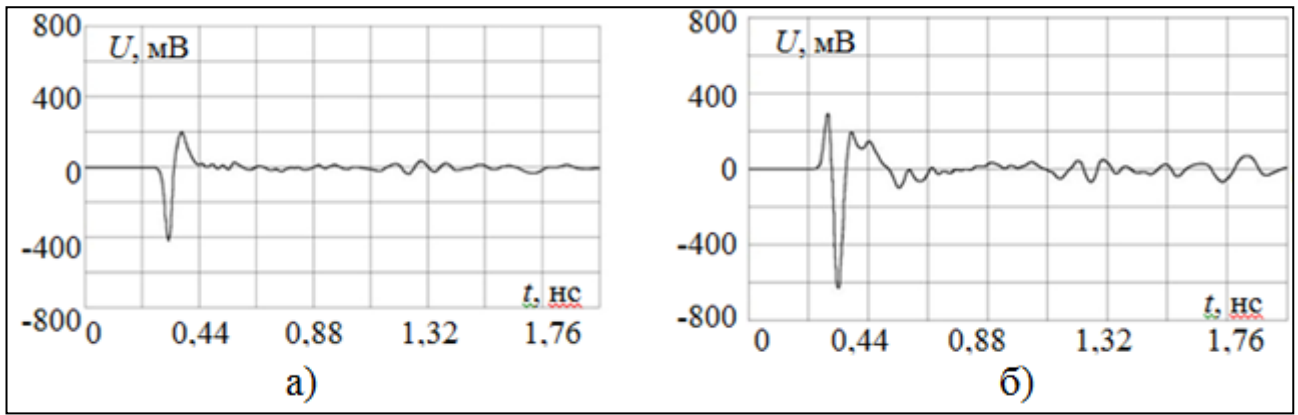


Рисунок 3.11 – Импульсные отклики во временном окне 2 нс, измеренные по закрытой схеме (а) и через пространство (б)

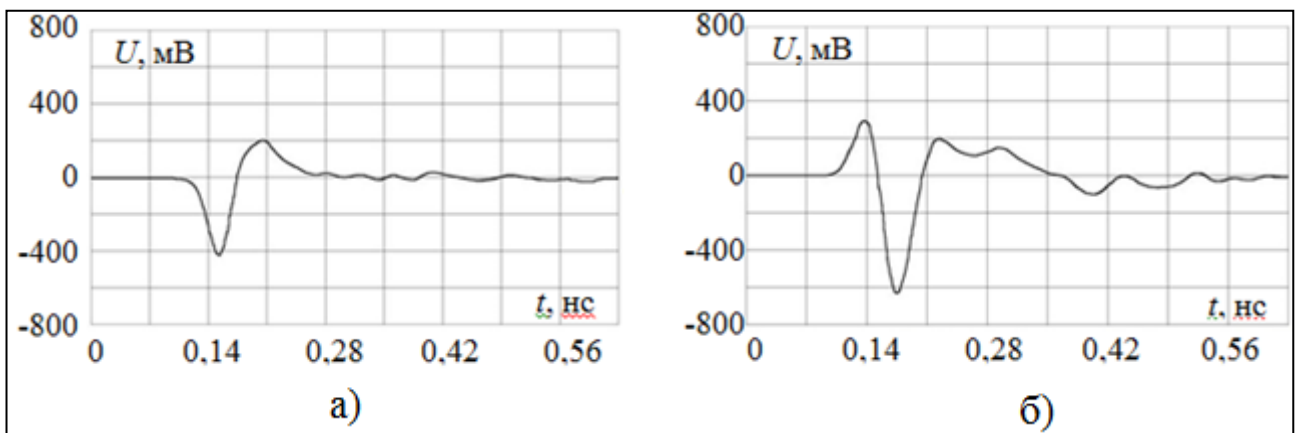


Рисунок 3.12 – Импульсные отклики во временном окне 0,6 нс, измеренные по закрытой схеме (а) и через пространство (б)

На рисунке 3.13 представлены результирующие частотные зависимости КУ с использованием: 1) частотного оборудования; 2) времяимпульсного оборудования во временном окне 2 нс; 3) времяимпульсного оборудования во временном окне 0,6 нс.

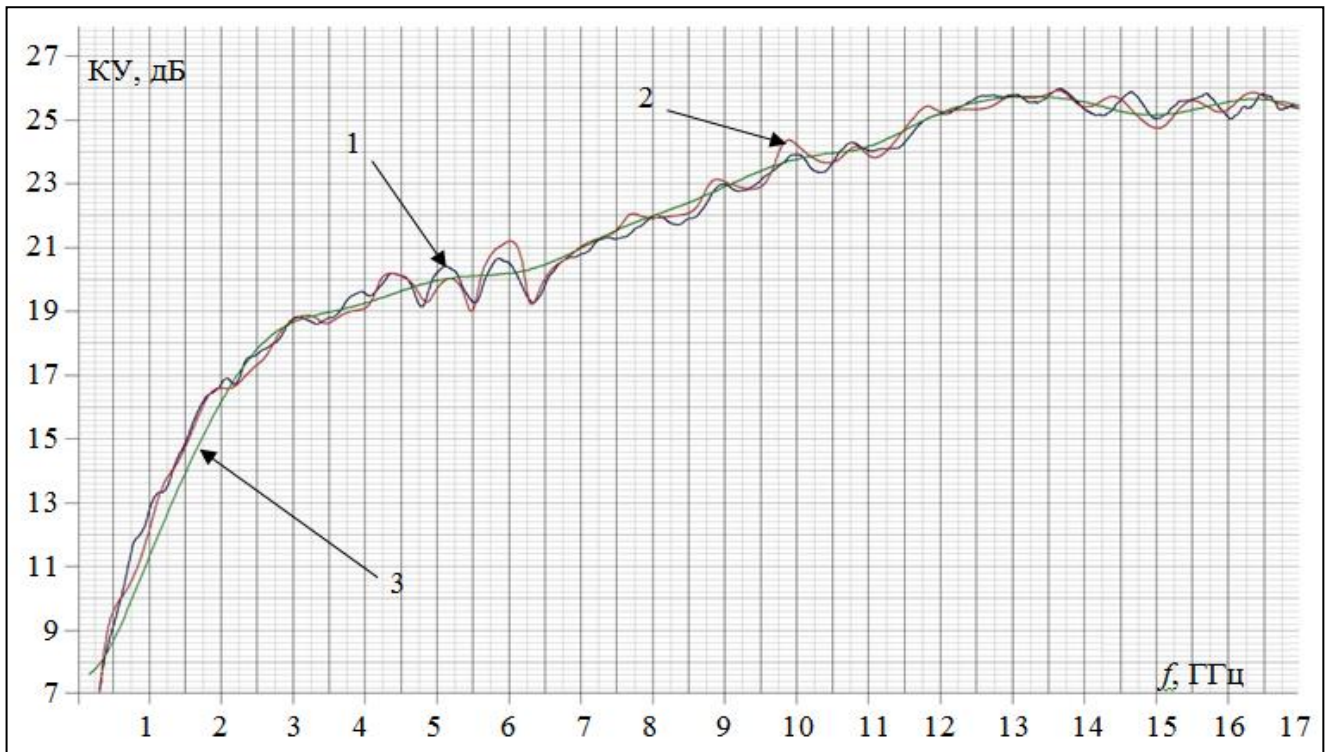


Рисунок 3.13 – Сравнение частотных зависимостей КУ

Отмечается 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. На рисунке 3.13 для кривых 1 (частотный метод) и 2 (временной метод с окном 2 нс) имеются осцилляции КУ. Данные осцилляции являются результатом дифракции и переотражений в самой рупорной антенне [128], а так же суперпозицией полезных и паразитных (отраженных) сигналов от различных объектов рабочего места. Отсутствие флуктуаций КУ на кривой 3 получено выбором меньшего размера временного окна (0,6 нс), однако в данном случае, отфильтровались и полезные спектральные составляющие, характеризующие антенну, поскольку, как известно [128], некоторые флуктуации в КУ рупорной антенны, не связанные с отражением от посторонних объектов, всё же должны присутствовать. Поэтому выбор размеров временного окна является критически важным 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

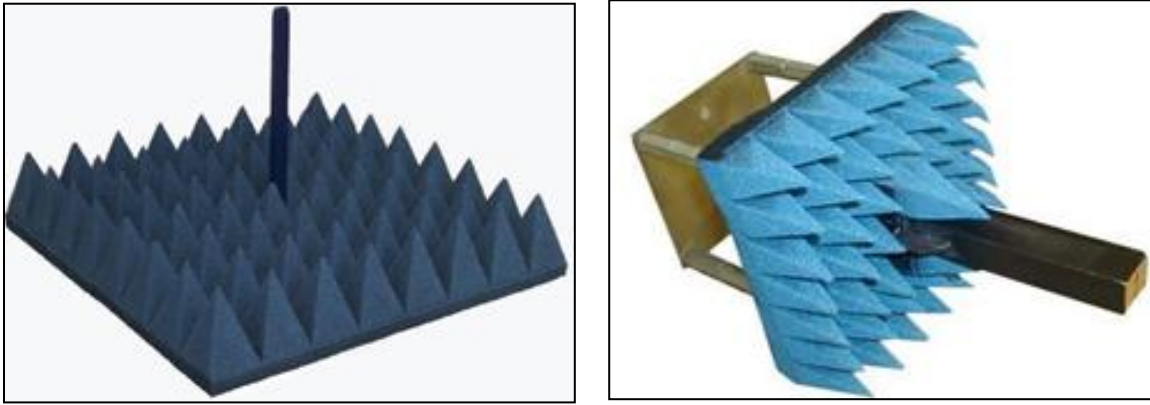
17 ГГц, пригодны как частотный метод измерений, так и времяимпульсный. Вопрос выбора оптимальной длительности импульса во временном окне, при котором результаты измерений КУ будут максимально приближены к истинному – предмет дальнейших исследований.

3.4 Сравнительный анализ измерений радиотехнических характеристик антенны *Ka*-диапазона при использовании различных зондовых антенн

В данном подразделе представлены сравнительные результаты измерений РТХ антенны *Ka*-диапазона, полученные с использованием ЗА с линейной поляризацией производства АО «ИСС», «ТРИМ» и SATIMO [10].

Объектом испытаний являлась двухзеркальная осесимметричная антенна Кассегрена *Ka*-диапазона с диаметром основного рефлектора 2м. Цикл измерений проводился на АИВК БЗ с вертикальной поверхностью сканирования с использованием монохроматического оборудования (частотного метода) в БЭК, который описан в подразделе 1.7 в БЭК. Зондовые антенны последовательно заменялись при неизменных условиях окружающей обстановки (избыточное давление в камере в пределах: от 2 до 5 Па, температура: от 22 до 22,5°, влажность воздуха: от 50 до 52%, уровень запылённости: не более 3520000 частиц в метре кубическом (класс чистоты – ISO 8). Измерения проводились на центральной частоте рабочего диапазона ИА.

Компания SATIMO входит в группу компаний Mirowave Vision Group и является одним из мировых лидеров в области создания ЗА с высокой чистотой поляризации. В АО «ИСС» имеются ЗА компании SATIMO, выполненные в виде отрезка прямоугольного волновода с встроенным коаксиально-волноводным переходом (КВП) (Рисунок 3.14 а). Зондовые антенны работают в стандартных диапазонах, соответствующих размерам волновода [129]. Зондовые антенны производства компании «ТРИМ» являются сверхширокополосными, представляют собой коньковый волновод, встроенный в пирамидальный рупор (3.14 б).



а)

б)

Рисунок 3.14 – Внешний вид зондовых антенн производства: а) SATIMO *Ka*-диапазона, б) сверхширокополосная (18 – 40 ГГц) зондовая антенна производства «ТРИМ»

Поскольку в настоящее время АО «ИСС» располагает несколькими АИВК БЗ возникла необходимость создания собственных ЗА для возможности одновременных испытаний антенн одного диапазона на различных АИВК БЗ. Зондовые антенны производства АО «ИСС» выполнены в виде открытого конца прямоугольного волновода (по аналогии с ЗА SATIMO). Улучшение прочностных характеристик данных ЗА достигнуто за счет частичного выполнения волноводной части из двух сборочных единиц, закрепленных болтовыми соединениями между собой (рисунок 3.15). Область ЗА, находящаяся вблизи излучающей части, выполнена в виде цельного трубчатого волновода. Рядом с раскрывом волновода расположен ферритовый кожух, минимизирующий излучение ЗА в заднем полупространстве. Для удобства эксплуатации конструкция ЗА является сборно-разборной.

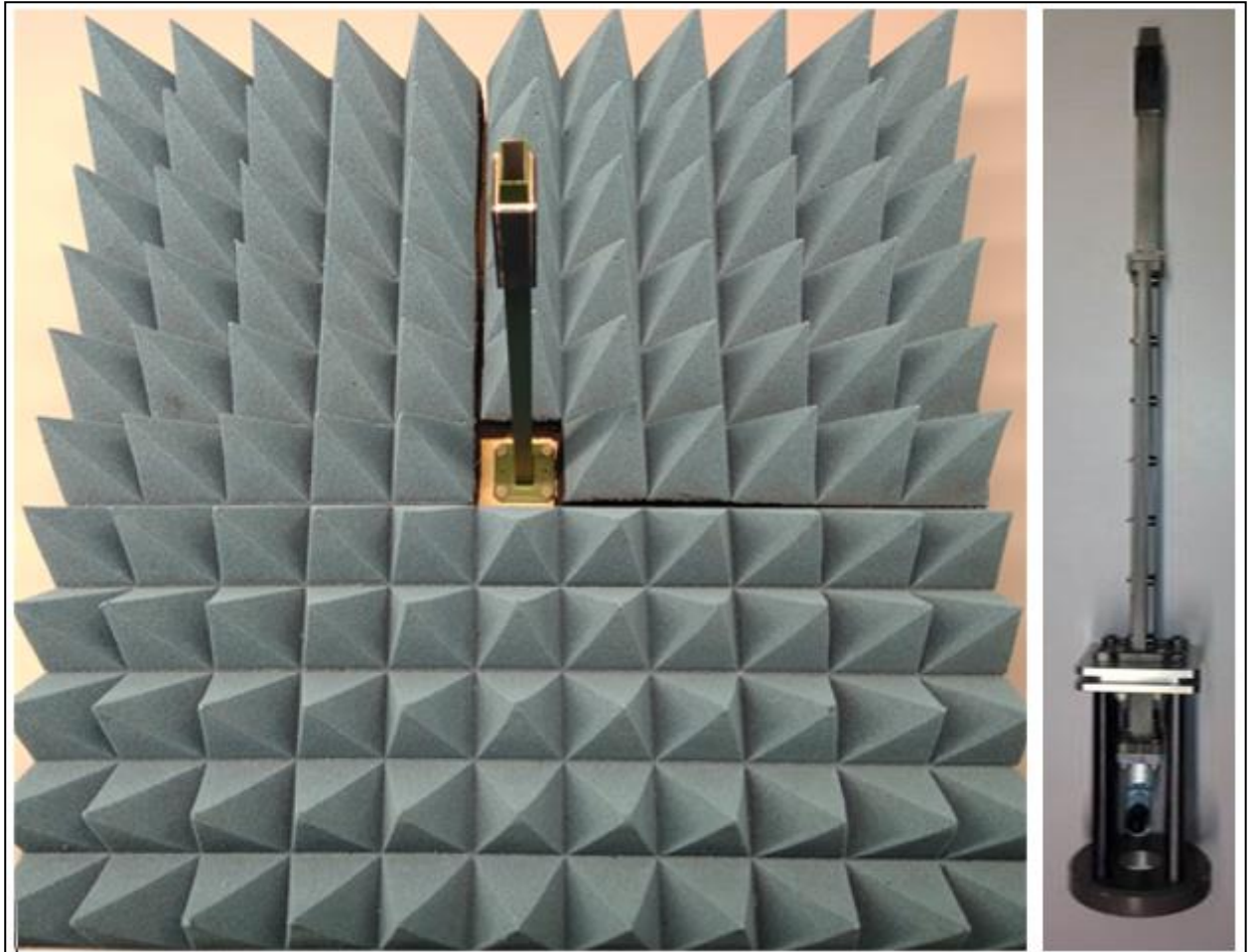


Рисунок 3.15 – Внешний вид зондовой антенны *Ka*-диапазона производства АО «ИСС»

На рисунке 3.16 представлены проекции ДН на требуемую ЗО в программном пакете Satsoft (окружность диаметром $0,4^\circ$, соответствующая уровню половинной мощности излучения ИА на основной поляризации) по кросс-поляризации с отображением значений КПР при использовании трех рассматриваемых ЗА. Синие пунктирные линии с цифрами показывают значения КПР в дБ.

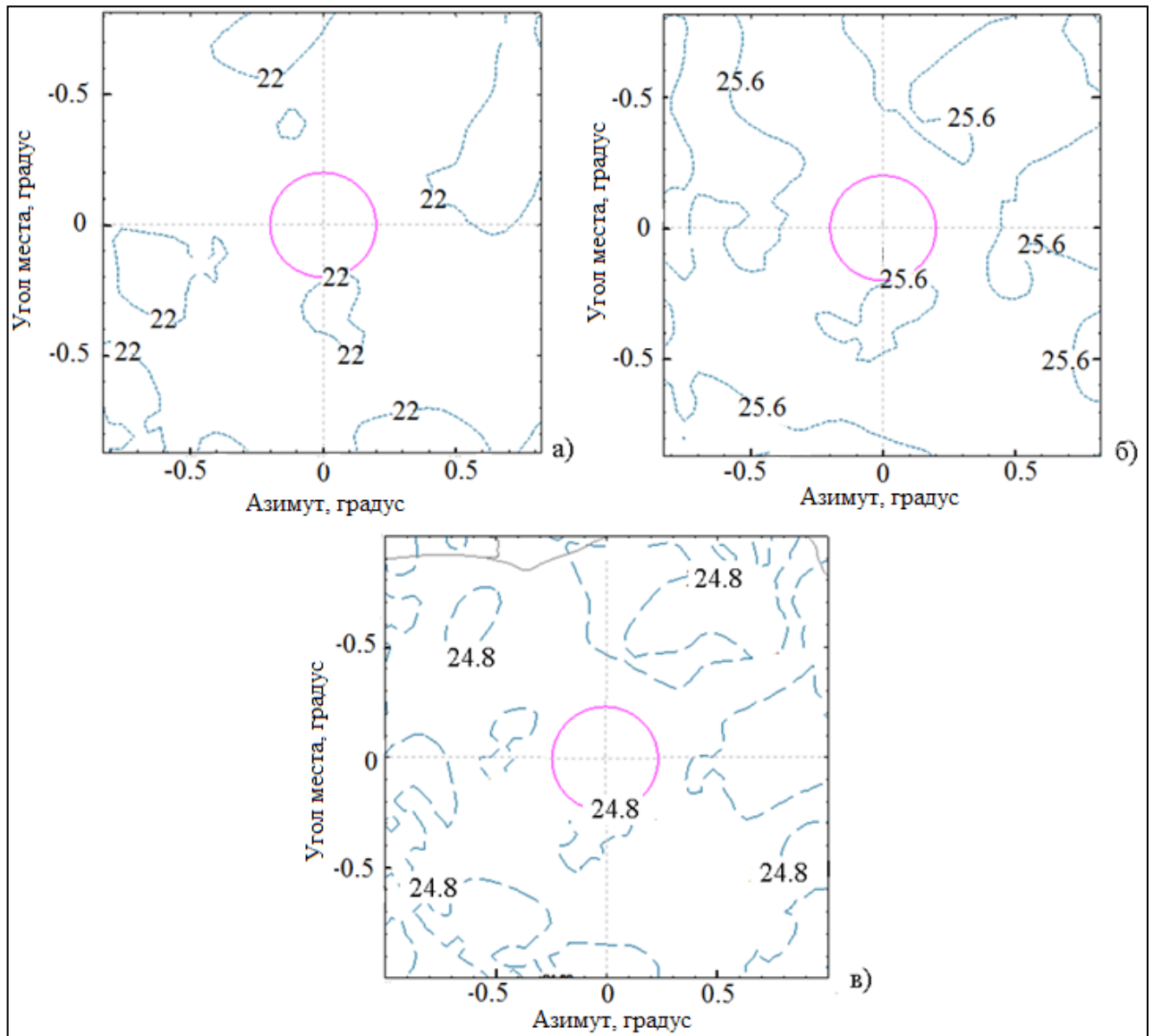


Рисунок 3.16 – Картографическая проекция кросс-поляризационного излучения исследуемой антенны с отображением уровня кросс-поляризационной развязки в зоне обслуживания при использовании зондовых антенна производства «ТРИМ»

(а), «ИСС» (б) и SATIMO (в)

Как видно из рисунка 3.16 проекции КПР на ЗО, измеренные с помощью ЗА компании «ТРИМ» имеют более чем на 2,8 дБ меньший уровень КПР, в то время как результаты измерений с помощью ЗА производства компаний SATIMO и «ТРИМ» хорошо согласуются и находятся в пределах погрешности измерений (погрешность восстановления амплитудной ДН на уровне минус 28 дБ составляет примерно $\pm 1,2$ дБ, см. Приложение Г). Как известно более широкая полоса рабочих частот приводит к ухудшению характеристик добротности системы [3]. В

нашем случае, аналогично, сверхширокополосная ЗА производства «ТРИМ» имеет повышенный уровень собственного кросс-поляризационного сигнала.

Для минимизации статистической ошибки, проведено по 5 измерений (как правило, для производственных задач большее количество выборок не требуется, поскольку среднеквадратическое отклонение значений уровней амплитудной ДН перестаёт заметно изменяться) для каждой ЗА и показаны среднестатистические значения измеренных величин в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – РТХ антенны для рассматриваемых зондовых антенн

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

Из вышеприведенной таблицы видно, что значения УБЛ в азимутальной плоскости не согласуются на величину 0,4 дБ, а в угломестной – на 0,2 дБ, что не превышает погрешности измерений на данных относительных уровнях ДН (см. Приложение Г). Максимальное расхождение КНД составило 0,18 дБ, что так же находится в пределах заявленной погрешности используемого в эксперименте измерительного комплекса. Расхождение измеренных ШДН по уровням в минус 3 и минус 10 дБ составляет $0,013^\circ$ и не превышает погрешности измерения заявленной производителем ($0,02^\circ$). Важно отметить, что для достижения наиболее близких итоговых значений КПР для различных ЗА необходимо знать априорную информацию об их собственных поляризационных характеристиках. Для дальнейшего развития данного вопроса планируется измерение собственных КПР ЗА для математического учёта данных характеристик при расчётах.

3.5 Основные результаты главы

1. На основе сравнительного анализа амплитудных ДН, измеренных на АИВК ближней и дальней зон, можно заключить, что оба измерительных комплекса могут обеспечивать точность измерений, сравнимую с инструментальной погрешностью, заявленной производителем АИВК (в пределах основного и первых боковых лепестков ИА), и, соответственно, могут использоваться при наземной экспериментальной отработке зеркальных антенн Ku - и K -диапазонов.
2. Сравнительный анализ характеристик направленности антенны K -диапазона при использовании линии передачи с волоконно-оптическим оборудованием и линии передачи, в состав которой входит внешний смеситель, показал, что оба схемных подхода обеспечивают практически идентичные результаты и, соответственно, могут использоваться при наземной экспериментальной отработке серийных антенн указанного типа.
3. Экспериментально подтверждено, что для измерения КУ рупорных антенн рассматриваемого типа, работающих в диапазоне до 17 ГГц, пригодны как частотный, так и времяимпульсный методы в дальней зоне и в пределах БЭЖ.
4. По результатам сравнительного анализа результатов измерений радиотехнических характеристик зеркальной антенны Кассегрена Ka -диапазона с помощью ЗА различных производителей установлено, что несогласованность измеренного КНД составила 0,18 дБ, ширин диаграмм направленности по уровням минус 3 и минус 10 дБ не превысила $0,013^\circ$, значений УБЛ – не более 0,4 дБ, что находится в пределах заявленной погрешности измерительного комплекса с вертикальной поверхностью сканирования. Разница кросс-поляризационной развязки для зондовых антенн производства «ИСС» и SATIMO не превысила 0,8 дБ на уровне минус 25 дБ, что так же находится в пределах погрешности измерений. Значение кросс-поляризационной развязки для зондовой антенны производства «ТРИМ» отличается более чем на 2,8 дБ, что заметно превышает заявленную погрешность измерительного комплекса. Таким образом, можно заключить, что для измерения ам-

плитудных ДН зеркальных антенн *Ka*-диапазона подходят все вышеуказанные ЗА. Для антенн, требующих измерения кросс-поляризационной развязки в зоне обслуживания под углами $\pm 0,2^\circ$ более 24 дБ в узкой полосе частот рекомендуется использовать зондовые антенны производства «SATIMO» и «ИСС».

4. ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ МЕТОДИК ИЗМЕРЕНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕНН

В разделе приводятся экспериментальные исследования актуальных особенностей методик измерений, влияющих на результаты измерений радиотехнических характеристики антенн. К таким особенностям для комплексов ближней зоны относятся: расстояние от зондовой антенны до исследуемой; линейное смещение зондовой антенны относительно нормали к поверхности сканирования; для комплексов дальней зоны: установка корректного положения антенны для измерения коэффициента эллиптичности в режиме автоматизированных измерений объёмной диаграммы направленности.

На основе приведенных в разделе результатов сформулировано второе научное положение, выносимое на защиту диссертационной работы.

Материалы раздела опубликованы в работах: [13 – 15, 17].

4.1 Исследование влияния на характеристики направленности расстояния между зондовой и исследуемой антенной *Ku*-диапазона с контурной диаграммой направленности времяимпульсным методом

В подразделе приведены результаты экспериментальных исследований характеристик направленности антенны *Ku*-диапазона с контурной ДН, полученных по результатам измерений на планарном СШП АИВК БЗ с вертикальной поверхностью сканирования времяимпульсным методом в БЭЖ на различных расстояниях от ЗА [13]. На рисунке 4.1 показан внешний вид радиотехнического сканера с вертикальной плоской поверхностью сканирования.

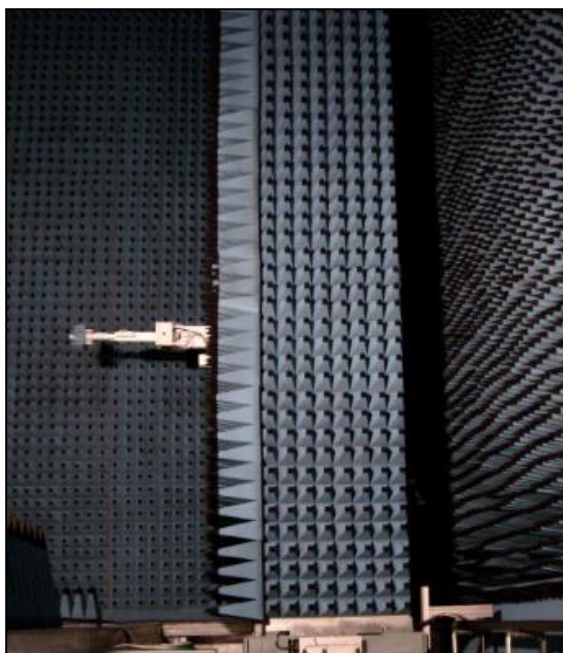


Рисунок 4.1 – Радиотехнический сканер с вертикальной поверхностью сканирования

Целью данных экспериментов являлась проверка согласованности восстановленных амплитудных ДН по уровням минус 3 и минус 10 дБ, а также уровня первых боковых лепестков ИА. Результаты экспериментов приводятся для рабочей частоты 11,35 ГГц. Методика измерений в БЗ времяимпульсным методом описана в подразделе 1.6.

Технологический процесс производства антенн КА на АО «ИСС» включает в себя измерения РТХ антенн как автономно (антенна устанавливается на специализированный технологический стенд), так и в составе КА (ИА устанавливается на часть корпуса КА – антенную панель, либо измеряется в составе самого КА). Поэтому оценка возможности проведения измерений на расстояниях, превышающих зону ближнего излученного поля и находящуюся в зоне Френеля [86], является актуальной.

По причине отсутствия реальной конструкции корпуса КА в эксперименте ИА располагалась на расстояниях, сопоставимых с габаритами КА (рисунок 4.2). Максимальное расстояние от ИА до ЗА выбиралось равным 4120 мм. Это объясняется тем, что при измерении антенны в составе КА расстояние от апертуры антенны до корпуса КА составит порядка 4 м. Для проверки степени

согласованности результатов измерений проведено три измерения РТХ антенны в ближней зоне на расстояниях: $R=2360, 3360, 4120$ мм.

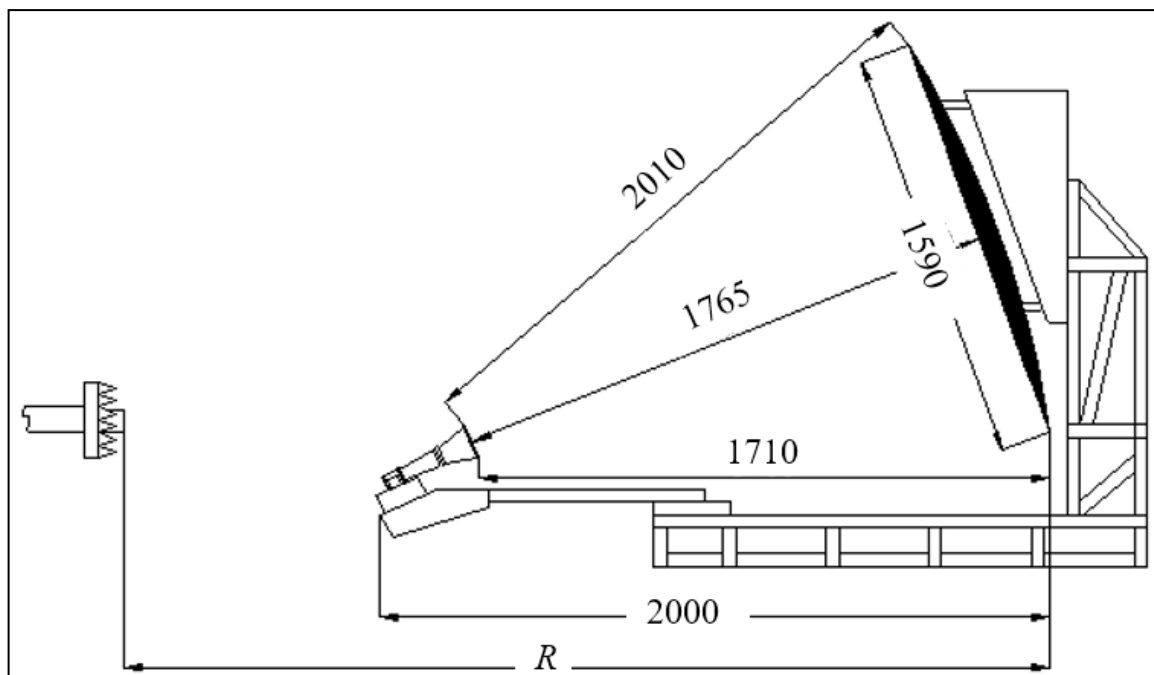


Рисунок 4.2 – Геометрические параметры исследуемой антенны (мм) и расстояние до зондовой антенны

На рисунках 4.3 – 4.8 представлены амплитудные и фазовые распределения поля ИА, а так же картографические проекции ДН для различных расстояний от ЗА.

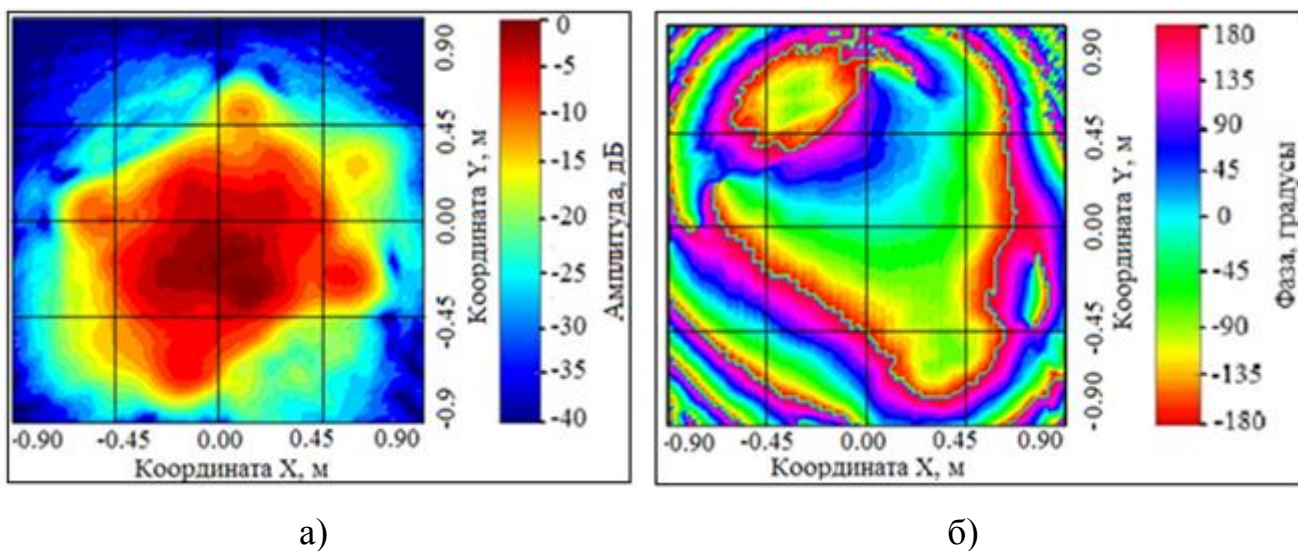


Рисунок 4.3 – Амплитудное а) и фазовое б) распределения ближнего излученного поля исследуемой антенны при $R=2360$ мм

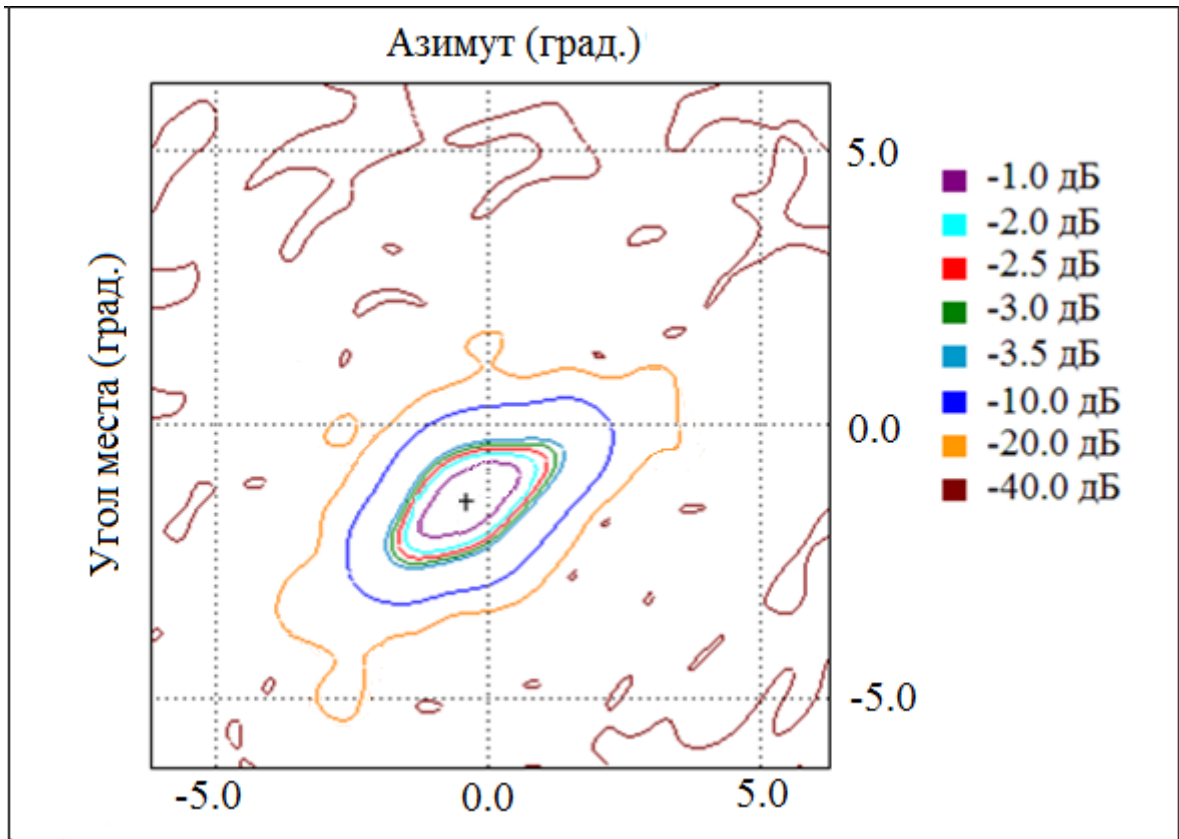
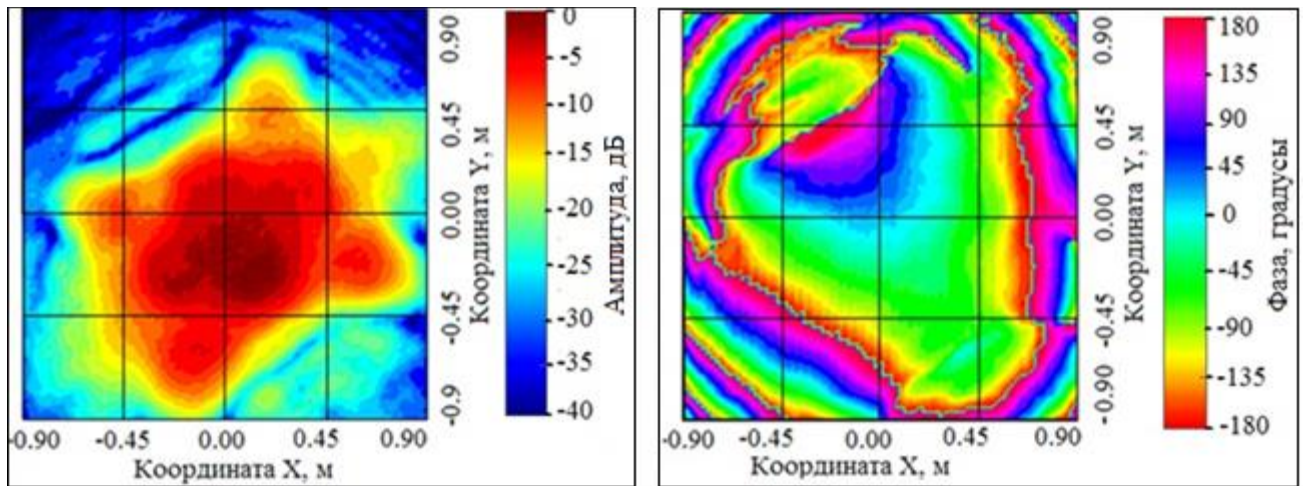


Рисунок 4.4 – Картографическая проекция ДН исследуемой антенны при $R=2360$ мм



а)

б)

Рисунок 4.5 – Амплитудное а) и фазовое б) распределения ближнего излученного поля исследуемой антенны при $R = 3360$ мм

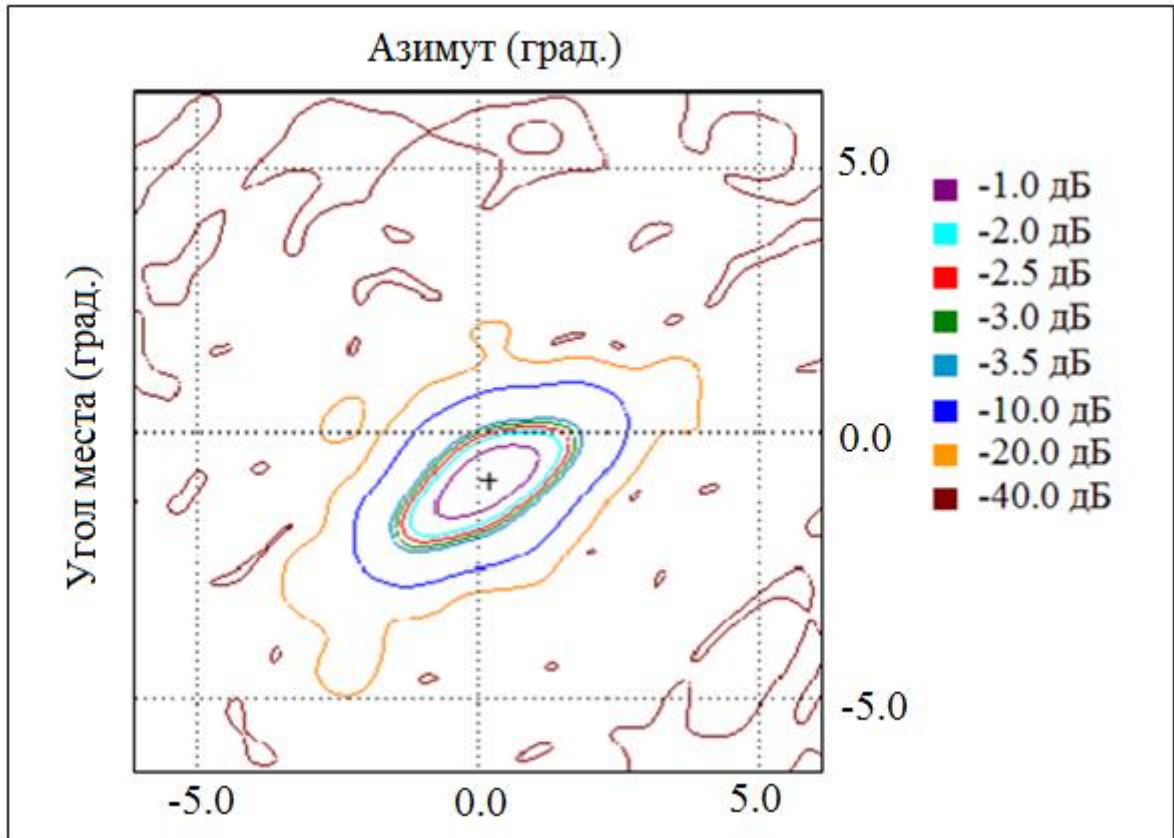


Рисунок 4.6 – Картографическая проекция ДН исследуемой антенны при $R=3360$ мм

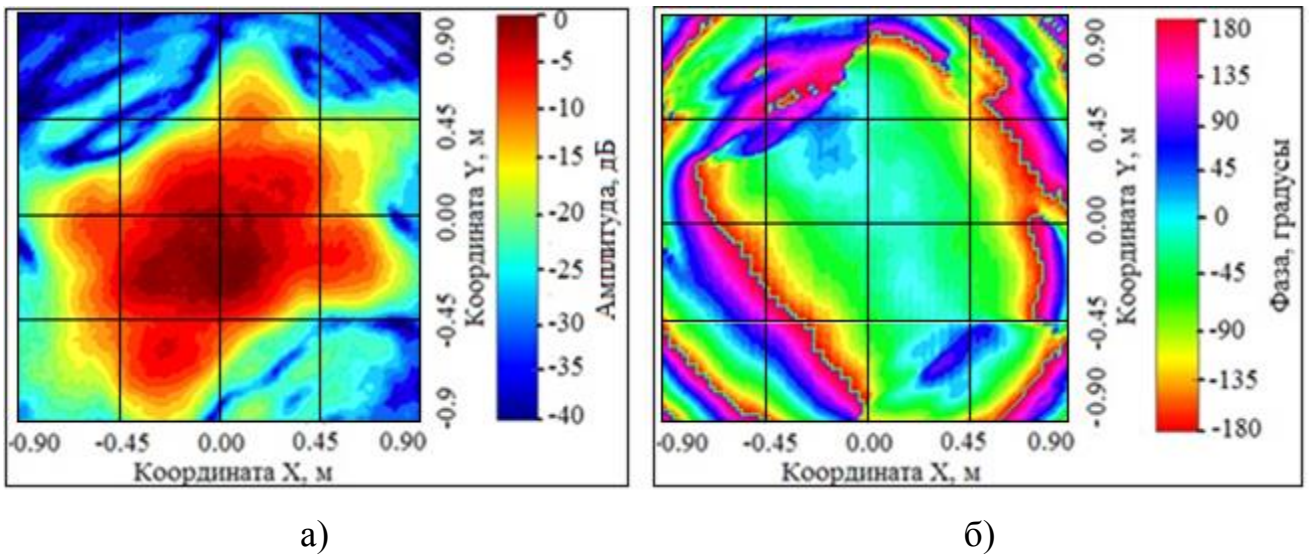


Рисунок 4.7 – Амплитудное а) и фазовое б) распределения ближнего излученного поля исследуемой антенны при $R=4120$ мм

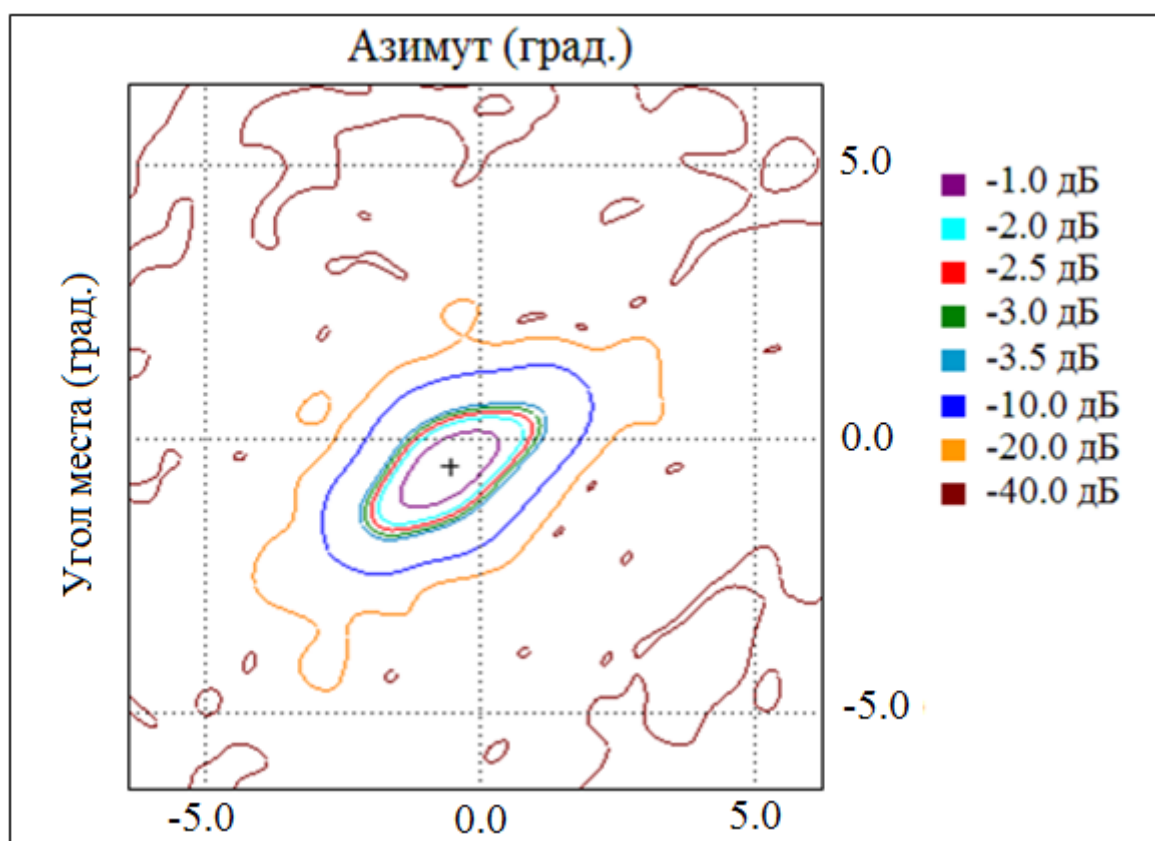


Рисунок 4.8 – Картографическая проекция ДН исследуемой антенны при $R=4120$ мм

На фазовых распределениях отмечаются неравномерности фазового фронта, связанные с неточностями при юстировке антенны относительно плоскости сканирования СШП АИВК БЗ, что отчетливо видно на картографических проекциях ДН (электрическая ось антенны не направлена точно в нулевые координаты). Важно отметить, что для данного эксперимента это не являлось критичным, поскольку цель эксперимента заключалась, в первую очередь, в проверке совпадения формы амплитудной ДН. При испытаниях антенн уже в рамках производственного процесса точность юстировки антенн жестко регламентирована и контролируется с помощью специализированных лазерных радаров. На рисунке 4.9 представлены картографические проекции до относительного уровня ДН минус 20 дБ, наложенные друг на друга для наглядного представления.

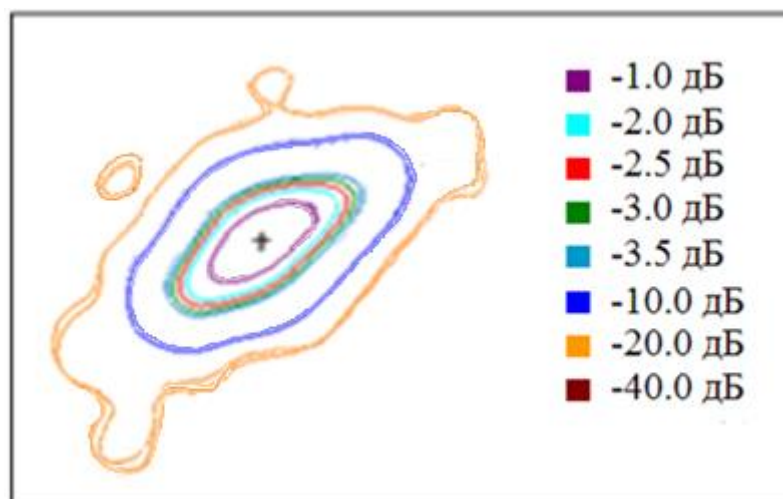


Рисунок 4.9 – Картографические проекции ДН исследуемой антенны до относительного уровня минус 20 дБ при наложении друг на друга

На рисунке 4.10 показаны измеренные сечения ИА в азимутальной и угломестной плоскостях для трёх расстояний от ЗА.

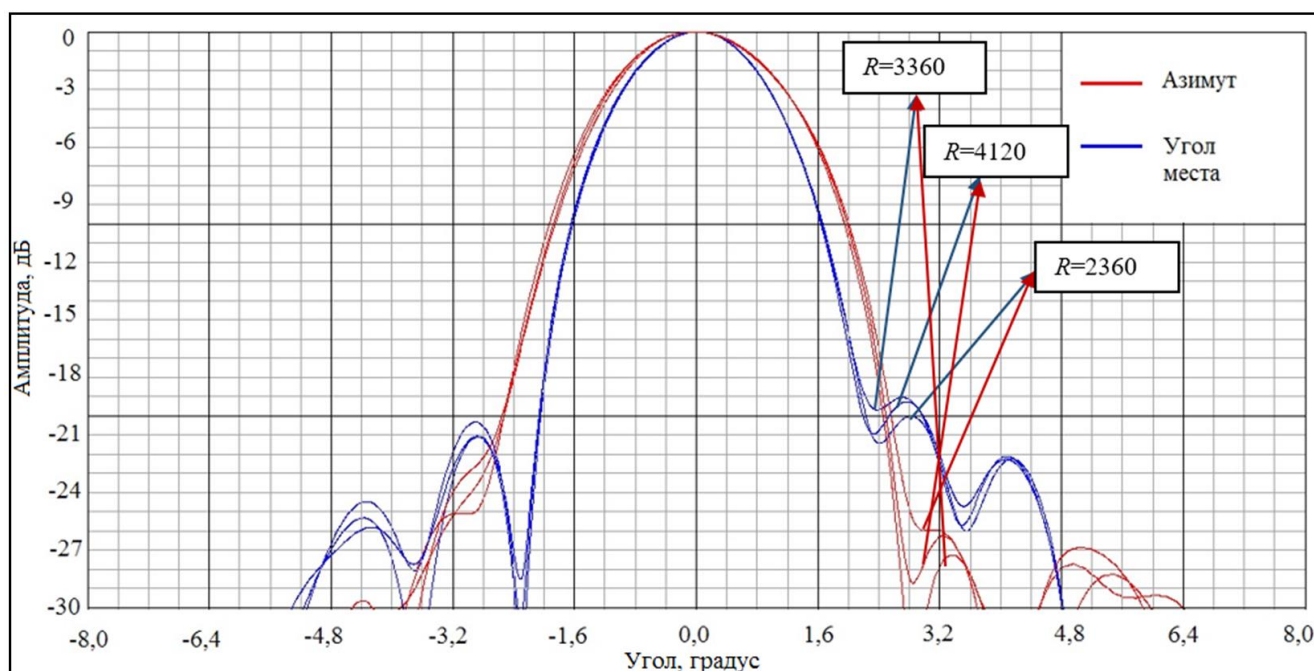


Рисунок 4.10 – Сечения ДН в главных плоскостях для различных расстояний от зондовой антенны

Из рисунков 4.9, 4.10 видно, что ДН достаточно хорошо согласуются до уровня минус 20 дБ.

В таблице 4.1 приведены измеренные на различных расстояниях данные для ШДН по относительным уровням минус 3 и минус 10 дБ.

Таблица 4.1 – РТХ исследуемой антенны на частоте 11,35 ГГц для различных расстояний от зондовой антенны

Расстояние от зондовой антенны / Плоскость		ШДН по уровню минус 3 дБ, градус	ШДН по уровню минус 10 дБ, градус	УБЛ, дБ
2360 мм	Аз	2,241	3,86	-23,9
	УМ	1,897	3,281	-20
3360 мм	Аз	2,316	3,873	-25,1
	УМ	1,898	3,284	-19,0
4120 мм	Аз	2,288	3,859	-22,5
	УМ	1,92	3,284	-19,3

На основе таблицы 4.1 можно сделать следующие более детальные выводы: в азимутальной плоскости несогласованность ШДН по уровню минус 3 дБ составила $0,075^\circ$ (эквивалентно разнице примерно в 0,3 дБ по уровню сигнала), в угломестной – $0,023^\circ$ (эквивалентно разнице примерно в 0,1 дБ по уровню сигнала), по уровню минус 10 дБ – $0,014^\circ$ (эквивалентно разнице примерно в 0,8 дБ по уровню сигнала) и $0,003^\circ$ (эквивалентно разнице в 0,1 дБ по уровню сигнала) соответственно. Несогласованность УБЛ в азимутальной плоскости составила 2,6 дБ (на уровнях порядка минус 22 – 24 дБ), в угломестной – 1 дБ (на уровнях порядка минус 19 – минус 20 дБ).

Вышеприведенный анализ показал, что для всех анализируемых характеристик несогласованность результатов измерений находится в пределах инструментальной погрешности СШП АИВК БЗ с вертикальной поверхностью сканирования (Приложение Г) за исключением УБЛ в азимутальной плоскости. Разница превышает заявленную погрешность на 1,4 дБ. Данный факт объясняется тем, что как видно из рисунков 4.3, 4.5, 4.7 АФР ИА измерено не достаточно корректно, а именно – наблюдается усечение требуемой области сканирования (см. подраздел 1.5), 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, соответствующим порядка минус 20 дБ, на различных расстояниях до ЗА, в том числе и в зоне Френеля с нижней границей, определяемой по (1.5). Для повышения точности восстановления ДН на более низких уровнях необходимо обеспечивать требуемую область сканирования для исключения погрешности, связанной с ограничением.

4.2 Сравнительный анализ отклонения оси ДН офсетной зеркальной антенны с эллиптической поляризацией по результатам аналитической, численно-модельной и экспериментальной оценки с учетом отклонения зондовой антенны от нормали к плоскости сканирования

В данном подразделе исследуется отклонение ДН в плоскости ортогональной оси симметрии офсетной однорефлекторной антенны Q -диапазона с эллиптической поляризацией [17]. Проведен сравнительный анализ отклонений ДН при правом и левом направлениях вращения вектора напряженности электрического поля антенны с помощью аналитического выражения, а также методами численного моделирования и натурного эксперимента. 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 $\lambda/4$ рабочей волны.

Зеркальные офсетные антенны получили широкое распространение, как в наземных, так и в бортовых информационных комплексах благодаря своей конструкции, 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 [130]. 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 ракеты-носителя (рисунок 4.11).

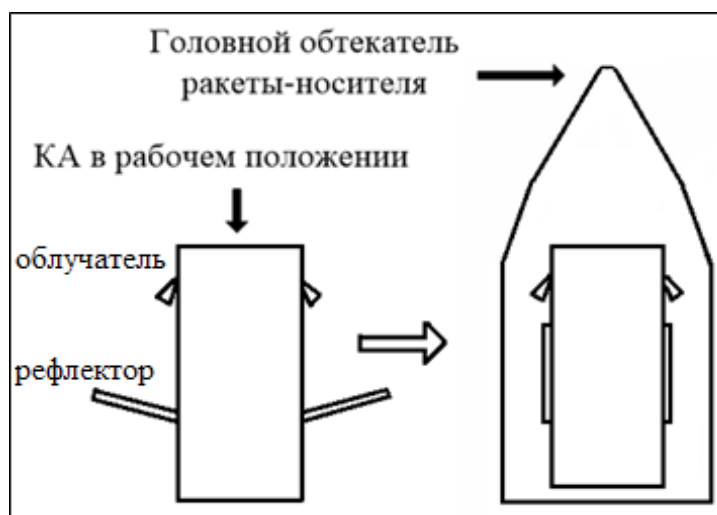


Рисунок 4.11 – Схематичное изображение КА в рабочем положении и размещенного в головном обтекателе ракеты-носителя

Одним из основных недостатков данного типа антенн (помимо более высокого уровня кросс-поляризационного излучения в сравнении с осесимметричными антеннами) является отклонение ДН от фокальной оси в плоскости, ортогональной плоскости симметрии антенны, при излучении эллиптически поляризованного поля [131–133]. У прямофокусных антенн с эллиптической поляризацией данный эффект практически не проявляется. Как известно, к отклонению ДН приводят линейные и кубические искажения в фазовом распределении на апертуре антенны [134]. Данные искажения подразделяют на детерминированные и случайные. Причинами случайных фазовых искажений могут являться несовершенство в изготовлении элементов антенной системы, вследствие чего распределение тока по апертуре будет отличаться от синфазного. К детерминированным относят фазовые искажения, которые заранее известны и вносятся специально, к примеру, для осуществления сканирования ДН в требуемом угловом секторе. Особенность протекания

поверхностных токов на рефлекторе офсетной антенны приводит к тому, что линейные компоненты эллиптически поляризованного поля, отраженного от рефлектора, испытывают деполяризацию. В результате этого фазовый фронт отраженного поля становится неоднородным, появляются линейные искажения в фазовом распределении поля на апертуре, как следствие, наблюдается отклонение ДН в плоскости, ортогональной плоскости симметрии антенны. Отклонение электрической оси от направления оптической оси приводит в свою очередь к снижению коэффициента усиления (КУ) на краях требуемой зоны облучения при работе антенны на двух круговых поляризациях противоположных направлений, что может быть критичным. Фазовые искажения, приводящие к вышеописанному эффекту, можно считать детерминированными, поскольку в литературе [131 – 133] приводятся соотношения, позволяющие с точностью до $0,01^\circ$ определить угол смещения ДН относительно оси симметрии антенны. Близкую к истинной зависимость между углом θ отклонения ДН от нормального направления и параметрами антенны можно определить, как

$$\sin(\theta) = \pm (\sin(\theta_0)\lambda) / 4\pi F, \quad (4.1)$$

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

Для анализа использовалась офсетная антенна K -диапазона со следующими основными геометрическими параметрами: рабочая частота – 19 ГГц, фокусное расстояние – 800 мм, диаметр рефлектора – 700 мм, угол офсета – $30,08^\circ$. Моделирование выполнялось в ПО Grasp. Трехмерная модель антенны представлена на рисунке 4.12.

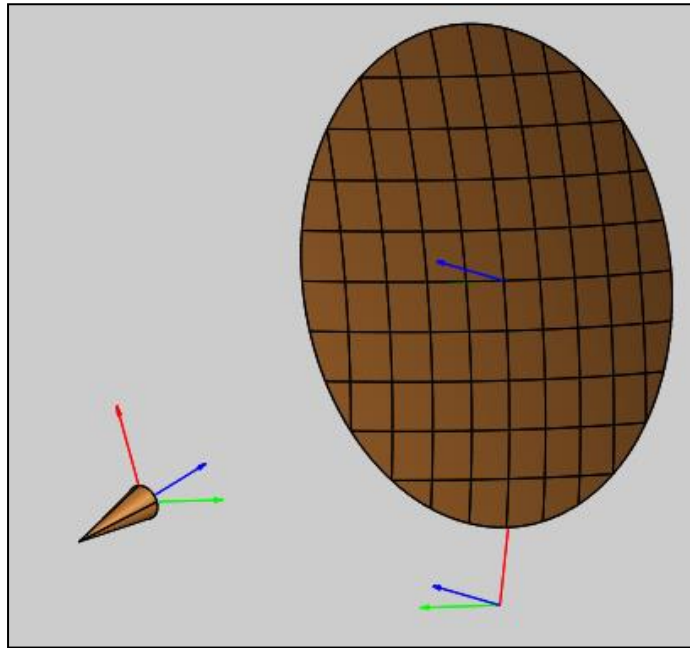


Рисунок 4.12 – Модель антенны в программном пакете Grasp

Сравнительные результаты численного моделирования и результатов измерений в БЗ представлены в картографической проекции – в ПО Satsoft на рисунке 4.13. Проекций ДН представлены для левосторонней поляризации по уровню половинной мощности.

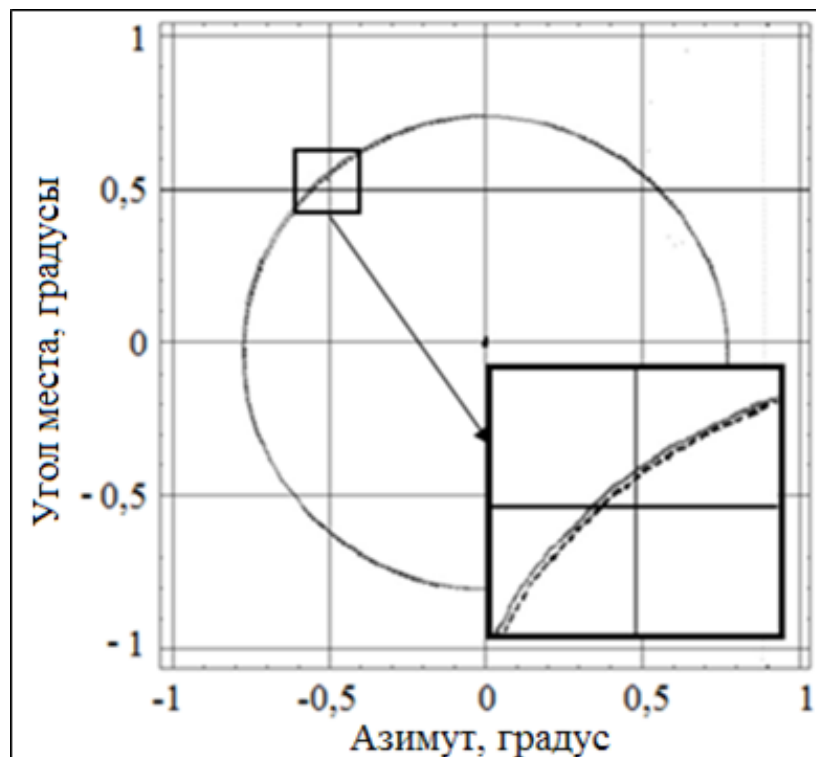


Рисунок 4.13 – Численно-модельная (--) и измеренная (—) картографические проекции ДН по уровню минус 3 дБ с увеличенным фрагментом

На рисунке 4.14 показаны проекции измеренных ДН для правой и левой эллиптических поляризаций. Отклонение от оптической оси составило $\pm 0,042^\circ$.

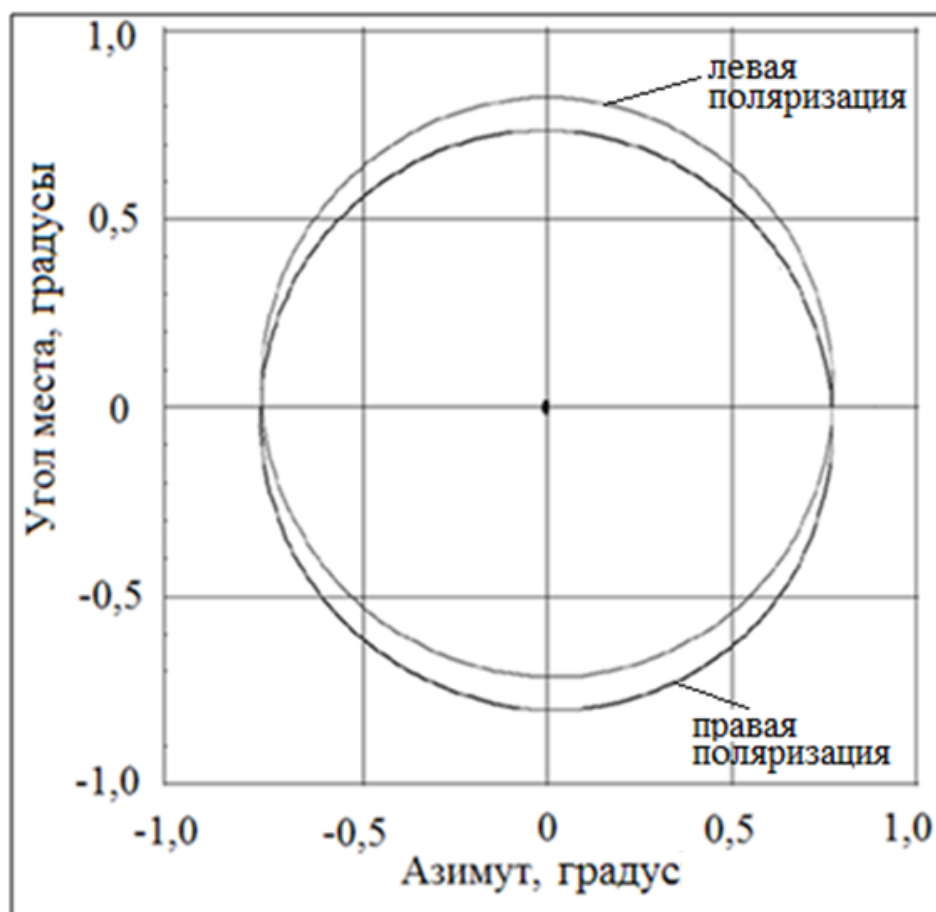


Рисунок 4.14 – Картографические проекции ДН, измеренные по уровню минус 3 дБ для левой и правой эллиптических поляризаций

На рисунке 4.15 показаны проекции ДН для правой и левой эллиптической поляризации, полученные в результате численного моделирования (--) и по результатам измерений (—) на АИВК БЗ. Рисунок поясняется увеличенным фрагментом, на котором отчетливо видно, что результаты, полученные численным моделированием и посредством измерений имеют практически идентичные результаты.

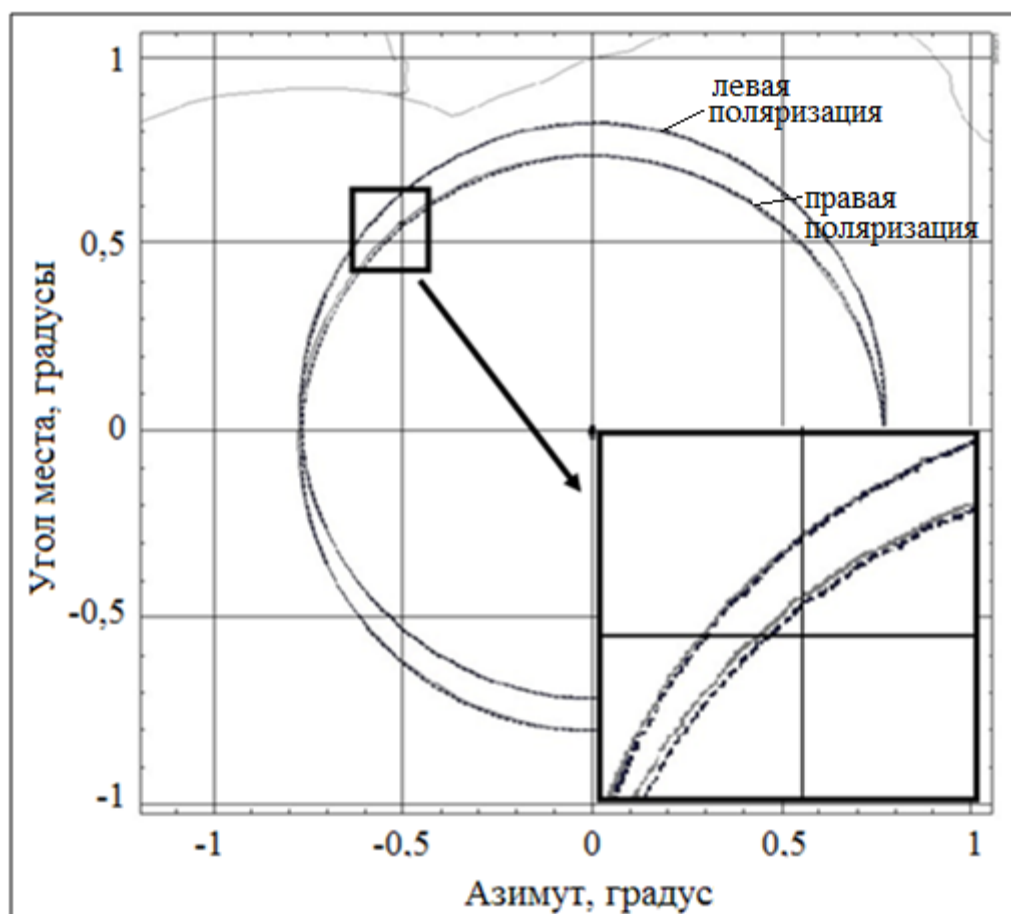


Рисунок 4.15 – Картографические проекции ДН, полученные в результате моделирования (--) и измеренные (—) по уровню минус 3 дБ для левой и правой эллиптической поляризации с увеличенным фрагментом

В результате проведенного исследования получены три значения отклонения электрической оси ДН антенны: по формуле (4.1), численным моделированием и посредством измерений. Значения, рассчитанные по соотношению (4.1) и по результатам моделирования, полностью совпадают и составляют $0,045^\circ$. Значение, полученное в результате измерений на СШП АИВК, составляет $0,042^\circ$. Таким образом, отклонение теоретических и практических значений составило $0,003^\circ$, что значительно меньше инструментальной погрешности измерительного комплекса $0,02^\circ$ (Приложение Г). 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 (4.1) позволяет с высокой точностью провести априорную оценку отклонения ДН офсетной зеркальной антенны с эллиптической поляризацией.

Существуют различные способы компенсации влияния отклонения электрической оси ДН в офсетных антеннах эллиптической поляризации [135]:

- Для уменьшения эффекта отклонения луча можно уменьшить угол между оптической осью облучателя и осью параболы по формуле (3.1). Это достигается увеличением фокусного расстояния антенны. В космической технике этот метод малоактуален, поскольку приводит к увеличению габаритов антенны.
- Альтернативой является усложнение облучающей системы. Облучающий рупор можно выполнить 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. 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.
- В качестве облучателя используют решетку из трех 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 кросс-поляризации 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.
- 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.

Таким образом, расчетные и экспериментальные данные по оценке отклонения ДН от направления оптической оси практически полностью согласуются. Существуют различные способы компенсации эффекта отклонения ДН в офсетных антеннах с эллиптической поляризацией. Выбор того или иного способа определяется конкретными задачами. Проекция угла отклонения ЗА на плоскость сканирования, составляющая около $\lambda/4$, не влияет на результаты измерения направления электрической оси ИА.

4.3 Экспериментальное исследование влияния отклонения зондовой антенны от нормали к плоскости сканирования на характеристики направленности антенн КА

Для осуществления точных измерений РТХ антенн на планарном АИВК БЗ важным аспектом является точность позиционирования ЗА в заданной системе координат [80]. Помимо перемещения ЗА в декартовых координатах имеет место вращение по крену (по поляризации), необходимое для измерения двух ортогональных составляющих вектора напряжённости электрического поля и расчёта суммарной ДН, КПР, КЭ и других характеристик. На практике во всех случаях имеет место некоторое отклонение ЗА от её оси вращения, несмотря на высокую точность изготовления элементов измерительного оборудования. Зондовые антенны являются сменными нестационарными устройствами в составе АИВК. Это приводит к постепенному износу контактных частей, что становится причиной возникновения прецессий. В связи с этим актуальной является задача экспериментальной оценки влияния отклонения продольной оси ЗА в виде открытого конца прямоугольного волновода от нормали на измерение РТХ ИА.

На рисунке 4.16 схематически показано отклонение ЗА от нормали к поверхности сканирования и возникающее вследствие этого линейное смещение проекции апертуры ЗА на плоскость сканирования.

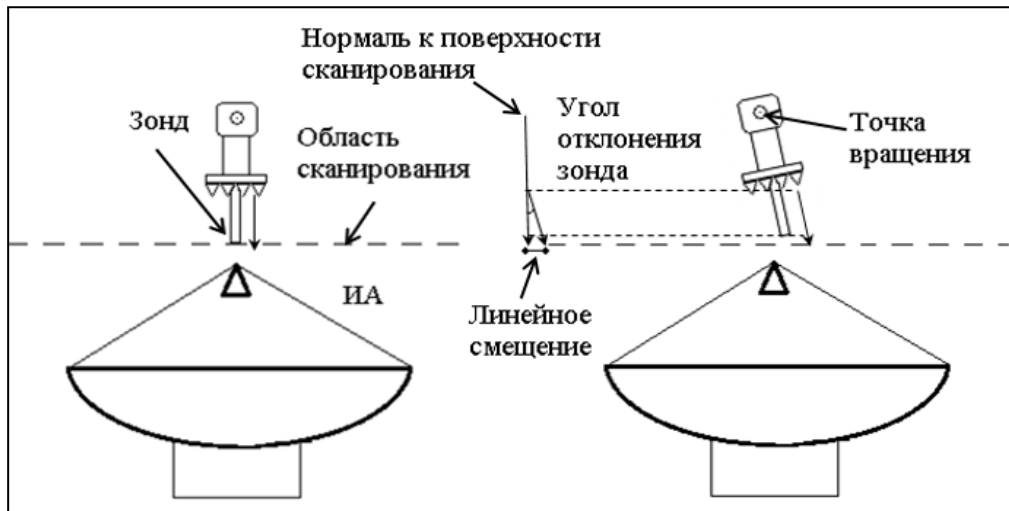


Рисунок 4.16 – Отклонение зондовой антенны от нормали к поверхности сканирования и возникновение линейного смещения апертуры зондовой антенны

Эксперимент проводился на АИВК БЗ с горизонтальной поверхностью сканирования. В качестве объекта исследования использовалась двухзеркальная осесимметричная антенна K -диапазона с эллиптической поляризацией с синфазным, спадающим к краю амплитудным распределением. Геометрические параметры антенны: основное зеркало – параболоид вращения диаметром 900 мм (60λ), малое зеркало – гиперboloид вращения диаметром 200 мм, облучатель – конический гофрированный рупор с диаметром апертуры 55 мм, рабочая частота 20,8 ГГц, длина волны $\lambda \approx 15$ мм. Расстояние от точки вращения ЗА (рисунок 4.16) до плоскости сканирования составляло 800 мм. Область сканирования выбиралась из условия (1.8). Расстояние от апертуры ЗА до апертуры ИА – 400 мм ($26,7 \lambda$ – расстояние близкое к величине радиуса ИА). По результатам измерений ожидалось нарастание погрешности восстановления ДН по мере увеличения отклонения ЗА от нормали к плоскости сканирования.

Первоначально проводился цикл статистических измерений, по результатам которых погрешность измерений не превысила заданную производителем АИВК погрешность. Динамический диапазон измерительной системы составлял порядка 70 дБ. Для получения наиболее точных результатов измерений в БЗ необходимо учитывать характеристики направленности ЗА [105, 106]. На рисунке 4.17 приведены сечения ДН ЗА в E и H плоскостях.

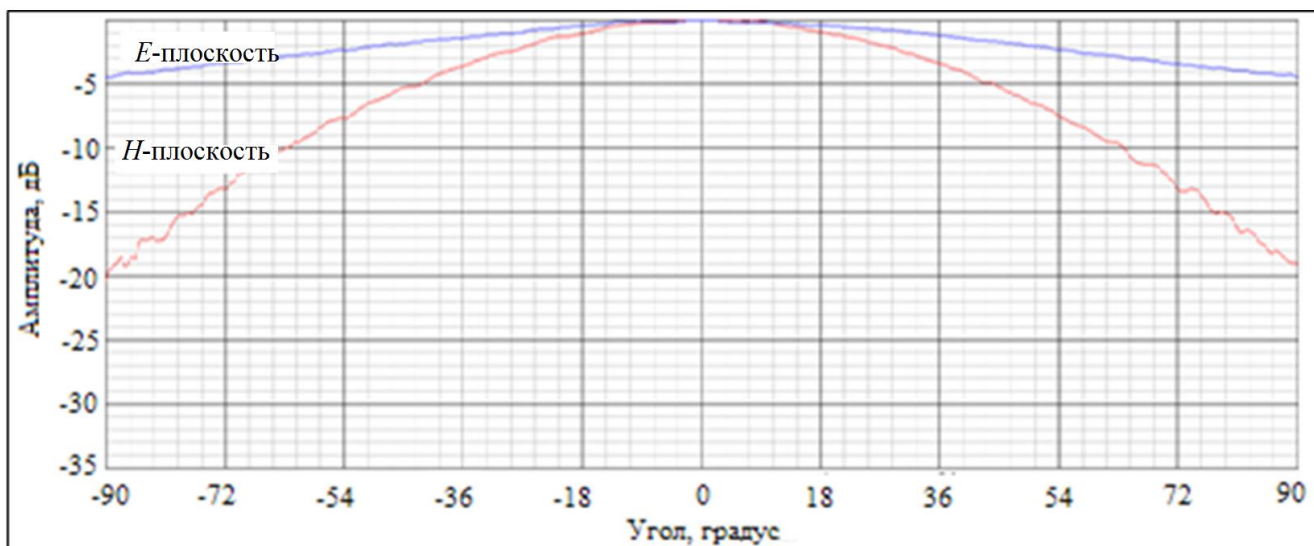


Рисунок 4.17 – Сечения ДН зондовой антенны в плоскостях E и H .

Ниже представлены сечения ДН ИА, восстановленные с учетом и без учета ДН ЗА в плоскости, соответствующей плоскости H ЗА (рисунок 4.18).

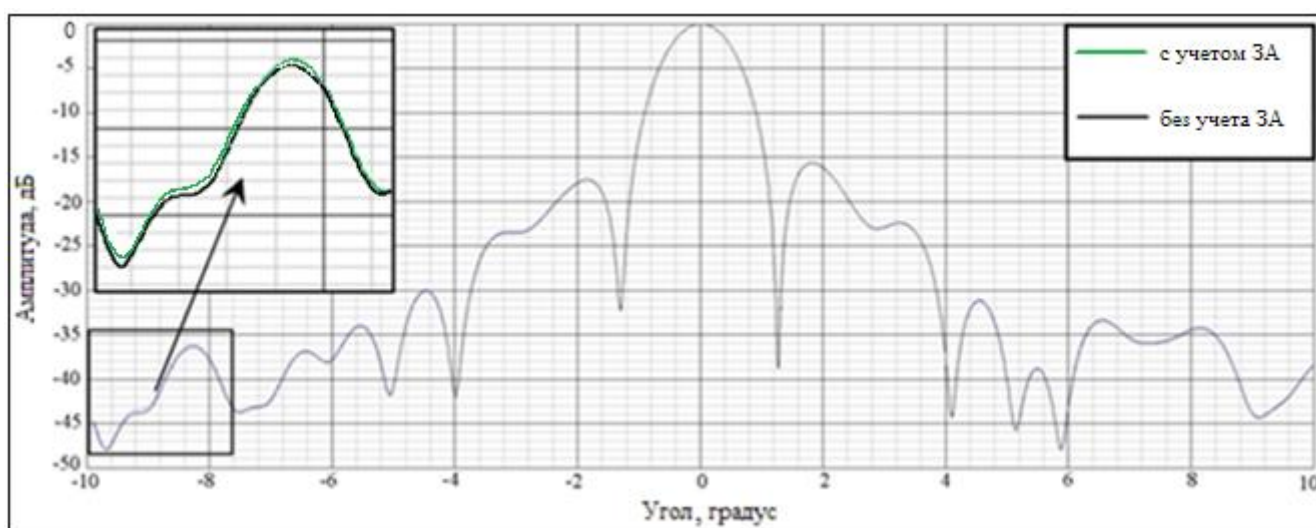


Рисунок 4.18 – Сечения суммарных ДН в азимутальной плоскости с увеличенным фрагментом с учётом и без учёта ДН зондовой антенны

Из увеличенного фрагмента рисунка 4.18 видно, что по мере удаления от осевого направления разница между ДН нарастает (сказываются свойства направленности ЗА). Однако, в данном случае изменение амплитуды ДН не превышает погрешность АИВК, которая составляет на уровнях ДН ниже минус 30 дБ примерно 0,5 дБ (Приложение Г).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в данном эксперименте неизотропностью ДН ЗА можно пренебречь.

На рисунке 4.19 показаны сечения ДН в азимутальной плоскости, рассчитанные по результатам измерений с различным отклонением ЗА от нормали к поверхности сканирования.

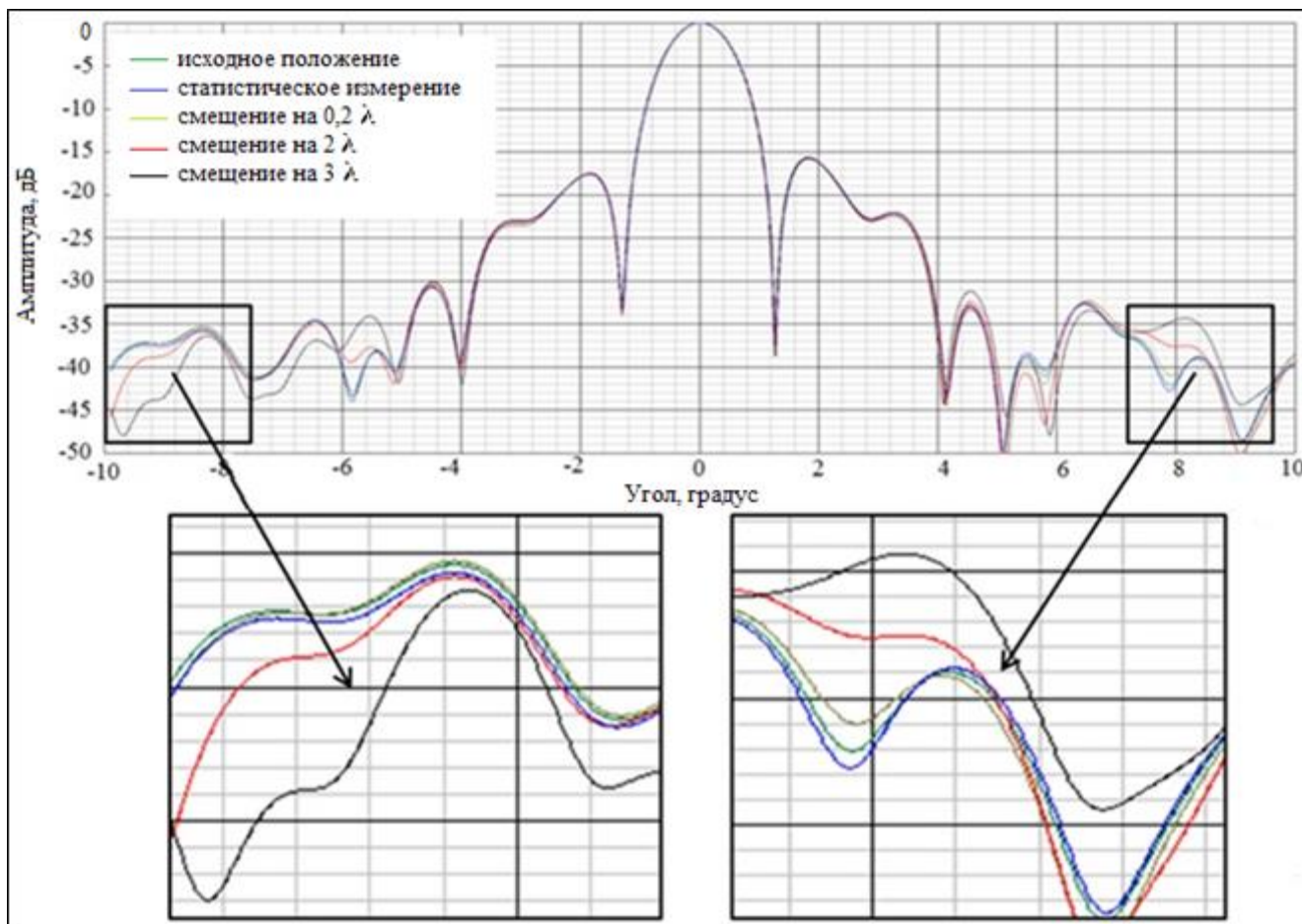


Рисунок 4.19 – Сечения ДН для комплекса измерений с различным углом наклона зондовой антенны с увеличенными фрагментами.

Как и ожидалось, на рисунке 4.19 видно, что наибольшее отклонение относительных уровней ДН от результатов измерений с корректным шагом наблюдается для отклонения на 3 градуса, что соответствует линейному перемещению на 42 мм, превышающему λ в 3 раза. Отклонение значений ДН начинают превышать погрешность АИВК:

- для линейного смещения ЗА на $0,2 \lambda$ – на уровнях минус 40 дБ;

- для линейного смещения ЗА на 2λ – на уровнях минус 33 дБ;
- для линейного смещения ЗА на 3λ – на уровнях минус 23 дБ.

Для устранения отклонения ЗА от нормали к плоскости сканирования предлагается использовать оптические системы контроля, такие как лазерные дальномерные системы (радары) типа MV 224, MV 260, и др. производства компании Metris [136]. На рисунке 4.20 а) представлена ЗА компании SATIMO [137], применявшаяся для проведения вышеописанных экспериментов, на которой расположены реперные точки (специализированные оптические сферы), установленные на магниты. На рисунке 4.20 б) показан лазерный радар MV 260. Измеряя время оклика оптического луча от реперных точек, радар позволяет оценить их положение с точностью до 0,15 мм на расстоянии порядка 15 м от объекта измерений. Таким образом, можно контролировать положение ЗА с большой точностью и компенсировать её отклонения от нормали к поверхности сканирования либо позиционером АИВК либо, если такой возможности нет, – технологическими проставками.

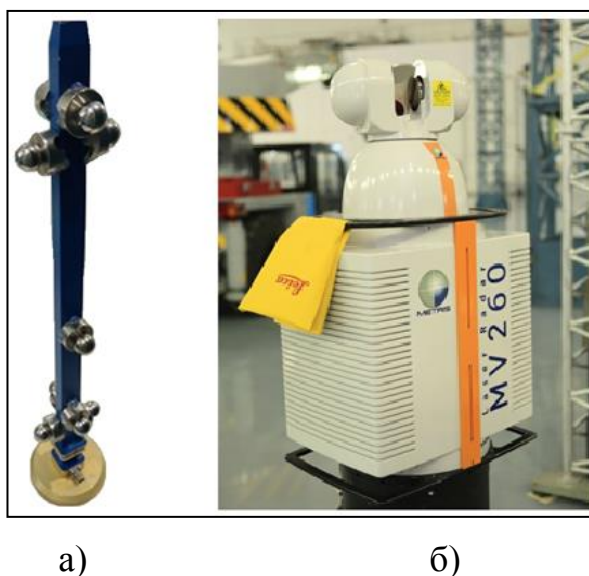


Рисунок 4.20 – а) Зондовая антенна диапазона 18 – 26,5 ГГц, применявшаяся в эксперименте; б) Лазерный радар

В качестве выводов можно отметить следующее: экспериментально установлено, 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 при динамическом диапазоне измерительной системы порядка 70 дБ. Отклонение на величину, превышающую длину рабочей волны в 3 раза, не приводит к искажению определения электрической оси ИА и позволяет восстанавливать ДН до уровня минус 23 дБ с точностью, не превышающей погрешность АИВК. Для минимизации отклонения ЗА от номинального положения целесообразно использовать прецизионные лазерные радары. Влияние отклонения ЗА на измерение уровня кросс-поляризации и КПП – предмет дальнейших исследований. Так же, важно отметить, что полученные выводы сделаны для конкретного расстояния между апертурой ИА и плоскостью сканирования. Оценка количественных показателей для восстановленных ДН при измерениях на различных расстояниях при отклонении ЗА от нормали к плоскости сканирования требует дополнительных исследований. Автор предполагает, что полученные в подразделе результаты могут быть в некоторой степени экстраполированы для различных расстояний при условии, что поле от ИА по мере увеличения расстояния будет расходиться незначительно.

4.4 Особенности измерения коэффициента эллиптичности на автоматизированном измерительном комплексе дальней зоны в частотной области

Измерительный полигон на основе АИВК ДЗ, расположенный в АО «ИСС», представляет собой разнесённые в пространстве передающую и приёмную части, между которыми располагается ниспадающий рельеф протяжённостью 2,5 километра. На рисунке 4.21 представлена структурная схема измерительного полигона.

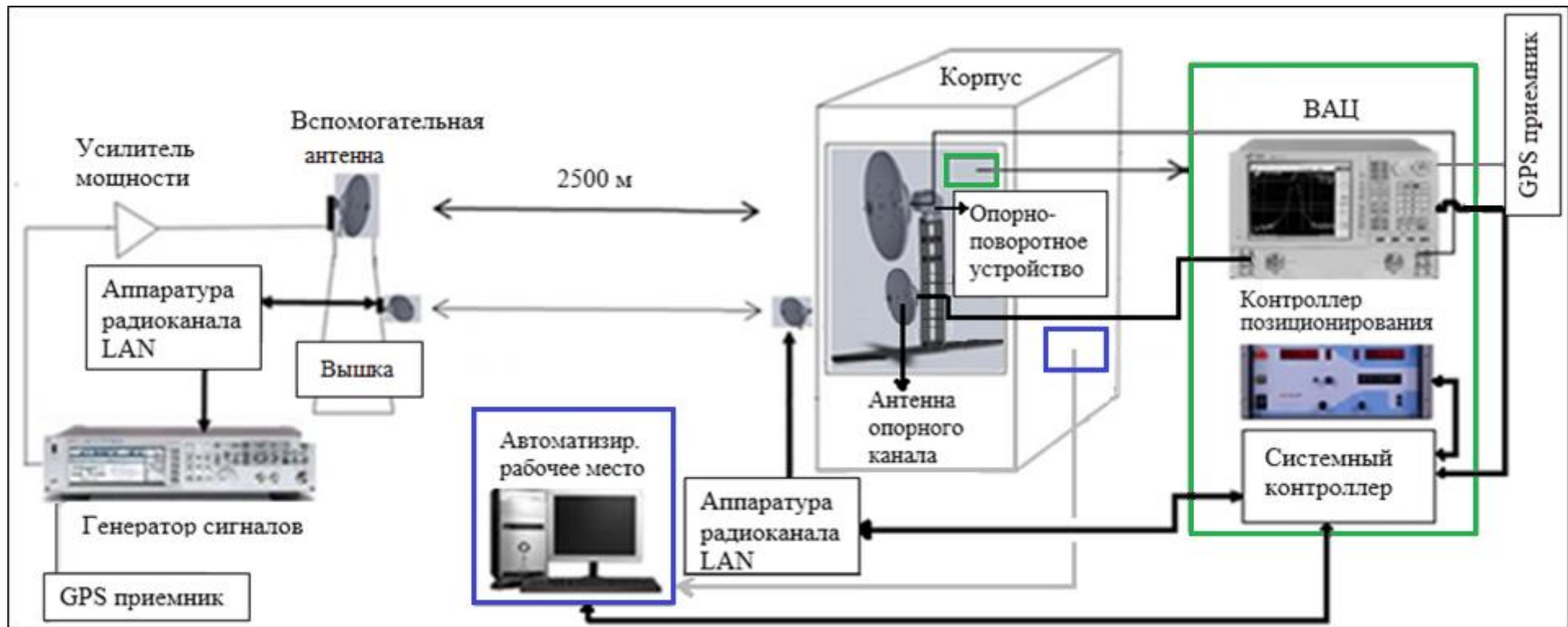


Рисунок 4.21 – Структурная схема измерительного полигона дальней зоны с базой 2,5 км на АО «ИСС»

В эксперименте использовалась двухзеркальная антенна Кассегрена с эллиптической поляризацией, которая упоминалась в предыдущем подразделе. Антенна устанавливалась на ОПУ, с помощью которого осуществлялось вращение антенны в плоскости азимута и угла места в секторе $8^\circ \times 8^\circ$. Вспомогательная антенна закреплялась неподвижно на вышке на удалении в 2,5 км и работала в режиме передачи. Поляризационные характеристики антенны измеряются методом разложения волны на ортогонально-поляризованные компоненты электрического поля в линейном базисе. При этом вспомогательная антенна излучает линейно поляризованное электромагнитное поле (в нашем случае вертикальной поляризации). Плоскость поляризации вспомогательной передающей антенны выставляется относительно горизонта при помощи высокоточного квадранта, обеспечивающего инструментальную погрешность не более 10 угловых секунд.

Знак рассчитанного КЭ определяет направление вращения вектора напряжённости электрического поля. Для того, чтобы связать знак КЭ с характеристикой антенны – правой или левой поляризации – необходимо зафиксировать схему измерений. Если при измерении поляризационных характеристик первой измерять вертикальную ортогональную компоненту поля, а второй – горизонтальную, и при этом вращать вспомогательную антенну по часовой стрелке, глядя со стороны апертуры антенны, то положительное значение КЭ будет соответствовать антенне с левой поляризацией, а отрицательное – с правой.

Перед началом измерений необходимо провести взаимную юстировку измеряемой и вспомогательной антенн и устранить возможную прецессию электрических осей при их повороте по оси поляризации (по крену).

Отличие традиционного измерения КЭ от измерений с помощью АИВК заключается в следующем: традиционный метод подразумевает непрерывное вращение ИА по крену с фиксацией максимального и минимального уровней сигнала, соответствующих различным положениям поляризационного эллипса ИА [21]. После чего по известным формулам определялся КЭ, либо КПР. При

использовании современного АИВК коэффициент эллиптичности, как правило, вычисляется как вторичная характеристика после проведения измерения объёмной ДН по формуле (1.19).

ИА непрерывно перемещается в азимутальной плоскости, затем в шаговом режиме изменяется положение в угломестной плоскости и цикл повторяется до момента, когда весь заданный по двум координатам сектор измерен. После этого антенна поворачивается на 90 градусов по крену, и вышеописанная операция повторяется. Такой метод может приводить к некорректному измерению КЭ, поскольку исходное положение может не соответствовать совмещённому положению большой (или малой) осей поляризационного эллипса с плоскостью колебаний вектора \vec{E} вспомогательной антенны. Для корректного измерения КЭ предварительно требуется путём поворота ИА по крену найти положение, при котором будут зафиксированы максимальный и минимальный уровни сигнала. Это положение будет соответствовать совпадению большой оси поляризационного эллипса с плоскостью линейно поляризованного вектора \vec{E} (рисунок 4.22 а). После проведения цикла измерений будут сформированы исходные данные для дальнейшего расчёта в ПО.

На рисунке 4.22 представлено упрощённое геометрическое представление положений поляризационных эллипсов ИА в плоскости колебания линейно поляризованного вектора напряжённости \vec{E} электрического поля вспомогательной антенны.

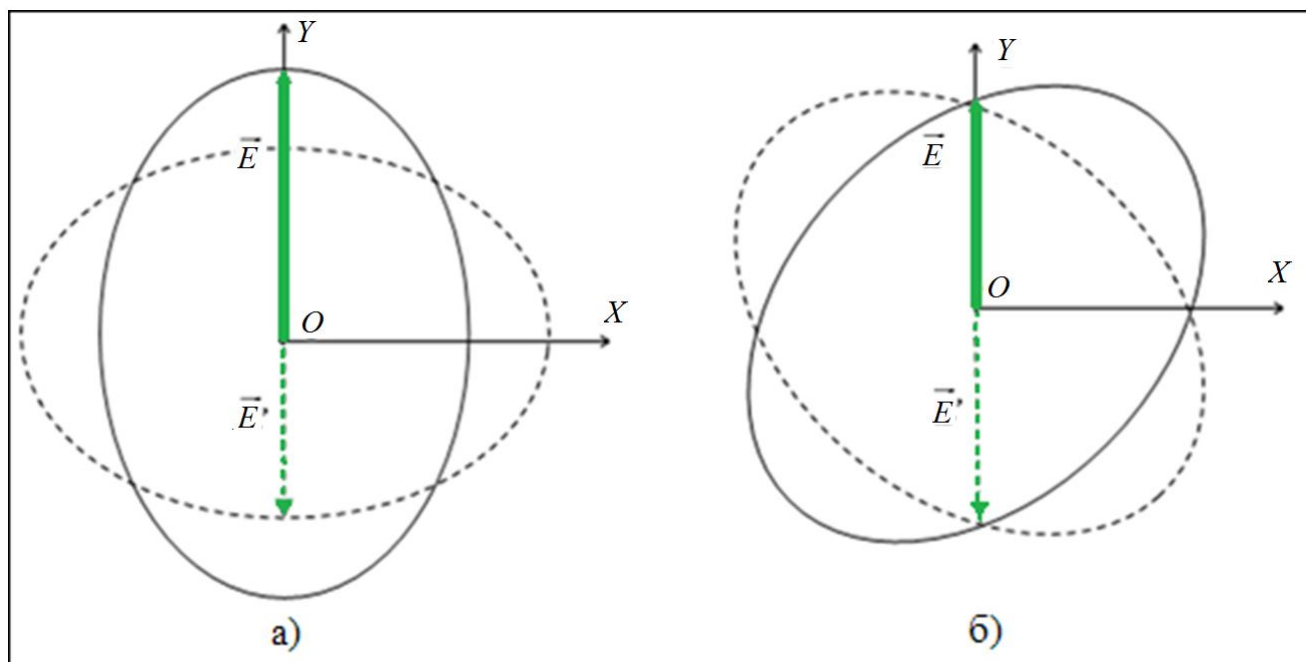


Рисунок 4.22 – Упрощенное представление взаимного расположения поляризационного эллипса исследуемой антенны и плоскости колебаний вектора вспомогательной антенны с линейной вертикальной поляризацией для исходного

(—, \vec{E}) и ортогонального (---, \vec{E}') положений:

а) корректное, б) некорректное

Если большая полуось поляризационного эллипса ИА не будет совпадать с плоскостью основной поляризации вспомогательной антенны (рисунок 4.22 б), КЭ ИА будет существенно завышен (рисунок 4.23, таблица 4.2).

На рисунке 4.23 представлены графики частотной зависимости КЭ при различных начальных установках поляризационного эллипса ИА. Под цифрой «1» показаны результаты измерений КЭ, когда поляризационный эллипс исследуемой антенны сориентирован большой полуосью сонаправлено с плоскостью вертикальной поляризации вспомогательной антенны; под цифрой «2» – ориентация большой полуоси поляризационного эллипса отличается от плоскости вертикальной поляризации вспомогательной антенны. Отрицательный знак показывает направление вращения вектора поляризации ИА.

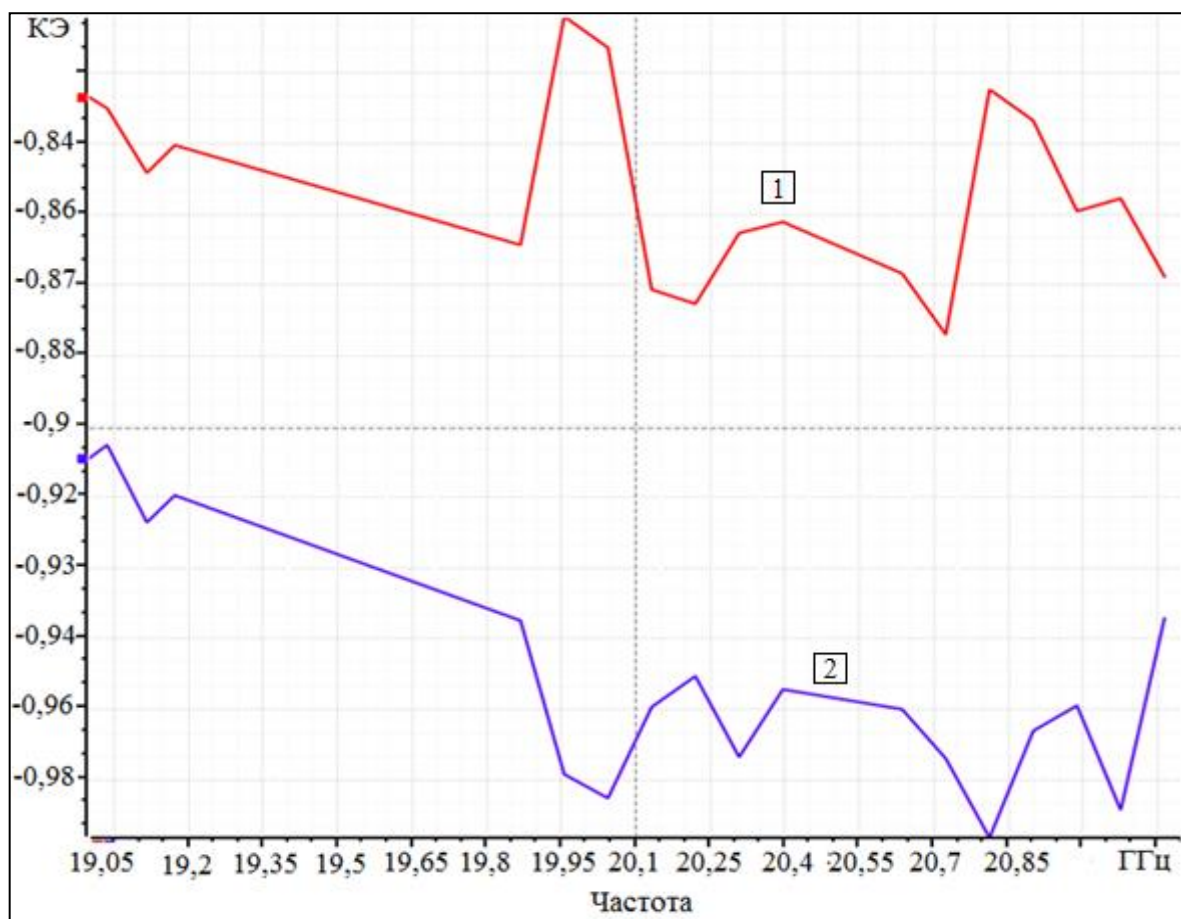


Рисунок 4.23 – Результаты измерений коэффициента эллиптичности антенны для двух положений: 1 – корректного; 2 – некорректного

Таблица 4.2 – Коэффициент эллиптичности исследуемой антенны

Частота, ГГц	Корректное измерение		Некорректное измерение	
	Разница по уровню сигнала, дБ	КЭ	Разница по уровню сигнала, дБ,	КЭ
19,0	1,61	-0,83	0,85	-0,91
19,116	1,45	-0,85	0,72	-0,92
19,868	1,29	-0,86	0,52	-0,94
20,044	1,72	-0,82	0,18	-0,98
20,22	1,17	-0,87	0,42	-0,95
20,396	1,34	-0,86	0,39	-0,96
20,724	1,10	-0,88	0,26	-0,97
20,812	1,63	-0,83	0,11	-0,99
20,9	1,56	-0,84	0,31	-0,96
20,988	1,36	-0,85	0,36	-0,96
21,076	1,39	-0,85	0,16	-0,98
21,164	1,22	-0,87	0,53	-0,94

Таким образом, корректный выбор первоначального положения ИА 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 неудовлетворяющей требованиям технических условий. Данные особенности измерения КЭ в автоматизированном режиме рекомендуются к включению в руководство по эксплуатации АИВК.

4.5 Основные результаты главы

1. Результаты эксперимента с различным расстоянием от зондовой антенны до апертуры исследуемой антенны показывают, что поставленная цель по оценке формы ДН в пределах зоны обслуживания достигнута – форма картографических проекции ДН имеет высокую степень согласованности до относительного уровня -20 дБ. Увеличение взаимного расстояния между антеннами приводит к увеличению требуемой области сканирования, а также к снижению динамического диапазона регистрируемого поля, что приводит к увеличению погрешностей измерений. Стоит отметить, что в данном эксперименте большой вклад в неточность восстановления результирующей ДН в дальней зоне оказала погрешность ограничения области сканирования.
2. Расчетные и экспериментальные данные по оценке отклонения электрической оси ДН хорошо согласуются. Согласованность результатов имеет значительно меньшую погрешность в сравнении с заявленной погрешностью измерительного комплекса. Проекция отклонения зондовой антенны от нормали к плоскости сканирования в пределах четверти длины волны не приводит к погрешности восстановления направления электрической оси.
3. По результатам проведения экспериментального исследования влияния отклонения зондовой антенны от нормали к плоскости сканирования на характеристики направленности зеркальной антенны K -диапазона можно сделать следующие выводы: линейное смещение апертуры зондовой антенны в виде

открытого конца прямоугольного волновода в пределах $0,2 \lambda$ не приводит к увеличению погрешности восстановления ДН, превышающей погрешность АИВК вплоть до уровня минус 40 дБ при динамическом диапазоне измерительной системы порядка 70 дБ. Экспериментально установлено, что отклонение продольной оси зондовой антенны на угол, проекция которого в линейном отношении превышает длину рабочей волны в 3 раза, не приводит к отклонению электрической оси антенны и позволяет восстанавливать ДН до уровня минус 23 дБ с точностью, не превышающей погрешность АИВК. Для контроля положения зондовой антенны необходимо использовать прецизионные лазерные радары. В работе исследовано влияние отклонения зондовой антенны от нормали к поверхности сканирования на характеристики направленности зеркальной антенны. Влияние отклонения зондовой антенны на измерение уровней кросс-поляризации и кросс-поляризационной развязки – предмет дальнейших исследований.

4. Корректный выбор первоначального положения исследуемой антенны в значительной мере определяет результат определения коэффициента эллиптичности. В нашем случае максимальная разница в расчете коэффициента эллиптичности составила 0,16. При некорректном выборе первоначального положения итоговый результат определения коэффициента эллиптичности может стать причиной отбраковки антенны, в то время как при корректном – антенна будет удовлетворять требованиям технических условий. Установленный факт рекомендован к включению в руководство по эксплуатации автоматизированного измерительно-вычислительного комплекса дальней зоны.

5. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЙ

В разделе рассматриваются два способа повышения эффективности (увеличения скорости измерений при сохранении приемлемого качества результатов) процесса измерений:

- одновременное измерение амплитудно-фазового распределения ближнего поля многолучевой антенны, формируемого сразу несколькими облучателями исследуемой антенны (т.е. за один цикл измерений формируются массивы комплексных коэффициентов передачи сразу с нескольких портов многолучевой антенны). Для этой цели используется многопортовый режим измерений в векторном анализаторе цепей.
- увеличение шага ближнепольного сканирования, что в свою очередь сократит время измерений. Проведена оценка влияния данного параметра на результаты восстановления диаграммы направленности исследуемой антенны.

На основе приведенных в разделе результатов сформулированы третье и четвертое научные положения, выносимые на защиту диссертационной работы.

Результаты раздела опубликованы в работах: [16, 18].

5.1 Ближнепольные измерения коэффициента усиления многолучевой антенны Q -диапазона

В подразделе представлены методика и результаты измерений КУ антенны Q -диапазона методом замещения с использованием планарного сканера БЗ. Отмечается степень влияния рассогласований на результирующий КУ. Приведены сравнительные АЧХ КУ для однопортовой и двухпортовой схем измерения.

Существуют различные методы измерения КУ в БЗ [29]. В этом подразделе приводятся результаты измерений КУ методом замещения (т.е. сравнения с эталонной антенной, имеющей известный КУ) в планарном сканере БЗ (рисунок 5.1).

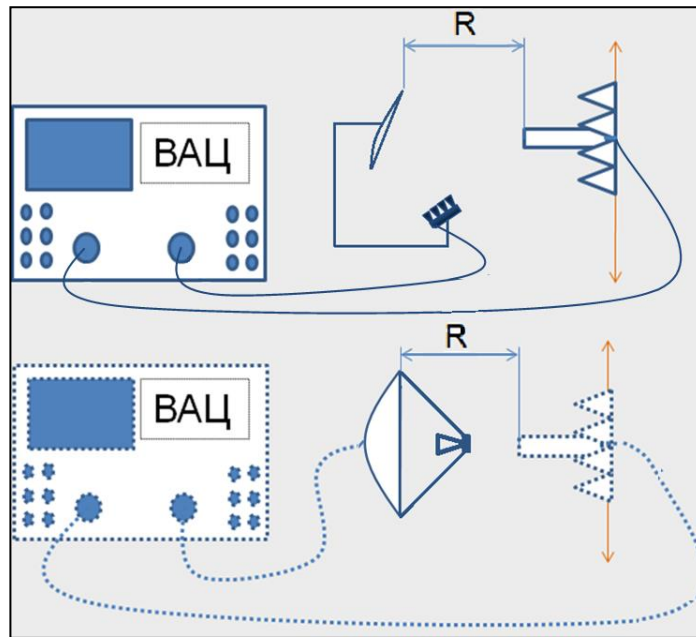


Рисунок 5.1 – Упрощенная структурная схема измерений КУ методом замещения

Процесс нахождения КУ заключается в следующем: первоначально в автоматическом режиме измеряются АФР поля вблизи раскрыва исследуемой и эталонной антенн, собираются данные о комплексных коэффициентах передачи антенн для двух взаимно ортогональных координат на плоскости (ХОУ). Для получения полной картины о формируемом ИА поле проводятся измерения для двух взаимно ортогональных положений вспомогательной линейно-поляризованной ЗА. После этого проводится математическая обработка полученных данных. Как результат, рассчитывается искомая амплитудная ДН измеренной антенны с максимумом сигнала в направлении главного лепестка ДН.

Для некоторых практических задач оказывается достаточным найти искомый КУ по формуле:

$$K_A = \frac{Q_A}{Q_{эт}} K_{эт}, \quad (5.1)$$

где K_A , $K_{эт}$ – коэффициенты усиления исследуемой и эталонной антенн, отн.ед; Q_A , $Q_{эт}$ – значения максимумов сигнала в направлении главного лепестка ДН для исследуемой и эталонной антенн (эти значения предварительно рассчитываются в ПО), отн. ед.

Для задач, в которых требуются наиболее точные определения уровня КУ, в приведенную формулу необходимо ввести поправочные коэффициенты на рассогласования в измерительном тракте. В [29] указывается, что при измерении КУ в БЗ методом замещения следует учесть отражения от исследуемой и эталонных антенн, а также от генератора. Стоит отметить, что на практике заказчика интересует КУ антенны без вычета отражений, имеющих в тракте данной антенны, т.е. так называемый реализуемый КУ, а также тот факт, что паспортные данные на КУ эталонных антенн чаще всего приводятся уже с учетом имеющихся отражений в тракте антенны. Другими словами, в практических целях дополнительных итераций, заключающихся в измерении коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) эталонной и измеряемой антенны, не требуется. Рассогласование генератора (если используется достаточно современный регулярно проходящий поверку измерительный прибор) зачастую оказывается пренебрежимо малым и не внесет существенных изменений в результирующий КУ. В то же время, с точки зрения практического опыта, стоит отметить, что при измерениях исследуемой и эталонной антенн могут использоваться различные аксессуаров СВЧ тракта, такие как коаксиальные и коаксиально-волноводные переходы (КВП). Это может привести к некоторой погрешности измерений из-за разницы вносимых потерь сигнала на отражение, поэтому учет данной разницы, в случаях, когда значения КСВН значительно отличаются, имеет практический интерес. В нашем случае КВП, используемые при измерениях антенн, имеют значения КСВН, равные 1,15 и 1,2, что соответствует значениям модуля комплексного коэффициента отражения равным 0,07 и 0,091. Для удобства расчета разницы между вносимыми потерями от каждого КВП необходимо перевести значения модулей коэффициентов отражения во вносимые потери и учесть это в результирующем КУ:

$$K_{полн} = K_{изм} + |(-10\log(1 - |\Gamma_1|^2)) - (-10\log(1 - |\Gamma_2|^2))|, \quad (5.2)$$

где:

$K_{изм}$ – измеренный (реализуемый) КУ исследуемой антенны, дБ;

$K_{полн}$ – КУ исследуемой антенны с учётом рассогласования, дБ;

$\Gamma_{1,2}$ – коэффициенты отражения от КВП, используемых для подключения к каждой из антенн, в относительных единицах.

По результатам расчетов можно сделать вывод, что измеренный КУ без учета отражений от КВП увеличится всего на 0,015 дБ, в то время как итоговая погрешность измерений КУ на АИВК (с использованием данной конкретной эталонной антенны) составит порядка 0,5 дБ. Поэтому данное значение не является критическим и может не учитываться.

Объектом испытаний являлась офсетная МЛА Q -диапазона частот с левой круговой поляризацией и 10 облучателями со следующими геометрическими параметрами: диаметр 600 мм, фокусное расстояние 1200 мм, угол офсета 23,53°. В качестве эталонной антенны использовалась осесимметричная зеркальная антенна.

В большинстве традиционных описаний измерений характеристик антенн в БЗ на плоскости ИА имеет один порт. Но возможности современных ВАЦ позволяют проводить измерения одновременно с нескольких портов тестируемой антенны. В данном подразделе приведены результаты измерений одновременно для двух портов МЛА Q -диапазона. За один проход сканером заданной области сканирования на входы приемников поступают массивы комплексных чисел, описывающих АФР поля вблизи раскрыва антенны, одновременно с двух подключенных входов антенны. Для проведения автоматизированного измерения используется программное обеспечение научно-производственного предприятия «ТРИМ», позволяющее зафиксировать АФР одновременно с двух входов приемника. Одновременное использование нескольких портов позволяет значительно сократить время измерения параметров антенн (в нашем случае – более, чем в 1,6 раза).

Состав оборудования и схемы измерений для приемника 1 (опорного) и приемника 2 (измерительного) ВАЦ приведены на рисунке 5.2.

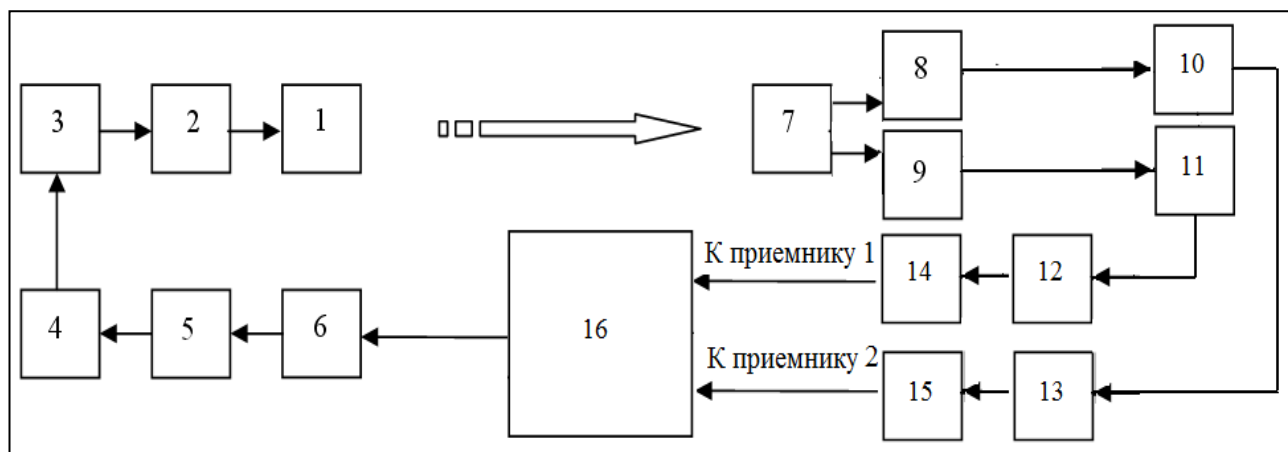


Рисунок 5.2 – Структурная схема измерений. 1 – зондовая антенна; 2 – кабель от вращающегося коаксиального сочленения до зондовой антенны; 3 – кабель от СВЧ-усилителя до вращающегося коаксиального сочленения; 4 – СВЧ-усилитель; 5 – аттенюатор 10 дБ; 6 – кабель от генератора до аттенюатора; 7 – исследуемая антенна; 8, 9 – КВП 1 и 2; 10, 11 – кабель от КВП до СВЧ-усилителей; 12, 13 – СВЧ-усилители; 14, 15 – кабели от усилителей до приемников; 16 – векторный анализатор цепей.

Многолучевая антенна имеет в своем составе 10 облучателей с обозначениями: $1L - 10L$. Порты под номерами: $1L, 2L, 5L, 6L, 7L$ подключались к приемнику 1, порты под номерами: $3L, 4L, 8L, 9L, 10L$ подключались к приемнику 2. Эталонная антенна подключалась к соответствующим портам ВАЦ для исключения влияния различных схем измерения.

Зондовая антенна была выставлена относительно центрального облучателя в решетке, находящегося в геометрическом центре всей облучающей системы, а зона сканирования была увеличена по сравнению с зоной сканирования для одного излучателя. Увеличение зоны сканирования проводится с целью создания необходимых условий для измерения поля от всех пространственно разнесенных излучателей, при этом не требуется дополнительных корректировок положения ЗА. Стоит отметить, что возможные погрешности измерений, возникающие вследствие неидентичного подключения кабелей от одной антенны к другой; погрешности, возникающие при незначительных переменах влажности, температуры (во время перестыковки от исследуемой к эталонной антенне);

погрешности от нестабильности генератора, а также погрешности, связанные с расширением зоны сканирования, принимались пренебрежимо малыми. Графики зависимости КУ антенны Q -диапазона от частоты представлены на рисунке 5.3.

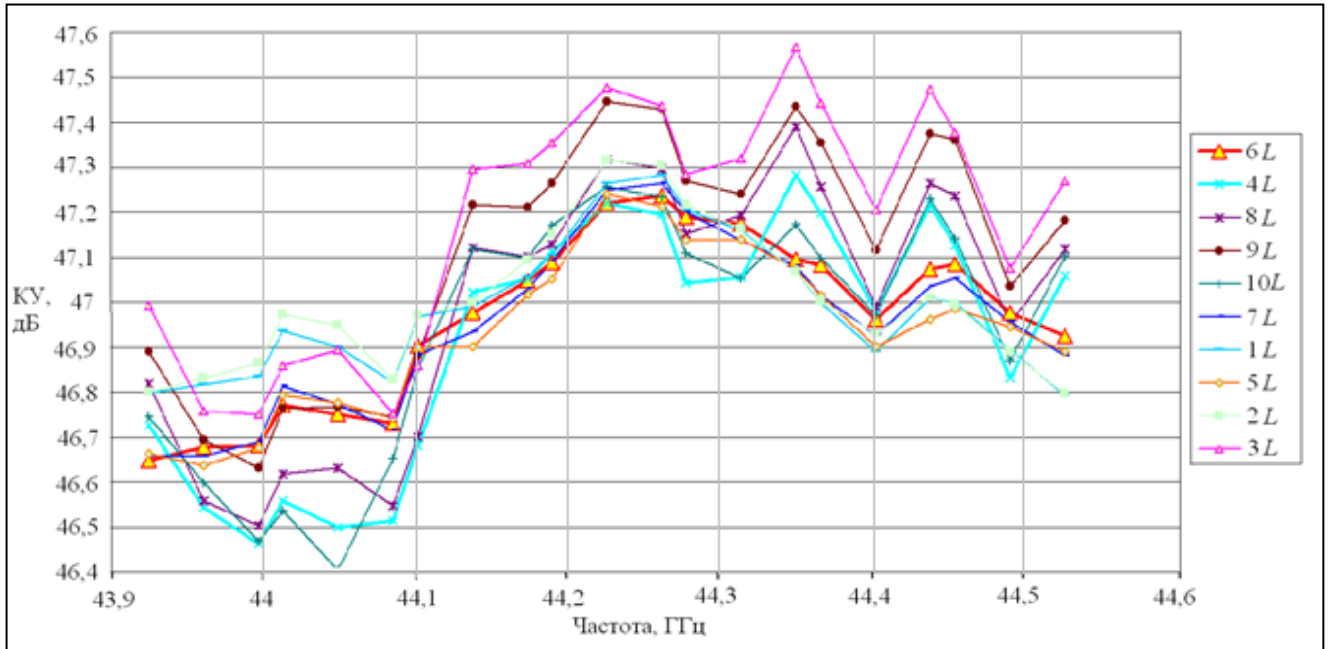


Рисунок 5.3 – Графики зависимости КУ антенны Q -диапазона от частоты

Использование как однопортовой, так и двухпортовой схемы подключения портов антенны не будет вносить существенного вклада в результирующее значение КУ. Это можно видеть на графиках, приведенных на рисунке 5.4.

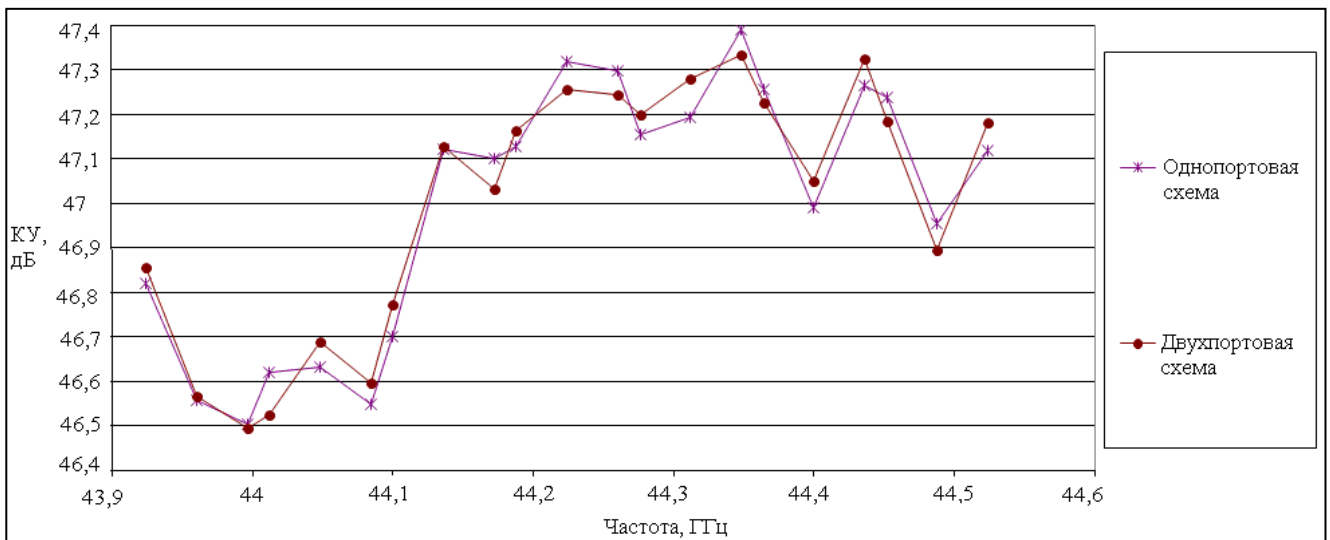


Рисунок 5.4 – Сравнительные зависимости КУ антенны от частоты для однопортовой и двухпортовой схем

Из графиков видно (рисунок 5.4), что наибольшее расхождение результатов измерений составляет менее 0,1 дБ, а это не превышает погрешности измерения КУ на АИВК (0,2 дБ, Приложение Г) и свидетельствует о хорошей согласованности результатов. Наблюдаемое наибольшее различие по КУ между портами 3L и 10L (рисунок 5.3) антенны составляет 0,36 дБ и объясняется особенностью МЛА, у которых максимальные КУ имеют излучатели, находящиеся вблизи фокуса зеркала, а минимальные – излучатели, расположенные вдали от фокуса (в неоптимальном положении). В поведении КУ ИА заметны флуктуации и его понижение с ростом частоты, что объясняется частотной избирательностью антенны и ее трактов, а так же дифракционными эффектами в антенне [128] и интерференцией волн полезного сигнала и отраженных от объектов рабочего места.

Таким образом, отмечаются следующие выводы: учет рассогласований при измерении КУ методом замещения, зачастую, имеет практический смысл только для устранения влияния неидентичных схем подключения эталонной и исследуемой антенн (использование различных КВП с отличающимися КСВН 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. В нашем случае площадь области сканирования была увеличена на 18,5% по сравнению с традиционным измерением одного порта антенны, что привело к пропорциональному увеличению времени измерений. Однако, учитывая, что в нашем случае использовался двухпортовый метод, итоговый выигрыш по времени составил более, чем 1,6 раза. Важно отметить, что для антенн с одиночным облучателем, имеющим два порта, время измерений сократится ровно в два раза.

5.2 Исследование влияния увеличения шага сканирования в ближней зоне на результаты измерений характеристик направленности антенн

В подразделе приведены 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, а так же проверка на практике справедливости аналитического выражения (5.2), позволяющего рассчитать величину шага сканирования, обеспечивающего точные измерения в пределах требуемого угла восстановления ДН.

В методиках измерения АФР антенн в БЗ указывается, что шаг сканирования, не должен превышать половину длины рабочей волны.

$$\Delta x = \Delta y \leq \frac{\lambda}{2}. \quad (5.1)$$

Условие (5.1) позволяет минимизировать погрешность за счет дискретизации измеряемого поля. Увеличение шага сканирования приведет к снижению точности измерений и, в тоже время, к сокращению времени сканирования. Для некоторых практических задач это является рациональным. К таким задачам относится оценка наведения ДН на требуемую зону обслуживания для антенн космических аппаратов, а также предварительная настройка антенны для получения информации об уровне первых боковых лепестков и ширины главного лепестка ДН. В таких случаях рационально выбирать параметры сканирования, позволяющие решить вышеуказанные задачи с требуемой точностью.

В [76] приводятся соотношения, позволяющие для точного восстановления ДН в пределах требуемого угла θ_{\max} увеличить шаг сканирования:

$$\Delta x = \Delta y \leq \lambda / 2 \sin(\theta_{\max}) \quad (5.2)$$

Объектом испытаний являлась двухзеркальная осесимметричная антенна Кассегрена Ka -диапазона, выполненная из композиционного материала, со

следующими геометрическими характеристиками: основное зеркало – параболоид вращения диаметром 640 мм, малое зеркало – гиперboloид вращения диаметром 130 мм, облучатель – конический гофрированный рупор с диаметром апертуры 50 мм. Область сканирования выбиралась из условия (1.8). Расстояние от апертуры ЗА до апертуры ИА составляло 300 мм; $\lambda \approx 11$ мм соответствует верхней частоте диапазона.

На рисунке 5.5 представлена зависимость величины шага сканирования от требуемого угла восстановления ДН.



Рисунок 5.5 – Зависимость величины шага сканирования от требуемого угла восстановления ДН

Как видно из рисунка 5.5, для требуемого угла восстановления ДН, равного 10° , по условию (5.2) шаг сканирования может составлять 31,5 мм, т.е. более, чем в 5,5 раз большем, чем рекомендуется условием (5.1).

На первом этапе экспериментов проводились статистические измерения для подтверждения согласованности результатов измерения в пределах заявленной погрешности АИВК. Динамический диапазон измерительной системы составлял порядка 70 дБ. На рисунке 5.6 представлены сечения в азимутальной плоскости для средней частоты рабочего диапазона антенны.

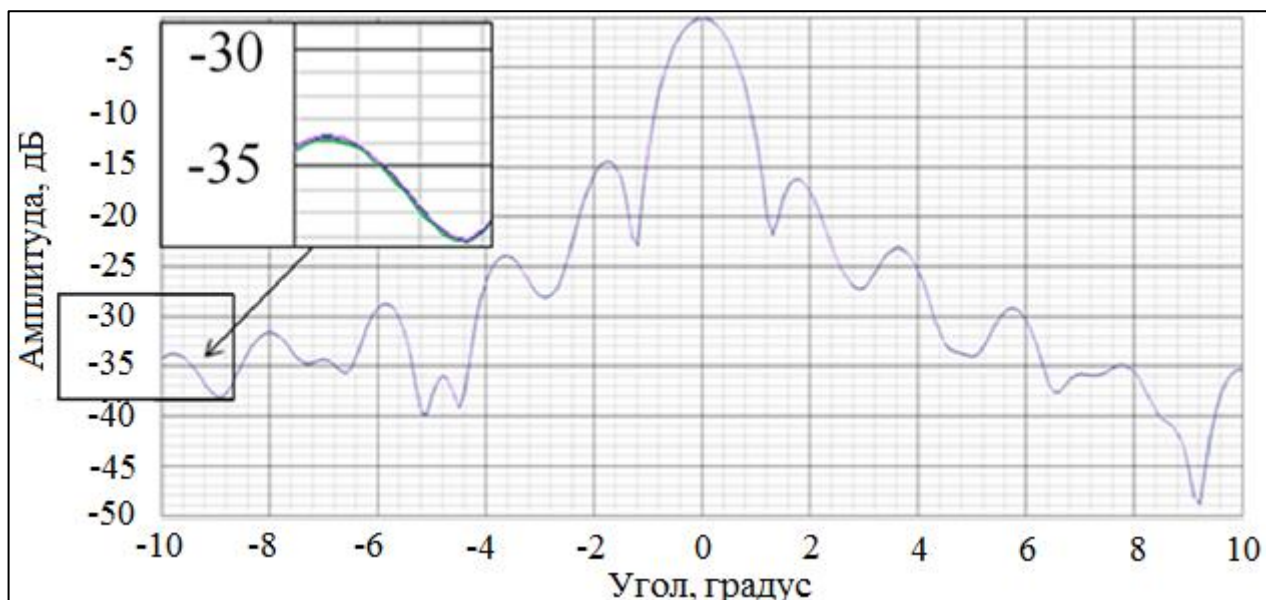


Рисунок 5.6 – Сечения ДН в азимутальной плоскости для двух последовательно проведенных измерений на средней частоте диапазона

Как видно из рисунка 5.6, повторяемость результатов измерений значительно выше заявленной погрешности АИВК (Приложение Г).

Ниже представлены сечения, измеренные с различным шагом сканирования (рисунки 5.7, 5.8).

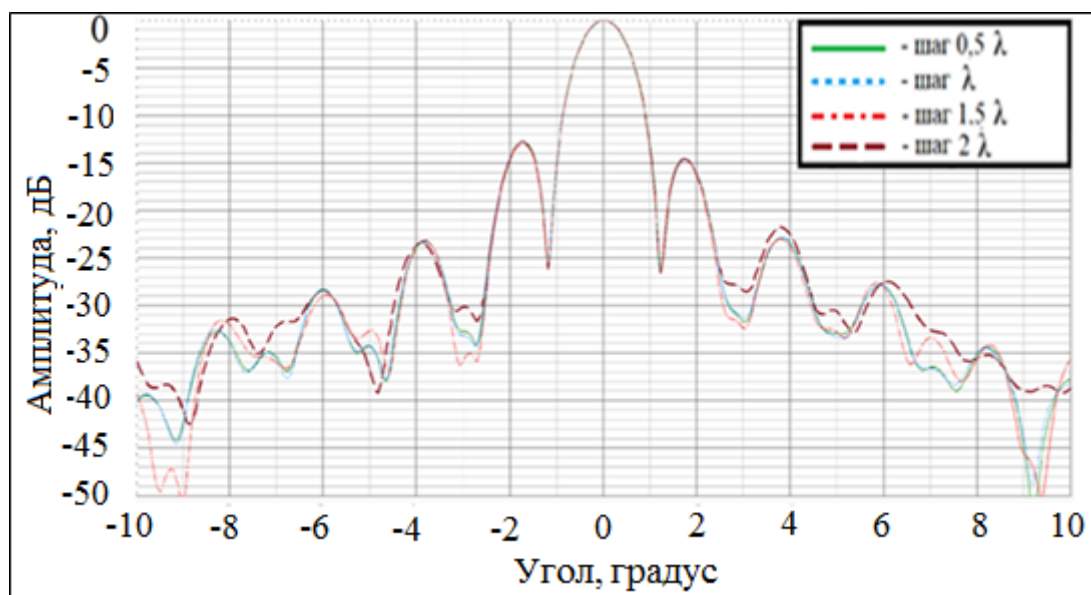


Рисунок 5.7 – Сечения ДН в азимутальной плоскости для различных шагов сканирования на нижней частоте диапазона

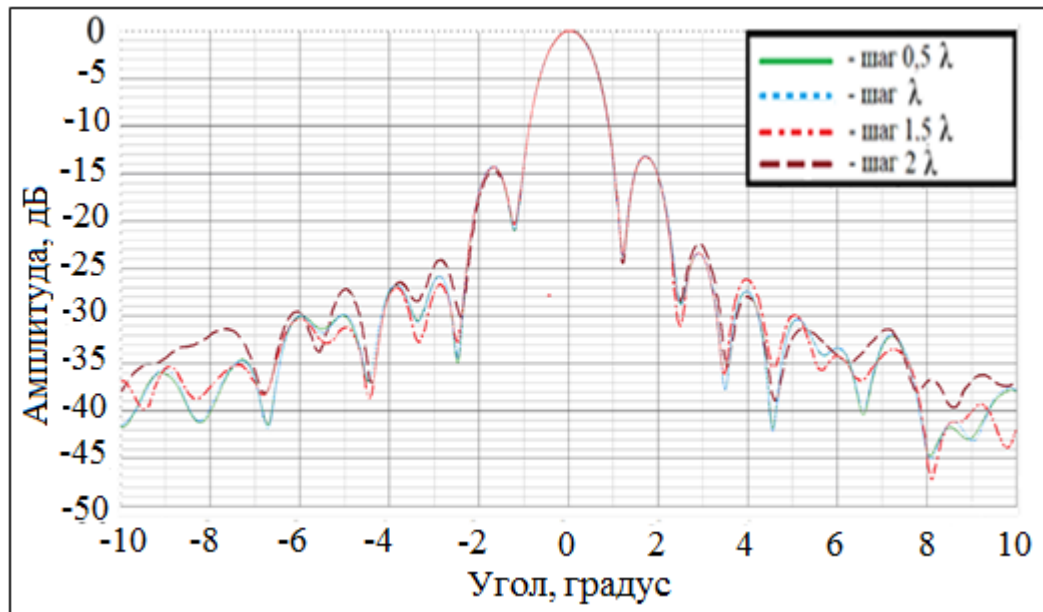


Рисунок 5.8 – Сечения ДН в угломестной плоскости для различных шагов сканирования на нижней частоте диапазона

На основе вышеприведенных рисунков установлено, что значения ширины ДН отличаются в худшем случае на $0,01^\circ$, что не превышает погрешность измерения АИВК ($0,02^\circ$), несогласованность отклонений электрической оси не превышает $0,011^\circ$, что так же меньше погрешности АИВК ($0,02^\circ$), уровень первых боковых лепестков не согласуется в пределах $0,2$ дБ при погрешности комплекса в $0,3$ дБ.

Время измерений составило:

- для шага сканирования $0,5\lambda$: 2 ч. 37 мин.;
- для шага сканирования λ : 1 ч. 14 мин.;
- для шага сканирования $1,5\lambda$: 50 мин.;
- для шага сканирования 2λ : 39 мин.

Таким образом, время измерений имеет близкую к обратно пропорциональной зависимость от величины шага сканирования и определяется комплексом факторов [29]. Стоит отметить, что предел увеличения шага сканирования определяется не только требуемой точностью восстановления ДН, но и техническими возможностями механической системы сканера. Очевидно, что при достижении предельной скорости перемещения позиционера, дальнейшее

увеличение шага сканирования не будет приводить к сокращению времени измерений.

По результатам измерений в БЗ на плоскости с различным шагом сканирования можно сделать 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, можно сделать вывод, что в задачах восстановления ДН при динамическом диапазоне измерительной системы порядка 70 дБ шаг сканирования можно увеличить с $\lambda/2$ до λ без потери точности результатов до уровня минус 35 дБ, при этом почти в два раза ускорив процесс измерений. На настоящий момент данный уровень восстановления АДН позволяет измерять большинство антенн КА, находящихся на стадии изготовления в АО «ИСС».

5.3 Основные результаты главы

1. Результаты измерений КУ двухпортовым методом хорошо согласуются с результатами измерений КУ однопортовым методом (согласование в пределах инструментальной погрешности АИВК). При измерении МЛА Q -диапазона сокращение времени измерений двухпортовым методом составило более 1,6 раза. Поскольку измерения производились в высокочастотном Q -диапазоне имеет место предположение об экстраполяции полученных результатов в том числе и на более низкие частотные диапазоны, поскольку измерения на них отличаются значительно меньшими погрешностями. Без вынужденного изменения размера области сканирования, то есть для случая антенны с одиночным двухпортовым облучателем, время измерений сократится в два раза.
2. По результатам измерений в ближней зоне на плоскости частотным методом с различным шагом сканирования можно заключить, что в задачах

восстановления диаграммы направленности шаг сканирования можно увеличить с $\lambda/2$ до λ без потери точности полученных результатов в пределах минус 35 дБ при динамическом диапазоне измерительной системы порядка 70 дБ. На настоящий момент данный уровень восстановления диаграммы направленности позволяет измерять большинство антенн КА, находящихся на стадии изготовления в АО «ИСС».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе проведены экспериментальные исследования, посвященные оценке влияния актуальных факторов производственного процесса на результаты измерений РТХ антенн КА, даны рекомендации по минимизации их влияния, а также выявлены практические методы, позволяющие повысить эффективность процесса измерений РТХ антенн КА, изготовленных на АО «ИСС».

На основе проделанной работы сформулированы следующие выводы:

- Диаграммы направленности, измеренные на технологическом стенде, укрытом высокоэффективным пирамидальным РПМ, имеют высокую степень согласованности с расчетными ДН. Наличие антенной панели оказывает заметное влияние на 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 на уровне минус 3 дБ при измерениях на антенной панели превышает ШДН при измерениях на технологическом стенде на 0,015 – 0,02 градусов при погрешности комплекса не более 0,01 градуса. КНД в осевом направлении антенны, вблизи которой находится технологическая сотопанель, ниже в среднем по диапазону на 0,15 дБ.

- Применение антенных рефлекторов, прошедших технологический ремонт, не целесообразно в случаях, когда размеры ремонтируемых участков сравнимы или превышают длину рабочей волны. Соответствие формы профиля поверхности рефлектора требуемым значениям не гарантирует необходимых характеристик направленности антенны. Подтверждение характеристик направленности исследуемой антенны гарантируется с помощью измерений на АИВК БЗ. Ухудшение КНД бортовых офсетных антенн Q-диапазона с рефлекторами, прошедшими технологический ремонт, может превышать 2 дБ.

- На основе сравнительного анализа ДН, измеренных на АИВК ближней и дальней зон, можно заключить, что оба измерительных комплекса могут

обеспечивать точность измерений, сравнимую с инструментальной погрешностью АИВК (в пределах основного и первых боковых лепестков исследуемой антенны), и, соответственно, могут использоваться при НЭО зеркальных антенн Ku - и K -диапазонов.

- Сравнительный анализ ДН антенны K -диапазона при использовании линии передачи с волоконно-оптическим оборудованием и линии передачи, в состав которой входят внешние смесители показал, что оба схемных подхода обеспечивают практически идентичные результаты и, соответственно, могут использоваться при НЭО серийных антенн указанного типа.

- Экспериментально подтверждено, что для измерения КУ рупорных антенн, работающих в диапазоне до 17 ГГц, пригодны как частотный, так и времяимпульсный методы в дальней зоне в пределах БЭК.

- Результаты эксперимента с различным расстоянием от ЗА до апертуры ИА в пределах ближнего излученного поля показывают, что ДН имеет высокую степень согласованности до относительного уровня минус 20 дБ. Важно отметить, что в данном эксперименте большой вклад в неточность восстановления результирующей ДН в ДЗ оказала погрешность за счет ограничения области сканирования.

- Линейное смещение проекции апертуры ЗА в виде открытого конца прямоугольного волновода от нормали к плоскости сканирования в пределах $0,2 \lambda$ не приводит к увеличению погрешности восстановления суммарной ДН, превышающей погрешность АИВК БЗ до уровня минус 40 дБ при динамическом диапазоне измерительной системы порядка 70 дБ. Линейное смещение, превышающее длину рабочей волны в 3 раза, так же не приводит к отклонению электрической оси антенны и позволяет восстанавливать суммарную ДН до уровня минус 23 дБ с точностью, не превышающей погрешность АИВК БЗ. Для контроля положения ЗА необходимо использовать лазерные радары совместно с оптическими сферами, закрепляемыми на поверхности ЗА.

- Корректный выбор первоначального положения ИА при измерении комплекса параметров за одну итерацию на АИВК ДЗ в значительной мере

определяет результат нахождения КЭ. Положение линейно поляризованного вектора напряженности электрического поля вспомогательной антенны должно совпадать с плоскостями малой и большой оси поляризационного эллипса ИА.

- Результаты измерений КУ двухпортовым методом согласуются в пределах инструментальной погрешности АИВК с результатами измерений КУ однопортовым методом. Сокращение времени измерений двухпортовым методом может достигать 2 раз.

- По результатам измерений в БЗ на плоскости частотным методом с различным шагом сканирования можно заключить, что в задачах восстановления ДН узконаправленных антенн шаг сканирования можно увеличить с $\lambda/2$ до λ без потери точности полученных результатов до уровня минус 35 дБ при динамическом диапазоне измерительной системы порядка 70 дБ. На настоящий момент данный уровень восстановления АДН позволяет измерять большинство антенн КА, производимых в АО «ИСС».

Полученные результаты имеют высокую практическую пользу, т.к. объектами испытаний являлись серийно выпускаемые антенны, работающие в перспективных K (18–26,5 ГГц) -, Ka (27–40 ГГц) - и Q (40–50 ГГц) -диапазонах, производству которых будет посвящена дальнейшая многолетняя работа предприятия АО «ИСС».

На основе вышеизложенных результатов можно заключить, что цель исследования достигнута, а решение поставленных задач отражено в научных положениях, обоснование которых изложено в оригинальных разделах текста диссертации.

Автор надеется, что представленные в диссертации результаты окажутся полезными исследователям и инженерам, работающим в области антенных измерений.

Дальнейшие работу по развитию тематики диссертации планируется посвятить более углубленному изучению обозначенных вопросов с нахождением универсальных закономерностей, применимых к различным типам антенн, используемых в АО «ИСС».

Список сокращений и условных обозначений

АИВК	автоматизированный измерительно вычислительный комплекс
АФР	амплитудно-фазовое распределение
БЗ	ближняя зона
БПФ	быстрое преобразование Фурье
БЭК	безэховая камера
ВАЦ	векторный анализатор цепей
ВОЛМ	волоконно-оптический лазерный модуль
ВОЛП	волоконно-оптическая линия передачи
ВОФМ	волоконно-оптический фотодиодный модуль
ДЗ	дальняя зона
ДН	диаграмма направленности
ЗА	зондовая антенна
ЗО	зона обслуживания
ИА	исследуемая антенна
КА	космический аппарат
КВП	коаксиально-волноводный переход
КНД	коэффициент направленного действия
КУ	коэффициент усиления
КЭ	коэффициент эллиптичности
ЛОИ	лабораторно-отрабочные испытания
ЛС	локальная сеть
МЛА	многолучевая антенна
НЭО	наземная экспериментальная обработка
ОПУ	опорно-поворотное устройство
ПО	программное обеспечение
ПФ	преобразование Фурье
РПМ	радиопоглощающий материал
РТХ	радиотехнические характеристики
СКИ	сверхкороткий импульс

СШП	сверхширокополосный
УБЛ	уровень боковых лепестков
ШДН	ширина диаграммы направленности
ЭВМ	электронно-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. Испытания конструкций и систем космических аппаратов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://airspot.ru/book/file/659/isyptanija_ka.pdf свободный (дата обращения 24.02.2017).
3. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения: учеб. пособие / В.Е. Чеботарев, В.Е. Косенко; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2011. – 488с.
4. Тестоедов Н.А.. Диагностика конструкций космических аппаратов по результатам вибрационных и акустических испытаний: Монография/ Н.А. Тестоедов, Е.А. Лысенко, В.А. Бернс; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2016. – 204 с.
5. 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.
6. Антенна с контурной диаграммой направленности производства АО «ИСС» / С.К. Доманов, А.В. Мухин, Е.Ю. Узолин, А.Г. Романов. // Научно-технические проблемы (Москва). – 2015. – Т. 16, № 3.– С. 44–47.
7. 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.
8. Доманов С.К. Анализ влияния антенной сотовой панели 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.
9. 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.
 10. 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.
 11. Доманов С.К. Измерение коэффициента усиления рупорной антенны в дальней зоне с помощью частотного и времяимпульсного оборудования в диапазоне до 17 ГГц // С.К. Доманов, А.В. Мухин, И.В. Коньшев. – Материалы докладов всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2014». – Томск. – 2014. – С. 11–14.
 12. 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. научн.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР – 2016». – Томск: Издательство «В – Спектр». – 2016. С. 32–35.
 13. 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. Коньшев. – Материалы

- докладов всерос. науч.-техн. конф. «Современные проблемы радиоэлектроники» – Красноярск. – 2014. – С. 342–346.
14. 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.
 15. 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.
 16. 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.
 17. 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.
 18. 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.
 19. Фрадин А.З. Измерение параметров антенно-фидерных устройств / А.З. Фрадин, Е.В. Рыжков.– М.: Связь, 1962. – 317 с.
 20. Фрадин А.З. Измерение параметров антенно-фидерных устройств / А.З. Фрадин, Е.В. Рыжков. М.: Связь, 1972. – 352 с.
 21. 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.

22. Hollis J. S., Lyon T.J., Claton L. Microwave antenna measurements. – Scientific – Atlanta, Inc, Atlanta, Georgia. – USA, 1979. – 320 p.
23. Лавров В. И. Измерение параметров крупногабаритных бортовых антенн спутниковых систем связи / В. И. Лавров, В. Г. Сомов, П. Я. Сивирин. – Красноярск :– СибГАУ, 2010. 152 с.
24. Троицкий В.С. Радиоастрономические методы исследования антенн. Радиотехника и электроника, 1956.– Т.1, №5. – 601 с.
25. Христиансен У., Хегбом И. Радиотелескопы / Перевод с англ. под ред. А.А.Пистолькорса. – 2-ое изд. – М.: Мир, 1988. – 304с.
26. Гавриленко В.Г. Методы измерения характеристик антенн по сигналам внеземных радиоисточников: Электронное учебно-методическое пособие / В.Г. Гавриленко, А.В. Калинин. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2012. – 58 с.
27. Фролов О.П. Зеркальные антенны для земных станций спутниковой связи / О.П. Фролов, В.П. Вальд. М.: горячая линия – Телеком, 2008. – 496 с.
28. Курочкин А.П., Усин В.А. Комбинированная методика восстановления диаграмм направленности антенн по измерениям в ближней зоне. – Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетехн. – 1980. – вып. 1. С. 51–58.
29. Синтез характеристик антенн по измерениям в ближней зоне: монография/ Ю.А Антохина, А.Ф. Крячко, А.С. Ковалев и др. – Спб.: ГУАП, 2016. – 309 с.
30. Методы измерения параметров излучающих систем в ближней зоне: монография / Л.Д. Бахрах, С.Д. Кременецкий, А.И. Курочкин. – Л.: Наука, 1985. – 272 с.
31. Бахрах Л.Д., Курочкин А.П., Дмитренко Д.А. и др. Об определении диаграммы направленности приемной антенны по источнику в зоне Френеля с использованием голографии и оптической обработки. Доклады АН СССР. – 1971. – Т. 201, № 4.–С. 580–582.
32. Курочкин А.П. Об особенностях измерений радиоголограммы при помощи зонда // Радиотехника и электроника. – 1971. – Т.16, №7.– С.1723–1726.

33. Бахрах Л.Д., Геруни П.М., Курочкин А.П., Арутюнян Дж.С. Оптическое моделирование диаграммы направленности по радиоголограмме поля в раскрыве. В кн.: Антенны / под ред. А.А. Пистолькорса. М.: Связь. – 1972. – Вып. 14. – С. 28–34.
34. Турчин В.И., Цейтлин Н.М. К вопросу об измерении диаграмм направленности в зоне Френеля. Доклады АН СССР. 1972. – Т. 205, № 4. – С. 820–823.
35. Арутюнян А.А., Арутюнян Дж.С., Геруни П.М. и др. Измерение диаграмм направленности на основе машинного восстановления радиоголограмм в их раскрыве. Изв. АН АрмССР. Физика. –1972. – Т. 7, № 5. – С. 373–376.
36. Турчин В.И., Цейтлин Н.М. К вопросу об измерении диаграмм направленности в зоне Френеля. Доклады АН СССР. –1972. – Т. 205, № 4.– С. 820– 823.
37. Турчин В.И., Цейтлин Н.М., Чандаев А.К. Об измерении диаграмм направленности антенны по излучению источника в зоне Френеля при помощи голографии на СВЧ и обработки на ЭВМ // Радиотехника и электроника. – 1973. –Т. 18, № 4. С. 725–734.
38. Геруни П.М., Арутюнян Дж.С. Радиоголография и современные методы антенных измерений. В кн.: Радио и акустическая голография. Л.: Наука, 1976. – С. 85– 98.
39. Бахрах Л.Д., Колосов Ю.А., Курочкин А.П. Определение поля антенны в дальней зоне через значения поля в ближней зоне. В кн.: Антенны / под ред. А. А. Пистолькорса. М.: Связь. –1976. – Вып. 24.– С.3– 14.
40. Турчин В.И. Вычисление полей в фазометрическом (радиоголографическом) методе антенных измерений. Изв. вузов. Сер. Радиофизика. –1977. – Т. 20., № 7. – С. 1071-1077.
41. Корбуков Г.Е. Радио и акустическая голография / Г.Е. Корбуков, С.В. Кулаков. Л.: Наука. – 1976. – С. 85–98.
42. Бахрах Л.Д. Голография в микроволновой технике / Л.Д. Бахрах, А.П. Курочкин. М.: Советское радио, 1979. – 320 с.

43. Бахрах Л.Д., Будаев А.Г., Булкин В.М. и др. Восстановление диаграммы направленности излучающей системы по измерениям ближней зоны на цилиндрической поверхности. Доклады АН СССР, 1979. – Т. 249, №3. – С. 601– 605.
44. Бахрах Л.Д., Будаев А.Г., Булкин В.М., Колосов Ю.А. и др. Восстановление диаграммы направленности антенны по измерениям ближней зоны на цилиндрической поверхности. В кн.: Радиологическая и оптическая обработка информации в микроволновой технике. Л.: Наука, 1980. С.63– 79.
45. Белов Ю.И. Экспериментальное исследование характеристик направленности зеркальной антенны амплитудно-фазометрическим методом / Ю.И. Белов, Н.В. Векслер, Н.С. Коротков. Радиотехника и электроника. – 1981. – Т. 26, №5.
46. Воронин Е.Н., Нечаев Е.Е., Шашенков В.Ф. Реконструктивные антенные измерения. – М.: Наука.– Физматлит, 1995.
47. Barrett, R. M. Barnes, M. H. (1952) Automatic antenna wavefront plotter. In: Electron. – Vol. 25. – P. 120 –125.
48. Ludwig A.C. Near-field far-field transformations using spherical-wave expansion // IEEE Trans. Ant. and Prop. –1971. –V. AP-19, № 2. P.214– 220.
49. Leach W.M., Paris D.T. Probe compensated near-field measurements on a cylinder // IEEE Trans. Ant. and Prop. – 1973.– V. AP-21, №4.– P. 435– 445.
50. Grimm K.R. Antenna analysis by near-field measurements. Microwave J.– 1976.– V. 19, № 4.– P.43–52.
51. Balanis C.A. Antenna theory // Wiley, 1997. – 959 p.
52. Куроптев П.Д., Левяков В.В., Фатеев А.В. Восстановление диаграммы направленности широкополосной рупорной антенны из амплитудно-фазового распределения в ближней зоне. Материалы VI общероссийской науч.-техн. конф. «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем» – Омск. – С. 249–254.

53. Бахрах Л.Д., Каплун И.В., Колосов Ю.А., Курочкин А.П. Расчет установок для измерения характеристик направленности антенн коллиматорным методом. Вопросы радиоэлектроники. Серия ОТ.– 1980. –Вып. 5. – С. 20–27.
54. Каплун И.В., Колосов Ю.А. Построение компактных полигонов для измерения характеристик антенн коллиматорным методом // Радиотехника. –1981.– Т. 36, № 10.– С.29–35.
55. Вешникова И.Е. Каплун И.В., Колосов Ю.А., Курочкин А.П. Измерение диаграммы направленности антенн в поле линейного коллиматора. Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общие вопросы радиоэлектроники – 1983.– Вып. 1. С.39–54.
56. Балабуха Н.П. В.С.Солосин, А.С.Зубов - Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния.– М.: Наука, 2007.
57. Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С. Компактный полигон для измерения рассеивающих свойств объектов и параметров антенн. Общее описание // Антенны. – 2008. – Вып.6 (133). С. 59–80.
58. ИТПЭ РАН. Лаборатория №3 – электродинамики компактных полигонов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.itae.ru/staff/page_units/Lab3/%D0%9B%D0%B0%D0%B13.pdf, свободный (дата обращения 18.08.2017).
59. Материалы научно-практического семинара по вопросам проведения антенных измерений в ближней зоне [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://trimcom.ru/post/9-materialy_nauchno_prakticheskogo_seminara.pdf, свободный (дата обращения 18.10.2017).
60. Imbriale W. A., Gao S., Voccia L Space Antenna Handbook // John Wiley & Sons, Inc., 2012. – 959 p.
61. R&S NEWS 211/14 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cdn.rohde-schwarz.com/magazine/pdfs_1/issue/NEWS_211_english_150dpi.pdf, свободный (дата обращения 10.10.2017).

62. Frankonia Anechoic Chambers [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://frankonia-solutions.com/anechoic-chambers/>, свободный (дата обращения 10.10.2017).B0%D0%B13.pdf, свободный (дата обращения 18.08.2017).
63. Группа компаний МАСКОМ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mascom.ru/services/ekranirovannyye-sooruzheniya/bezekhovyye-kamery/bezekhovyye-kamery.php>, свободный (дата обращения 10.10.2017).
64. Keysight Technologies. Тестирование антенн – Режим доступа: <https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5968-6759RURU.pdf?id=772274>, свободный (дата обращения 12.08.2017).
65. Калинин. Ю.Н. Измерение диаграмм направленности антенн в планарном сканере без измерения фазы / Ю.Н. Калинин // Антенные и фидерные измерения. – 2015. – № 1(212). – С. 61-68.
66. Keysight Technologies. Antenna Measurement Theory – Режим доступа: https://www.keysight.com/upload/cm_upload/All/ORFR-Theory.pdf, свободный (дата обращения 15.10.2017).
67. ГОСТ 8.309 – 78 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-8-309-78-gsi>, (дата обращения: 21.08.17 г.).
68. D.M. Kerns and E.S. Dayhoff, Theory of diffraction in microwave interferometry, J. Res. Natl. Bur. Stand., Vol. 64B, pp. 1–13, January–March 1960.
69. D.M. Kerns, Analytical techniques for the correction of near-field antenna measurements made with an arbitrary but known antenna, presented at the URSI-IRE Meeting, Washington, DC, 29 April–2 May, 1963.
70. D.M. Kerns, Correction of near-field antenna measurements made with an arbitrary but known antenna, Electron. Lett., Vol. 6, pp. 346–347, 28 May, 1970.
71. F. Jensen, Electromagnetic near-field far-field correlations, Ph.D. dissertation, Technical University of Denmark, Lyngby, 1970.
72. F. Jensen, On the probe compensation for near-field measurements on a sphere, Arch. Elek. Ubertagung., Vol. 29, P. 306–308, July/August 1975.

73. F. Holm Larsen, Probe correction of spherical near-field measurements, *Electron. Lett.*, Vol. 13, P. 393–395, July 1977.
74. W. M. Leach, Jr. Probe compensated near-field measurements on a cylinder, Ph.D. dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, August 1972.
75. W.M. Leach, Jr. and D. T. Paris, Probe compensated near-field measurements on a cylinder, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 21, pp. 435–445, July 1973.
76. Gregson St., McCormick J., Parini C. Principles of Planar Near-Field Antenna Measurements, The Institution of Engineering and Technology. IET Electromagnetic Waves Series. L.: United Kingdom, 2007. 53 p.
77. Parini C. Theory and Practice of Modern Antenna Range Measurements / C. Parini St Gregson, J. McCormick, Janse van Resburg // The Institution of Engineering & Technology, London 2015. 759 p.
78. J.E. Hansen, Ed., Spherical Near-field Antenna Measurements, Peter Peregrinus, London, UK, 1988.
79. Balanis. C.A. Modern antenna handbook // Wiley. – 2008. – 1680 p.
80. Newell A.C. Error Analysis Techniques for Planar Near-Field Measurements // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1988. V. 36, No. 6. P. 754 – 768.
81. Slater. D. (1991). Near-Field Antenna Measurements. Boston: Artech House.
82. Yaghjian A. D. An overview of Near-Field Antenna Measurements // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1986. T.21, №.4. – С.30– 45.
83. Renato Cicchetti. Near-Field to Far-Field Transformation Techniques with Spiral Scannings: A Comprehensive Review / Renato Cicchetti, Francesco D’Agostino, Flaminio Ferrara etc. Hindawi publishing Corporation. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2014, 13 p.
84. Антенны, сфокусированные в зоне ближнего излученного поля: монография / под общ. ред. Ю.Е. Седельникова, Н.А. Тестоедова; Сиб. гос. аэрокосмич. Ун-т. – Красноярск, 2015. – 308 с.

85. Справочник по антенной технике: Справ. В 5 т. Т. 1. / Л.Д. Бахрах, Л.С. Бенинсон, Е.Г. Зелкин и др; Под ред. Я.Н. Фельда, Е.Г. Зелкина. – М.: ИПРЖР, 1997. – 256 с.
86. Кривошеев Ю.В., Шишлов А.В. Восстановление характеристик излучения и диагностика антенн по измерениям в зоне Френеля. – Труды 54-й научной конференции МФТИ. – Москва – Долгопрудный – Жуковский. – 2011. Т. 2 – С. 45– 46.
87. Спутниковые диапазоны и сети ШПД [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://old.telesputnik.ru/archive/pdf/185/30.pdf>, свободный (дата обращения 21.10.2017).
88. D'Elia G., Leone G., Pierri R. A new approach in the near field-far field transformation. // IEEE Int. Antennas Propagat. Symp. Dig., Houston, USA. – 1983. – P. 495– 498.
89. Инденбом М.В. Восстановление диаграммы направленности линейной антенны и устранение влияния отражений по измерениям в зоне Френеля / М.В. Инденбом // Антенны. – 2013. – № 3(190). – С. 46– 57.
90. Krivosheev Y.V., Shishlov A.V., Tobolev A.K., Vilenko I.L. Fresnel Field to Far Field Transformation Based on Two-Dimensional Fourier Series Expansion. // Advanced Electromagnetics Symposium (AES), Paris, France. – 2012. – P. 200– 207.
91. Krivosheev Y.V., Shishlov A.V., Tobolev A.K., Vilenko I.L. Fresnel Field to Far Field Transformation Using Sparse Field Samples. // International conference on mathematical methods in electromagnetic theory (MMET), Kharkiv, Ukraine. – 2012. – P. 237– 242.
92. Кривошеев Ю.В. Измерение характеристик антенн в зоне Френеля на разреженной сетке углов: дис. канд. техн. наук: 05.12.07. – Москва, 2014. – 146 с.
93. 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.
94. Майзельс Е.Н., Торгованов В.А. Измерение характеристик рассеяния радиолокационных целей. Под ред. М. А. Колосова, М.: «Советское радио», 1972. – 232 с.
95. Безэховые камеры FRANKONIA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://antemc.ru/public/catalog/7_katalog_bezehovyh_kamer_frankonia_\(russkiy_pdf\).pdf](http://antemc.ru/public/catalog/7_katalog_bezehovyh_kamer_frankonia_(russkiy_pdf).pdf), свободный (дата обращения: 29.05.2017).
96. Безэховые камеры группы компаний МАСКОМ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mascom.ru/upload/bukletES.pdf>, свободный (дата обращения: 29.05.2017).
97. TRIM Сверхширокополосные измерительные системы. Экранированные безэховые камеры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://trimcom.ru/goods_category/ekranirovannyye-kamery/, свободный (дата обращения: 29.05.2017).
98. Роговенко С.С., Милютин Е.Р., Перцовский Р.А. К вопросу об измерении диаграмм направленности антенн при помощи вертолета. – Труды учеб. ин-тов связи, 1960. – вып. 3.– С. 89 – 95.
99. Измерение параметров излучения крупноапертурных антенн с помощью беспилотного летательного аппарата [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tsonline.ru/articles2/sputnik/izmerenie-parametrov-izlucheniya-krupnoaperturnyh-antenn-s-pomoschyu-bespilotnogo-letatel'nogo-apparata-measurement-of-radiation-characteristics-of-large-antenna-using-uavs>, свободный (дата обращения: 13.04.2017).
100. Бочаров В.С. Особенности бортовых антенно-фидерных устройств космических аппаратов / В.С Бочаров, А.Г. Генералов, Э.В. Гаджиев Научно-технический семинар «Перспективы развития антенно-фидерных устройств космических аппаратов» ОАО «НИИЭМ».– г. Истра.– 2013. – С. 55–58.

101. Гаджиев Э.В. Пути построения малогабаритных невыступающих бортовых антенно-фидерных систем космических аппаратов // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2014. – вып. 76. – С. 1 – 20.
102. Приближённая методика оценки влияния корпуса носителя на характеристики направленности бортовых антенн малых космических аппаратов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.mivlgu.ru/conf/armand2017/rmdzs-2017/pdf/S4_7.pdf, свободный (дата обращения 18.10.2017).
103. Исследование влияния корпуса КА на характеристики направленности бортовых антенн [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://niiem.ru/images/n/docs/conf/conf03/10.pdf>, свободный (дата обращения 18.10.2017).
104. «TRIM» Сверхширокополосные измерительные системы». [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://trimcom.ru/>, свободный (дата обращения: 16.07.17 г.).
105. Армия – 2015. НПП «ТРИМ Сверхширокополосные измерительные системы». [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://trimcom.ru/post/10-ArmsExpo-2015.pdf>, свободный (дата обращения: 16.07.17 г.).
106. Калинин. Ю.Н. Измерение координат фазового центра антенны / Ю.Н. Калинин // Антенны. – 2014. – № 4(203). – С. 54– 62.
107. Измерение характеристик и параметров антенн и рассеивателей с помощью сверхкоротких импульсных сигналов [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://trimcom.ru/post/1-radar-mms.pdf>, свободный (дата обращения: 20.05.17 г.).
108. Измерение характеристик антенн методами ближней и дальней зоны во временной области [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://trimcom.ru/post/5-ntk-sfr.pdf>, свободный (дата обращения: 21.05.17 г.).
109. Калинин Ю.Н., Чавдарь М.А. Измерение коэффициента усиления методом трех антенн в планарных сканерах ближней зоны // Вестник метролога. – 2017. – №1. – С. 10-14.

110. Калинин Ю.Н., Чавдарь М.А. Прямое измерение коэффициента усиления и эквивалентной изотропной излучаемой мощности антенны в сферических сканерах ближней зоны // Антенны. – 2016. – №11. – С. 56–61.
111. Современные методы и средства измерения радиотехнических характеристик антенн [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://trimcom.ru/conf_2016/doklad_kalinin_milyaev.pdf, свободный (дата обращения: 24.05.17 г.).
112. ПАО «Радиофизика» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.radiofizika.ru/>, свободный (дата обращения: 18.07.17 г.).
113. ФГУП «ВНИИФТРИ». [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.vniiftri.ru/index.php/ru/>, свободный (дата обращения: 17.07.17 г.).
114. Метрологическое обеспечение антенных измерительных комплексов [Электронный ресурс] –
Режим доступа: <http://www.trimcom.ru/seminar/32.ppsx>, свободный (дата обращения: 26.10.17 г.).
115. 1720-2012 - IEEE Recommended Practice for Near-Field Antenna Measurements [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6375745>, платный (дата обращения 17.10.17 г.)
116. ООО НПП «СШП ТРИМ», Автоматизированный измерительно-вычислительный комплекс (АИВК) для измерений радиотехнических характеристик антенн в составе КА и автономно ТМСА 1.0-40.0 БЗ/ГСП 044: Руководство по эксплуатации, Книга 1, ТМСА.044.040.00Б РЭ. СПб., 2012. – 41 с.
117. 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.
118. Марченко А.Л., Марченко Е.А. Основы преобразования информационных сигналов. Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., стереотип. – М: Горячая линия – Телеком, 2015. – 288 с.

119. ООО НПП «СШП ТРИМ», Автоматизированный измерительно-вычислительный комплекс (АИВК) ТМСА1.0-50.0 Д 072 (далее поле): Руководство по эксплуатации ТМСА.072.050.00Д РЭ. СПб., 2014. – 134 с.
120. Многолучевые антенные системы HTS Multibeam antenna systems of high throughput geostationary communications satellites (HTS). [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.tssonline.ru/articles2/sputnik/mnogoluchevye-antennye-sistemy-hts-multibeam-antenna-systems-of-high-throughput-geostationary-communications-satellites-\(hts\)](http://www.tssonline.ru/articles2/sputnik/mnogoluchevye-antennye-sistemy-hts-multibeam-antenna-systems-of-high-throughput-geostationary-communications-satellites-(hts)), свободный (дата обращения 10.08.17 г.).
121. Разработка гибридно-зеркальной антенны с многолучевой диаграммой направленности. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/v/razrabotka-gibridno-zerkalnoy-antenny-s-mnogoluchevoy-diagrammoy-napravlenosti>, свободный (дата обращения 10.08.17 г.).
122. Основные тенденции развития систем спутниковой связи [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.mtuci.ru/news/sp/conference_2017/docs/4.pptx, свободный (дата обращения 11.08.17 г.).
123. Разработка устройств антенных систем космической связи перспективных диапазонов / И.Ю. Данилов, А.Г. Романов, Ю.Е. Седельников, К.О. Шендалев // Научные технологии (Москва). – 2017. – Т. 18, № 12. – С. 27–31.
124. Конструкция космических аппаратов [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.iss-reshetnev.ru/branch-center/design-cosmic-device>, свободный (дата обращения 12.08.17 г.).
125. Чернятина А.А. Экспериментальное исследование радиопрозрачного материала терморегулирующего покрытия для применения в солнцезащитных экранах // Чернятина А.А., Харламов В.А., Ермолаев Р.А. и др. – Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. – Красноярск. – 2012. – С. 153–157.


126. Yu Ding, Yang Lin, Fu De-min, and Liu Qi-zhong, “Analysis and simulation of system phase errors in planar near-field measurements on ultra-low sidelobe antennas”, Proc. of IEEE Int. Conf. on Ultra-Wideband (ICUWB), 2010.– vol. 1, P. 1–4.
127. Wideband planar near-field antenna measurement technique using an analog fiber-optic link / A. Chizh, S. Malyshev, K. Mikitchuk, A. Milyaev, M. Popikov // Proceedings of 45th European Microwave Conference (EuMC) –Paris, France. – 6–11 September. – 2015. – P. 1148–1151.
128. Edward V. Jullap. Aperture Antennas and Diffraction Theory // IEE electromagnetic waves (London). – 1981. – Ser.10. – 177 p.
129. Размеры прямоугольных волноводов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://anisco.ru/dimware.htm>, свободный (дата обращения 13.08.2017).
130. Виды спутниковых антенн [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kitsystem.ru/kak-vybrat-sputnikovuyu-antennu>, свободный (дата обращения 19.05.2016).
- 131 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.
132. Adatia, N.A., A.W. Rudge, Beam squint in circularly polarised offset – reflector antenna / Electronics letters / – 1975. – Vol. 11, – P. 513–515,.
133. Beam Squint Due to Circular Polarization in a Beam-Waveguide Antenna [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://tmo.jpl.nasa.gov/progress_report/42-128/128M.pdf, свободный (дата обращения 21.05.2016).
134. Гошин Г.Г. Устройства СВЧ и антенны. Часть 2. Антенны: учебное пособие / Г.Г. Гошин. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. – 159 с.
135. S.B. Sharma, D.A. Pujara, S.B. Chakrabarty and V.K. Singh. Removal of beam squinting effects in a circularly polarized offset parabolic reflector antenna using

a matched feed / Progress in electromagnetics research letters/ – 2009. – Vol. 7. – P. 105–114.

136. Laser Radar MV224/260 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.metris3d.hu/laserradar_eng_1107.pdf, свободный (дата обращения 04.08.2017).
137. Open Ended Waveguides. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.mvg-world.com/en/products/field_product_family/antenna-1/open-ended-waveguide (дата обращения 04.08.2017).

Приложение А

УТВЕРЖДАЮ
ЗГК по разработке КС,
общему проектированию
и управлению КА


Ю.Г.Выгонский
« _____ » _____ 2017 г.

АКТ

**об использовании результатов диссертационной работы Доманова
Сергея Константиновича в производственном процессе АО
«Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф.
Решетнёва»**

Настоящим актом подтверждается, что в ходе выполнения предприятием АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф.Решетнёва лабораторно-отрабочных испытаний антенн космических аппаратов (КА) «Благовест», «Луч», «Енисей», «ГЛОНАСС К2» и др. использованы результаты исследований диссертационной работы Доманова С.К. в части:

1. Подтверждения возможности ближнеполевых измерений длиннофокусных антенн в составе КА;
2. Проведения эмпирической оценки влияния корпуса КА и технологического стенда на радиотехнические характеристики (РТХ) антенн по измерениям в ближней зоне;
3. Подтверждения взаимозаменяемости автоматизированных измерительно-вычислительных комплексов (АИВК) дальней и ближней зоны, с использованием как частотного, так и времяимпульсного оборудования, а так же взаимозаменяемости АИВК, расположенных в безэховой экранированной камере и вне её;
4. Исследования РТХ антенн, измеренных при помощи зондовых антенн различных производителей, подтверждена возможность использования зондовых антенн производства АО «ИСС»;
5. Оценки отклонения зондовой антенны от нормали к плоскости сканирования на РТХ антенн;
6. Подтверждения взаимозаменяемости измерительных схем с волоконно-оптической линией передачи и внешним СВЧ-смесителем.
7. Оценки возможности проведения многопортовых измерений и сокращения времени испытаний антенн.

8. Выработки оптимальной методики по измерению коэффициента эллиптичности антенн с круговой поляризацией на АИВК дальнего поля;
9. Оценки влияния температурного дрейфа на характеристики импульсного сигнала при использовании времяимпульсного измерительного оборудования в дальней зоне;
10. Исследования влияния различных установок в программном обеспечении АИВК на результирующие РТХ антенн.

Начальник отделения 100



В.В. Попов

И.о. начальника отдела



И.Г. Крюков

Приложение Б

УТВЕРЖДАЮ
ЗГК по разработке КС,
общему проектированию
и управлению КА


Ю.Г.Выгонский
«___» _____ 2017 г.

АКТ

**об использовании результатов диссертационной работы Доманова
Сергея Константиновича в программе обучения АО «Информационные
спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва»**

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Доманова С.К. использовались при подготовке программы обучения с наименованием: «Обучение персонала на право работы с автоматизированными измерительно-вычислительными комплексами (АИВК) ближнего поля в частотной области со сканированием на плоскости».

Приведённые в диссертационной работе особенности методик измерений на АИВК ближнего поля в частотной области со сканированием на плоскости в значительной степени повышают точность измерений радиотехнических характеристик антенн космических аппаратов и существенно сокращают временные затраты на проведение наземной экспериментальной отработки изделий.

Начальник отделения 100



В.В.Попов

И.о. начальника отдела 115




И.Г.Крюков

Приложение В

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ООО «НПП «ТРИМ СШП»

 П.В. Миляев
« 17 » августа 2017 г.

АКТ

**об использовании результатов диссертационной работы Доманова
Сергея Константиновича в производственном процессе ООО «НПП
«ТРИМ СШП Измерительные системы»**

Настоящим актом подтверждается внедрение в производственный процесс общества с ограниченной ответственностью «Научно-производственное предприятие «ТРИМ СШП Измерительные системы» результатов диссертационной работы Доманова С.К.

Практические результаты, приведённые в диссертационной работе Доманова С.К., касающиеся вопросов влияния отклонения зондовой антенны от нормали к плоскости сканирования при использовании автоматизированных измерительно-вычислительных комплексов (АИВК) ближнего поля с плоской поверхностью сканирования на радиотехнические характеристик антенн, а так же рекомендации, связанные с измерением коэффициента эллиптичности антенн при помощи АИВК дальнего поля в автоматизированном режиме, позволяют повысить точность проведения измерений и, соответствующим образом, доработать техническую документацию на АИВК.

Главный конструктор

Генеральный директор



 А.П. Миляев

 П.В. Миляев

Приложение Г

Основные метрологические характеристики используемых в диссертационной работе АИВК

Таблица Г.1 – АИВК БЗ со сканированием на горизонтальной поверхности в лабораторном помещении (частотный метод)

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра
1	Диапазон рабочих частот	1 – 40 ГГц
2	Размер рабочей зоны сканера	10 x 16 м
3	Инструментальные погрешности положения зондовой антенны сканера: <ul style="list-style-type: none"> • По линейным координатам, не более: • По угловым координатам, не более: 	± 0,05 мм ± 0,05 град
4	Инструментальные погрешности измерения амплитуды и фазы в раскрыве: <ul style="list-style-type: none"> • Для амплитуды до уровня минус 10 дБ, не более: • Для фазы, не более: 	±0,2 дБ ±5,4°
5	Инструментальная погрешность измерений уровней относительной АДН: <ul style="list-style-type: none"> • 0 – минус 10 дБ; • минус 10 дБ ... минус 20 дБ; • минус 20 дБ ... минус 30 дБ; • минус 30 дБ ... минус 40 дБ: 	±0,2 дБ ±0,3 дБ ±0,5 дБ ±1,0 дБ
6	Инструментальная погрешность углов восстановленной ДН, не более:	±0,02 градуса

Таблица Г.2 – АИВК БЗ с вертикальной поверхностью сканирования в БЭК
(временнoй импульсный метод)

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра
1	Диапазон рабочих частот:	1 – 50 ГГц
2	Рабочая область сканирования зондовой антенны:	8 x 7 м
3	Инструментальные погрешности положения зондовой антенны сканера по линейным координатам, не более:	± 0,2 мм
4	Инструментальные погрешности измерения АФР: <ul style="list-style-type: none"> • Для амплитуды до уровня минус 10 дБ, не более: • Для фазы, не более: 	±0,2 дБ ±5,4°
5	Инструментальная погрешность измерений уровней относительной ДН: <ul style="list-style-type: none"> • для уровней 0 – минус 3 дБ: • для уровней минус 3 дБ – минус 10 дБ: • для уровней минус 10 дБ – минус 30 дБ: • для уровней минус 30 дБ – минус 40 дБ: 	±0,6 дБ ±0,8 дБ ±1,2 дБ ±1,5 дБ
6	Инструментальная погрешность углов восстановленной ДН, не более:	±0,02 градуса

Таблица Г.3 – АИВК БЗ с вертикальной поверхностью сканирования в БЭК
(частотный метод)

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра
1	Диапазон рабочих частот:	1 – 50 ГГц
2	Рабочая область сканирования зондовой антенны:	8 x 7 м
3	Инструментальные погрешности положения зондовой антенны сканера по линейным координатам, не более:	± 0,2 мм
4	Инструментальные погрешности измерения АФР: <ul style="list-style-type: none"> • Для амплитуды до уровня минус 10 дБ, не более: • Для фазы, не более: 	±0,2 дБ ±5,4°
5	Инструментальная погрешность измерений уровней относительной ДН: <ul style="list-style-type: none"> • для уровней 0 – минус 10 дБ: • для уровней минус 10 дБ – минус 20 дБ: • для уровней минус 20 дБ – минус 30 дБ: • для уровней минус 30 дБ – минус 40 дБ: 	±0,2 дБ ±0,3 дБ ±0,4 дБ ±0,5 дБ
6	Инструментальная погрешность углов восстановленной ДН, не более:	±0,02 градуса

Таблица Г.4 – АИВК ДЗ в БЭК (временнoимпульсный метод)

Наименование параметра	Значение параметра
Диапазон рабочих частот:	0,1 – 50 ГГц
Динамический диапазон измерения ДН:	> 76 дБ
Погрешность измерения ДН (в диапазоне 0 – минус 25 дБ):	$\pm 0,2$ дБ
Погрешность измерения ДН (в диапазоне 0 – минус 45 дБ):	$\pm 0,5$ дБ
Аппаратурная погрешность измерения КУ:	$\pm 0,5$ дБ
Погрешность измерения фазовых характеристик:	$\pm 5^\circ$
Максимальная длительность временного окна:	1 мкс
Погрешность определения азимутального угла:	$\pm 0,05^\circ$

Таблица Г.6 – АИВК ДЗ (частотный метод, открытый полигон 2.5 км)

Наименование параметра	Значение параметра
Диапазон рабочих частот:	1,0 – 50 ГГц
Инструментальная погрешность измерения относительной ДН: <ul style="list-style-type: none"> • для уровней ДН 0 – минус 3 дБ, не более • для уровней ДН минус 3 – минус 10 дБ, не более • для уровней ДН минус 10 – минус 30 дБ, не более • для уровней ДН минус 30 – минус 40 дБ, не более 	± 0,2 дБ ± 0,3 дБ ± 0,5 дБ ± 1 дБ
Погрешность позиционирования антенны, не более <ul style="list-style-type: none"> • по азимуту • по углу места • по крену 	±0,01° в секторе углов ±10° ±0,01° в секторе углов -5...+15° ±0,05°