

Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Всероссийский научно-исследовательский институт  
физико-технических и радиотехнических измерений»  
ФГУП «ВНИИФТРИ»

на правах рукописи

Озеров Михаил Алексеевич

**МЕТОДЫ УМЕНЬШЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ  
«ЛОКАЛЬНЫХ» РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТОВ НА  
ШИРОКОПОЛОСНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ  
КОМПЛЕКСАХ**

Специальность 2.2.10 «Метрология и метрологическое обеспечение»

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

Менделеево – 2023 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, заместитель генерального директора ФГУП «ВНИИФТРИ» по радиотехническим и электромагнитным измерениям

**Официальные оппоненты:**

**Юханов Юрий Владимирович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой антенн и радиопередающих устройств инженерно-технологической академии ЮФУ, главный конструктор Центра инженерных разработок "Микроволновые технологии электродинамических структур", г. Таганрог;

**Смирнов Андрей Павлович**, доктор технических наук, руководитель направления ЭМС и радиоизмерений АО «НПФ «Диполь», Россия, 197101, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Монетная, 16, корп. 45, лит. Я, пом.52.

**Ведущая организация:** Главный научный метрологический центр Министерства обороны Российской Федерации, Россия, 141006, Московская область, город Мытищи, улица Комарова, 13

Защита диссертации состоится «\_\_» декабря 2023 г в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 32.1.004.01 в ФГУП «ВНИИФТРИ» по адресу: 141570, Московская обл., Солнечногорский р-н., р.п. Менделеево.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГУП «ВНИИФТРИ» ([www.vniiftri.ru](http://www.vniiftri.ru)):  
<https://www.vniiftri.ru/upload/iblock/091/06dj91djagyx1lr0refd2tu38rcr1tm3.pdf>

Автореферат разослан «\_\_» октября 2022 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук

М.В. Балаханов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Исследование рассеивающих свойств объектов в настоящее время проводятся для решения широкого спектра задач их обнаружения и классификации. Такие исследования востребованы в гражданской сфере в интересах обеспечения безопасности дорожного движения, развития беспилотного транспорта, дистанционного зондирования Земли, а также в области обороны и безопасности. Многим типам объектов предъявляются требования по радиолокационной заметности. Радиолокационная заметность определяется величиной эффективной площади рассеяния (или ЭПР), которая непосредственно влияет на предельную дальность обнаружения объекта. В связи с этим разработчиками объектов предпринимаются меры по уменьшения радиолокационной заметности с целью противодействия обнаружению и распознаванию, что нашло своё воплощение в Stealth-технологии.

Создание перспективных малозаметных образцов невозможно без оценки их характеристик рассеяния с помощью специальных средств измерений. Основной радиолокационной характеристикой (РЛХ) объекта является интегральная эффективная площадь рассеяния (ЭПР), описывающая рассеивающие свойства объекта как точечного. Повышение разрешающей способности средств обнаружения позволило воспроизводить радиолокационное изображение объекта и привело к появлению возможности измерения локальных ЭПР, описывающих рассеивающие свойства локальных элементов или отдельных участков поверхности объекта как функции одной или двух пространственных координат. Оценку интегральной и локальной ЭПР проводят экспериментально с использованием радиолокационных измерительных комплексов (РИК) или расчётными методами.

В настоящее время парк зарубежных средств измерений ЭПР составляет около 100 радиолокационных измерительных комплексов (РИК), среди которых ведущими являются полигоны, корпораций Lockheed Martin, Boeing, Northrop Grumman, Hughes Aircraft.

Аналогичные работы в нашей стране ведутся с конца 60-х годов прошлого века и привели к созданию ряда отечественных РИК. Современные отечественные РИК позволяют проводить измерения ЭПР в динамическом диапазоне  $10^{-2}$ - $10^4$  м<sup>2</sup> для открытых полигонов ( $10^{-5}$ - $10^2$  м<sup>2</sup> для закрытых полигонов) с суммарной погрешностью измерений 2...5 дБ. К перспективным малозаметным объектам предъявляются всё более жёсткие требования по величине интегральной ЭПР, которые находятся на уровне  $10^{-2}$ - 1 м<sup>2</sup> с погрешностью 1...3 дБ, а также устанавливаются требования к величинам ЭПР отдельных элементов конструкции – «локальной» ЭПР. Определение путей достижения задаваемых значений ЭПР с учётом вклада различных элементов объекта невозможно без построения радиолокационных изображений (РЛИ).

В настоящее время большинство отечественных РИК измеряют лишь интегральные РЛХ, но для вновь разрабатываемых и модернизируемых комплексов предъявляются обязательные требования по возможности синтезирования РЛИ объектов. В связи с этим для обеспечения требуемой точности измерения «локальных» радиолокационных характеристик, получаемых путём синтезирования РЛИ, должна быть решена задача прослеживаемости РИК к соответствующим эталонам. В настоящее время на отечественных РИК синтезируемые изображения нормируются не к единице ЭПР, а к их максимальной яркости. Таким образом, существующая методическая и техническая базы не обеспечивают в полной мере возможность измерения «локальных» РЛХ объектов, а также не позволяют проводить достоверную оценку параметров современных широкополосных РИК с инверсным синтезом апертуры при их испытаниях.

Таким образом, современное состояние методического обеспечения измерений РЛХ объектов характеризуется:

- наличием технической возможности синтеза РЛИ на широкополосных радиолокационных РИК;

- отсутствием методов оценки погрешностей синтезируемых РЛИ;
- высокими значениями погрешностей измерений ЭПР, обусловливаемыми неравномерностью распределения ЭМП поля в рабочем объёме, влиянием фоновых и мешающих переотражений;
- систематическим характером доминирующих составляющих погрешности.

В связи с этим возникают **противоречия** между требованиями к функциональным и метрологическим характеристикам РИК и существующим методическим аппаратом для измерений «локальных» РЛХ, что в конечном итоге неизбежно ведёт к снижению качества испытаний малозаметных образцов. Поэтому разработка методов уменьшения погрешности измерений «локальных» радиолокационных характеристик объектов на широкополосных РИК, является **актуальной**.

**Объектом** исследований являются широкополосные радиолокационные измерительные комплексы с функцией синтеза радиолокационных изображений методом инверсного синтеза апертуры, используемые для оценки РЛХ объектов.

**Предметом** исследований являются методы синтеза и анализа радиолокационных изображений.

**Целью работы** является снижение радиолокационной заметности объектов за счёт повышения информативности и улучшения точностных характеристик измерений их РЛХ на радиолокационных измерительных комплексах

Интерес к ЭПР объектов возник с появлением первых радиолокационных станций. Поэтому к настоящему времени опубликовано большое количество работ по методам теоретической и экспериментальной оценки ЭПР объектов. Основными среди них являются труды Уфимцева П.Я., Майзельса Е.Н., Торгованова В.А., Тучкова Л.Т., Кобака В.О., Ягольников С.В., Даллманна Т., Кнотт Е.Ф., Менсы Д.Л., Бартона Д.К., Куртца Дж.Л. и других авторов. В некоторых из них, вместе с исследованием методов измерений надлежащее внимание уделялось способам оценки погрешности измерений интегральных РЛХ. В качестве основного алгоритма восстановления двумерных радиолокационных изображений авторами рассматривался метод томографии, однако на перспективных РИК основной метод синтеза РЛИ предполагает измерение комплексных многочастотных диаграмм обратного рассеяния, перераспределение их в матрицу пространственных частот, и совершение над ней быстрого преобразование Фурье. Кроме того, в перечисленных работах не была показана однозначная связь между ЭПР РЛИ объекта с его интегральной моностатической ЭПР.

Поэтому достижение цели исследований связано с решением **научной задачи**, заключающейся в разработке методов уменьшения погрешности измерений РЛХ объектов на широкополосных радиолокационных измерительных комплексах.

Решение научной задачи предполагало решение ряда **частных задач**, основными из которых являются:

1. Разработать модель широкополосного радиолокационного измерительного комплекса и проведения с её помощью анализа частных составляющих погрешности измерений локальных ЭПР.
2. Разработать метод градуировки радиолокационных изображений в единицах ЭПР.
3. Обосновать способы определения погрешности измерений эффективной площади рассеяния объектов на радиолокационных изображениях (РЛИ).
4. Обосновать требования к угловому шагу при измерении диаграмм обратного рассеяния и интерполяции массива исходных данных для синтеза РЛИ.
5. Разработать метод оценки неравномерности поля в рабочей зоне антенного полигона методом инверсного синтеза апертуры.
6. Разработать метод измерений интегральных радиолокационных характеристик малоотражающих объектов на основе пространственной трёхмерной фильтрации синтезированных РЛИ, обеспечивающего требуемую чувствительность и погрешность измерений.

Предпосылками решения указанных задач являются:

- линейная взаимосвязь между распределением поля в непосредственной близости объекта (РЛИ) и его диаграммой обратного рассеяния (ДОР);
- систематический характером доминирующих источников погрешностей измерений.

**Методы исследований.** В диссертационной работе применены теоретические и экспериментальные методы исследований. Теоретические исследования основаны на применении математического анализа, математической статистики, теории электромагнитного поля и цифровой обработки сигналов. Экспериментальные исследования проведены на комплексе вторичных эталонов единиц эффективной площади рассеяния, модуля коэффициента отражения в свободном пространстве и коэффициента усиления антенн, лабораторно-экспериментальной базе ФГУП «ВНИИФТРИ».

**Достоверность** полученных результатов основывается на корректном использовании широко апробированных методов спектрального анализа, а также подтверждается адекватностью используемых моделей и экспериментальными результатами с использованием высокоточной аппаратуры ФГУП «ВНИИФТРИ», поверенной и калиброванной с использованием государственных эталонов.

### **ПОЛОЖЕНИЯ, ВНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ:**

1) Метод измерений локальной ЭПР, на основе использования равенства Парсевалея обеспечивает однозначную взаимосвязь между локальными и интегральными радиолокационными характеристиками и позволяет проводить измерения локальной ЭПР с пределами  $\pm 0.6$  дБ.

2) Критерии выбора углового шага при измерении комплексной диаграммы обратного рассеяния, за счёт интерполяции позволяют обеспечить уменьшение продолжительности измерений локальных ЭПР в 4 раза.

3) Метод измерений неравномерности поля в рабочей зоне радиолокационного измерительного комплекса, на основе обратного синтеза апертуры, позволяет проводить оценку неравномерности амплитудного распределения с погрешностью  $\pm 0.5$  дБ, фазового распределения с погрешностью  $\pm 8$  градусов, в условиях испытательных полигонов.

4) Метод измерений интегральных радиолокационных характеристик объектов с малой ЭПР, позволяет за счёт пространственной фильтрации синтезированных РЛИ, обеспечить расширение динамического диапазона на 10...15 дБ.

**Научная новизна** полученных результатов заключается в следующем:

- 1) Впервые предложен метод градуировки радиолокационных изображений в единице ЭПР, позволяющий получать оценки ЭПР отдельных элементов объекта в заданных диапазонах углов и частот с нормированной погрешностью.
- 2) Впервые предложены и обоснованы критерии выбора углового шага при измерениях и интерполяции массивов исходных данных для синтеза РЛИ, которые в отличие от известных подходов позволяют снизить продолжительность измерений, а также исключить грубые ошибки измерений ЭПР локальных центров рассеяния.
- 3) Впервые предложен метод измерений неравномерности амплитудного и фазового распределений поля в рабочей зоне радиолокационного полигона, основанный на обратном синтезе апертуры, который отличающийся более простой технической реализацией, не требующий использования планарного сканера.
- 4) Впервые предложен способ обработки результатов измерений интегральных радиолокационных характеристик объектов с малой ЭПР на основе

пространственной фильтрации синтезированных РЛИ, позволяющий уменьшить погрешности и увеличить диапазон измерений, выполняемых в неидеальных условиях.

**Практическая значимость.** Реализован метод градуировки радиолокационных изображений в единице ЭПР, позволяющий с помощью широкополосных РИК получать оценки ЭПР отдельных элементов объекта с нормированной погрешностью. Разработан метод уменьшения погрешности РЛХ объектов с малой ЭПР на основе пространственной фильтрации синтезированных РЛИ.

Основные выводы и результаты работы **реализованы:**

при создании комплекса автоматизированного для высокоточных измерений радиотехнических характеристик антенных систем и характеристик рассеяния объектов в СВЧ диапазоне МГФК.411734.086 в рамках ОКР «Технология-РЛ»;

при разработке программно-аппаратного комплекса для измерений рассеивающих свойств объектов «Сигнатура–2М».

Часть результатов диссертационных исследований получена в ходе выполнения двух плановых НИР и двух ОКР, в которых принимал участие соискатель в качестве ответственного исполнителя.

**Публикации.** Диссертационные материалы отражены в 27 научных трудах, в том числе в 17 статьях, из них в 11 статьях в журналах, включённых в текущий перечень ВАК в том числе 3 в журналах, входящих в перечень RSCI ВАК, в 10 материалах докладов на Всероссийских и межведомственных научно-технических конференциях и 2-х отчётах о НИР.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на XXIX и XXX Всероссийском симпозиуме «Радиолокационное исследование природных сред», 2015 и 2017 гг., в работе «круглого стола» по теме «Актуальные аспекты создания техники со сниженной заметностью» состоявшегося в рамках Международного военно-технического форума «АРМИЯ-2015», в 2015 г., на 38, 39, 40, 41-ой научно-технических конференциях молодых учёных – метрологов ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России в 2013, 2014, 2015 и 2016 гг. Демонстрация работы программно-аппаратного комплекса для измерений рассеивающих свойств объектов «Сигнатура–2М» на Международном форуме «АРМИЯ-2018», «АРМИЯ-2022» и на 14 Московском международном инновационном форуме и выставке «Точные измерения – основа качества и безопасности».

**Объем работы.** Диссертация состоит из введения, 5 разделов, заключения, списка использованных источников и содержит 124 страницы основного текста, в том числе 85 рисунков и 2 таблицы. Список использованных источников содержит 29 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** рассмотрено состояние предмета исследований, обоснована актуальность работы, дана оценка новизны полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведена краткая аннотация содержания работы.

**В первом разделе** проведён анализ существующего уровня и направлений развития отечественных и иностранных РИК. Разработана математическая модель РИК и проведена экспериментальная оценка адекватности модели. При помощи разработанной модели проведён анализ уравнения измерений и основных источников погрешности синтезируемого РЛИ с помощью модели широкополосного РИК с инверсным синтезом апертуры.

Учитывая сложную функциональную связь между погрешностью измерений ДОР и погрешностью синтезируемого РЛИ, задача оценки влияния погрешностей измерений ДОР на погрешности измерений РЛИ и выявления основных влияющих факторов на погрешность измерений решалась с использованием численных методов, основанных на применении математического моделирования.

Блок-схема алгоритма математической модели РИК представлена на рисунке 1.

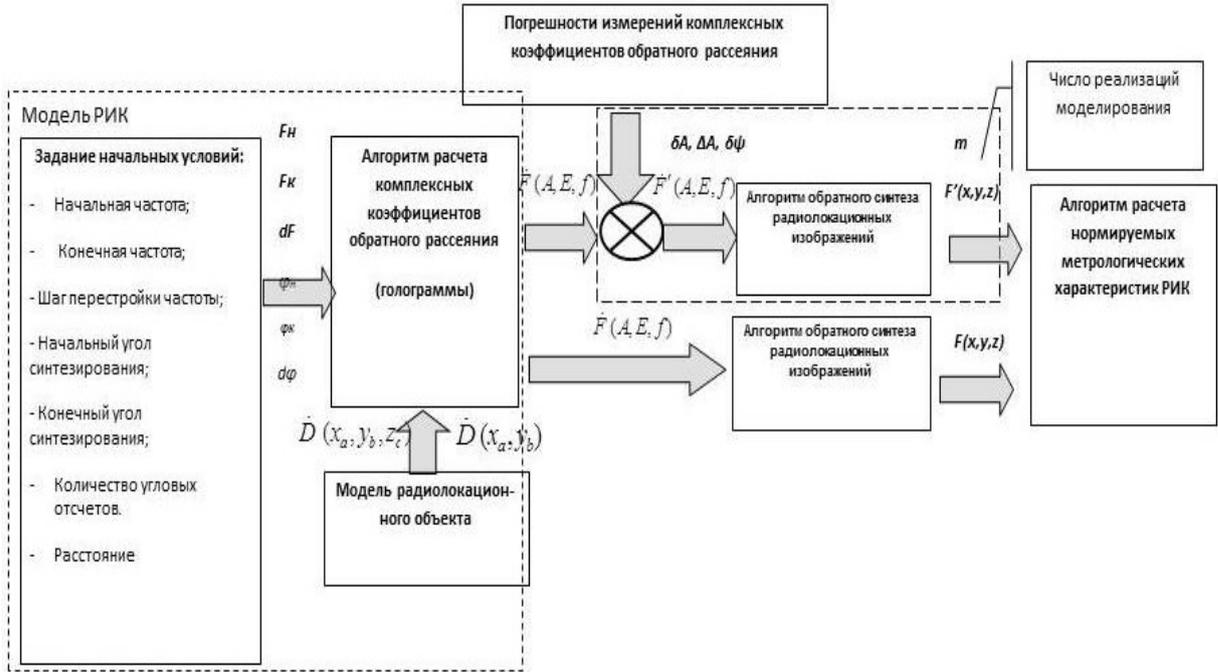


Рисунок 1 - Блок-схема модели для расчетно-экспериментальной оценки метрологических характеристик РИК

Модель радиолокационного объекта в общем случае представляет собой матрицу  $\dot{D}(x_a, y_b, z_c)$  размерностью  $A \times B \times C$ , заполненную значениями коэффициента отражения в рассматриваемой точке объёма со значениями в диапазоне от 0 до 1. Тогда комплексная многочастотная диаграмма обратного рассеяния (КМДОР) в приближении геометрической оптики и без учёта затенения описывается уравнением:

$$\dot{F}(\theta, \vartheta, f) = \sum_x \sum_y \sum_z \frac{1}{r(x, y, z, \theta, \vartheta)} \dot{D}(x, y, z) e^{-j2kr(x, y, z, \theta, \vartheta)} \quad (1)$$

где  $r(x, y, z, \theta, \vartheta) = \sqrt{(x - R \cos(\vartheta) \cos(\theta))^2 + (y - R \cos(\vartheta) \sin(\theta))^2 + (z - R \sin(\vartheta))^2}$ ;

$k = 2\pi f / c$  - волновое число,  $m^{-1}$ ;

$\theta$  - азимут, рад.;

$\vartheta$  - элевация, рад.;

$f$  - частота, Гц;

$c$  - скорость света в вакууме, м/с;

$x, y, z$  - координаты в декартовой системе, м.

Разработанная модель РИК описывает, сложение сигналов от элементов объекта в процессе его вращения в соответствии с принципом Гюйгенса-Френеля. Модель синтезирует РЛИ с заданными значениями случайных погрешностей регистрации амплитуд и фаз. Систематические погрешности моделируются источниками побочных переотражений с заданными интенсивностью и координатами, а также расстоянием до наблюдателя, обуславливающим сферичность фронта ЭМП. В итоге, измеряемая КМДОР описывается уравнением:

$$\dot{F}_{iz}(\theta, \vartheta, f) = \Delta A(\theta, \vartheta, f) \dot{F}(\theta, \vartheta, f) \frac{randn(\delta A, A)}{A} e^{-j \cdot randn(\delta \varphi, \varphi)}, \quad (2)$$

где  $\Delta A(f)$  - систематическая погрешность измерения модуля коэффициентов отражения, связанная с несоблюдением условий свободного пространства;

$\delta A$  – среднее квадратическое отклонение случайной составляющей погрешности измерений модулей коэффициентов обратного рассеяния;

$\delta \varphi$  – среднее квадратическое отклонение случайной составляющей погрешности измерений аргументов коэффициентов обратного рассеяния;

Обработка входного массива данных производится по алгоритму инверсного синтеза РЛИ, представленному на рисунке 2.

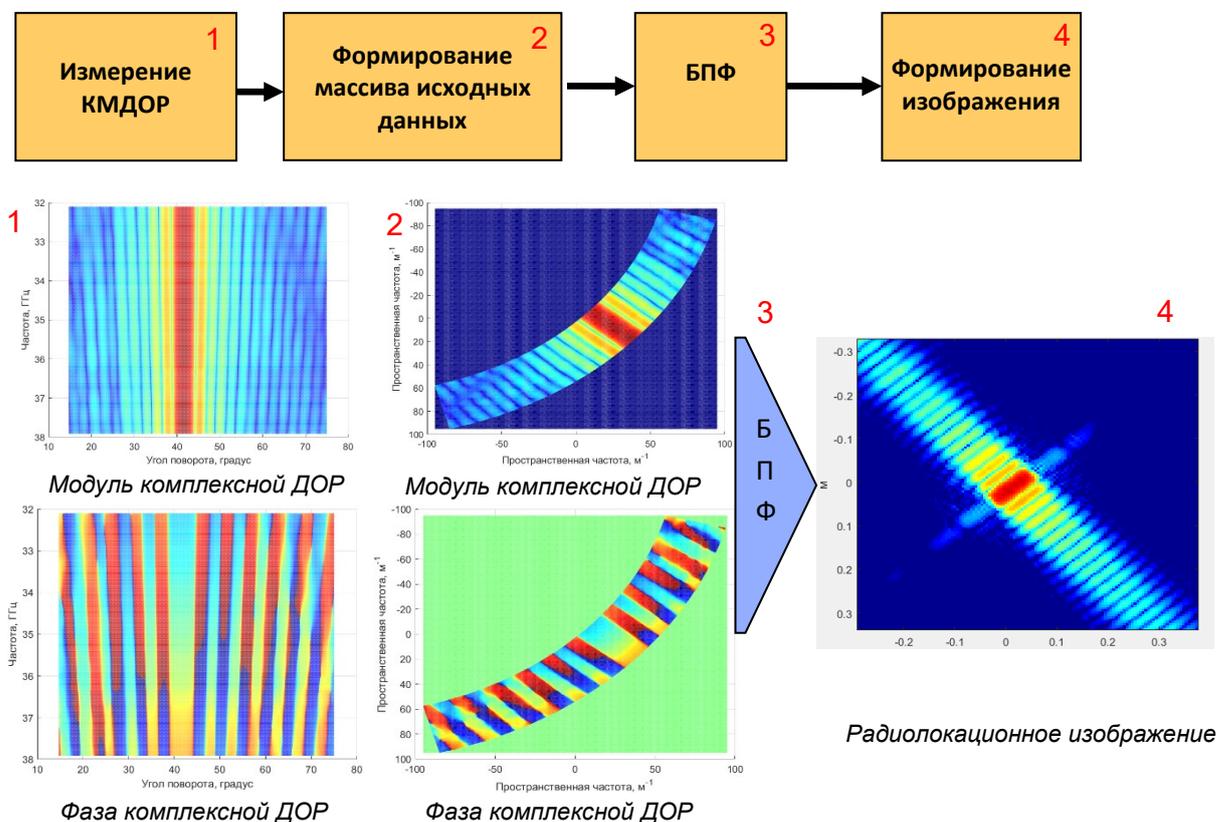


Рисунок 2 – Иллюстрация преобразования исходных данных при формировании РЛИ обратным синтезом апертуры

С помощью предложенной модели было исследовано влияние основных источников погрешности измерений локальных и интегральных радиолокационных характеристик. Результаты анализа обобщены в таблице 1.

Таблица 1 – Анализ влияния основных источников погрешности измерений

№	Характеристика влияющего фактора	Возможные пути уменьшения влияния
1	<p><b>Математическая обработка</b></p> <p><b>А) В части измерений ДОР</b></p> <p>Основным источником погрешности при цифровой обработке является эффект Гиббса, возникающий в результате временного стробирования сигналов при реализации дискретного частотного синтеза, и проявляется в искажении ДОР на краях частотного диапазона.</p>	<p><b>А) В части измерений ДОР</b></p> <p>Для уменьшения влияния эффекта Гиббса применяются аподизация измеренного массива и обеспечивается избыточность измеряемых данных на краях частотного диапазонов.</p>

№	Характеристика влияющего фактора	Возможные пути уменьшения влияния
	<p><b>Б) В части измерений РЛИ</b>  Особенности применяемых алгоритмов синтезирования РЛИ (способ градуировки и погрешность используемых эталонов, ограничения по частоте и угловому сектору синтезирования, влияние боковых лепестков близлежащих «блестящих точек» и др.) могут обуславливать значительные погрешности при измерениях локальной ЭПР на РЛИ.  Некорректно выбранные настройки угловой сетки при выполнении измерений могут привести грубым ошибкам измерений локальной ЭПР при синтезировании РЛИ.</p>	<p><b>Б) В части измерений РЛИ</b>  Исключение возможных грубых ошибок измерений локальной ЭПР при синтезировании РЛИ может быть достигнута привязкой к эталону единицы ЭПР, тем самым обеспечив единство измерений путём экспериментальной оценки погрешности измерений локальной ЭПР. Это требует разработки методов градуирования РЛИ в единицах ЭПР и определения погрешности измерений «локальной» ЭПР на РЛИ.  Исключение методической погрешности из-за некорректного выбора шага угловой сетки для синтезирования РЛИ требует обоснования критериев её выбора, а практическая необходимость уменьшения продолжительности испытаний – разработки методов обработки, обеспечивающих увеличение углового шага без значимого ухудшения точности измерений.</p>
2	<p><b>Несоблюдение условия свободного пространства,</b> проявляющееся в присутствии фоновых и побочных переотражений определяет нижнюю границу диапазона измерений ЭПР и оказывает доминирующее влияние на погрешность измерений</p>	<p>Величина погрешности определяется временной стабильностью измерительного канала РИК и характеристиками измерительной. Уменьшение данной погрешности техническими способами является сложным дорогостоящим.  Наряду с временным стробированием регистрируемых сигналов и вычитанием фоновой составляющей необходимо применение математических алгоритмов фильтрации с высокой пространственной избирательностью.</p>
3	<p><b>Сферичность фазового фронта ЭМП</b>  ввиду конечного расстояния между наблюдателем и исследуемым объектом, а также искажения из-за особенностей используемых полеобразующих систем значительно влияют на погрешность измерений «локальной» ЭПР, даже при обеспечении минимального расстояния</p>	<p>Обеспечить контроль АФР ЭМП в рабочей зоне РИК, неравномерность фазы в пределах рабочей зоны РИК не должна превышать значения <math>\pi/8</math>. Разработать алгоритмы пересчёта результатов измерений в «промежуточной» зоне в «дальнюю» зону.</p>

№	Характеристика влияющего фактора	Возможные пути уменьшения влияния
	«дальней зоны» погрешность измерений ЭПР локального центра может достигать 0,6 дБ.	Уменьшение сферичности ЭМП путём увеличения протяжённости измерительной трассы нежелательно ввиду уменьшения энергопотенциала, увеличения фоновых и побочных переотражений.
4	<p><b>Случайные составляющие погрешности измерений модуля КМДОР</b></p> <p><b>А) В части измерений ДОР</b>  Величина погрешности определяется энергетическим потенциалом измерительного канала РИК. При испытаниях объектов со значениями ЭПР менее <math>10^{-2}</math> м<sup>2</sup> требуется увеличение отношения сигнал/шум не менее 10 дБ (частная составляющая погрешности при этом достигает 2,3 дБ)</p> <p><b>Б) В части измерений РЛИ</b>  Случайные составляющие погрешности измерений КМДОР оказывают слабое влияние на погрешность измерений ЭПР локальных центров. Например, при соотношении сигнал/шум в КМДОР 3 дБ погрешность измерений ЭПР локального центра не превышает 0,1 дБ</p>	<p><b>А) В части измерений ДОР</b>  Возможное увеличение энергетического потенциала за счёт уменьшения расстояния до объекта нежелательно из-за увеличения неравномерности фазы в рабочей зоне РИК.</p> <p><b>Б) В части измерений РЛИ</b>  Принятие мер не требуется. Поскольку синтез РЛИ обеспечивает увеличение отношения сигнал/шум для локальной области РЛИ пространства за счёт согласованной пространственной фильтрации, данная процедура может быть использована для восстановления ДОР</p>

Анализируемые источники погрешности РИК свойственны для большинства типов комплексов, но могут иметь разный вклад в суммарную погрешность измерений. Например, для РИК коллиматорного типа не свойственна сферичность фазового фронта и связанная с ней погрешность, но при этом имеется дополнительный источник погрешности из-за дифракции на краях используемого рефлектора, и связанных с этим побочных переотражений. Обобщённые оценки, приведённые на рис. 3 показывают, что использование новых методов обработки результатов измерений позволит снизить погрешность измерений локальной ЭПР с имеющихся 2..5 дБ до требуемых 1...3 дБ.

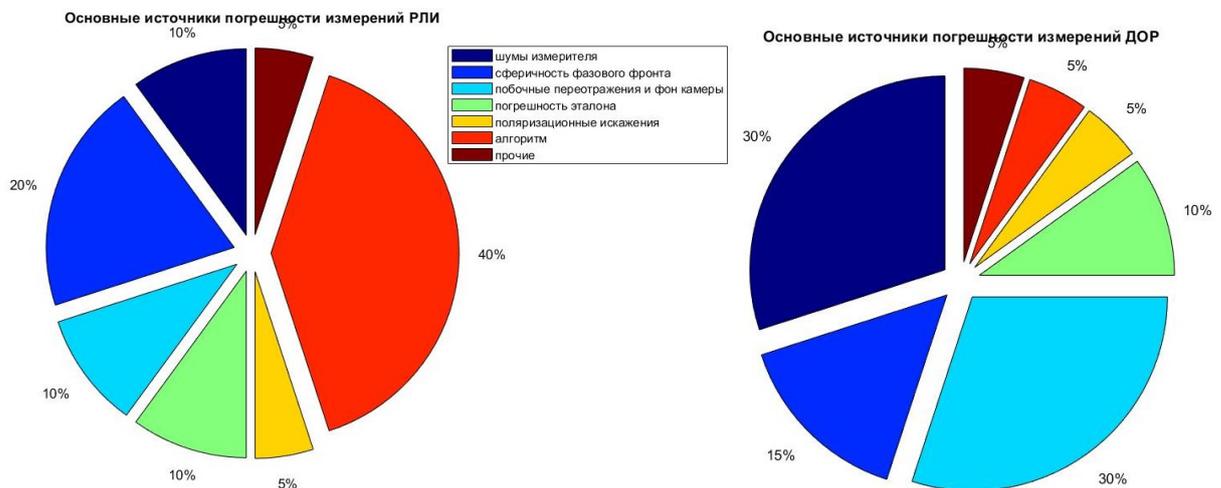


Рисунок 3 – Оценка вкладов отдельных составляющих в суммарную погрешность

Таким образом, с использованием разработанной математической модели широкополосного РИК с функцией инверсного синтеза апертуры обоснована необходимость совершенствования методического аппарата в области измерений «локальных» РЛХ для обеспечения единства и повышения точности измерений до требуемых значений.

**Второй раздел** посвящен разработке метода градуирования радиолокационных изображений в единице ЭПР и способов оценки погрешности РЛИ. До настоящего времени на практике проводился лишь качественный анализ информации, содержащейся в РЛИ, в то время как оно содержит и количественную информацию о рассеивающих свойствах объекта.

Формирование РЛИ в общем случае сводится к переходу от двумерной матрицы амплитуд с измерениями «частота - угол» к аналогичной матрице «длина - угол» или «длина - длина». Для установления связи между ЭПР элемента разрешения РЛИ и ЭПР локального центра предложено использовать методы спектрального анализа временных процессов, наиболее близкие по смыслу к решаемой задаче. Например, гармонический сигнал с частотой 10 Гц в дискретном виде можно представить как в частотной  $x(n)$ , так и во временной  $X(m)$  областях (рис. 4), которые однозначно связаны между собой прямым и обратным преобразованием Фурье (3), (4).

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} X(m) e^{-\frac{2\pi i}{N} mn}, \quad (3)$$

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{\frac{2\pi i}{N} mn}, \quad (4)$$

где  $N$  - общее количество отсчетов;

$n$  и  $m$  - номера отсчетов в частотной и временной областях, соответственно.

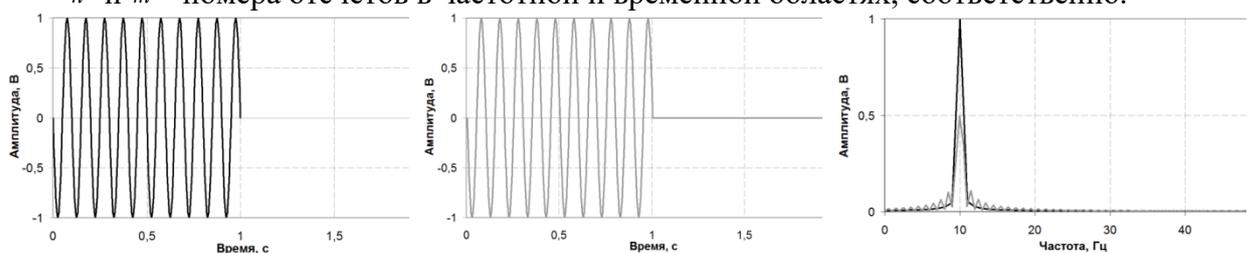


Рисунок 4 - Временное (левый и средний рисунки) и частотное (нижний рисунок) представления гармонического сигнала без добавления (черным) и с добавлением нулевых отсчетов (серым)

Как по временному, так и по частотному представлениям гармонического сигнала можно однозначно определить и амплитуду, и частоту сигнала. Для преобразований (3) и (4) справедлива теорема Парсеваля (5), смысл которой заключается в равенстве энергий во временной и частотной областях представления.

$$\sum_{n=0}^{N-1} |x(n)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} |X(m)|^2. \quad (5)$$

При преобразовании исходного (временного) массива путем добавления нулевых элементов для реализации быстрого преобразования Фурье (БПФ) амплитуда сигнала в частотной области не соответствует амплитуде сигнала во временной области (рис. 3), но равенство Парсеваля выполняется. Поэтому при масштабировании преобразованной зависимости следует учитывать количество действительных отсчетов  $N^H$ , присутствующих во входном массиве в соответствии с выражением (6).

$$x(n) = \frac{1}{N^H} \sum_{m=0}^{N-1} X(m) e^{-\frac{2\pi i}{N} mn}. \quad (6)$$

Равенство (5) с учётом (6) преобразуется к виду:

$$\frac{N^H}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |x(n)|^2 = \frac{1}{N^H} \sum_{m=0}^{N-1} |X(m)|^2. \quad (7)$$

Математические операции, используемые для формирования РЛИ, в том или ином виде основаны на преобразовании Фурье, поэтому полученные выводы для них полностью справедливы. Продолжая аналогии со спектральным анализом можно утверждать, что амплитуда сигнала во временной области эквивалентна амплитуде сигнала, отражённого от исследуемого объекта, то есть, непосредственно определяет его интегральную ЭПР. Следовательно, после преобразования КМДОР в РЛИ суммарная мощность всех дискретных элементов в нем должна также быть равной сумме значений ЭПР по углам и частотам.

Выражение для расчета РЛИ, нормированного в единице ЭПР, можно записать, воспользовавшись двумерным случаем для (6) с учетом (7) в виде (8). Здесь и далее для удобства будут приведены соотношения для синтеза и анализа двумерных РЛИ.

$$x(n_1, n_2) = \frac{1}{N_1^H N_2^H} \sum_{m_1=0}^{N_1-1} \sum_{m_2=0}^{N_2-1} X(m_1, m_2) e^{-\frac{2\pi i}{N_1} m_1 n_1} e^{-\frac{2\pi i}{N_2} m_2 n_2}, \quad (8)$$

где  $X(\cdot) = \sqrt{\sigma(\cdot)} e^{i\varphi(\cdot)}$ , м;

$\varphi(\cdot)$  – фаза КМДОР, рад.

Массив значений РЛИ  $X(m_1, m_2)$  измеряется лишь при самой тривиальной математической обработке, во всех остальных случаях он формируется преобразованием исходного массива КМДОР  $S(\theta, f)$  путём перестановок элементов матрицы  $S$  с размерностью  $[M_1 \times M_2]$  (рис. 5) в специально подготовленную матрицу  $X$  размерности  $[N_1 \times N_2]$  (рис. 6) для которых  $M_1 M_2 \neq N_1 N_2$ . Данная процедура требуется для учёта траектории движения измеряемого объекта, из-за влияния которой синтезируемое изображение может быть размытым. Особенность данного алгоритма заключается в том, что сразу несколько элементов матрицы  $S$  могут претендовать на одно место в матрице  $X$ , но занимает его лишь один, в то время как остальные отбрасываются. Одновременно с этим в матрице  $X$  остаются незаполненные элементы, которым присваиваются нулевые значения.

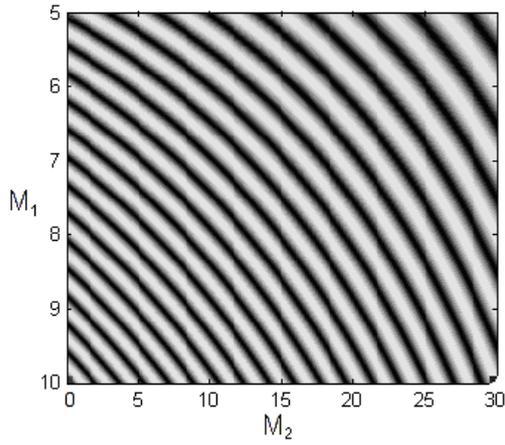


Рисунок 5 - Модуль исходной КМДОР (массив  $S [M_1 \times M_2]$ , где  $M_1$  – строки частот, ГГц,  $M_2$  – столбцы углов, градус)

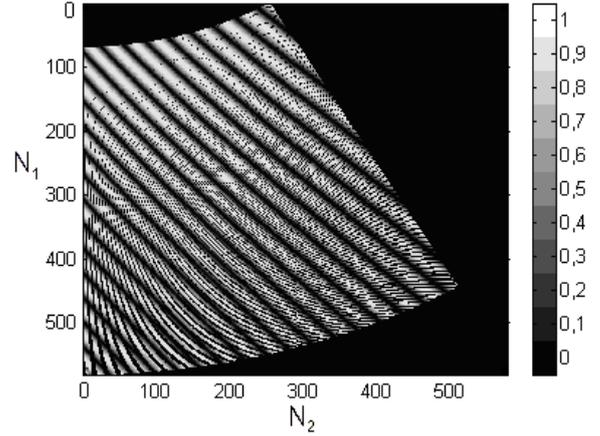


Рисунок 6 - Модуль преобразованной КМДОР (массив  $X [N_1 \times N_2]$ , где  $N_1, N_2$  – строки и столбцы отсчётов продольной и поперечной координат, соответственно)

Если принять, что количество ненулевых (заполненных элементами матрицы  $S$ ) элементов в массиве равно  $K \leq N_1 N_2$ , то (8) преобразуется к виду:

$$x'(n_1, n_2) = \frac{1}{K} \sum_{m_1=0}^{N_1-1} \sum_{m_2=0}^{N_2-1} X(m_1, m_2) e^{-\frac{2\pi i}{N_1} m_1 n_1} e^{-\frac{2\pi i}{N_2} m_2 n_2}. \quad (9)$$

Соотношение (9) может быть использовано для градуирования РЛИ в единицах ЭПР и обеспечивает однозначную взаимосвязь между локальными и интегральными характеристиками рассеяния объектов.

Решение задачи метрологического обеспечения измерений «локальной» ЭПР на РЛИ предполагает оценку погрешности измерений. Для этого ввиду отсутствия специальных мер «локальной» ЭПР необходимо разработать способ определения погрешности измерений «локальной» ЭПР на РЛИ с использованием радиолокационных отражателей простой формы.

Погрешность  $\Delta_\Sigma$  измерений суммарной ЭПР РЛИ, обусловленную математической обработкой КМДОР при его формировании, можно оценить, используя (7), с учетом (9):

$$\Delta_\Sigma = \frac{1}{M_1 M_2} \sum_{m_1=0}^{M_1-1} \sum_{m_2=0}^{M_2-1} |s(m_1, m_2)|^2 - \frac{K}{N_1 N_2} \sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} |x(n_1, n_2)|^2. \quad (10)$$

Градуирование РЛИ предоставляет возможность оценки ЭПР локального центра рассеяния путём интегрирования участка РЛИ на котором он расположен. При выполнении такой операции неизбежны погрешности, обусловленные наличием фона и вторичных переотражений, влиянием собственных боковых лепестков и боковых лепестков изображений соседних элементов, побочных переотражений, инструментальных погрешностей. Количественное значение данной погрешности  $\Delta_L$  возможно оценить экспериментальными методами путем построения РЛИ меры ЭПР с известными рассеивающими свойствами. В этом случае абсолютная погрешность ЭПР локального центра рассеяния в пределах кадра с координатами  $[x_1, y_1; x_2, y_2]$  будет оцениваться исходя из соотношения:

$$\Delta_L = \bar{\sigma}_{ЭПР} - \alpha \sum_{n_1=x_1}^{x_2} \sum_{n_2=y_1}^{y_2} |x(n_1, n_2)|^2, \quad (11)$$

где  $\bar{\sigma}_{ЭПР}$  - ЭПР меры, усредненная по углу и частоте, м<sup>2</sup>;

$\alpha$  - масштабирующий коэффициент, зависящий от особенностей алгоритма формирования РЛИ.

Экспериментальная апробация предложенного метода проведена на радиолокационном объекте из двух сфер диаметрами 120 мм и 16 мм со значениями ЭПР (усредненными по углу и частоте)  $1,13 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$  и  $3,63 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ , соответственно (рис. 6). Синтез РЛИ осуществлялся в круговом секторе, в частотном диапазоне 5...15 ГГц. Погрешность рассчитывалась по формуле (11) для каждой из сфер и составила для большей сферы 0,6 дБ, для меньшей – 1,9 дБ.

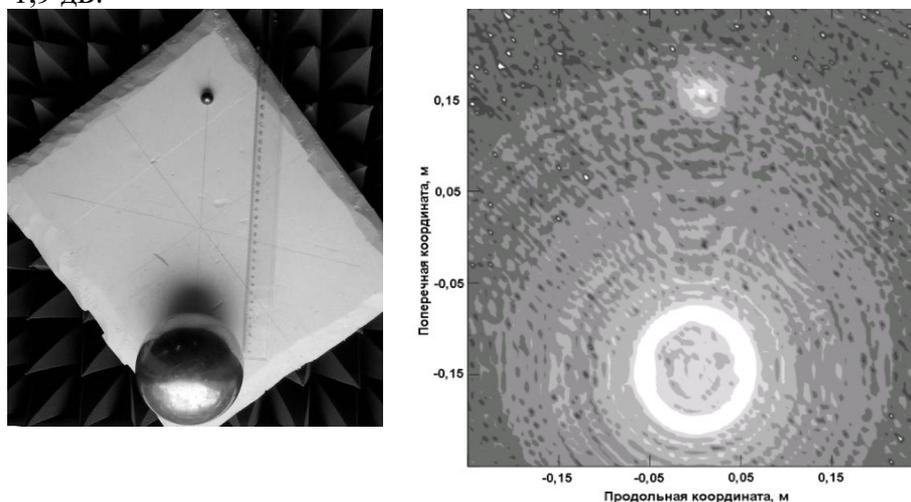


Рисунок 6 – Радиолокационный объект и его РЛИ составного

В качестве тестовых объектов для оценки погрешности измерений ЭПР локальных центров рассеяния возможно использование любых тел для которых хорошо известна угловая и частотная зависимость ЭПР. Наиболее удобным для оценки характеристик РИК в целом представляется использование, в первую очередь, металлических сфер, во вторую – цилиндров при расположении их образующей параллельно оси вращения. Предложенный способ представляется наиболее информативным для оценки метрологических характеристик высокоинформативных РИК в части измерений ЭПР локальных центров рассеяния объектов.

Таким образом, обоснован способ градуирования радиолокационных изображений в единицах эффективной площади рассеяния, основанный на использовании равенства Парсевалья. Предложены методы оценки погрешности измерений ЭПР локальных центров рассеяния. Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о возможности применения разработанных методов.

**В третьем разделе** представлено обоснование метода интерполяции массива исходных данных для синтеза РЛИ. Обоснование метода проведено для обобщенного случая трехмерного наблюдения объекта, а его экспериментальная апробация выполнена для случая позиционирования радиолокационного объекта в координатах азимут-крен.

Одним из важных условий обеспечения заданных значений погрешности измерений локальной ЭПР является корректный выбор шага по углу при вращении измеряемого объекта. Используемые критерии выбора максимального шага по углу при измерениях ДОР не учитывают применяемые при обработке координатные преобразования. В то же время, уменьшение углового шага при измерениях ведёт к пропорциональному для каждой угловой оси увеличению продолжительности времени измерений, что в свою очередь может приводить к неприемлемым значениям погрешности измерений за счёт временной нестабильности измерительной системы. Таким образом, уменьшение углового шага одновременно с уменьшением соответствующей методической погрешности может обуславливать уменьшение динамического диапазона измерений и увеличение случайной составляющей погрешности, имеющей инструментальный характер.

Большинство современных РИК обеспечивает возможность получения двумерных (2М) РЛИ, некоторые комплексы позволяют измерить и трехмерные (3М) изображения, обеспечивающие большую информативность. Принципиальных отличий в способах формирования двумерных 2М и 3М РЛИ нет. В обоих случаях требуется использование сигналов, обеспечивающих разрешение по дальности, а также изменение ориентации исследуемого объекта относительно наблюдателя. Если для получения 2М РЛИ в подавляющем большинстве случаев используется вращение объекта по азимуту, то для 3М РЛИ дополнительно требуется изменение элевации или крена.

Критерии выбора шага перестройки по частоте диктуются необходимостью обеспечения однозначного распределения сигналов на синтезируемой временной шкале и подробно рассмотрены в работах, посвящённых спектральному анализу. Необходимость уменьшения углового шага физически обуславливается необходимостью приёма сигналов, рассеиваемых всеми рассматриваемыми локальными рассеивателями по отдельности и их комбинациями без неоднозначных фазовых соотношений. Это означает, что должно быть измерено достаточное количество угловых отсчётов на наибольших по амплитуде лепестках КМДОР без перескока фазы через  $2\pi$ . Для оценки достаточного углового шага можно, представив лепесток ДОР периодом гармонического колебания, воспользоваться теоремой Котельникова. При такой логике на лепесток ДОР должно приходиться не менее двух отсчётов, а эмпирическое выражение для определения минимального углового шага для электрически протяжённых можно записать в виде:

– для системы – координат «азимут – крен»

$$\Delta\theta, \Delta\varphi \leq \frac{\lambda_{\min}}{2l}; \quad (12)$$

– для системы координат «азимут – элевация»

$$\Delta\theta \leq \frac{\lambda_{\min}}{2l_x}; \Delta\vartheta \leq \frac{\lambda_{\min}}{2l_y}, \quad (13)$$

$\Delta\theta, \Delta\varphi, \Delta\vartheta$  – минимальный шаг по азимуту, крену и элевации, соответственно, рад.;

$l$  – максимальная длина объекта, м;

$l_x, l_y$  – максимальные длины объекта по горизонтали и вертикали, соответственно,

м.

Экспериментальная проверка, проведённая на трёхгранном отражателе в системе координат «азимут - крен», подтвердила правильность сформулированных критериев. Отражатель с взаимно перпендикулярными квадратными гранями ориентировался общей вершиной в направлении излучателя (рис. 7). КМДОР была измерена в секторе углов  $\pm 70^\circ$  по азимуту и крену в полосе частот от 12 до 18 ГГц. Размер рёбер уголкового отражателя равен 0,15 м, а минимальный угловой шаг в соответствии с (12) составляет  $2,25^\circ$ .

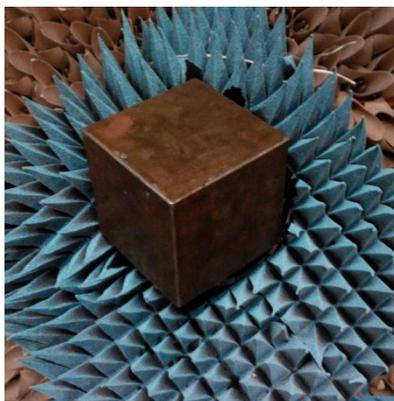


Рисунок 7 – Внешний вид отражателя, установленного на поворотное устройство

Результаты измерений с разным шагом по углу и вычислений, выполненных на их основе, приведены на рис. 8 и 9.

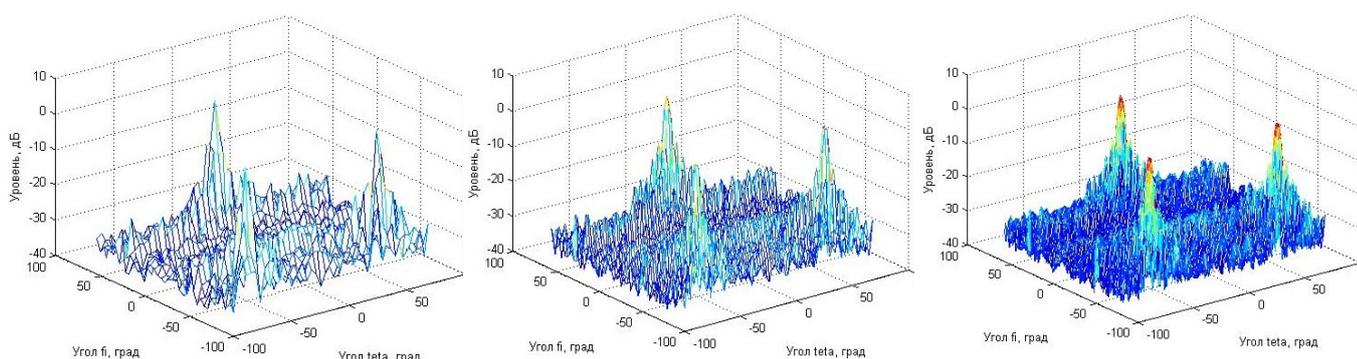


Рисунок 8 – Модуль КМДОР на центральной частоте с шагом 4° (слева), 2° (в центре) и 1° (справа)

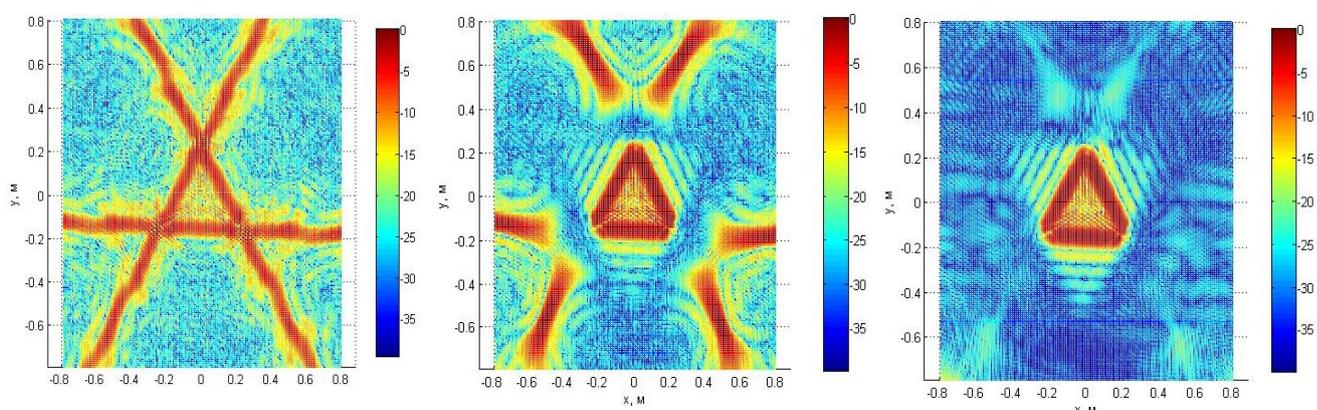


Рисунок 9 – Сечения РЛИ плоскостью Z=0, синтезированные из КМДОР с шагом 4° (слева), 2° (в центре) и 1° (справа)

Приведённые результаты подтверждают правильность выбора минимального углового шага при синтезировании апертуры с учётом электрического размера исследуемого объекта в соответствии с (12) и (13). «Критерий 1», выраженный формулами (12) и (13), совпадает с требованием обеспечения отсутствия перескоков фазы через  $2\pi$  от источников отражений максимально удалённых от оси вращения. Но, поскольку размеры синтезируемой области, очевидно, больше габаритов исследуемого объекта, при синтезировании РЛИ с использованием алгоритма БПФ могут возникать ложные отклики (рис. 10, в центре). Их появление связано с неучётом в «критерии 1» габаритов области синтезирования. На ложные отклики перераспределяется часть энергии, что приводит к погрешности оценки локальной ЭПР, а их наличие само по себе затрудняет анализ РЛИ. Исключение ложных откликов может быть обеспечено путём использования «критерия 2», отличающегося от «критерия 1» заменой в (12) и (13) длин объекта  $l$ ,  $l_x$ ,  $l_y$  на соответствующие длины синтезируемых областей  $L$ ,  $L_x$ ,  $L_y$ .

Уменьшение углового шага при измерениях КМДОР для удовлетворения «критерия 2» ведёт к обратно пропорциональному увеличению объёма измерений для каждой оси вращения, не принося при этом новой информации об объекте измерений. Поэтому, для уменьшения объёма, следовательно, продолжительности измерений предложено использование интерполяции массивов исходных данных, удовлетворяющих «критерию 1», на пространственную сетку в соответствии с «критерием 2».

В результате преобразования трехмерного массива КМДОР из координат «частота – угол – угол» в трехмерный массив пространственных частот плотность действительных отсчетов перестает быть равномерной, что также обуславливает появление на изображении ложных откликов. Данный фактор также требует учёта при выборе шага интерполированного массива, учитывающего степень разреженности формируемой матрицы в координатах пространственных частот. Наблюдаемые ложные отклики при этом не исчезают, но отдаляются от центра фокусировки РЛИ, выходя за область в которой проводится анализ изображения объекта. Коэффициент, учитывающий степень разреженности при измерениях в системе координат «азимут – крен», может быть определен как:

$$K = N_{II} / N_{II}, \quad (14)$$

где  $N_{II}$  – число ненулевых элементов в перестроенной матрице;

$N_{II}$  – число элементов в исходной матрице КМДОР.

Уточнённое значение минимального углового шага с учётом (14) для измерений в системе координат «азимут – крен» можно выразить как:

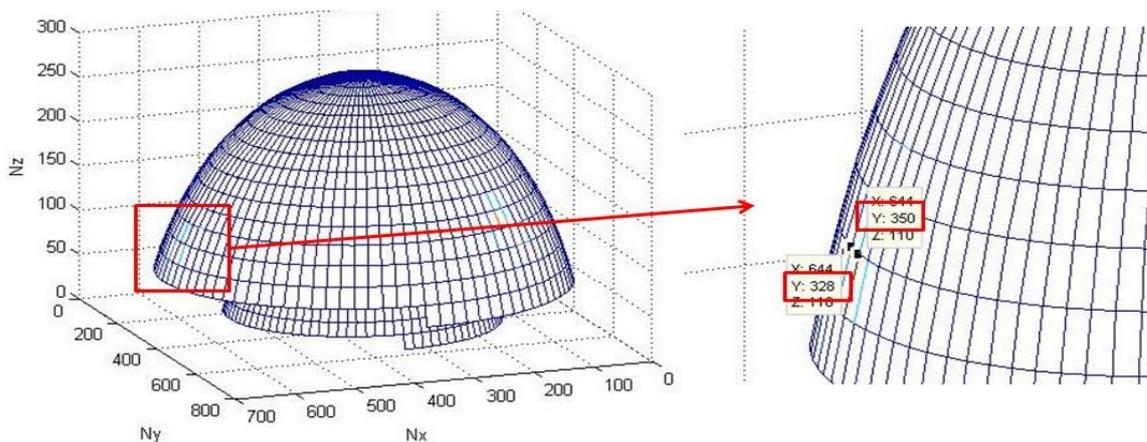
– при измерениях без интерполяции

$$\Delta\theta', \Delta\phi' \leq \frac{\lambda_{\min}}{2L} \leq \frac{\lambda_{\min} \sqrt{K}}{2l}; \quad (15)$$

– при измерениях с интерполяцией

$$\Delta\theta', \Delta\phi' \leq \frac{\lambda_{\min}}{4l}. \quad (16)$$

Следовательно, учёт разреженности требует увеличения объёма измерений в  $K$  раз при измерениях в системе координат «азимут – крен». При перестроении исходного массива КМДОР теряются лишь отсчёты, расположенные в уплотнённой области пространственного массива и являющиеся избыточными. Следовательно, повышение качества изображения также может быть достигнуто за счёт интерполяции перестроенной матрицы пространственных частот для каждой частоты зондирующего сигнала на сетку с меньшим размером ячейки пространственной частоты (рис. 10).



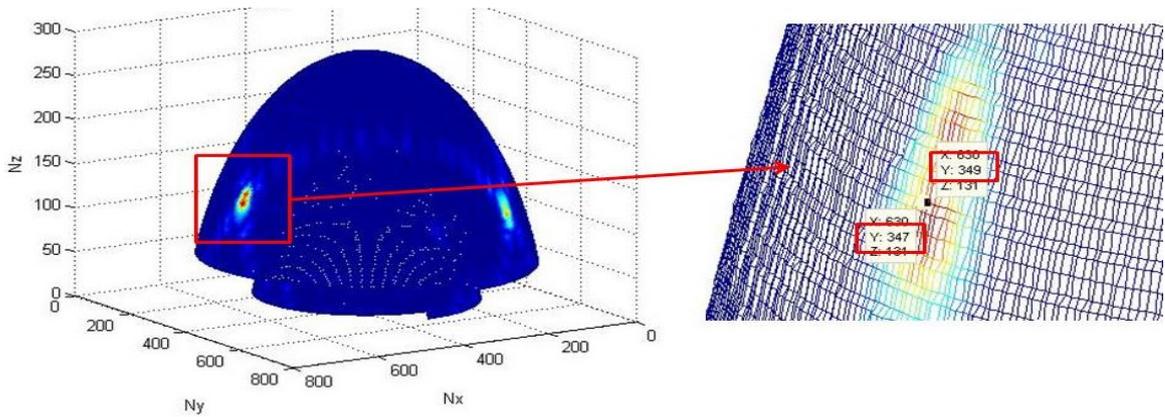


Рисунок 10 – Заполнение матрицы исходной ДОР с шагом  $4^\circ$  (вверху) и ДОР с интерполяцией с шагом  $0,5^\circ$  (внизу)

Таким образом, для уменьшения влияния разреженности отсчётов измеренный двумерный массив комплексной ДОР (после комплексного вычитания фонового сигнала и фильтрации помеховых сигналов во временной области) на каждой частоте интерполируется на более частую сетку угловых координат. Результаты применения интерполяции для измерений, удовлетворяющих условию (12), но не удовлетворяющих (16) приведены на рисунках (11-12).

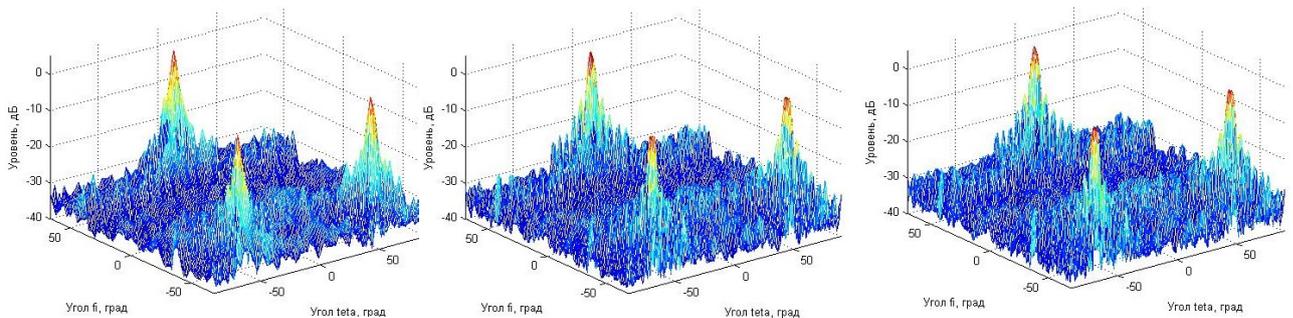


Рисунок 11 – Модуль КМДОР на центральной частоте с исходным шагом  $4^\circ$  после интерполяции до  $1^\circ$  (слева), с исходным шагом  $2^\circ$  после интерполяции до  $1^\circ$  (в центре) и шагом  $1^\circ$  без интерполяции (справа)

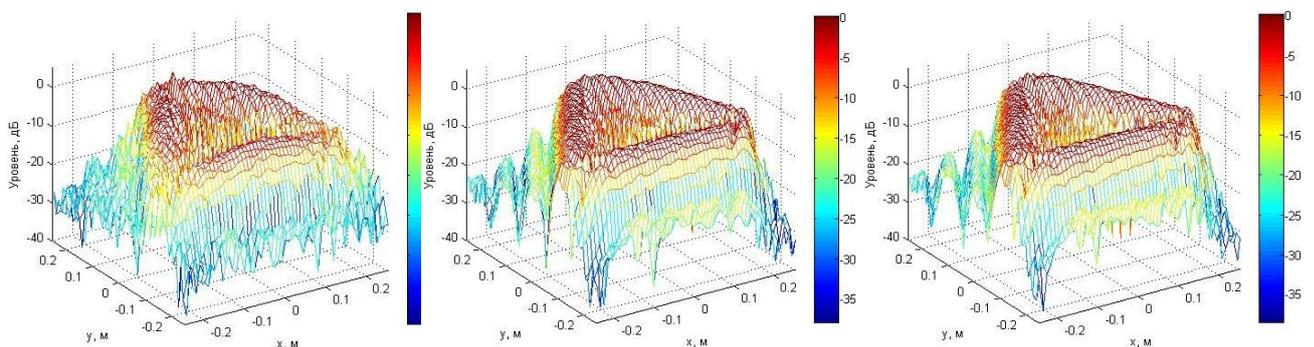


Рисунок 12 – Фрагменты сечений РЛИ плоскостью  $Z=0$ , синтезированные из КМДОР с исходным шагом  $4^\circ$  после интерполяции до  $1^\circ$  (слева), с исходным шагом  $2^\circ$  после интерполяции до  $1^\circ$  (в центре) и шагом  $1^\circ$  без интерполяции (справа)

Результаты, приведенные на рис. 13 и 14, подтверждают эффективность применения описанной процедуры интерполяции отсчётов для удаления ложных сигналов, выполненной с применением кубических сплайнов. Детальный анализ представленных результатов показывает, что результаты измерений с разреженной сеткой, не

удовлетворяющей «критерию 1», характеризуются искажениями формы РЛИ. Изображения, полученные из набора исходных данных, удовлетворяющего «критерию 1», интерполированное с учётом «критерия 2», обеспечивают синтезирование РЛИ объекта с отсутствием ложных откликов в зоне анализа.

На рис. 13 представлено сравнение оценок ЭПР локального центра рассеяния в зависимости от углового шага измерений КМДОР при синтезе РЛИ без интерполяции и с применением интерполяции КМДОР на угловую сетку, удовлетворяющую условию (16). В качестве объекта измерений был использован металлический диск с диаметром 0,1 м, а размеры синтезируемой области пространства составляли 1,5 м. Частотный диапазон от 12 до 18 ГГц, 3001 частотная точка.

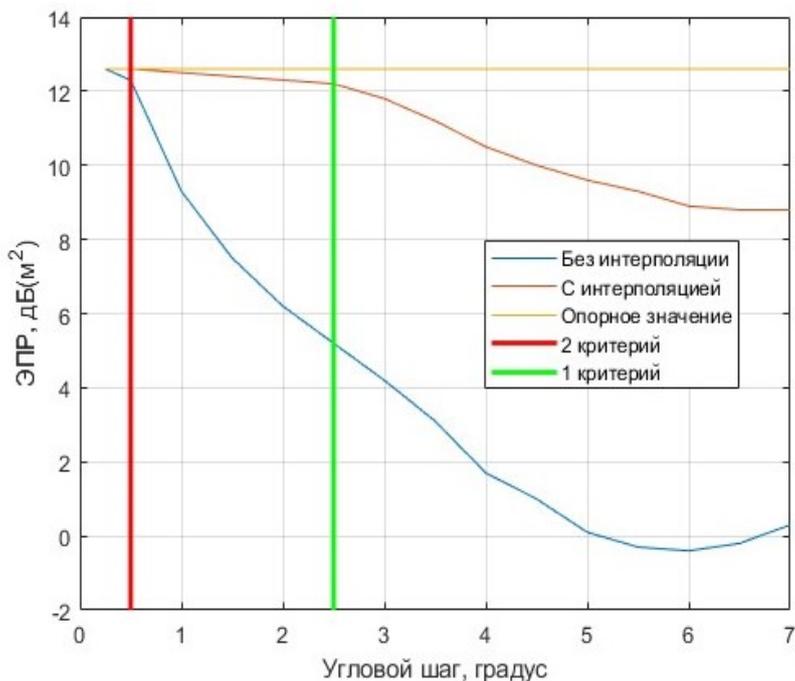


Рисунок 13 – Сравнение оценок ЭПР локального центра рассеяния в зависимости от углового шага без интерполяции и с применением интерполяции

Таким образом, обоснованные критерии выбора углового шага измерений КМДОР для синтеза РЛИ обеспечивают необходимые условия для исключения методической погрешности измерений «локальной» ЭПР, обусловленной разреженностью отсчетов исходных данных, а предложенный алгоритм интерполяции массива исходных данных для синтеза РЛИ, позволяет уменьшить объем и продолжительность измерений от 2 до 4 раз для угловой оси (степени свободы).

**Четвертый раздел** посвящён разработке методики измерений неравномерности амплитудного и фазового распределения поля в рабочей зоне антенного полигона методом инверсного синтеза апертуры.

При измерениях РЛХ объектов одним из доминирующих источников погрешности является неравномерность амплитудно-фазового распределения (АФР) электромагнитного поля (ЭМП) в рабочей зоне, которая обусловлена влиянием направленности излучателя из-за ограниченного расстояния до объекта и наличием побочных переотражений ЭМП. Информация об АФР позволяет оценить погрешность проводимых измерений на этапе исследования метрологических характеристик РИК, и, что немаловажно, проводить технические мероприятия по улучшению качества антенного полигона с количественной оценкой полученного эффекта. В настоящее время для измерений распределения ЭМП, как правило, используются линейные или плоскостные (планарные) сканеры. Однако, применению сканеров для аттестации РИК сопутствует ряд недостатков:

- искажение исследуемого поля элементами конструкции;
- пространственная избирательность используемого зонда;
- технические сложности размещения сканера в рабочей зоне антенного полигона;
- значительная стоимость.

Указанные причины делают актуальным решение задачи контроля распределения поля в рабочей зоне антенных полигонов альтернативными способами. Данная задача может быть решена путём анализа РЛИ объектов с постоянной (или известной) удельной отражающей способностью вдоль их поверхности.

РЛИ отображает распределение токов на поверхности радиолокационного отражателя, которое однозначно связано с распределением поля в непосредственной близости от него. Поэтому, его можно интерпретировать как сечение поля линией (для одностепенного позиционера, радиолокационный отражатель – тонкий стержень), либо плоскостью (для двухстепенного позиционера, радиолокационный отражатель – плоская пластина). Например, расположив стержень (или цилиндр) перпендикулярно оси вращения его РЛИ представит собой постоянную линию уровня, имеющую равную с объектом протяженность. Если же использовать пластину и вращать её в двух плоскостях, то изображением будет поверхность с постоянным уровнем, соответствующей формы.

Алгоритм оценки АФР в рабочей зоне измерительного комплекса для одностепенного позиционера может быть следующим. На первом этапе измеряется КМДОР стержня  $F(\theta, f)$  в заданном секторе углов относительно перпендикуляра к его образующей. На втором этапе компенсируется линейный набег фазы возникающий за счет распространения ЭМП до тестового отражателя и обратно:

$$F'(\theta, f) = F(\theta, f)e^{jkR}. \quad (16)$$

Третий этап заключается в восстановлении РЛИ  $D(x, y)$  в декартовой системе координат в соответствии с (1) не приводя его к БПФ. Анализ  $D(x, y)$  позволяет оценить интегральные характеристики амплитудного и фазового распределений ЭМП в полосе частот, использовавшейся для проведения измерений. Использование интегральных оценок, с одной стороны, не позволяет определить особенности сформированного АФР на отдельно взятых частотах и сделать выводы об их нахождении в пределах установленных допусков, с другой – характеризуют фактические искажения РЛИ, получаемые в результате интегрирования КМДОР. Также необходимо учитывать, что при оценке фазовой неравномерности поля в рабочей зоне кривизна поверхности используемого отражателя, умноженная на волновое число, должна быть значительно меньше оцениваемых значений.

Экспериментальная проверка предложенной методики проводилась путем измерений сечений стержня с длиной образующей 380 мм и диаметром 6 мм. Измерения КМДОР проводились в диапазоне частот 12...17 ГГц под разными ракурсами облучения рабочей зоны используемой антенной. На рис. 15 приведено сечение усреднённой ДН излучателя и нормированные к общему максимуму сечений РЛИ стержня, извлеченные из под квадратного корня. На рисунке 15 видно, что РЛИ стержня с достаточной точностью повторяет ДН излучающей антенны.

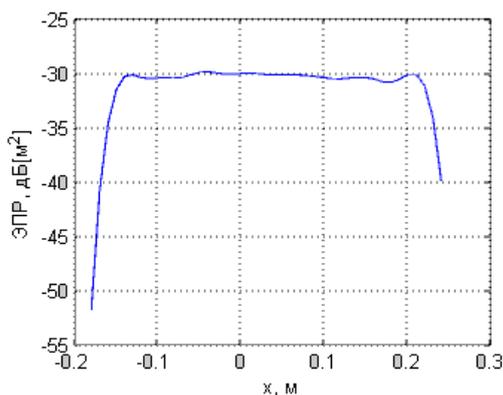


Рисунок 14 – Сечение РЛИ стержня

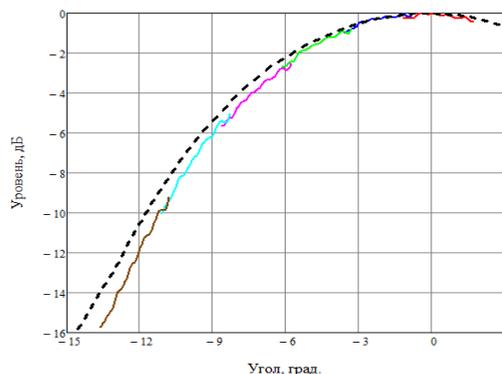


Рисунок 15 – Результаты сравнения заданной неравномерности поля с измеренной (пунктирная линия – усреднённая ДН антенны, сплошные линии – сечения РЛИ стержня под разными ракурсами облучения)

Таким образом, результаты натуральных экспериментов и математического моделирования подтверждают применимость предложенной методики для контроля неравномерности распределения поля в рабочей зоне антенного полигона. Методика измерений неравномерности АФР ЭМП обеспечивает оценку доминирующих составляющих погрешности измерений в условиях эксплуатации.

**В пятом разделе** представлен метод восстановления интегральных радиолокационных характеристик радиолокационных объектов на основе пространственной фильтрации синтезированных радиолокационных изображений.

Нижняя граница диапазонов измерений ЭПР на каждом ракурсе ДОР определяется либо энергетическим потенциалом измерительной системы, либо относительной величиной фоновых переотражений – ЭПР фона. Наибольшие усилия при проектировании РИК и проведении измерений РЛХ прикладываются именно к уменьшению ЭПР фона. Низких значений ЭПР фона добиваются за счет применения радиопоглощающих материалов, проведения двухэтапных измерений с комплексным вычитанием фоновых сигналов, физического и/или математического стробирования сигналов по временной задержке. Современные открытые РИК обеспечивают ЭПР фона в диапазоне  $10^{-4} \dots 10^{-2} \text{ м}^2$ , закрытые – в диапазоне  $10^{-6} \dots 10^{-4} \text{ м}^2$ , что позволяет измерять на порядок большие минимальные значения ЭПР. Однако, значения на нижней границе динамического диапазона обычно достигаются с существенными ограничениями по условиям измерений и характеристикам измеряемого объекта, поэтому достигаемые на практике значения чувствительности составляют порядка  $10^{-3} \text{ м}^2$  для открытых РИК и порядка  $10^{-5} \text{ м}^2$  для закрытых, что может быть недостаточным для измерений малых значений ЭПР с низкой погрешностью. Современные измерительные задачи требуют уменьшения минимальной измеряемой ЭПР крупногабаритных объектов до уровня  $10^{-3} \text{ м}^2$  и до  $10^{-5} \text{ м}^2$  для малогабаритных объектов при обеспечении погрешности измерений  $\pm 2 \text{ дБ}$ . Для достижения данной цели чувствительность РИК должна быть увеличена на величину не менее 10 дБ.

Фон РИК формируется за счёт приёма побочных переотраженных сигналов, а также их фантомов. Величина ЭПР фона зачастую тесно взаимосвязана с расстоянием до измеряемого объекта, поэтому технически и, в значительной степени экономически, выгодно размещать измеряемый объект на возможно меньшем удалении от приемопередающей антенны. Минимальное расстояние до объекта ограничивается необходимостью обеспечения равномерного АФР ЭМП в рабочей зоне в соответствии с условием «дальней зоны» (17):

$$R_{\min} \geq \frac{2(d_{АНТ} + l_{ОТР})^2}{\lambda}; \quad (17)$$

где  $d_{АНТ}, l_{ОТР}$  - размеры апертуры антенны и габариты объекта, м.

Данные физические ограничения могут быть частично преодолены на широкополосных РИК путём использования пространственной фильтрации РЛИ. Суть метода заключается в стробировании интересующей области синтезированного РЛИ и последующего восстановления ДОР на расстояние удовлетворяющее условию (17). При этом, для синтеза РЛИ могут использоваться штатные математические алгоритмы РИК, а для пространственного стробирования объекта оконные функции трехмерной или двумерной фигуры (в зависимости от мерности изображения) со сглаженными для уменьшения эффекта Гиббса краями.

Эффективность использования пространственной фильтрации подтверждается результатами экспериментальных исследований по измерению КМДОР объекта в зоне Френеля при наличии источников побочных переотражений. Измерения проводились в частотном диапазоне от 12 до 18 ГГц, составной объект из двух цилиндров располагался на расстоянии 2,8 м от приемо-передающей антенны. Измеряемый цилиндр имел длину образующей 20 см, диаметр основания 6 см, имитирующий фоновый отражатель цилиндр – 8 и 3 см, соответственно. Измерения проводились с установкой фонового отражателя и без него. Синтезированные РЛИ представлены на рис. 16.

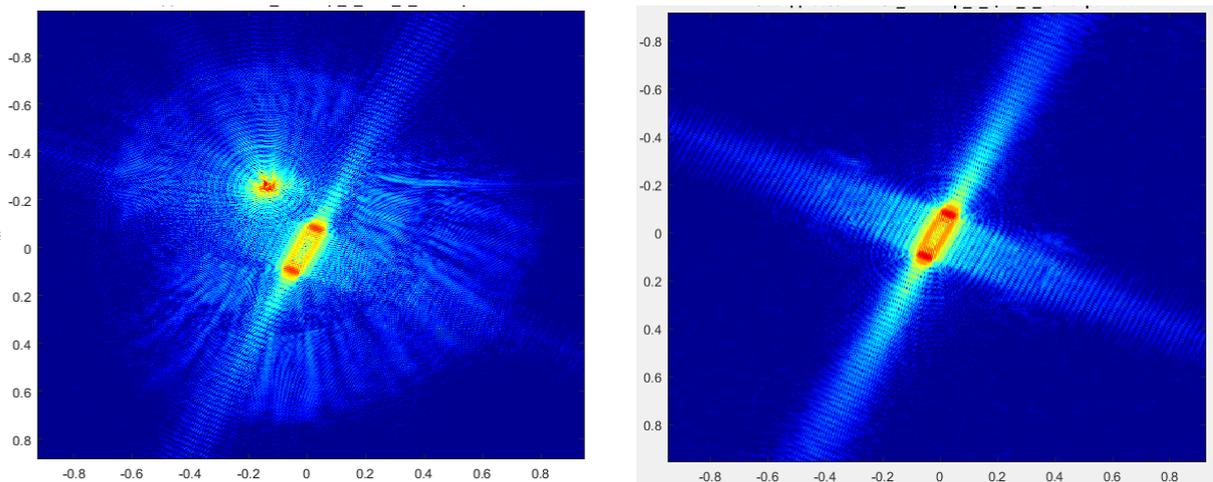


Рисунок 16 – Синтезированные РЛИ с помеховым отражателем (слева) и без него (справа)

Измеренные и восстановленные ДОР для измеряемого цилиндра в составе составного объекта и без помехового отражателя представлены на рис. 17. Наличие фонового отражателя с ЭПР около 15 дБ [1 м<sup>2</sup>] уменьшает чувствительность системы до аналогичной величины, а влияние сферичности фазового фронта в зоне Френеля проявляется в снижении ЭПР в максимуме ДОР и её искажению в целом. Применение предложенного метода обеспечивает как исключение значительной по величине фоновой составляющей, так и уменьшение искажений из-за неравномерности фазового фронта, возникающего при несоблюдении условия (17). Форма ДОР, восстановленной по результатам измерений и фильтрации, в достаточной степени совпадает с теоретическим расчетом для оптической области.

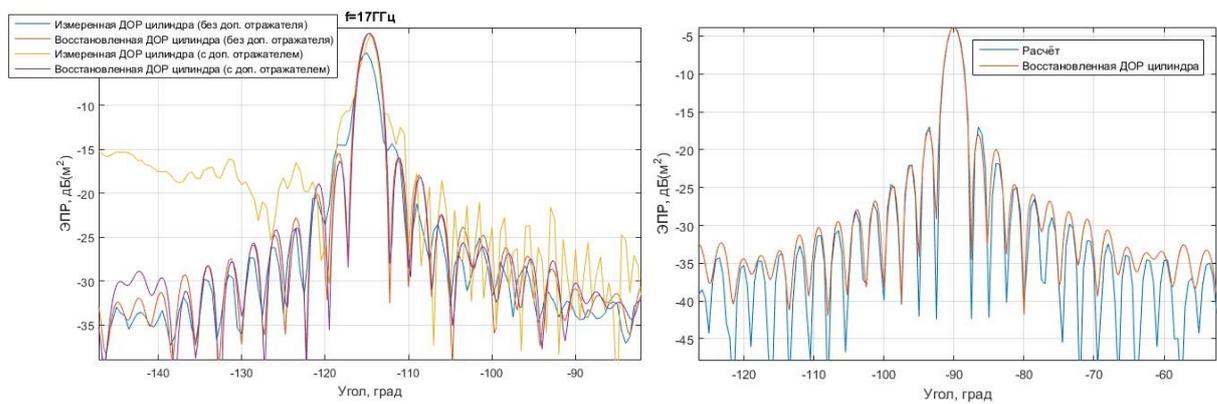


Рисунок 17 – Измеренные и восстановленные ДОР (слева), теоретический расчёт и восстановленная ДОР (справа)

Полученные результаты подтверждают эффективность применения метода пространственной фильтрации РЛИ для уменьшения фоновых сигналов, обеспечивающего повышение отношения сигнал/фон на 10...15 дБ в зависимости от условий измерений. Алгоритм восстановления ДОР из РЛИ, синтезированного в «промежуточной зоне», обеспечивает получение результатов, эквивалентных измеренным в «дальней зоне» при соблюдении равномерности амплитудного распределения поля в рабочей зоне полигона.

**В заключении** приведены основные научные результаты и сведения об их внедрении. Показано, что в процессе решения поставленной научной задачи были получены следующие новые научные результаты:

1. Предложен метод градуирования радиолокационных изображений в единице ЭПР на основе равенства Парсевалья, который обеспечивает однозначную взаимосвязь между локальными и интегральными характеристиками рассеяния объектов.
2. Предложен способ определения погрешности измерений ЭПР на РЛИ основанный на использовании стандартных мер ЭПР и не требующий разработки специальных эталонов (мер) «локальной» ЭПР.
3. Обоснован с использованием теоремы Котельникова критерии выбора углового шага при измерениях определяющий минимальный объём измерений для корректного синтеза РЛИ.
4. Предложен способ интерполяции массива исходных данных для синтеза РЛИ позволяющий уменьшить объем и продолжительность измерений от 2 до 4 раз для угловой оси (степени свободы).
5. Разработан метод оценки неравномерности амплитудного и фазового распределений ЭМП в рабочей зоне РИК методом инверсного синтеза апертуры обеспечивающий возможность оценки составляющих погрешности измерений из-за побочных переотражений и ограниченного расстояния в условиях эксплуатации.
6. Разработан метод обработки результатов измерений на основе пространственной фильтрации синтезированных РЛИ обеспечивающий повышение отношения сигнал/фон на 10...15 дБ для измерений радиолокационных характеристик объектов с низкой ЭПР.

Таким образом, использование разработанной системы методов обеспечения требуемой точности измерений радиолокационных характеристик объектов на широкополосных радиолокационных комплексах с инверсным синтезом апертуры позволяет значительно повысить информативность радиолокационных измерительных комплексов и получить достоверную информацию о характеристиках радиолокационной заметности современных и перспективных объектов. Метрологическое обеспечение испытаний этих объектов при этом может быть реализовано в рамках поверочной схемы

разработанной в ОКР «Аксоль-ЭПР», без создания специального эталона локальных радиолокационных характеристик, и тем самым подтверждает решение поставленной научной задачи.

**Основные результаты диссертации отражены в следующих работах**

1. Озеров М.А. Разработка расчетно-экспериментального метода оценки метрологических характеристик измерительных комплексов на основе инверсного синтеза апертуры. / М.А. Озеров // Вестник метролога – 2013. – №3 – с.18-22.
2. Озеров М.А. Градуирование радиолокационных изображений в единицах эффективной площади рассеяния / М.А. Озеров, А.В. Титаренко // Радиотехника. - 2014. – №12 – с.10 –16
3. Озеров М.А. Оценка неравномерности поля в рабочей зоне антенного полигона методом инверсного синтеза апертуры / М.А. Озеров, А.В. Титаренко // Вестник метролога – 2014. – №4 – с.25-28
4. Озеров М.А. Особенности формирования массивов исходных данных для синтеза трехмерных РЛИ. / М.А. Озеров, А.В. Титаренко // Вестник метролога – 2015. – №2 – с.24-28
7. Озеров М.А. Синтезирование пространственной импульсной характеристики антенны для восстановления диаграммы направленности, измеренной в неидеальных условиях. / М.А. Озеров, А.В. Титаренко // Вестник метролога – 2016. №4 с.14-18
8. Озеров М.А. Расчетно-экспериментальный метод оценки метрологических характеристик радиоэлектронных измерительных комплексов РЛХ объектов ВВТ инверсным синтезом апертуры // Тезисы докладов XXXVIII конференции молодых ученых и специалистов военных метрологов «Актуальные задачи военной метрологии»
9. Озеров М.А. Способ нормирования радиолокационных изображений в единицах эффективной площади рассеяния // Тезисы докладов XXXIX конференции молодых ученых и специалистов военных метрологов «Актуальные задачи военной метрологии»
10. Озеров М.А. Градуирование радиолокационных изображений в единицах эффективной площади рассеяния / М.А. Озеров, А.В. Титаренко // Тезисы докладов X Всероссийской научно-технической конференции – 2014. с. 194-198
11. Озеров М.А. Методика оценки неравномерности поля в рабочей зоне антенного полигона методом инверсного синтеза апертуры / М.А. Озеров, А.В. Титаренко // Тезисы докладов X Всероссийской научно-технической конференции «Метрологическое обеспечение обороны и безопасности в Российской Федерации», п. Поведники - 2014. с. 157-161
12. Озеров М.А. Особенности формирования массивов исходных данных для построения трехмерных радиолокационных изображений / М.А. Озеров, А.В. Титаренко // Труды XXIX Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред», г. Санкт-Петербург - 2015. с. 537-546
13. Озеров М.А. Способы определения погрешности измерений эффективной площади рассеяния объектов на радиолокационных изображениях / М.А. Озеров, А.В. Титаренко // Труды XXIX Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред», г. Санкт-Петербург - 2015. с. 547-560
14. Озеров М.А. Критерий выбора углового шага измерений диаграммы обратного рассеяния радиолокационного объекта для построения его радиолокационного изображения / М.А. Озеров, И.М. Малай // Тезисы докладов X Всероссийской научно-технической конференции «Метрология в радиоэлектронике», ФГУП «ВНИИФТРИ» - 2016 с. 217-220
15. Озеров М.А. Метод измерений интегральных радиолокационных характеристик объектов с низкой ЭПР на основе пространственной фильтрации синтезированных радиолокационных изображений / М.А. Озеров, И.М. Малай // Тезисы

докладов X Всероссийской научно-технической конференции «Метрология в радиоэлектронике», ФГУП «ВНИИФТРИ» - 2016 с. 217-220

16. Озеров М.А. Метод восстановления интегральных радиолокационных характеристик объектов, измеренных в неидеальных условиях, на основе пространственной фильтрации синтезированных радиолокационных изображений / М.А. Озеров // Труды XXX Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред», г. Санкт-Петербург - 2017. с. 537-546

17. Малай И.М., Анютин Н.В., 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.

18. Титаренко А.В., Анютин Н.В., Озеров М.А. Профилирование границ раздела изотропных сред с использованием полиномов Чебышева в задачах рассеяния радиоволн// В сборнике: Метрология в радиоэлектронике. Материалы XI Всероссийской научно-технической конференции. В 2-х томах. Федеральное государственное унитарное предприятие "Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений" (ФГУП "ВНИИФТРИ"). 2018. С. 201-207.

19. Озеров М.А., Титаренко А.В. Многомерная пространственная фильтрация для повышения точности измерений электродинамических характеристик излучения антенн // Измерительная техника. 2021. № 11. С. 46-54