

На правах рукописи



Анютин Николай Викторович

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕНН ПУТЕМ
СКАНИРОВАНИЯ ПО НЕКАНОНИЧЕСКИМ ПОВЕРХНОСТЯМ В
БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

2.2.10 – Метрология и метрологическое обеспечение

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Менделеево – 2022 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ»)

Научный руководитель: **Малай Иван Михайлович,**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Кирпанев Алексей Владимирович,**
доктор технических наук, доцент, начальник
отдела антенн W-диапазона
АО «Научно-производственное предприятие
«Радар ммс», г. Санкт-Петербург

Коняев Денис Алексеевич,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник физического
факультета ФГБОУ ВО «Московский
государственный университет
имени М.В. Ломоносова», г. Москва

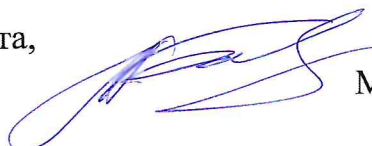
Ведущая организация: ООО «Научно-производственное предприятие
«ТРИМ СШП Измерительные Системы»,
г. Санкт-Петербург

Защита состоится «18» мая 2022 г. в 10 часов на заседании Диссертационного совета 32.1.004.01 в ФГУП «ВНИИФТРИ» по адресу: 141570, Московская область, г. Солнечногорск, р.п. Менделеево, промзона ФГУП «ВНИИФТРИ».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГУП «ВНИИФТРИ»

Автореферат разослан « » марта 2022 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



М.В. Балаханов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время технологии связи и радионавигации стремительно развиваются. Одним из ключевых элементов данных технологий являются антенны и антенные решетки, у которых увеличиваются рабочие частоты, внедряется цифровое управление лучом и т.д. В процессе разработки и производства антенн необходим контроль их характеристик. Внешние характеристики антенн определяются через электромагнитное поле в дальней зоне (ДЗ) излучения. Средством измерений (СИ) внешних характеристик антенн являются антенные измерительные комплексы (АИК). Для современных антенных решеток с большими размерами условия, эквивалентные условиям ДЗ излучения, формируются на расстоянии десятков метров и более. Создание АИК ДЗ таких размеров является экономически нецелесообразным, поэтому измерения вынуждены проводить с помощью компактных полигонов или АИК ближней зоны (БЗ). Создание компактных полигонов в связи с требованиями к точности изготовления зеркал радиоколлиматоров значительно дороже в сравнении с АИК БЗ. По этой причине в нашей стране основным СИ внешних характеристик современных антенн и антенных решеток являются АИК БЗ.

В АИК БЗ внешние характеристики антенн измеряются косвенными методами. Сначала измеряется коэффициент передачи между исследуемой антенной и зондовой антенной, которую помещают в заданное множество точек БЗ излучения исследуемой антенны. Этот процесс называется сканированием электромагнитного поля. Затем измеренное поле пересчитывается из БЗ в ДЗ излучения с помощью специальных алгоритмов, которые называют алгоритмами преобразования электромагнитного поля.

Для современных антенн и антенных решеток существует потребность в разработке и внедрении в практику методов измерений их внешних характеристик со все большей точностью, информативностью и оперативностью. Для удовлетворения этой потребности в состав АИК БЗ стали включать позиционеры с большим числом степеней свободы, а также средства измерений координат – лазерные трекеры. Свобода в выборе точек сканирования электромагнитного поля позволяет проводить измерения за меньшее время, а также уменьшать влияние переотраженных электромагнитных волн путем размещения зондовой антенны дальше от окружающих объектов и ближе к источникам прямого излучения. Координатные измерения на классических

АИК БЗ позволяют учитывать отклонения зондовой антенны от узлов эквидистантных сеток на части плоскости, цилиндра или сферы, которые являются каноническими поверхностями сканирования. Точность измерений современными лазерными трекерами на порядок выше точности позиционирования зондовой антенны механическими позиционерами. Благодаря этому верхняя граница диапазона частот, которая теоретически ограничивается точностью измерений координат зондовой антенны, может быть расширена на частоты свыше 50 ГГц.

В классических методах измерений характеристик антенн путем сканирования электромагнитного поля в БЗ большинство интегралов сводится к быстрому преобразованию Фурье. По этой причине в классических методах используется только информация о пространственном или угловом шаге между точками на канонических поверхностях сканирования, а также радиус цилиндра или сферы. В основе новых методов измерений характеристик антенн путем сканирования электромагнитного поля в БЗ лежит решение системы интегральных уравнений, которые связывают скалярное произведение электромагнитных полей исследуемой и зондовой антенны с измеряемым на практике коэффициентом передачи. Достоинством такого решения является возможность сканирования электромагнитного поля во множестве точек, не связанных друг с другом одной поверхностью. Основные недостатки новых методов заключаются в плохой обусловленности матрицы системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), к которой сводится исходная система интегральных уравнений, а также большой вычислительной сложности алгоритмов. На практике это проявляется, во-первых, в возрастании в несколько раз числа точек сканирования и, следовательно, времени измерений. Во-вторых, значительно возрастает стоимость вычислительной подсистемы АИК БЗ, поскольку измерения внешних характеристик антенн и электродинамическое моделирование их полей методами интегральных уравнений требуют одни и те же вычислительные ресурсы. По этим причинам до настоящего времени отсутствовали методики измерений внешних характеристик антенн путем сканирования электромагнитного поля в БЗ излучения, в которых применяются позиционеры с большим числом степеней свободы и лазерные трекары.

Таким образом, **актуальна** научная задача разработки методики измерений внешних характеристик антенн путем сканирования электромагнитного поля по неканоническим поверхностям в ближней зоне излучения.

Объектом исследования являются антенные измерительные комплексы ближней зоны со свободно позиционируемой зондовой антенной.

Предмет исследования – методы измерений характеристик антенн путем сканирования электромагнитного поля в ближней зоне излучения.

Целью работы является обеспечение единства измерений характеристик антенн путем сканирования электромагнитного поля по неканоническим поверхностям в ближней зоне излучения. Для достижения цели работы решаются следующие частные **задачи**:

1. Теоретическое обоснование подходов к разработке алгоритма измерений внешних характеристик антенн путем сканирования электромагнитного поля по неканоническим поверхностям в ближней зоне излучения.

2. Разработка алгоритма измерений внешних характеристик антенн путем сканирования электромагнитного поля по неканоническим поверхностям в ближней зоне излучения.

3. Разработка имитационной модели измерений внешних характеристик антенн путем сканирования электромагнитного поля в произвольно заданном множестве точек в ближней зоне излучения.

4. Исследование и обоснование показателей точности методики измерений внешних характеристик антенн путем сканирования электромагнитного поля по неканоническим поверхностям в ближней зоне излучения.

Методы решения основываются на линейной и тензорной алгебре, теоретической и вычислительной электродинамике, программировании на языке MATLAB, теории погрешностей.

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждается корректным использованием существующих методов исследования; соответствием расчетных и экспериментальных данных; использованием средств измерений, прослеживаемых к государственным эталонам.

Научная новизна работы заключается в том, что

1. Получена формула для прямого преобразования электромагнитного поля внутрь замкнутой поверхности, которая в отличие от известных не требует обращения матрицы оператора преобразования.

2. Получено асимптотическое уравнение связи между антеннами в дальней зоне излучения зондовой антенны, которое в отличие от известных применимо в ближней зоне излучения исследуемой антенны.

3. Разработан метод восстановления компонент вектора электромагнитного поля, входными данными для которого в отличие от известных служат измерения коэффициента передачи между антеннами в волновой зоне излучения минимум в трех точках с разностью фаз не более 180° .

4. Разработана имитационная модель измерений внешних характеристик антенн путем сканирования электромагнитного поля в произвольно заданном множестве точек в ближней зоне излучения, которая в отличие от известных применима в промежуточной и дальней зоне излучения.

Практическая ценность:

Разработанная имитационная модель измерений внешних характеристик антенн в ближней зоне излучения может использоваться для аттестации методик измерений и испытаний антенных измерительных комплексов. Разработанная методика измерений внешних характеристик антенн путем сканирования электромагнитного поля по неканоническим поверхностям в ближней зоне излучения может использоваться на всех существующих и новых антенных измерительных комплексах ближней зоны.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанный быстрый алгоритм расчета коэффициента передачи между антеннами, одна из которых находится в дальней зоне излучения, обладает вычислительной сложностью, не зависящей от расстояния между антеннами.

2. Разработанный прямой алгоритм преобразования электромагнитного поля с коррекцией по диаграмме направленности зондовой антенны позволяет восстанавливать электромагнитное поле как снаружи, так и внутри неканонической поверхности сканирования в ближней зоне излучения исследуемой антенны.

3. Разработанная имитационная модель измерений внешних характеристик антенн путем сканирования электромагнитного поля в произвольно заданном множестве точек в ближней зоне излучения позволяет оценивать показатели точности измерений характеристик антенн, выполняемых на антенных измерительных комплексах ближней зоны.

4. Разработанная методика измерений внешних характеристик антенн путем сканирования электромагнитного поля по неканоническим поверхностям в ближней зоне излучения позволяет выполнять измерения с эквивалентным уровнем помех не больше -35 дБ.

Результаты работы реализованы в виде

программного обеспечения для созданных во ФГУП «ВНИИФТРИ» сканеров электромагнитного поля, для которого получено свидетельство о регистрации № 2018619915;

методики измерений внешних характеристик антенн путем сканирования электромагнитного поля по неканоническим поверхностям в ближней зоне излучения.

Апробация результатов работы проводилась на

VI Научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и специалистов «Метрология в XXI веке» (г.п. Менделеево, 22 марта 2018 г.);

Международной конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий – РЭУС – 2018» (г. Москва, 30 мая-1 июня 2018 г.);

IX Всероссийской научно-технической конференции «Метрология в радиоэлектронике» (г.п. Менделеево, 19-21 июня 2018 г.);

28-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и инфокоммуникационные технологии» (г. Севастополь, 9-15 сентября 2018 г.);

16th IEEE East-West Design & Test Symposium (г. Казань, 14-17 сентября 2018 г.);

Всероссийской конференции «Антенны и распространение радиоволн» (г. Санкт-Петербург, 16-19 октября 2018 г.);

VI Всероссийской микроволновой конференции (г. Москва, 28-30 ноября 2018 г.);

VII Научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и специалистов «Метрология в XXI веке» (г.п. Менделеево, 21 марта 2019 г.);

VIII Международном конкурсе «Лучший молодой метролог КООМЕТ – 2019» (г. Казань, 5-6 июня 2019 г.);

Международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн ИРЭМВ – 2019» (пос. Дивноморское, 24-28 июня 2019 г.);

IX Всероссийской научно-технической конференции «ЭМС» (г. Москва, 6-7 августа 2020 г.).

Публикации. Основные положения и результаты диссертационной работы отражены в 16 публикациях, из которых 5 опубликованы в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК, 3 входят в базу данных Scopus.

Личный вклад автора. Автор участвовал в постановке научной задачи, лично сформулировал частные задачи для ее решения. Вся теоретическая часть работы выполнена и реализована в виде программного обеспечения лично автором. Автор лично подготовил все связанные с работой публикации и провел апробацию результатов на различных научно-технических конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Основное содержание работы изложено на 146 страницах и включает 31 рисунок и 24 таблицы. Список литературы состоит из 138 наименований на 15 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, указана научная задача и цель работы, сформулированы частные задачи, научная новизна и практическая ценность результатов работы, выносимые на защиту основные положения, а также обозначен личный вклад автора.

В главе 1 проводится анализ теории взаимодействия антенн и методов измерений их внешних характеристик путем сканирования в БЗ.

В разделе 1.1 приводится обзор известных методов измерений внешних характеристик антенн путем сканирования в БЗ. Сначала рассматриваются алгоритмы преобразования электромагнитного поля из БЗ в ДЗ (БЗ-ДЗ алгоритмы), которые можно разделить на классические, прямые и инверсные. Отмечаются преимущества прямых БЗ-ДЗ алгоритмов перед инверсными. Однако эти преимущества полностью обесцениваются главным недостатком прямых БЗ-ДЗ алгоритмов – отсутствием коррекции по зондовой антенне. Далее рассматриваются алгоритмы коррекции по зондовой антенне, которые позволяют учесть влияние характеристик зондовой антенны на результаты измерений. После приводится обзор математических моделей измерений на АИК БЗ. Отмечается, что в нашей стране разработана имитационная модель измерений на АИК БЗ только для плоской поверхности сканирования, в которой не реализована проверка алгоритмов коррекции по зондовой антенне. В конце раздела 1.1 анализируются тенденции развития АИК БЗ и реализуемых на них методов измерений. Отмечается переход за рубежом от исследований методов измерений с неканоническими поверхностями сканирования к их внедрению на практике в новых видах АИК БЗ.

В разделе 1.2 предлагается следующая компактная запись микроскопических уравнений Максвелла в отсутствии электрических зарядов:

$$[\nabla, \mathbf{F}] = -\frac{i\sigma_2}{c} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial t} + 4\pi \mathbf{j} \right), \quad (1)$$

$$(\nabla, \mathbf{F}) = 0, \quad (2)$$

где $\mathbf{F} = \{\mathbf{E}, \mathbf{H}\}$ – вектор электромагнитного поля, $\mathbf{E}$ и $\mathbf{H}$ – напряженность электрического и магнитного поля; $\mathbf{j} = \{\mathbf{j}_e, \mathbf{j}_m\}$ – вектор источников электромагнитного поля; c – скорость света в вакууме; t – время; $\mathbf{j}_e$ и $\mathbf{j}_m$ – объемная плотность электрических и магнитных токов; σ_α – матрицы Паули:

$$\sigma_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \sigma_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

Решение системы уравнений (1)-(2) может быть записано через скалярные $\varphi = \{\varphi_e, \varphi_m\}$ и векторные $\mathbf{A} = \{\mathbf{A}_e, \mathbf{A}_m\}$ потенциалы электромагнитного поля. При этом существует два решения: запаздывающее со временем $t' = t - R/c$ и опережающее со временем $t' = t + R/c$, где R – расстояние до источника электромагнитного поля. Решение системы уравнений (1)-(2) через опережающие потенциалы традиционно не рассматривается, поскольку в нем следствие возникает раньше его причины. Тем не менее, опережающие потенциалы могут использоваться при условии стационарности и линейности среды распространения электромагнитных волн.

Преобразование гармонического электромагнитного поля $\tilde{\mathbf{F}}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{F}(\mathbf{r}) e^{i\omega t}$ (ω – циклическая частота) с поверхности сканирования S можно осуществить по следующей формуле:

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}) = \frac{1}{c} \oint_S \left(\mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') - \nabla \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') i\sigma_2 \right) \mathbf{J}(\mathbf{r}') dS', \quad (3)$$

$$\mathbf{G}_\beta^\alpha(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = -ik \left(\frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial x^\alpha \partial x_\beta} + \delta_\beta^\alpha \right) \frac{e^{-ikR}}{R}, \quad \nabla \mathbf{G}_\beta^\alpha(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \varepsilon_{\alpha\beta\gamma} \frac{\partial}{\partial x^\beta} \frac{e^{-ikR}}{R},$$

где $\mathbf{J} = c / (4\pi) [\mathbf{n}, i\sigma_2 \mathbf{F}]$ – поверхностная плотность эквивалентных токов; $\mathbf{n}$ – внешняя нормаль к поверхности S ; $k = \omega / c$ – волновое число; $\mathbf{R} = \mathbf{r} - \mathbf{r}'$ – радиус-вектор от источников электромагнитного поля; $\delta_{\alpha\beta}$ и $\varepsilon_{\alpha\beta\gamma}$ – символы Кронекера и Леви-Чивиты.

Формулу (3) можно записать в следующем компактном виде:

$$\mathbf{F}_f = \hat{L}_{fs} \mathbf{J}_s \circ \mathbf{S}_s,$$

где s – индекс, обозначающий принадлежность к области источников электромагнитного поля; f – индекс, обозначающий принадлежность к области, в которой электромагнитное поле вычисляется; $\hat{L}_{fs}$ – оператор преобразования

электромагнитного поля; $\circ$ – покомпонентное произведение Адамара; $\mathbf{F}$, $\mathbf{J}$ и $\mathbf{S}$ – векторы, которые объединяют величины в N точках:

$$\begin{aligned}\mathbf{F} &= \{E_1^1 \quad E_1^2 \quad E_1^3 \quad H_1^1 \quad H_1^2 \quad H_1^3 \quad \dots \quad H_N^3\}, \\ \mathbf{J} &= \{J_{e1}^1 \quad J_{e1}^2 \quad J_{e1}^3 \quad J_{m1}^1 \quad J_{m1}^2 \quad J_{m1}^3 \quad \dots \quad J_{mN}^3\}, \\ \mathbf{S} &= \{\delta S_1 \quad \delta S_1 \quad \delta S_1 \quad \delta S_1 \quad \delta S_1 \quad \delta S_1 \quad \dots \quad \delta S_N\}.\end{aligned}$$

При этом классическое решение через запаздывающие потенциалы и решение через опережающие потенциалы, которое отмечено звездой, связаны следующим тождеством:

$$\mathbf{F}_f^* = \hat{L}_{fs}^* (k, \mathbf{R}) \mathbf{J}_s^* \circ \mathbf{S}_s = \hat{L}_{fs} (-k, -\mathbf{R}) \mathbf{J}_s \circ \mathbf{S}_s = -\hat{L}_{fs} (-k, \mathbf{R}) \boldsymbol{\sigma}_3 \mathbf{J}_s \circ \mathbf{S}_s = -\boldsymbol{\sigma}_3 \mathbf{F}_f. \quad (4)$$

В разделе 1.3 приводится альтернативный вывод уравнения связи между антеннами с использованием тождества (4) и закона сохранения энергии. Наиболее удобная для практики запись этого уравнения без учета взаимного влияния антенн имеет следующий вид:

$$S_{21}(\mathbf{r}, \omega) = \frac{\eta(\omega) c e^{ikr'}}{4\pi r' Z} \oint_{S_\infty} \left(\hat{\mathbf{F}}(\hat{\mathbf{r}}', \omega), -\boldsymbol{\sigma}_3 \hat{\mathbf{T}}(-\hat{\mathbf{r}}', \omega) \right) e^{-ik(\hat{\mathbf{r}}', \mathbf{r})} dS', \quad (5)$$

где S_{21} – коэффициент передачи; $\eta(\omega)$ – нормировочная константа, которая учитывает энергетические потери на распространение и согласование электромагнитных волн в тракте; Z – импеданс антенны; S_∞ – сфера бесконечного радиуса; $\mathbf{T}$ – диаграмма направленности (ДН) зондовой антенны ($\mathbf{F}(\mathbf{r}) = \mathbf{T}(\theta, \varphi) e^{-ikr} / r$); крыша над векторами поля $\mathbf{F}$ и $\mathbf{T}$ означает операцию их нормировки по току $I = |\int \mathbf{j} dV|$, а над радиус-векторами $\mathbf{r}$ – по модулю r .

С помощью формулы (3) и тождества (4) получена следующая формула, которая явно связывает ДН со спектром плоских электромагнитных волн:

$$\mathbf{F}^\alpha(\mathbf{r}) = \frac{e^{ikr'}}{i\lambda r'} \oint_{S_\infty} \mathbf{F}^\alpha(\hat{\mathbf{r}}') e^{-ik(\hat{\mathbf{r}}', \mathbf{r})} dS'. \quad (6)$$

Подстановка формулы (6) в уравнение связи (5) позволила получить его ранее неизвестную асимптоту:

$$S_{21}(\mathbf{r}, \omega) = \frac{i\eta(\omega)c}{2kZ} \boldsymbol{\sigma}_3 \hat{\mathbf{T}}_\alpha \left(\nabla \arg(\hat{\mathbf{F}}^\alpha(\mathbf{r}, \omega)) / k, \omega \right) \hat{\mathbf{F}}^\alpha(\mathbf{r}, \omega). \quad (7)$$

Верификация асимптотического уравнения связи (7) была проведена по следующему эксперименту. Измерялся коэффициент передачи на частоте 30 ГГц ($\lambda = 10$ мм). В качестве исследуемой использовалась рупорная антенная П6-132 с размером апертуры $6,8\lambda \times 5,4\lambda$ ($x \times y$). С ней была связана декартова система

координат с началом в центре раскрыва. Ось Ox направлена вдоль большей стороны апертуры, Oy – вдоль меньшей стороны апертуры, Oz – перпендикулярно апертуре. В качестве зондовой использовалась рупорная антенна с размером апертуры $3,3\lambda \times 2,0\lambda$ ($x \times y$). Сканирование электромагнитного поля проводилось с помощью коллаборативного робота Universal Robots UR10 с шестью вращательными степенями свободы. Центр раскрыва зондовой антенны помещался в узлы прямоугольной эквидистантной сетки в сечении Oyz с центром $\{0, 0, 27\lambda\}$, размерами $30\lambda \times 50\lambda$ ($y \times z$) и шагом $\lambda / 2$.

На рисунке 1 приведено распределение коэффициента передачи S_{21} в сечении $y = 7,5\lambda$. Кривая асимптотического уравнения связи (7) (первое приближение) начинает отклоняться от экспериментальных значений не более 1 дБ, начиная с расстояния $z = 25\lambda$. ДЗ зондовой антенны начинается с $z = 23\lambda$. Таким образом, уравнение связи (7) можно применять, начиная с расстояния R_{WT} :

$$R \geq R_{WT} = 3D^2/\lambda, \quad (8)$$

где $D = \max r'$ – максимальная протяженность апертуры зондовой антенны.

Глава 2 посвящена разработке прямого БЗ-ДЗ алгоритма с коррекцией по зондовой антенне.

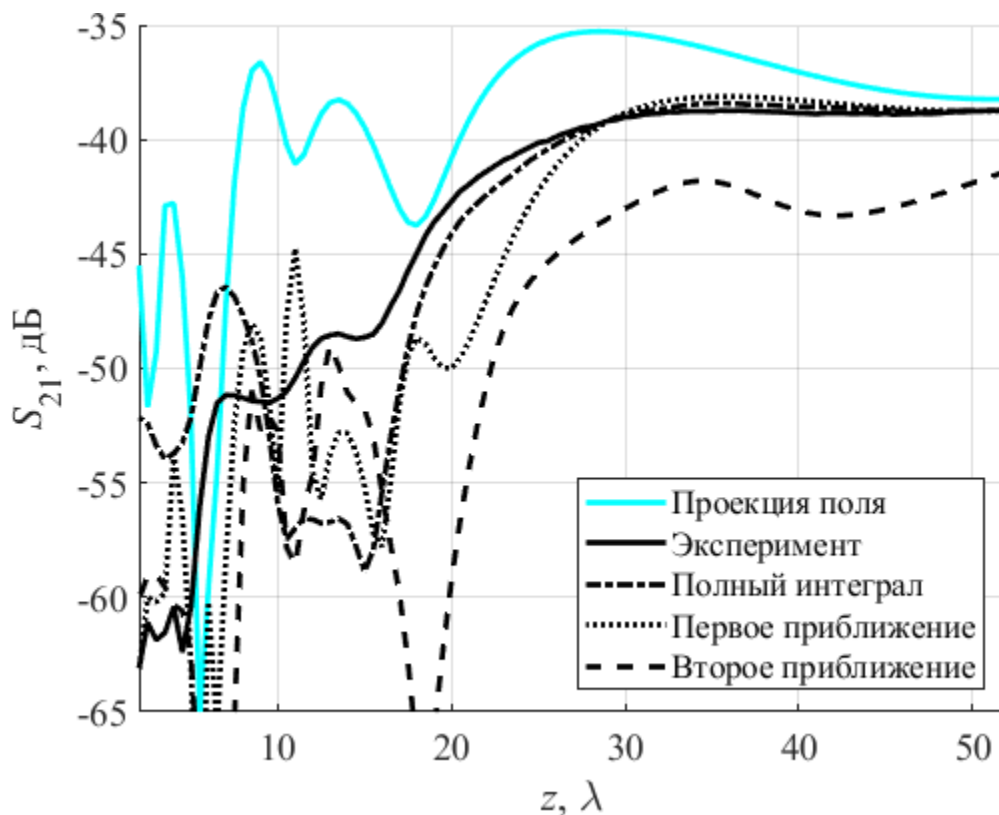


Рисунок 1 – Коэффициент передачи в сечении $y = 7,5\lambda$

В его основу положены формула (3), тождество (4) и асимптотическое уравнение связи (7). Корректное применение теории требует определения на практике систем координат, изображенных на рисунке 2. С исследуемой антенной связывается глобальная декартова система координат $Oxyz$ с базисом $\mathbf{A} = (\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z)$. С зондовой антенной связывается локальная Декартова система координат с базисом $\mathbf{A}' = (\mathbf{e}_{x'}, \mathbf{e}_{y'}, \mathbf{e}_{z'})$. Критерий (8) для открытых концов волноводов, которые являются стандартными зондовыми антеннами на АИК БЗ, выполняется, начиная с расстояния 3λ . В таких условиях локально (в точке) напряженности электрического и магнитного поля связаны друг с другом как в поперечной электромагнитной волне с ошибкой не более 1 дБ. По этой причине дополнительно вводится волновой базис $\mathbf{A}'' = (\mathbf{e}_\rho, \mathbf{e}_\zeta, \mathbf{e}_\xi)$.

Раздел 2.1 посвящен разработке алгоритма коррекции по зондовой антенне. На первом шаге оценивается ко-поляризованная компонента напряженности электрического поля E_ξ в волновом базисе $\mathbf{A}''$ по следующей формуле:

$$E_\xi = S_{21}^I(\mathbf{e}_\xi, \mathbf{e}_{y'}^I) - S_{21}^{II}(\mathbf{e}_\xi, \mathbf{e}_{x'}^{II}). \quad (9)$$

В формуле (9) и далее используются базисы локальной системы координат, которые соответствуют положению I при согласованных поляризациях исследуемой и зондовой антенн. В положении II зондовая антенна повернута относительно оси $O'z'$ на угол $\psi = 90^\circ$.

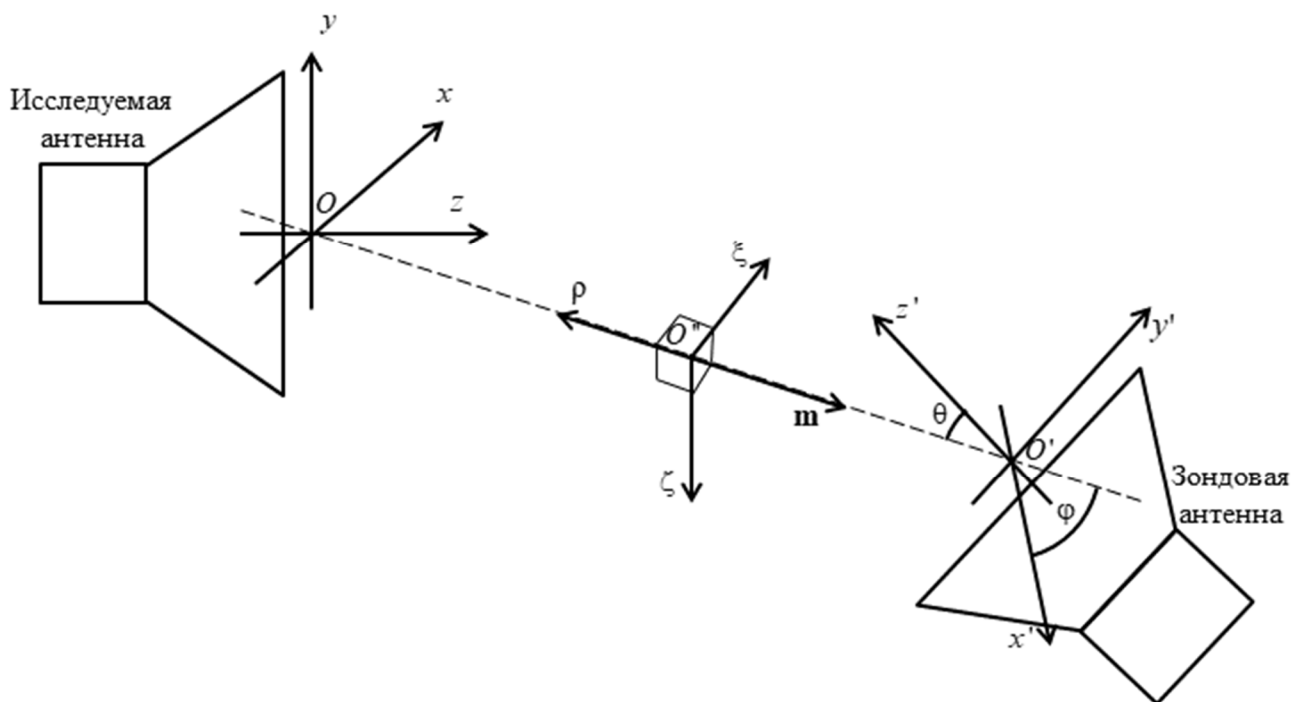


Рисунок 2 – Системы координат

Далее ищутся три ближайшие точки $\mathbf{r}_\alpha$ к точке $\mathbf{r}_0$, в которой требуется провести коррекцию по зондовой антенне, и вычисляется следующее решение СЛАУ относительно вектора распространения $\mathbf{m}$:

$$\begin{pmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{pmatrix} = \frac{1}{k} \begin{pmatrix} x_1 - x_0 & y_1 - y_0 & z_1 - z_0 \\ x_2 - x_0 & y_2 - y_0 & z_2 - z_0 \\ x_3 - x_0 & y_3 - y_0 & z_3 - z_0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \arg E_\xi(\mathbf{r}_0) - \arg E_\xi(\mathbf{r}_1) \\ \arg E_\xi(\mathbf{r}_0) - \arg E_\xi(\mathbf{r}_2) \\ \arg E_\xi(\mathbf{r}_0) - \arg E_\xi(\mathbf{r}_3) \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Характеристики зондовой антенны определены в локальной системе координат с базисом $\mathbf{A}'$. По этой причине необходимо сделать следующие преобразования координат:

$$\mathbf{m}' = \mathbf{A}'^{-1} \mathbf{m}, \quad (11)$$

$$\begin{Bmatrix} 0 & T_\zeta & T_\xi \end{Bmatrix} = \mathbf{A}''^{-1} \begin{Bmatrix} T_{1'}(-\mathbf{m}') & T_{2'}(-\mathbf{m}') & T_{3'}(-\mathbf{m}') \end{Bmatrix}. \quad (12)$$

В волновом базисе $\mathbf{A}''$ независимыми являются только две из шести компонент вектора электромагнитного поля $\mathbf{F}$. Их можно получить из следующего решения СЛАУ:

$$\begin{pmatrix} E_\zeta \\ E_\xi \end{pmatrix} = \frac{kW_0}{i\eta c} \begin{pmatrix} T_\zeta & T_\xi \\ -T_\xi & T_\zeta \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} S_{21}^I \\ S_{21}^{II} \end{pmatrix}, \quad (13)$$

где W_0 – подводимая к антенне мощность.

Заканчивается алгоритм коррекции по зондовой антенне преобразованием вектора электромагнитного поля $\mathbf{F}''$ обратно в глобальный базис $\mathbf{A}$:

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}'\mathbf{A}'' & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{A}'\mathbf{A}'' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \begin{Bmatrix} 0 & E_\zeta & E_\xi \end{Bmatrix} \\ \begin{Bmatrix} 0 & -E_\xi & E_\zeta \end{Bmatrix} \end{pmatrix}, \quad (14)$$

где $\mathbf{O}$ – нулевая матрица соответствующего размера.

Раздел 2.2 посвящен разработке прямого алгоритма преобразования электромагнитного поля на апертуру исследуемой антенны. Входные данные для него формируются алгоритмом коррекции по зондовой антенне, который заключается в последовательном вычислении формул (9)-(14). Из формулы (3) и тождества (4) получена формула (15).

Раздел 2.3 посвящен разработке прямого БЗ-ДЗ алгоритма, который включает в себя алгоритмы коррекции по зондовой антенне, преобразования электромагнитного поля на апертуру и в ДЗ. Преобразование электромагнитного поля с апертуры в ДЗ может быть выполнено с помощью той же формулы (15).

Верификация разработанного прямого БЗ-ДЗ алгоритма была проведена по экспериментам с коллаборативным роботом.

$$\begin{pmatrix} \pm E_{1x} \\ \pm E_{1y} \\ \pm E_{1z} \\ H_{1x} \\ H_{1y} \\ H_{1z} \\ \dots \\ H_{Mz} \end{pmatrix} = \pm \frac{ik}{4\pi} \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{11x}^2 - 1 & v_{11x}v_{11y} & v_{11x}v_{11z} & 0 & -v_{11z} & v_{11y} \\ v_{11y}v_{11x} & v_{11y}^2 - 1 & v_{11y}v_{11z} & v_{11z} & 0 & -v_{11x} \\ v_{11z}v_{11x} & v_{11z}v_{11y} & v_{11z}^2 - 1 & -v_{11y} & v_{11x} & 0 \\ 0 & v_{11z} & -v_{11y} & v_{11x}^2 - 1 & v_{11x}v_{11y} & v_{11x}v_{11z} \\ -v_{11z} & 0 & v_{11x} & v_{11y}v_{11x} & v_{11y}^2 - 1 & v_{11y}v_{11z} \\ v_{11y} & -v_{11x} & 0 & v_{11z}v_{11x} & v_{11z}v_{11y} & v_{11z}^2 - 1 \end{pmatrix} \frac{e^{\mp ikR_{11}}}{R_{11}} & \dots \\ \dots & \dots \\ \begin{pmatrix} v_{M1y} & -v_{M1x} & 0 & v_{M1z}v_{M1x} & v_{M1z}v_{M1y} & v_{M1z}^2 - 1 \end{pmatrix} \frac{e^{\mp ikR_{M1}}}{R_{M1}} & \dots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{1Ny} \\ -v_{1Nx} \\ 0 \\ v_{1Nx}v_{1Nz} \\ v_{1Ny}v_{1Nz} \\ v_{1Nz}^2 - 1 \end{pmatrix} \frac{e^{\mp ikR_{1N}}}{R_{1N}} & \dots \\ \dots & \dots \\ \begin{pmatrix} v_{MNz}^2 - 1 \end{pmatrix} \frac{e^{\mp ikR_{MN}}}{R_{MN}} & \dots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} \pm n_{1y}H_{1z} \mp n_{1z}H_{1y} \\ \pm n_{1z}H_{1x} \mp n_{1x}H_{1z} \\ \pm n_{1x}H_{1y} \mp n_{1y}H_{1x} \\ -n_{1y}E_{1z} + n_{1z}E_{1y} \\ -n_{1z}E_{1x} + n_{1x}E_{1z} \\ -n_{1x}E_{1y} + n_{1y}E_{1x} \end{pmatrix} \delta S_1 \\ \dots \\ \begin{pmatrix} -n_{Nx}E_{Ny} + n_{Ny}E_{Nx} \end{pmatrix} \delta S_N \end{pmatrix} \end{pmatrix}, \quad (15)$$

где $\mathbf{v}_{\alpha\beta} = \mathbf{R}_{\alpha\beta} / R_{\alpha\beta}$ – единичный вектор визирования точки $\alpha = 1 \dots M$ из точки $\beta = 1 \dots N$; верхние знаки относятся к преобразованию электромагнитного поля наружу, а нижние – внутрь замкнутой поверхности.

Их условия совпадали с условиями эксперимента, который использовался для верификации асимптотического уравнения связи (7), за исключением следующего. В качестве зондовой антенны использовался открытый конец прямоугольного волновода с сечением $0,72\lambda \times 0,34\lambda$ ($x \times y$). Сканирование электромагнитного поля проводилось по неканоническим поверхностям, удаленным от исследуемой антенны на расстояние не менее 3λ , 6λ и 9λ .

На рисунке 3 приведены результаты восстановления амплитудной ДН (АДН) с помощью разработанного прямого БЗ-ДЗ алгоритма. В нем реализуется промежуточное преобразование электромагнитного поля на апертуру исследуемой антенны. Это позволяет исключить из дальнейших вычислений часть источников паразитных переотражений и добиться эффекта пространственной фильтрации. Также были проведены исследования прямого БЗ-ДЗ алгоритма с синтезированием временной зависимости сигналов и отсечением помех по величине задержки.

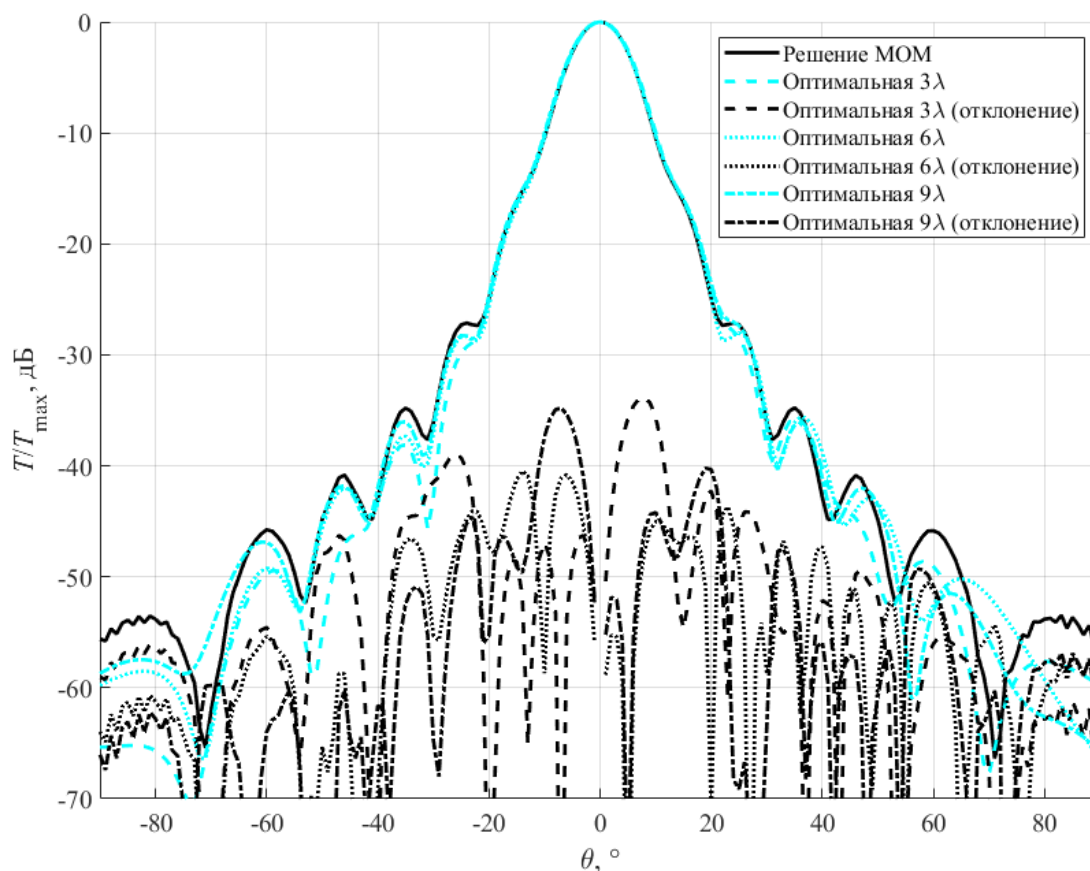


Рисунок 3 – Восстановление АДН в экспериментах с поверхностями на расстоянии 3λ , 6λ и 9λ

Однако эффект от временной фильтрации оказался несущественным в сравнении с эффектом от пространственной фильтрации. В первом случае эквивалентный уровень помех уменьшился не более чем на 5 дБ, а во втором – до 20 дБ. Для временной фильтрации требуется проведение измерений в сотне и более частот в широкой полосе. Отказ от временной фильтрации позволяет значительно сократить время сбора и обработки измерительной информации, а также использовать прямой БЗ-ДЗ алгоритм на большинстве существующих АИК БЗ, которые рассчитаны на измерения с небольшим числом частот.

Глава 3 посвящена разработке имитационной модели измерений внешних характеристик антенн на АИК БЗ, которая работает в два этапа. Сначала формируются исходные данные для БЗ-ДЗ алгоритмов в виде измеренных значений коэффициента передачи между исследуемой и зондовой антенной в точках сканирования электромагнитного поля. Затем результаты на выходе исследуемого БЗ-ДЗ алгоритма сравниваются опорными значениями, которые рассчитываются напрямую по заложенным в имитационную модель источникам электромагнитного поля.

Раздел 3.1 посвящен разработке алгоритма расчета коэффициента передачи между исследуемой и зондовой антенной. В его основу положено асимптотическое уравнение связи (7).

На первом шаге по эталонному вектору источников по формуле (15) вычисляется электромагнитное поле у источников паразитных переотражений – плоских отражателей. Затем в приближении физической оптики вычисляется поверхностная плотность эквивалентных электрических токов:

$$\begin{pmatrix} J_{ex} \\ J_{ey} \\ J_{ez} \end{pmatrix} = -\frac{cC_{an}}{2\pi} \begin{pmatrix} n_y H_z - n_z H_y \\ n_z H_x - n_x H_z \\ n_x H_y - n_y H_x \end{pmatrix}, \quad (16)$$

где C_{an} – коэффициент, определяющий уровень паразитных переотражений.

Далее по эталонному вектору источников и вектору источников паразитных переотражений с помощью формулы (15) вычисляется электромагнитное поле в точках сканирования $\tilde{\mathbf{r}}'$, которые смещены относительно исходных точек $\mathbf{r}'$ на значения $\delta\mathbf{r}'$:

$$\tilde{\mathbf{r}}' = \mathbf{r}' + \delta\mathbf{r}'. \quad (17)$$

В процессе сканирования электромагнитного поля зондовая антенна может вращаться относительно ориентации, которая определяется локальным базисом $\mathbf{A}'$. В имитационную модель вводятся три последовательные поворота на углы $\delta\psi_\alpha$ относительно ортов $\mathbf{e}_\alpha$ локальной системы координат $O'x'y'z'$:

$$\tilde{\mathbf{A}}' = \hat{B}(\mathbf{e}'_x, \delta\psi_x) \hat{B}(\mathbf{e}'_y, \delta\psi_y) \hat{B}(\mathbf{e}'_z, \delta\psi_z) \mathbf{A}', \quad (18)$$

где $\hat{B}(\mathbf{v}, \psi)$ – оператор поворота на угол ψ относительно заданного вектора $\mathbf{v}$.

В приближении волновой зоны вектор распространения $\mathbf{m}$ можно оценить по вектору электромагнитного поля в той же точке $\tilde{\mathbf{r}}'$ с помощью следующего решения СЛАУ:

$$\begin{pmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{pmatrix} = \left(\begin{pmatrix} 0 & H_z & -H_y & 0 & -E_z & E_y \\ -H_z & 0 & H_x & E_z & 0 & -E_x \\ H_y & -H_x & 0 & -E_y & E_x & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & -H_z & H_y \\ H_z & 0 & -H_x \\ -H_y & H_x & 0 \\ 0 & E_z & -E_y \\ -E_z & 0 & E_x \\ E_y & -E_x & 0 \end{pmatrix} \right)^{-1} \times \\ \times \begin{pmatrix} 0 & H_z & -H_y & 0 & -E_z & E_y \\ -H_z & 0 & H_x & E_z & 0 & -E_x \\ H_y & -H_x & 0 & -E_y & E_x & 0 \end{pmatrix} \{ E_x \ E_y \ E_z \ H_x \ H_y \ H_z \}. \quad (19)$$

Как уже отмечалось, ДН $\mathbf{T}'$ зондовой антенны известна в локальном базисе $\mathbf{A}'$, поэтому ее требуется преобразовать в глобальный базис $\mathbf{A}$ по следующей формуле:

$$\{T_1 \ T_2 \ T_3 \ T_4 \ T_5 \ T_6\} = \left\{ \mathbf{A}' \begin{pmatrix} T'_1 \\ T'_2 \\ T'_3 \end{pmatrix} \ \mathbf{A}' \begin{pmatrix} T'_4 \\ T'_5 \\ T'_6 \end{pmatrix} \right\}. \quad (20)$$

Только после этого вектор распространения $\mathbf{m}$ и ДН $\mathbf{T}$ зондовой антенны могут быть подставлены в асимптотическое уравнение связи (7):

$$S_{21} = i\eta c / (2kW_0) (T_1(-\mathbf{m})E_x + T_2(-\mathbf{m})E_y + T_3(-\mathbf{m})E_z - \\ - T_4(-\mathbf{m})H_x - T_5(-\mathbf{m})H_y - T_6(-\mathbf{m})H_z). \quad (21)$$

На последнем шаге алгоритма требуется учесть отклонения коэффициента передачи $\tilde{S}_{21}$ от значений, которые получены с помощью формулы (21), с помощью следующей формулы:

$$\tilde{S}_{21} = \left(1 + \text{rand}\left(10^{-C_{sn}/20}\right) + \delta E \right) |S_{21}| e^{i\left(\arg S_{21} + \text{rand}\left(\arctg\left(10^{-C_{sn}/20}\right)\right) + \delta\Phi\right)}, \quad (22)$$

где $\text{rand}(g)$ – функция, возвращающая случайное число от $-g$ до $+g$; C_{sn} – отношение сигнал-шум, дБ; δE и $\delta\Phi$ – отклонения амплитуды и фазы.

Раздел 3.2 посвящен разработке алгоритма оценки точности измерений на АИК БЗ. Опорные значения внешних характеристик антенн получаются после вычисления электромагнитного поля в ДЗ от опорного вектора источников с помощью формулы (15). Измеренные значения берутся на выходе исследуемого БЗ-ДЗ алгоритма. На его вход подаются характеристики зондовой антенны с заданной точностью и вектор измерений, который содержит рассчитанные на предыдущем этапе коэффициенты передачи в точках сканирования. Результаты измерений внешних характеристик антенн сравниваются с опорными значениями для оценки погрешности измерений либо с усредненными значениями для оценки неопределенности измерений.

Верификация разработанного алгоритма оценки точности измерений на АИК БЗ была проведена по эксперименту из раздела 2.3, в котором сканирование электромагнитного поля проводилось по неканонической поверхности на расстоянии 9λ от исследуемой антенны. При этом оценивался эквивалентный уровень помех измерений АДН с помощью двух БЗ-ДЗ алгоритмов. Сначала АДН была восстановлена с помощью прямого БЗ-ДЗ алгоритма без пространственной фильтрации, а затем с пространственной фильтрацией (рисунок 4).

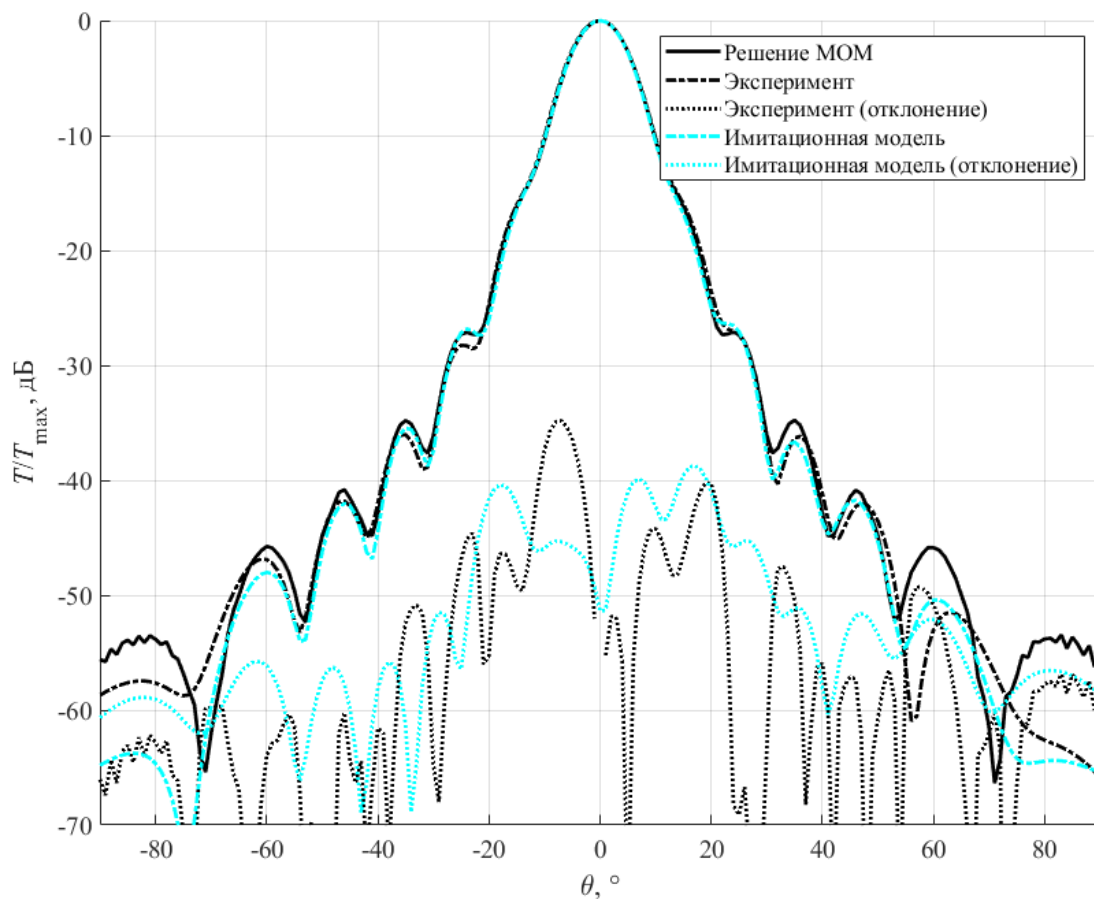


Рисунок 4 – Моделирование восстановления АДН с поверхности на расстоянии 9λ

Источники паразитных переотражений в имитационной модели измерений на АИК БЗ не совпадали с теми, что были в эксперименте. По этой причине можно оценивать лишь качественное совпадение экспериментальных и модельных результатов.

Сравнение экспериментальных и модельных результатов подтвердило адекватность разработанной имитационной модели измерений на АИК БЗ.

При неизменных параметрах имитационной модели добавление пространственной фильтрации в прямой БЗ-ДЗ алгоритм уменьшило эквивалентный уровень помех на значение от 10 до 20 дБ. На это же значение эквивалентный уровень помех уменьшился и в эксперименте.

Глава 4 посвящена исследованию разрабатываемой методики измерений внешних характеристик антенн путем сканирования по неканоническим поверхностям в БЗ. На первом этапе были исследованы источники погрешностей и неопределенностей измерений, которые позволили обосновать требования к входным данным и характеристикам оборудования. На втором этапе были оценены показатели точности разрабатываемой методики измерений.

Раздел 4.1 посвящен обоснованию требований к входным данным и характеристикам оборудования. Предложен алгоритм построения оптимальных поверхностей сканирования по известной геометрии исследуемой антенны. Обосновано минимальное расстояние от поверхности сканирования до исследуемой антенны значением 3λ . Исследовано влияние пространственного шага между соседними точками сканирования и обоснован его допустимый размер, который не должен превышать $\lambda / 2$. Исследована сходимость параметров распределений величин в методе Монте-Карло. Показано, что при реализации в имитационной модели 64-ех измерений ошибка вычисления эквивалентного уровня помех не превышает 1 дБ.

Получена оценка методической погрешности измерений с помощью разрабатываемой методики, эквивалентная уровню помех -39 дБ. Исследовано влияние значения среднего квадратического отклонения (СКО) характеристик оборудования на результаты измерений в отдельности и определены значения, обеспечивающие эквивалентный уровень помех не более -35 дБ (таблица 1).

Полученный перечень погрешностей и бюджет неопределенностей измерений позволил оценить показатели точности методики измерений с помощью стандартного расчета по МИ 2083-90 и ГОСТ 34100.1. Соответствующие значения эквивалентного уровня помех для погрешности измерений отличаются до 6 дБ от метода Монте-Карло. Отличия для неопределенности измерений существенно меньше и не превышают 2 дБ. Таким образом, стандартный расчет по ГОСТ 34100.1 может быть выполнен на основе полученного бюджета неопределенностей.

Таблица 1 – Обоснование характеристик оборудования

Характеристика	Значение, при котором эквивалентный уровень помех не превышает -35 дБ	
	в отдельности	в сумме
СКО поворота относительно оси зондовой антенны	3°	1°
СКО поворота относительно осей, ортогональных оси зондовой антенны	3°	2°
СКО смещения в направлении оси зондовой антенны	$\lambda / 100$	$\lambda / 200$
СКО смещения в направлениях, ортогональных оси зондовой антенны	$\lambda / 30$	$\lambda / 100$
СКО амплитуды коэффициента передачи	0,3 дБ	0,2 дБ
СКО фазы коэффициента передачи	3°	1°
Отношение сигнал-шум	40 дБ	40 дБ
Уровень паразитных переотражений	-30 дБ	-30 дБ
Эквивалентный уровень помех ДН зондовой антенны	-40 дБ	-40 дБ

Расчет по МИ 2083-90 позволяет делать лишь грубые оценки на основе перечня погрешностей измерений.

В разделе 4.2 приведены требования к входным данным и характеристикам оборудования, которые обеспечивают эквивалентный уровень помех измерений внешних характеристик антенн с помощью разработанного прямого БЗ-ДЗ алгоритма не более -35 дБ. Приводятся в виде рисунков и таблиц результаты оценки показателей точности методики измерений, которые были получены методом Монте-Карло по входным данным из таблице 1 в имитационной модели измерений на АИК БЗ.

На рисунке 5 приведена опорная АДН, а также усредненная по 64-ем реализациям в разработанной имитационной модели измерений на АИК БЗ. Доверительные границы погрешности измерений с вероятностью $P = 0,95$ несущественно зависят от уровней измерений и полярных углов. Соответствующая кривая в меньшей степени изрезана в сравнении с эквивалентным уровнем помех на рисунке 4 и является огибающей для множества подобных частных результатов.

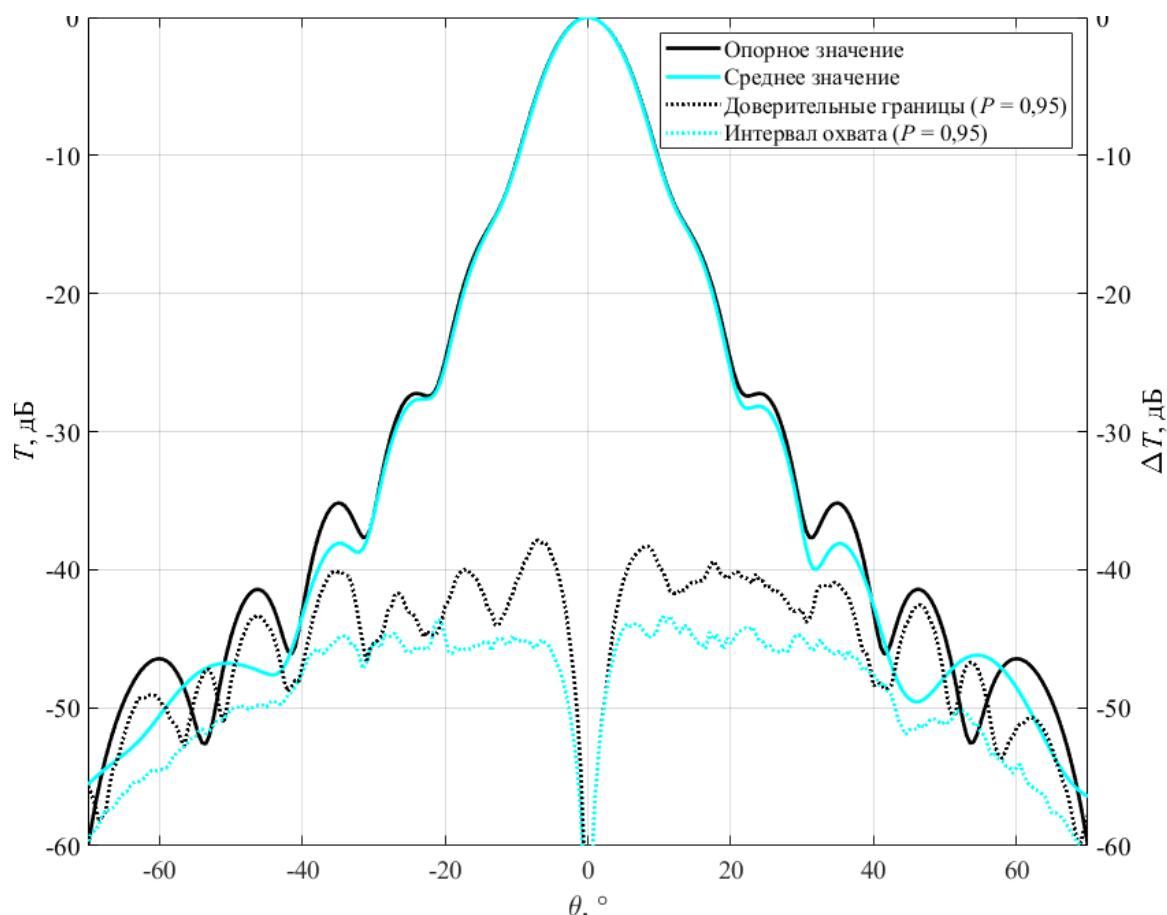


Рисунок 5 – Показатели точности измерений АДН с помощью разрабатываемой методики измерений

Все сказанное справедливо и для интервала охвата измерений с вероятностью $P = 0,95$. При этом интервал охвата несколько меньше доверительных границ погрешности измерений. Связано это с тем, методическая погрешность имеет преимущественно систематический характер и никак не проявляется после усреднения. Значение систематической погрешности можно оценить по разности уровней усредненной и опорной АДН на рисунке 5. При этом неопределенность измерений может быть сколь угодно уменьшена за счет уменьшения СКО характеристик оборудования, а значение погрешности измерений ограничено снизу эквивалентным уровнем помех -39 дБ, который соответствует методической погрешности.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе содержится решение актуальной научной задачи разработки методики измерений внешних характеристик антенн путем сканирования электромагнитного поля по неканоническим поверхностям в ближней зоне излучения. Решение научной задачи используется для обеспечения единства измерений характеристик антенн на автоматизированных измерительно-вычислительных комплексах ближней зоны.

В диссертации получены следующие основные результаты:

1. Сформулировано тождество между решениями уравнений электродинамики через запаздывающие и опережающие потенциалы электромагнитного поля. Тождество позволило разработать прямой алгоритм преобразования электромагнитного поля с замкнутой поверхности внутрь этой поверхности.

2. Из решения уравнений электродинамики через опережающие потенциалы получено уравнение, связывающее компоненты вектора электромагнитного поля в дальней зоне излучения со спектром плоских скалярных волн. С использованием этого уравнения получено асимптотическое уравнение связи между антеннами в ближней зоне исследуемой антенны и дальней зоне зондовой антенны.

3. Разработан прямой алгоритм преобразования электромагнитного поля с неканонических поверхностей сканирования на апертуру исследуемой антенны, который осуществляет пространственную фильтрацию и позволяет уменьшить эквивалентный уровень помех до 20 дБ.

4. Разработан прямой алгоритм преобразования электромагнитного поля из ближней зоны в дальнюю зону, который позволяет измерять внешние

характеристики антенн путем сканирования по неканоническим поверхностям. Методическая погрешность измерений внешних характеристик антенн с помощью разработанного алгоритма эквивалентна уровню помех, который не превышает значение -39 дБ.

5. Разработана имитационная модель измерений внешних характеристик антенн путем сканирования электромагнитного поля в произвольно заданном множестве точек в ближней зоне излучения. Имитационная модель может быть использована для аттестации методик измерений и испытаний антенных измерительных комплексов ближней, промежуточной и дальней зоны.

6. Проведены исследования методики измерений внешних характеристик антенн путем сканирования электромагнитного поля по неканоническим поверхностям в ближней зоне излучения. Обоснованы требования к входным данным алгоритмов и характеристикам оборудования. Предел допускаемой погрешности измерений внешних характеристик антенн по результатам имитационного моделирования эквивалентен уровню помех, который не превышает значение -35 дБ.

Таким образом, достигнута цель диссертационной работы – обеспечено единство измерений характеристик антенн путем сканирования электромагнитного поля по неканоническим поверхностям в ближней зоне излучения.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Анютин Н. В., Малай И. М., Озеров М. А., Титаренко А. В., Шкуркин М. С. Коррекция измеренного амплитудно-фазового распределения поля в ближней зоне по диаграмме направленности зонда // Измерительная техника. – 2018. – №1. – С. 50-53.

2. Анютин Н. В., Курбатов К. И., Малай И. М. Оценка методических погрешностей в алгоритмах антенных измерительных комплексов ближней зоны с планарным типом сканирования // Научные технологии в космических исследованиях земли. – 2018. – №1. – С. 14-20.

3. Анютин Н. В., Курбатов К. И., Малай И. М., Озеров М. А. Алгоритм преобразования электромагнитного поля, измеренного в ближней зоне антенны на сферической поверхности, в дальнюю зону, основанный на прямом

вычислении формул Стрэттона и Чу // Изв. Вузов. Радиоэлектроника. – 2019. – Т. 62. – №3. – С. 136-146.

4. Аняутин Н. В. Преобразование электромагнитного поля с описанной вокруг антенны замкнутой поверхности на апертуру антенны // Измерительная техника. – 2021. – №1. – С. 48-55.

5. Аняутин Н. В., Малай И. М. Математическая модель измерений характеристик антенн в ближней зоне излучения // Альманах современной метрологии. – 2021. – №1. – С. 44-66.

В изданиях, входящих в базу Scopus:

6. Anyutin N. V., Malay I. M., Malyshev A. V. Reconstruction Algorithm of Electromagnetic Field in Case of Elliptic Polarization of Near-Field Probe // Proc. EDWTS – 2018. – 2018. – С. 834-837.

7. Anyutin N., Malay I., Malyshev A. Advantage of Stratton and Chu Formulas for Electromagnetic Field Reconstruction // 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – IEEE, 2019. – С. 293-296.

8. Anyutin N., Malay I., Malyshev A. Investigation of NF-FF Transformations in the Measurement of all Components of the Electromagnetic Field // 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – IEEE, 2019. – С. 297-300.

В других журналах и изданиях:

9. Аняутин Н. В. Измерение вектора напряженности электрического поля гармонического излучения антенной-зондом // Труды международной конференции РЭУС – 2018. – 2018. – Т. 8. – №. 1. – С. 25-28.

10. Аняутин Н. В. Референтная методика измерения характеристик гармонического электромагнитного поля антенными измерительными комплексами ближней зоны // Материалы XI Всерос. научно-технической конференции «Метрология в радиоэлектронике». – 2018. – Т. 1. – С. 156-161.

11. Аняутин Н. В. Разработка калькулятора электромагнитного поля для антенных измерительных комплексов ближней зоны // Материалы XI Всерос. Научно-технической конференции «Метрология в радиоэлектронике». – 2018. – Т. 2. – С. 259-263.

12. Аняутин Н. В., Малай И. М., Озеров М. А., Шкуркин М. С. Разработка универсального алгоритма преобразования электромагнитного поля гармонического излучения из ближней зоны в дальнюю зону // Труды 28 международной Крымской конференции КрыМиКо – 2018. – 2018. – Т. 9. – С. 1994-2000.

13. Аняутин Н. В. Область применимости алгоритмов преобразования электромагнитного поля, основанных на его модальном разложении // Труды Всерос. Научно-технической конференции АРР – 2018. – 2018. – С. 65-69.

14. Аняутин Н. В. Измерение электромагнитного поля рупорными антеннами // VI Всероссийская Микроволновая конференция // Сборник докладов. – М.: Изд-во JRE – ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. – 2018. – С. 40-44.

15. Anyutin N. V. Fundamental studies of the microwave range electromagnetic field measurements in the near field zone // The best young metrologist of COOMET – 2019. – С. 4.

16. Аняутин Н. В. Особенности определения характеристик антенн РЭС, определяющих их ЭМС в местах размещения // IX Всероссийская научно-техническая конференция «ЭМС» // Сборник докладов. – 2020. – С. 20-27.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

1. Аняутин Н.В. Программа расчета параметров СВЧ электромагнитных полей // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018619915.