

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.10.10>

УДК: 537.874.2

**МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ,  
ПОЗВОЛЯЮЩАЯ УМЕНЬШИТЬ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ  
БИСТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ  
ОБРАЗЦОВ МАТЕРИАЛОВ**

Р.В. Гильмутдинов<sup>1,2</sup>, Н.Л. Меньших<sup>2</sup>, С.А. Федоров<sup>2</sup>, Л.В. Брук<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)  
141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9

<sup>2</sup>Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН  
125412, г. Москва, муниципальный округ Дмитровский, ул. Ижорская, д. 13, стр. 6

Статья поступила в редакцию 30 июля 2024 г.

**Аннотация.** В данной работе представлена методика обработки сигналов, возникающих при бистатистических измерениях коэффициента отражения плоских образцов материалов. Эта методика – синтез фона – основана на сопоставлении сигнала, отраженного от исследуемого объекта, и фонового сигнала во временной области. Использование данной методики позволяет повысить точность измерений характеристик бистатистического рассеяния объектов с малым значением амплитуды отраженной волны. Применение данной методики позволяет компенсировать погрешность измерения, связанную с неточностью позиционирования антенн, и существенно уменьшить погрешность измерений, вызванную взаимодействием антенн друг с другом при больших бистатистических углах. Было проведено измерение коэффициента отражения от образца материала по методу замещения. Полученные результаты обрабатывались путем векторного вычитания непосредственно измеренного

фонового сигнала, применения стробирования по времени и с помощью разработанной методики. Показано, что применение данной методики позволяет повысить точность измерения коэффициента отражения от материала. Также использование данной методики уменьшает погрешность определения минимального значения коэффициента отражения и угла, при котором этот минимум достигается. Наиболее эффективным является применение синтеза фона и строба по времени.

**Ключевые слова:** бистатические измерения, безэховая камера, коэффициент отражения, обработка сигналов, временная область.

**Автор для переписки:** Гильмутдинов Руслан Валерьевич, [psevduch777@gmail.com](mailto:psevduch777@gmail.com)

## Введение

В настоящее время увеличивается количество исследований, посвященных изучению бистатических свойств рассеяния различных объектов. В [1] обсуждаются достоинства многопозиционной радиолокации и показана возможность использования бистатики при передаче сигналов. В [2] путем измерения характеристик рассеяния масштабной модели объекта и численного моделирования исследуются бистатические значения эффективной площади рассеяния (ЭПР) малозаметной воздушной цели. Показано, что использование масштабной модели позволяет эффективно прогнозировать значения бистатические значения ЭПР.

Большое значение двухпозиционное рассеяние радиоволн получило в геофизических методах наблюдения за процессами, происходящими на Земле. В работе [3] описывается усовершенствованный метод интегральных уравнений для анализа обратного и бистатического рассеяния, позволяющий описать неоднородности почвы.

Строятся современные измерительные установки для экспериментальных исследований характеристик бистатического рассеяния объектов. Продемонстрирована возможность [4] регистрации малого уровня отражения от материала, имеющего низкий модуль коэффициента отражения (МКО)

на частотах в диапазоне 360-450 ГГц. Установка позволяет детектировать наличие дефектов в исследуемых образцах. В [5] описана бистатическая установка, в которой положение передающей антенны фиксируется с помощью шестикоординатного робота-манипулятора, что позволило проводить измерения рассеянного поля в широком диапазоне углов. В [6] создана сферическая трехмерная бистатическая установка. Такие установки позволяют анализировать рассеяние волн объектами сложной формы, изготовленными из разных материалов с разными свойствами, например, неоднородными, с частотной дисперсией или с анизотропией. В [7] описана модернизация установки, представленной в [6], а также исследованы вопросы влияющие на погрешность измерения бистатической ЭПР такие как, прямое излучение от передающей антенны к приемной. Авторы подчеркивают важность достижения минимального уровня шума, поскольку бистатический сигнал обычно имеет меньшую амплитуду.

В [8] показана возможность измерения объектов, размеры которых сравнимы с длиной волны, и ЭПР которых сопоставима с ЭПР используемой опоры. Эксперимент проводился при больших бистатических углах, точность измерений подтверждается сравнением с численным моделированием бистатической ЭПР. Показана возможность исследовать свойства объектов, имеющие ЭПР на уровне  $-50$  дБм<sup>2</sup>.

Сегодня особый интерес представляют вопросы, связанные с исследованием характеристик бистатического рассеяния образцов композитных радиопоглощающих материалов (РПМ). В [9] предложено использование метаматериалов для снижения ЭПР изогнутой и плоской мишени. Показано что результаты численных расчетов и измерений ЭПР исследуемых объектов находятся в соответствии друг с другом. В [10] исследуются экспериментальные свойства метаповерхностного поглотителя конечных размеров на квазимоностатическом и бистатическом измерительных стендах. Также численно исследовались рассеивающие свойства бесконечной метаповерхности.

При проведении бистатических измерений существует множество погрешностей, не позволяющих достичь желаемой точности результатов. В частности, существует проблема, связанная с взаимодействием антенн друг с другом.

В данной работе представлена разработанная методика обработки сигналов для измерения коэффициента отражения от образца материала на бистатическом стенде.

## **1. Постановка задачи**

При проведении бистатических измерений МКО от образцов плоских материалов антенны двигаются по дуге окружности и фиксируются на одном и том же угле по разные стороны от нормали к поверхности образца.

При использовании метода замещения выполняется три измерения: измеряется сигнал от образца с материалом, от калибровочного образца и фоновый сигнал. Учет фона в бистатических измерениях необходим не только для уменьшения погрешности измерения, но скорее для получения сколько-то осмысленных результатов при больших бистатических углах, что связано в первую очередь с очень большим сигналом взаимодействия антенн без отражения от исследуемого образца.

В ходе проведения экспериментальных исследований антенны устанавливаются в заданную точку с некоторой точностью. Соответственно, при каждом измерении сигнала антенны устанавливаются в окрестности заданной точки со своей случайной погрешностью. Ввиду малости случайной погрешности, предполагается, что передающая антенна находится в точке P1 (Рисунок 1) и при повторном измерении приезжает в заданную точку, при этом приемная антенна при измерении сигнала находится в точке P2, а при измерении фона – при передвижении антенн – уже в точке P3.

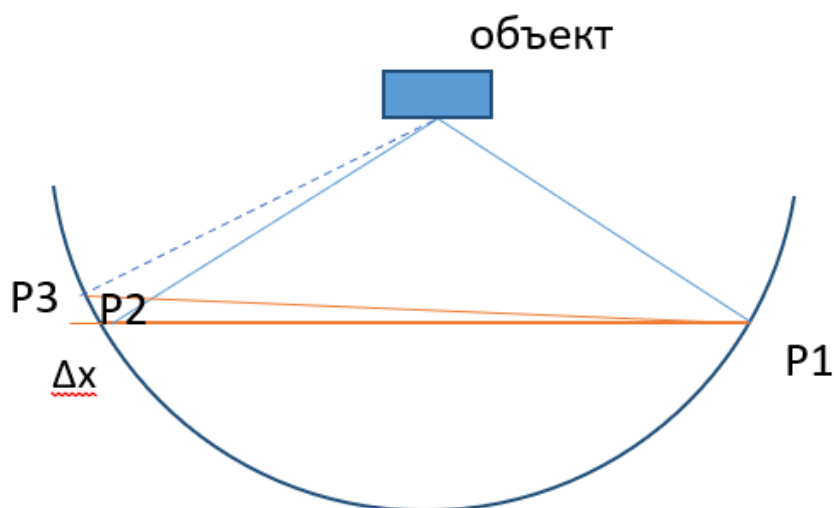


Рис. 1. Схема проведения бистатического эксперимента.

Ошибка позиционирования антенн связана с точностью углового разрядного датчика, а также обусловлена раскачиванием антенн при движении по рельсам. Необходимо также учитывать неровность рельсов, по которым перемещаются тележки, что даёт дополнительное смещение.

Ранее авторами настоящей работы была [11] продемонстрирована принципиальная возможность оптимизации параметров смещения фонового сигнала во временной области при проведении бистатических измерений.

На рисунке 2а изображена двумерная диаграмма распределения напряженности поля, принятой приемной антенной в пустой БЭК, и диаграмма отношения амплитуды фонового сигнала к разности напряженности поля при установленном объекте измерения и в пустой БЭК от частоты и бистатического угла. Можно заметить, что фоновый сигнал существенно растет с увеличением бистатического угла. Это связано с прямым прохождением сигнала между антеннами. На рисунке 2б представлено распределение измеренного поля в зависимости от частоты и бистатического угла от металлической пластины при вычитании фонового сигнала.

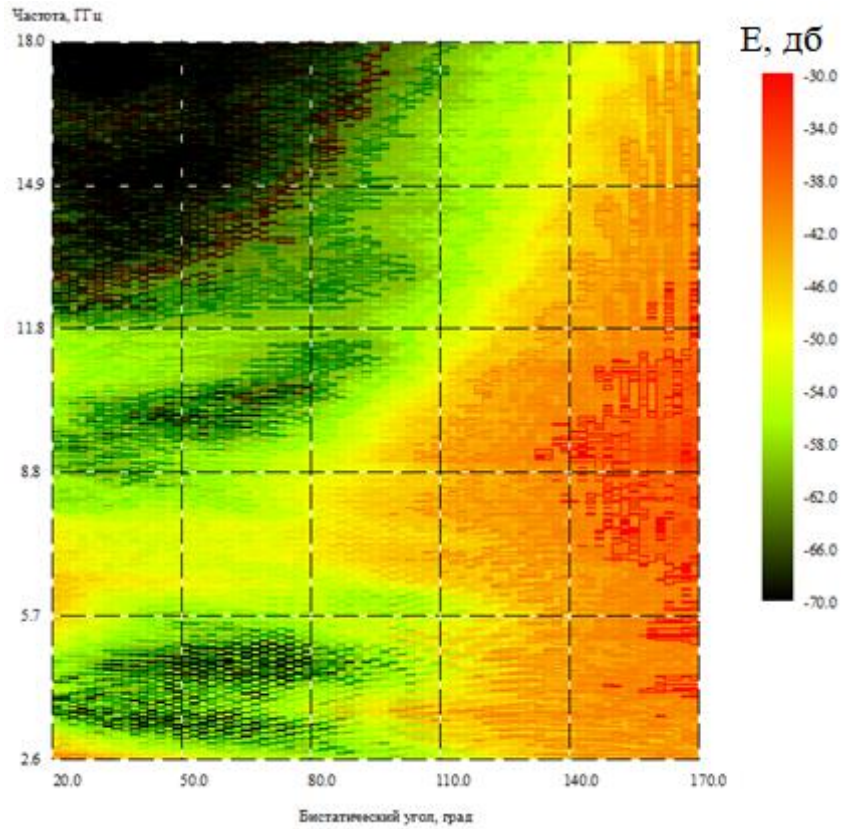


Рис. 2а. Распределение измеренного поля в зависимости от частоты и бистатического угла при отсутствии объекта в БЭК.

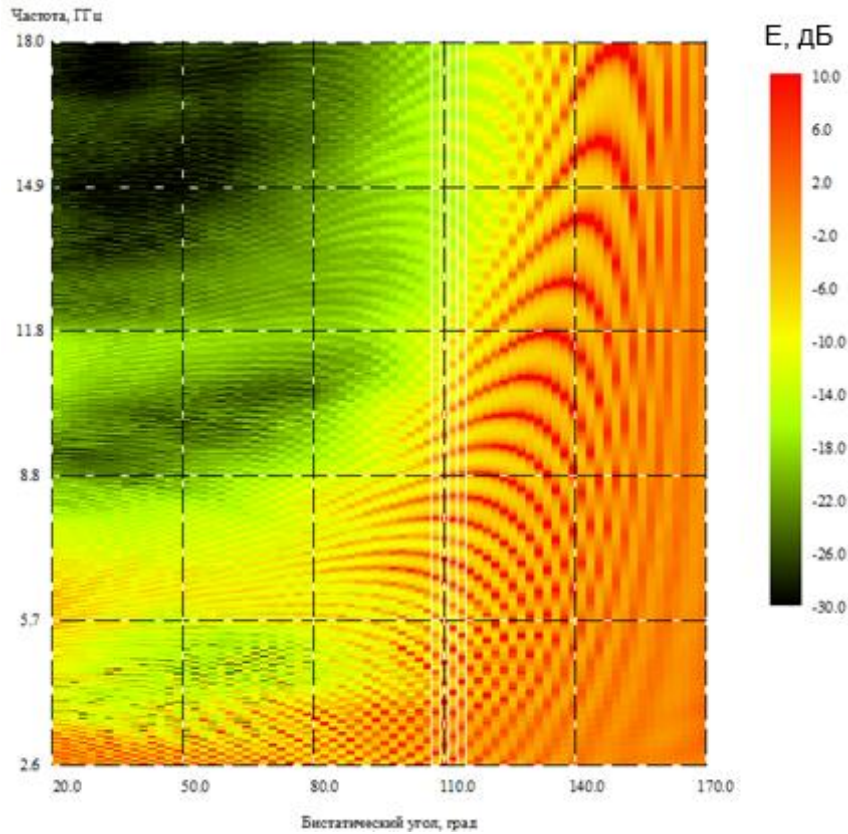


Рис. 2б. Диаграмма отношения амплитуды фонового сигнала к разности напряженности поля объекта и напряженности поля пустой БЭК.

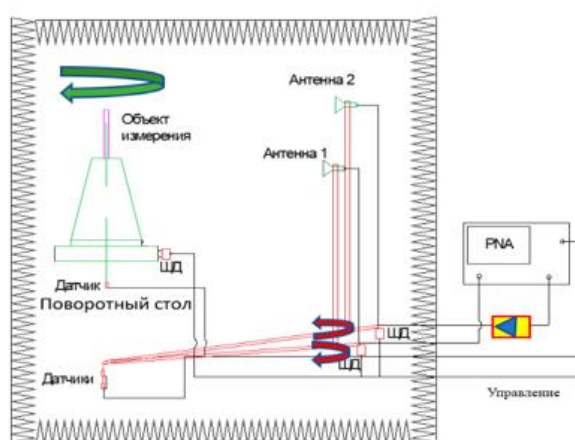
В данной работе представлена методика, позволяющая уменьшить погрешность измерения, связанную с неточностью позиционирования антенн, и повысить точность вычитания фонового сигнала. Данная методика позволяет измерять двумерные диаграммы рассеяния объектов при больших бистатических углах. В работе предложенная методика сравнивается с векторным вычитанием фона.

## 2. Описание бистатической установки

Установка [12] для проведения бистатических измерений состоит из опорно-поворотного устройства (ОПУ), на котором закрепляется исследуемый образец, приемной и передающей антенн, которые вращаются в горизонтальной плоскости по дуге окружности на жестко связанных с центром вращения тележках – рисунок 3а. Оси вращения антенн и поворотного стола совпадают. Тележки перемещаются в диапазоне углов от 10 до 85°, углы отсчитываются от нормали к исследуемому образцу. Объект измерения устанавливается на полую пенопластовую опору, закрепленную на ОПУ. Бистатический стенд расположен в БЭК размером 5×4×4 м. БЭК и механические части конструкции стенда покрыты радиопоглощающим материалом. Расстояние между антенной и объектом измерения составляет 2,0 м. На рисунке 3б изображена схема экспериментальной установки.



а) фотография



б) схема

Рис. 3. Измерительная установка.

В качестве антенн используются антенны Satimo SH2000, которые способны работать в широком диапазоне частот от 2 до 32 ГГц. В качестве генератора и анализатора используется векторный анализатор цепей PNA компании Agilent Technologies.

### 3. Методика синтеза фона

На рисунке 4 схематично изображены пути сигналов от передающей к приемной антенне при малом и большом бистатическом угле.

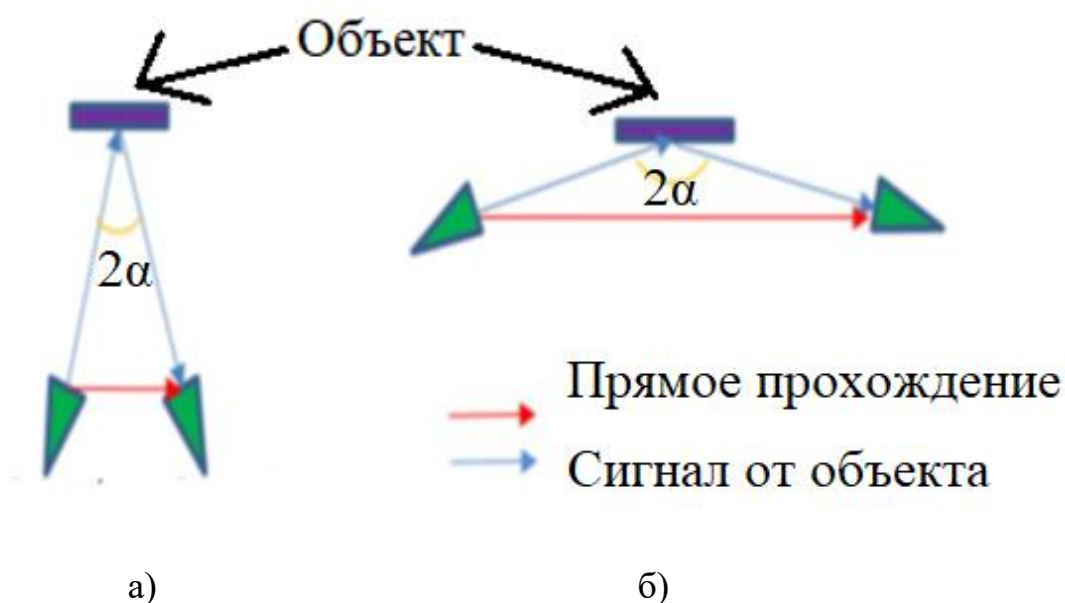


Рис. 4. Пути прохождения сигнала при а) малом и б) большом бистатическом угле.

Разница путей между прямым и отраженным сигналами выражается формулой:  $L = 2R(1 - \sin(\alpha))$ , где  $2\alpha$  – бистатический угол. Видно, что с ростом угла сигнал прямого прохождения из передающей в приемную антенну и полезный сигнал, содержащий отражение от исследуемого объекта, во временной области имеют все более близкие длины пути. На рисунке 5 изображены временные диаграммы фонового сигнала и сигнала от исследуемого образца с материалом вместе с фоновым сигналом.



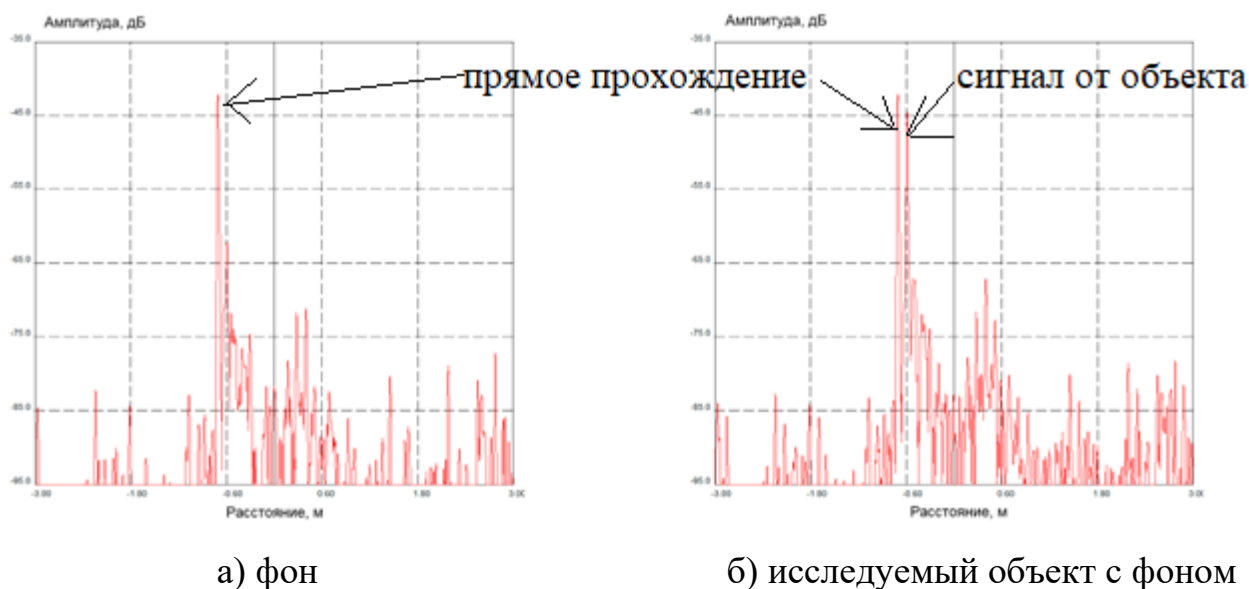


Рис. 5. Временные диаграммы при бистатическом угле 140 градусов.

Методика синтеза фона работает следующим образом. Задается сдвигка фонового сигнала во временной области на малую величину  $\Delta x$ , сопоставимую по величине с амплитудой колебания положения антенны. Методом перебора определяется такое значение величины  $\Delta x$ , при котором сигнал прямого прохождения между антеннами при измерении сигнала от объекта был бы наименьшим после вычитания фона. Определив  $\Delta x$  можно найти расположение точки P3, где производилось измерение сигнала фона. Смещение на величину  $\Delta x$ , согласно свойствам Фурье преобразования, эквивалентно умножению всех членов фонового сигнала на величину  $\exp(-if_k\Delta x/c)$ , где  $f_k$  – частота, на которой измерялся сигнал,  $c$  – скорость света.

Методика синтеза фона учитывает колебания положения антенны только по углу поворота. Методика предполагает, что сигнал от объекта находится на фиксированном расстоянии  $2R$  и сдвинуться не может. Поэтому предлагается в методике синтеза фона учитывать смещение местоположения антенны по углу поворота с учетом ширины сигнала и апертуры во временной области на величину  $\Delta x = |P2P1 - P3P1|$ , а местоположение сигнала от объекта с учетом протяженности объекта фиксировать. Будем предполагать, что составляющие фонового сигнала во временной области между антенной и объектом линейно сдвигаются на величину  $\Delta x'$  от расстояния  $\Delta x$  до нуля,

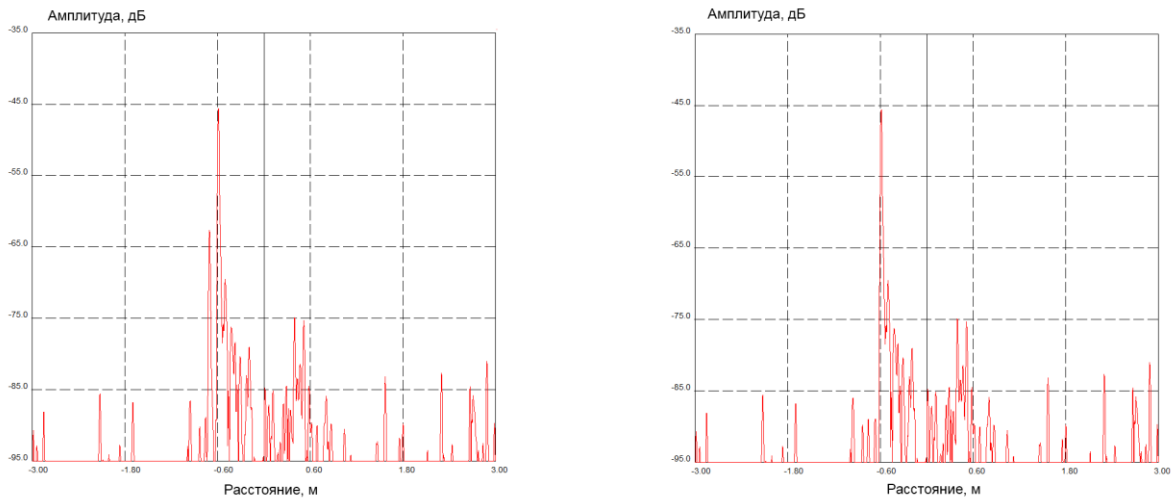
где сдвиг  $\Delta x$  соответствует положению сигнала прямого прохождения между объектами, а нуль – сигналу от исследуемого объекта. Обозначим за  $L$  – расстояние между сигналом прямого прохождения и сигналом от объекта, за  $d$  – часть сигнала, расположенного между рассматриваемыми сигналами. Тогда расстояние  $\Delta x' = \frac{d}{L} \Delta x$ . Расположенные за объектом составляющие фонового сигнала не смещаются, а перед сигналом прямого прохождения между антеннами составляющие смещаются на постоянную величину  $\Delta x$ . Во временной области каждый член ряда Фурье вычисляется с учетом сдвига на  $\Delta x'$ . Делая обратное преобразование Фурье, получаем сигнал, который будем называть синтезированным фоном. Чтобы уменьшить ошибку измерения можно применить временную селекцию (time-domain), но в этом случае на краях частотного диапазона результаты искажаются из-за эффекта Гиббса. Применение широкополосных антенн позволяет проводить измерения в полосе частот, выходящей за границы интересующего нас частотного диапазона (4-12 ГГц), в котором эффект Гиббса не проявляется при применении временной селекции.

#### 4. Результаты

Были проведены экспериментальные исследования коэффициента отражения плоского образца материала с использованием “классического” векторного вычитания и с использованием синтеза фона в диапазоне от 2,6 до 18 ГГц. В качестве материала использовался магнетодиэлектрик с известной частотной дисперсией материальных параметров [13] в конфигурации образца “Поролон+Обёртка” [14].

На рисунке 6 изображены временные диаграммы сигнала отраженного от образца материала полученные после а) векторного вычитания, б) синтезированного фона. Сравнивая полученные результаты с кривыми на рисунке 5, можно заметить, что применение синтезированного фона позволяет

существенно снизить уровень прямого прохождения сигнала, практически не изменяя полезный сигнал.

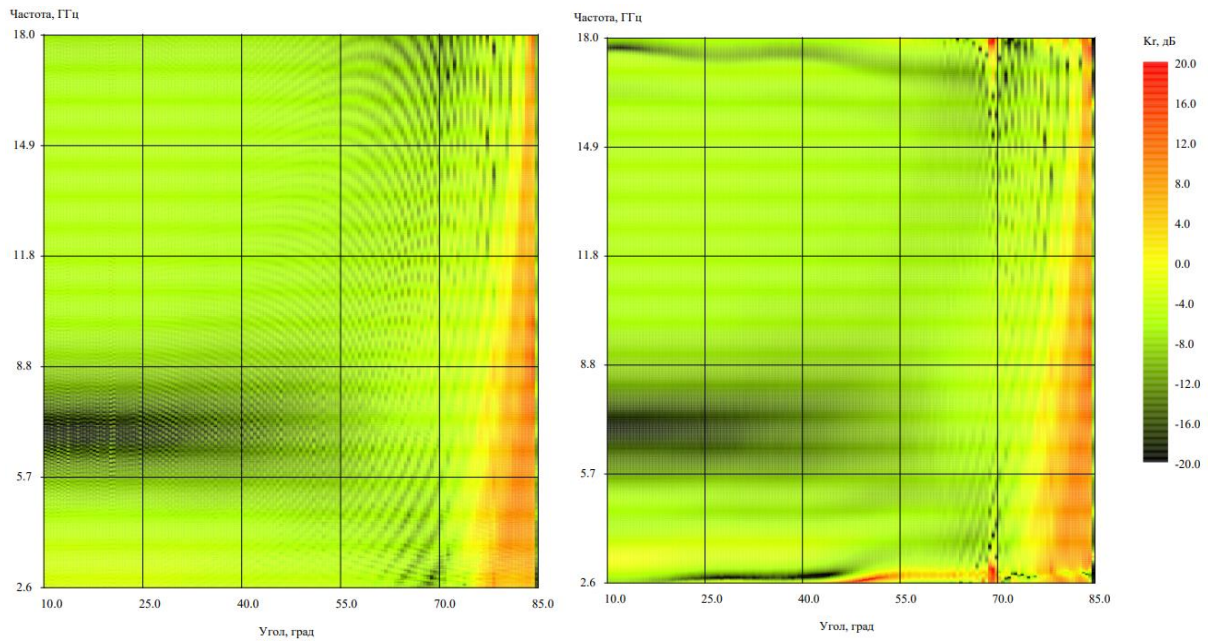


а) векторное вычитание

б) синтез фона

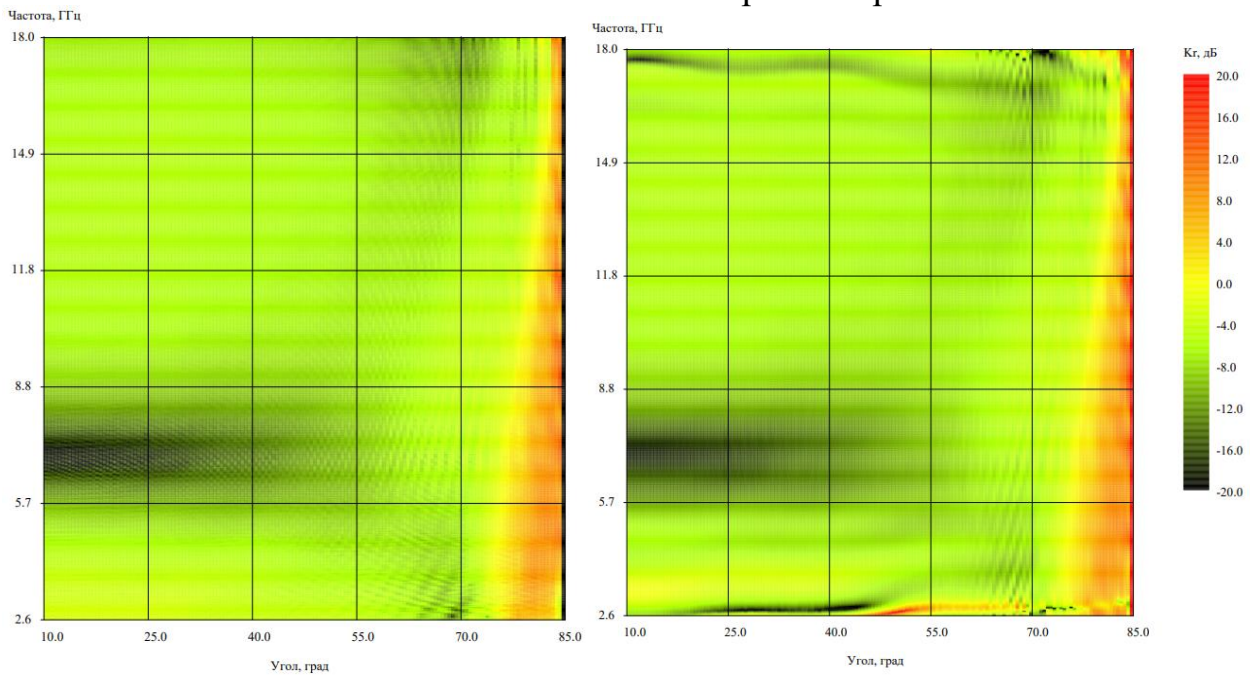
Рис. 6. Временные диаграммы.

На рисунке 7 изображены двумерные диаграммы зависимости МКО от угла падения и частоты для горизонтальной поляризации, полученные путем а) векторного вычитания, б) векторного вычитания и строба по времени, в) синтеза фона и г) синтеза фона и строба по времени. На рисунке 7а видны флуктуации, на рисунках 7б и 7г в области крайних частот можно заметить горизонтальные полосы, связанные с эффектом Гиббса. Значения МКО в области средних частот диаграммы, изображенные на рисунках 7в и 7г структурно похожи.



а) векторное вычитание

б) векторное вычитание  
и строб по времени



в) синтез фона

г) синтез фона и строб  
по времени

Рис. 7. Двумерная диаграмма МКО материала.

На рисунке 8 изображены кривые значений МКО на частотах а) 5 ГГц и б) 8 ГГц для горизонтальной поляризации, обработанных различными методиками. Экспериментальные кривые векторного вычитания и синтеза фона в области малых углов, обработанные с использованием строба по времени, полностью совпадают. В области скользящих углов (больше

60 градусов) значения МКО, обработанные методикой синтеза фона без и со стробом по времени структурно похожи и наиболее близки к результатам аналитического расчета. Кривая результатов МКО, полученная при использовании синтеза фона и строба? по времени имеет значительно более низкую амплитуду флуктуаций значений МКО во всем исследуемом секторе углов, по сравнению с векторным вычитанием. Погрешности между экспериментальными результатами и значениями аналитического расчета связаны с краевыми эффектами и неточностью измерения материальных параметров.

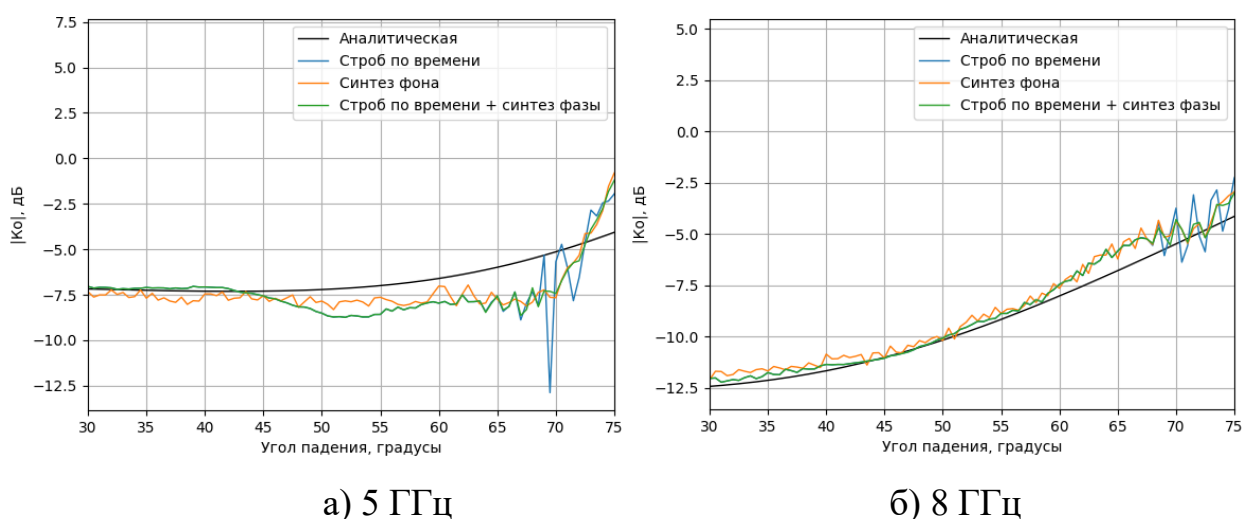


Рис. 8. Кривые значений МКО материала.

Поведение кривых, обработанных различными методиками, является характерным. Анализ результатов, полученных при обработке измеренных значений МКО от образцов различных материалов в исследуемом частотном диапазоне, позволяет сделать некоторые выводы. При малых углах падения случайная погрешность, вызванная неточностью позиционирования антенн и взаимодействием антенн, уменьшается с 2 до 1 дБ при уровне значений МКО  $-10$  дБ, и с 1,5 до 0,5 дБ при уровне значений МКО  $-5$  дБ. При углах падения близких к скользящим амплитуда флуктуаций уменьшается с 5 до 1 дБ.

## Заключение

Была разработана методика обработки сигналов для измерения коэффициента отражения от образцов материалов на бистатическом стенде. Эта методика использует распределение сигналов во временной области. Определяется смещение фонового сигнала, при котором сигнал прямого прохождения между антеннами при измерении сигнала от объекта был бы наименьшим после вычитания фона. Это позволяет существенно снизить влияние прямого прохождения сигнала между передающей и приемной антеннами и получить более плавное распределение амплитуды коэффициента отражения в зависимости от частоты и угла падения на материал.

Были проведены измерения коэффициента отражения от материала. Полученные результаты были обработаны различными методиками. Показано, что в области малых углов эффективность методики синтеза фона сопоставима с применением строба по времени, при этом методика синтеза фона позволяет точнее определять значение минимума коэффициента отражения и угла, при котором достигается этот минимум. При использовании широкополосных антенн наиболее оптимально использовать методику синтеза фона вместе со стробом по времени.

## Литература

1. Daout F., Schmitt F. Analysis of a bistatic Radar Cross Section measurement capability for the Boris Vian anechoic chamber //2014 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA). – IEEE, 2014. – С. 1-4.
2. Gürel L. et al. Validation through comparison: Measurement and calculation of the bistatic radar cross section of a stealth target //Radio science. – 2003. – Т. 38. – №. 3.
3. Zeng J. et al. A comprehensive analysis of rough soil surface scattering and emission predicted by AIEM with comparison to numerical simulations and experimental measurements //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2016. – Т. 55. – №. 3. – С. 1696-1708.

4. Jin M., Li B., Bai M. On the reflectivity measurements of microwave blackbody in bistatic near-field configuration //IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2021. – Т. 69. – №. 11. – С. 8027-8032.
5. Wei F., Guo L. An Efficient Electromagnetics Measurement of 3D Bistatic Scattering Problem at Oblique Incident //2019 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium-China (ACES). – IEEE, 2019. – Т. 1. – С. 1-2.
6. Eyraud C. et al. Validation of a 3D bistatic microwave scattering measurement setup //Radio Science. – 2008. – Т. 43. – №. 04. – С. 1-12.
7. Saleh H. et al. Upgrading the settings of a microwave experimental setup for better accuracy in bistatic radar cross section measurement //2017 Mediterranean Microwave Symposium (MMS). – IEEE, 2017. – С. 1-2.
8. Saleh H., Geffrin J. M., Tortel H. Bistatic scattering measurement on low permittivity spheroidal objects //2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). – IEEE, 2017. – С. 259-262.
9. Masaki T. et al. Monostatic and bistatic RCS measurements for thin metasurfaces //2017 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA). – IEEE, 2017. – С. 351-352.
10. Álvarez H. F., de Cos M. E., Las-Heras F. Monostatic and bistatic measurements of metasurfaces on anechoic chamber and a comparison with electromagnetic simulations //2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). – IEEE, 2019. – С. 1-4.
11. Fedorov S. A., Gilmudinov R. V., Menshikh N. L. Reducing Error of Position When Measuring the Bistatic Reflection Coefficient //2020 7th All-Russian Microwave Conference (RMC). – IEEE, 2020. – С. 276-278.
12. Gilmudinov R. V. et al. Procedural Measurement Error in Specular Reflection Coefficient from Planar Samples Using Two Different Types of Test Stands //Measurement Techniques. – 2021. – С. 1-7.

13. Semenenko V. N. et al. Complex permittivity and permeability of composite materials based on carbonyl iron powder over an ultrawide frequency band //Physical Review Applied. – 2021. – Т. 16. – №. 1. – С. 014062.
14. Гильмутдинов Р. В., Меньших Н. Л., Федоров С. А. Повышение точности измерений бистатистических характеристик рассеяния материалов образцов различных конфигураций. Измерительная техника, 73(6), 46–54 (2024). <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2024-6-46-54>

**Для цитирования:**

Гильмутдинов Р.В., Меньших Н.Л., Федоров С.А., Брук Л.В. Методика обработки сигналов, позволяющая уменьшить погрешности измерений бистатистических характеристик рассеяния образцов материалов. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.10.10>