

# Использование антенны с корректирующей линзой для измерения параметров рассеяния материалов на бистатическом стенде

Р.В. Гильмутдинов \* <sup>1</sup>, Н.Л. Меньших<sup>1</sup>, С.А. Фёдоров<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук, Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 18.11.2024  
Одобрена после рецензирования 10.12.2024  
Принята к публикации 26.12.2024

## Аннотация

В работе представлен бистатический измерительный стенд сантиметрового диапазона длин волн, модифицированный с помощью использования антенн с корректирующими линзами в качестве приемника и передатчика. Оптимизированная линза с рассчитанными параметрами была напечатана на 3D-принтере. Данная конструкция позволяет создать распределение поля с приемлемыми характеристиками в области размещения исследуемого объекта в широкой полосе частот. При проведении измерения коэффициента зеркального отражения материала в свободном пространстве большое влияние на результаты измерения оказывают дифракционные эффекты на краях образца, которые можно уменьшить, сформировав оптимальное поле в области размещения исследуемого образца. С использованием метода моментов было проведено численное моделирование измерения коэффициента зеркального отражения на модернизированном бистатическом стенде с линзой и в плоском поле. Были проведены экспериментальные исследования коэффициента отражения от материала в квазиплоском поле и в поле, созданном антенной с корректирующей линзой. Результаты расчетов и экспериментов показали, что применение антенны с корректирующей линзой позволяет повысить точность измерения коэффициента зеркального отражения в широком частотном и угловом диапазонах.

**Ключевые слова:** ФЕКО, метод моментов, гиперболическая линза, краевые эффекты, бистатические измерения, коэффициент отражения

EDN MHERAM

doi:[10.24412/2949-0553-2024-614-18-27](https://doi.org/10.24412/2949-0553-2024-614-18-27)

---

## Введение

В последние десятилетия диэлектрические линзы все чаще используются в радиотехнике и радиофизике для создания приемо-передающей системы с заданными параметрами [1]. Особенно популярны такие системы в миллиметровом и сантиметровом диапазонах длин волн. Ведутся исследования как с наиболее простыми линзами с одной преломляющей поверхностью, так и с более сложными градиентными слоистыми линзами [1, 2]. Сравнение распределения полей после эллиптической и гиперболической линз выполнено в [3], где показано, что обе линзы имеют примерно одинаковый коэффициент усиления и формируют очень близкие по структуре поля. Развитие методов 3D-печати позволило существенно продвинуть разработку и создание линз с градиентно-изменяющейся диэлектрической проницаемостью [4].

Впервые возможность установки линзового коллиматора в безэховой камере исследовалась в [5]. Линзовые коллиматоры применяются в низкочастотных безэховых камерах [6]. Для формирования квазиплоской волны в некоторой области пространства удобнее использовать гиперболическую линзу. Обсуждается использование градиентной оптики [7] для создания коллиматора на основе плоской линзы в метровом диапазоне длин волн для конической безэховой камеры.

---

\* Автор, ответственный за переписку: Руслан Валерьевич Гильмутдинов, [psevduch777@gmail.com](mailto:psevduch777@gmail.com)

Таким образом, наметилась четкая тенденция в исследованиях применения линз для формирования требуемого распределения поля в некоторой области пространства при проведении радиофизических измерений.

В настоящее время увеличивается число исследований, посвящённых развитию бистатической радиолокации. Для измерений свойств объектов создаются все новые бистатические стенды [8, 9] с высокой степенью свободы перемещения объекта и приемо-передающих антенн. В [10] описана бистатическая установка, позволяющая измерять бистатическую эффективную площадь рассеяния малых объектов. В статье [11] представлена разработанная специальная методика калибровки сигнала при измерении коэффициента отражения от плоских образцов материалов на стенде для бистатических исследований. В работе [12] описан метод обработки сигналов во временной области при бистатических измерениях, позволяющий значительно снизить инструментальную погрешность измерений. В [13] 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. В работе [14] данный метод был доработан путем использования добавочной мишени.

При бистатических исследованиях характеристик рассеяния объектов возникает множество препятствий [15], не позволяющих получить приемлемую точность результатов. К основным погрешностям относятся инструментальные и методические [16]. Последние связаны с выбранным методом измерения характеристик [17]. Методическая погрешность вызвана конечными размерами образца [18]. Линза позволяет снизить это влияние за счет уменьшения амплитуды поля на краях образца при обеспечении широкой зоны с относительно небольшим изменением фазы поля в области объекта измерения.

Цель настоящего исследования – уменьшить влияние краевых эффектов, возникающих на краях образцов материалов, на измеряемые значения модуля коэффициента отражения (МКО) от материала путем применения специальной системы формирования распределения электромагнитного поля в области размещения измеряемого образца.

## Постановка задачи

В [19] путем численного моделирования показано, что применение антенны с корректирующей линзой при бистатических измерениях МКО позволяет уменьшить методическую погрешность, вызванную краевыми эффектами. Авторами настоящей статьи ранее было проведено исследование по

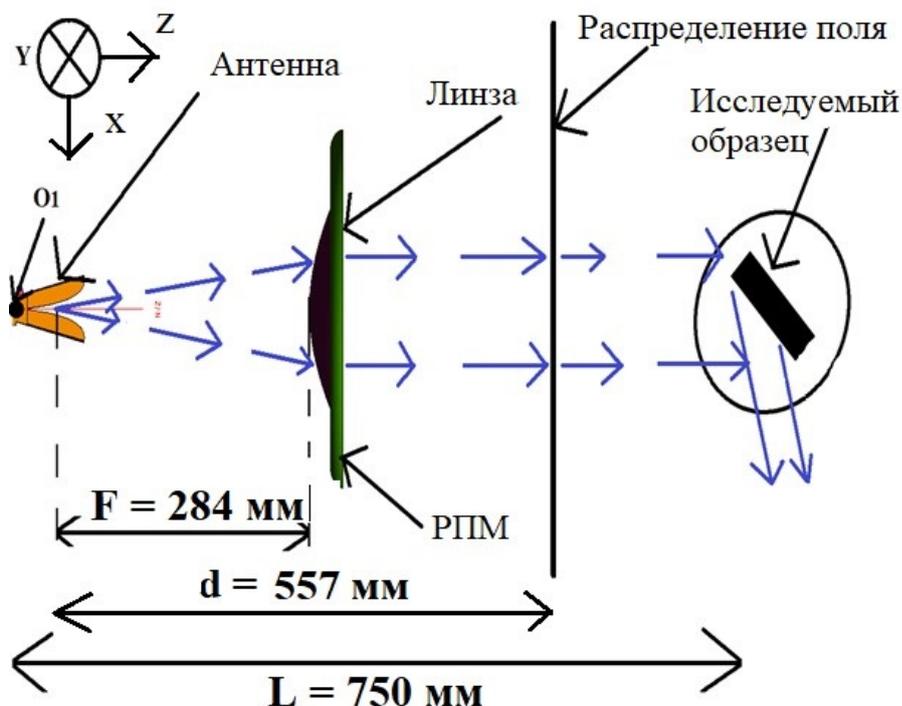


Рисунок 1 – Схема антенны с корректирующей линзой

оптимизации [20] параметров антенны с корректирующей линзой. С помощью численных методов в пакете для электродинамического моделирования FEKO проведено сравнение распределения поля,

формируемого антенной, находящейся в свободном пространстве, с полем, формируемым антенной с корректирующей линзой. Использована гиперболическая линза. Параметры разрабатываемой системы формирования поля подбирались таким образом, чтобы получить оптимальное амплитудно-фазовое распределение поля в области расположения образца. Типовые исследуемые образцы [21] представляют собой квадрат со стороной 200 мм. Была создана компьютерная модель линзы, и численным экспериментом подобраны параметры линзы для создания приемлемого амплитудно-фазового распределения поля. Линза с выбранными параметрами была напечатана на 3D-принтере из PLA-пластика. Диаметр линзы 160 мм выбран исходя из размеров исследуемых образцов, толщина 20 мм, фокусное расстояние и расстояние от вершины гиперболической поверхности объектива до примерного положения фазового центра антенны для заданного диапазона частот  $F = 284$  мм. Фокусное расстояние соответствует положению фазового центра антенны на частоте 9,5 ГГц.

На рисунке 1 изображена схема оптимизированной системы и ее основные параметры. Точка O1 — начало координат, совпадает с геометрическим центром основания антенны (задняя крышка).

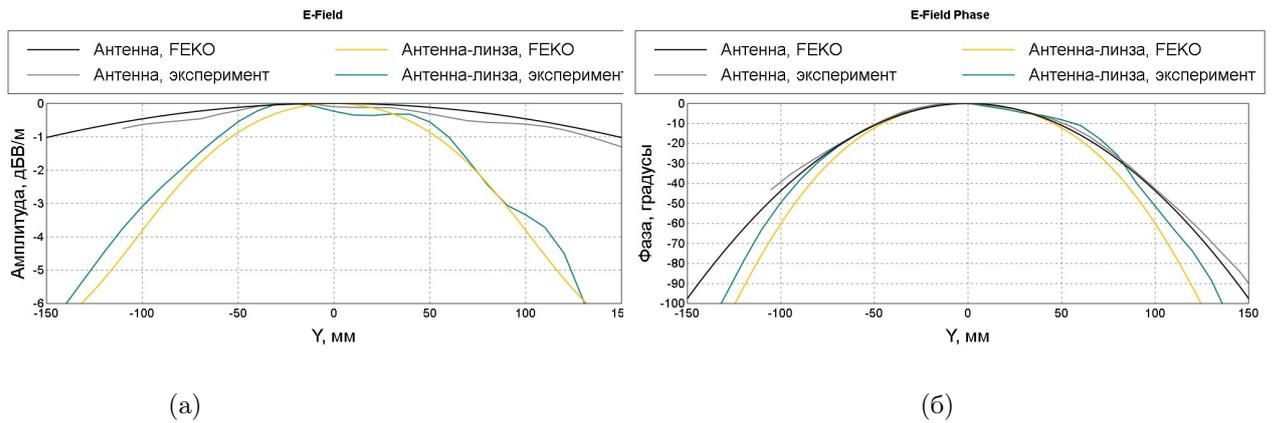


Рисунок 2 – Графики зависимости распределения а) амплитуды и б) фазы ближнего поля, E-плоскость,  $L = 750$  мм, 5 ГГц

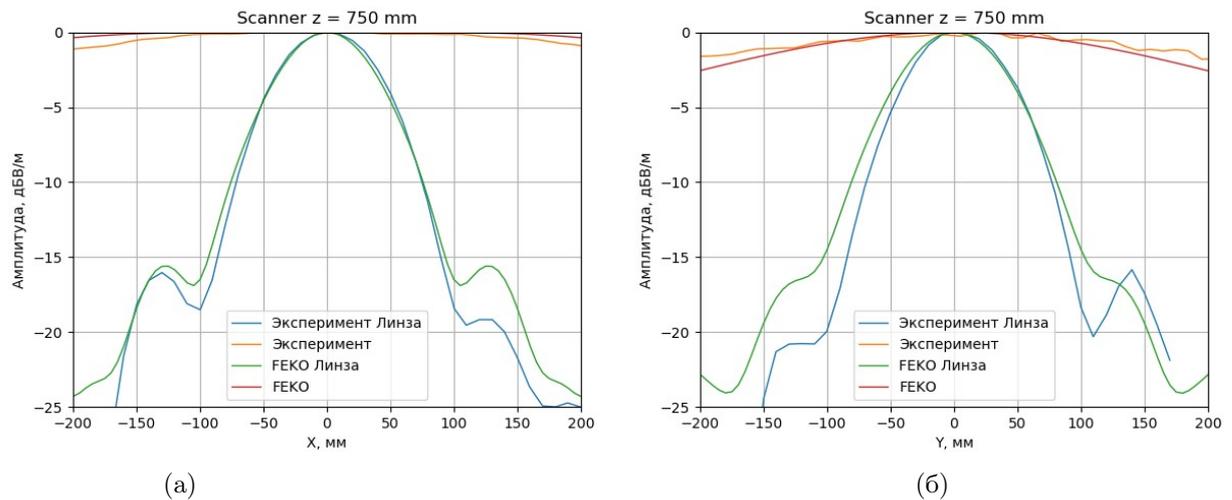


Рисунок 3 – Графики зависимости распределения амплитуды ближнего поля, а) H-плоскость, б) E-плоскость,  $L = 750$  мм, 10 ГГц

На рисунке 2 и фазовые срезы поля в E-плоскости антенны и антенны с корректирующей линзой (на рисунках обозначена как антенна-линза) на частоте 5 ГГц. На рисунке 3 изображены измеренные и рассчитанные амплитудные срезы в главных плоскостях антенны и антенны с корректирующей линзой на частоте 10 ГГц. Различия между экспериментальными и аналитическими значениями связаны с погрешностью определения материальных параметров радиопоглощающего материала (РПМ). Погрешности при фазовых измерениях, помимо упомянутых выше, связаны с позиционированием плоскости сканера. Видно, что измеренные значения фазы поля не соответствуют критерию квазиплоской волны. Однако использование метода замещения с высокой повторяемостью позиционирования образца позволяет проводить измерения при значительном изменении амплитуды и фазы поля от центра к краю

исследуемого образца. Заметим, что ширина пучка при компьютерном моделировании практически не меняется в диапазоне  $L = 700 - 1000$  мм.

В настоящей работе разработанные и напечатанные линзы были интегрированы в стенд для измерений бистатистических характеристик рассеяния. С помощью антенн с корректирующими линзами были получены угловые зависимости МКО для образцов материалов. Полученные результаты сравнивались с измерениями в квазиплоском поле, а также с результатами численного моделирования и аналитического расчета по формулам Френеля.

## Измерения МКО

Бистатистический стенд [22] для измерений МКО находится в безэховой камере и состоит из опорно-поворотного устройства, на котором располагается объект исследования, двух приёмно-передающих антенн, установленных на поворотных тележках, которые перемещаются в диапазоне углов  $10-85^\circ$ . Радиус вращения антенн при измерении в квазиплоском поле равен 2 м (рисунок 4).

При проведении измерений с помощью антенн с корректирующими линзами радиус вращения антенн составляет 950 мм. Радиус вращения антенн с корректирующими линзами выбран таким образом, чтобы обеспечить проведение измерения МКО при минимальном угле в  $15^\circ$ . Антенны с корректирующими линзами жестко связаны с тележками с помощью дополнительно установленных балок. Антенны с корректирующими линзами перемещаются в диапазоне углов  $15-85^\circ$ . Каждая линза установлена в проем радиопрозрачного экрана из пенопласта, который фиксируется на балке. Вокруг линз размещены диафрагмы из РПМ для устранения боковых лепестков диаграммы направленности, близких к главному лепестку. На рисунке 5 изображены антенны с корректирующими линзами, интегрированные в измерительный стенд.

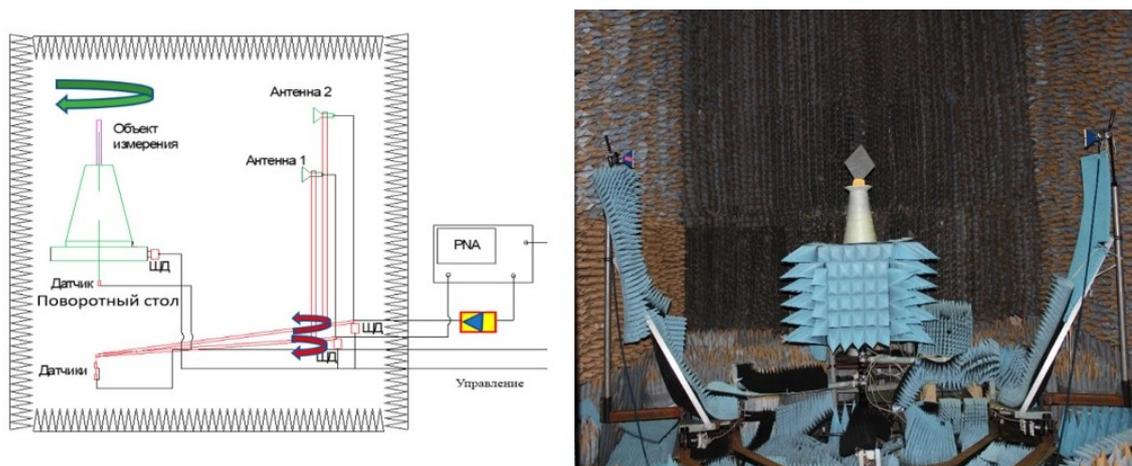


Рисунок 4 – Схема (а) и фотография (б) измерительного стенда

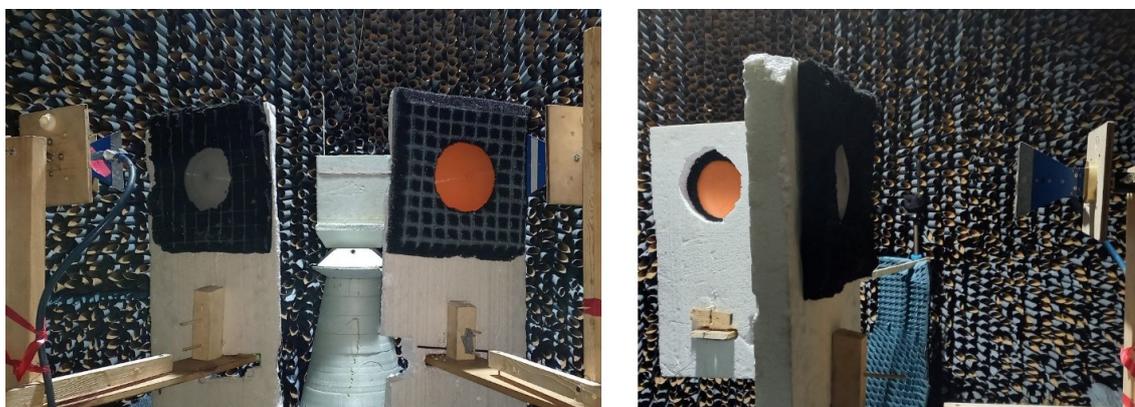


Рисунок 5 – Фотография антенн а) сзади б) сбоку с корректирующими линзами

В обеих конфигурациях измерительного стенда измерения МКО проводятся методом замещения. Сначала проводится измерение фона камеры,  $E_{\text{bkg}}(f, \varphi)$ , затем измеряется сигнал, отраженный от

металлической калибровочной пластины в зеркальном направлении,  $E_{\text{norm}}(f, \varphi)$ . После этого проводится измерение сигнала, отраженного от исследуемого образца в зеркальном направлении,  $E_{\text{sample}}(f, \varphi)$ . Далее, значения МКО (в децибелах) рассчитывается по следующей формуле:

$$K_0(f, \varphi) = 20 \lg \left| \frac{E_{\text{sample}}(f, \varphi) - E_{\text{bkg}}(f, \varphi)}{E_{\text{norm}}(f, \varphi) - E_{\text{bkg}}(f, \varphi)} \right|. \quad (1)$$

## Вычисления МКО

Значения МКО рассчитывались аналитически [23] для плоского бесконечного слоя материала, расположенного на проводящей подложке. Определим входной импеданс  $Z_{\text{вх}}$ :

$$Z_{\text{вх}} = Z_1 \frac{Z_2 - iZ_0 \operatorname{tg}(k_{1z}d)}{Z_0 - iZ_2 \operatorname{tg}(k_{1z}d)}, \quad (2)$$

где  $Z_1$ ,  $Z_2$  – импедансы исследуемого материала и металла соответственно;  $Z_0$  – импеданс свободного пространства;  $d$  – толщина исследуемого материала,  $k_{1z}$  – проекция волнового вектора в материале на ось,  $\varphi$  означает угол падения волны в свободном пространстве, угол  $\varphi_1$  – угол падения внутри исследуемого материала. При вертикальной (вектор  $\mathbf{E}$  перпендикулярен плоскости падения) и горизонтальной (вектор  $\mathbf{E}$  параллелен плоскости падения) поляризациях КО вычисляется по формулам ниже:

$$K_{\text{в.п}} = \frac{Z_{\text{вх}} \cos \varphi_1 - Z_0 \cos \varphi}{Z_{\text{вх}} \cos \varphi_1 + Z_0 \cos \varphi}; \quad (3)$$

$$K_{\text{г.п}} = \frac{Z_{\text{вх}}/\cos \varphi_1 - Z_0/\cos \varphi}{Z_{\text{вх}}/\cos \varphi_1 + Z_0/\cos \varphi}. \quad (4)$$

Численное исследование зависимости значений МКО от частоты и угла падения проводилось в программном пакете ФЕКО. Была создана компьютерная модель исследуемого плоского образца материала.

Расчет МКО материала в поле плоской волны, имитирующий измерения в дальней зоне антенны, проводился следующим образом. На объект исследования направлена плоская электромагнитная волна. Зеркально в дальней зоне рассчитывается отраженное поле. Рассмотрим модель численного эксперимента по измерению МКО с помощью антенны с корректирующей линзой. В модель заложено несколько приближений.

В реальном эксперименте есть большое количество помеховых сигналов, в первую очередь это прямое попадание сигнала из передающей антенны в приемную. Обычно такие сигналы стараются отсеять применением фильтрации во временной области. В данной модели помеховых сигналов нет, потому что не рассматривается приемная антенна. Вместо нее исследуется поле в дальней зоне.

Передающая антенна боковыми и задними лепестками также давала бы помеховый сигнал в дальнюю зону. Но этого практически не происходит за счет разбиения задачи по исследованию МКО образца при облучении антенной с корректирующей линзой на две отдельные подзадачи. В первой подзадаче получаем распределение поля, сформированного антенной с корректирующей линзой, в небольшой области пространства на плоскости прямо за линзой. Во второй подзадаче данное поле используется как источник излучения вместо системы формирования поля. Моделирование вращения антенны с корректирующей линзой вокруг исследуемого объекта вычислительно ресурсоемкая задача, поэтому данный подход помогает существенно ускорить процесс расчета. При достаточном количестве точек в заданной области и условии, что на краях поле существенно меньше, чем в центре, погрешности, связанные с пересчетом поля, оказываются незначительными.

Процесс расчета заключается в следующем.

1) В плоскости, проходящей через точку с координатами  $(0, 0, 557)$  (Рисунок 1) и перпендикулярной оси  $Z$  рассчитываются все компоненты электромагнитного поля. Область пространства, в которой оно рассчитывается, представляет собой квадрат со стороной 700 мм. Размер данной области пространства выбирается таким образом, чтобы на ее краях амплитуда поля была на 10 дБ меньше, чем в центре. Шаг сетки точек, в которых рассчитывается поле, определяется частотой излучения.

2) Полученное поле является источником для облучения исследуемого образца материала.

3) На рисунке 6 изображена схема облучения исследуемого объекта. Источник излучения (область пространства, содержащая ближнее поле антенны) вращается вокруг оси  $Y_2$ . Волновой вектор излучения,

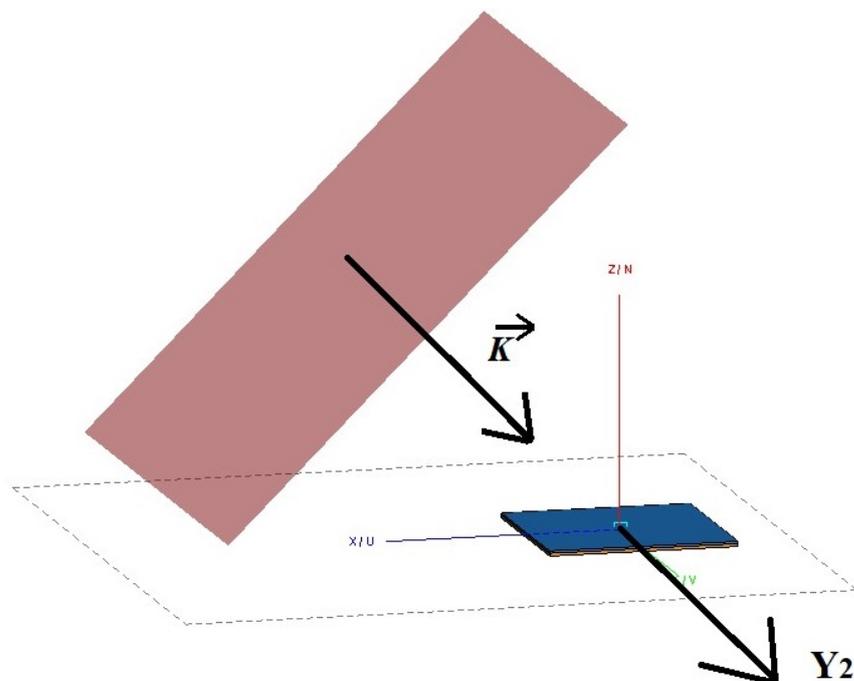


Рисунок 6 – Схема моделирования эксперимента по измерению МКО с помощью антенны с корректирующей линзой

$\mathbf{k}$ , направлен перпендикулярно плоскости, содержащей распределение ближнего поля антенны, вдоль радиуса вращения антенны. Такая схема эквивалентна повороту антенны вокруг центра исследуемого объекта по дуге окружности радиусом 750 мм. В качестве исследуемого образца выступает либо образец с материалом, либо металлическая пластина такого же размера. Результат рассчитывался в дальней зоне.

Для нормировки рассчитывается поле, отраженное от калибровочных образцов, представляющих собой металлическую подложку такой же формы и размера. МКО рассчитывается по формуле

$$K_0(f, \varphi) = 20 \lg \left| \frac{E_{\text{diel}}(f, \varphi)}{E_{\text{norm}}(f, \varphi)} \right|, \quad (5)$$

где  $E_{\text{diel}}(f, \varphi)$  – поле, отраженное от конфигурации с исследуемым материалом,  $E_{\text{norm}}(f, \varphi)$  – поле, отраженное от калибровочного образца. В нашем случае коэффициент отражения зависит от частоты  $f$  и угла падения  $\varphi$  (который равен углу отражения).

Значения поля были получены в диапазоне частот 4 – 10 ГГц и в секторе углов 0 – 80°. Расчет проводился методом моментов, характерный шаг сетки 1/12 длины волны в свободном пространстве.

## Анализ полученных результатов

Были проведены численные расчёты образца из магнетодиэлектрика [24] с измеренными материальными параметрами. На рисунке 7 представлены графики зависимости МКО от угла падения, полученные путем моделирования в поле антенны с корректирующей линзой и при облучении плоской волной. Отметим, что кривые МКО, полученные при облучении антенной с корректирующей линзой, имеют меньше флуктуаций по сравнению с зависимостями МКО, рассчитанными в поле плоской волны. Видно, что в диапазоне углов 0-40° значения МКО, полученные с использованием модифицированного поля, ближе к аналитическим значениям МКО, чем результаты, полученные при облучении плоской волной. Для углов падения больше 50° также кривые, полученные с использованием линзы, находятся ближе к аналитическим кривым, но поведение кривых уже больше отличается от аналитического расчета.

Рассмотрим экспериментальные и численные исследования рассеивающих свойств образца магнетодиэлектрика [25] с известными материальными параметрами в зависимости от частоты. В исследуемом диапазоне частот параметры материала, полученные на стенде измерения электрофизических параметров материалов и покрытий [25], принимают значения  $\epsilon' = 11 \dots 12$ ,  $\epsilon'' = 0,2 \dots 0,5$ ,  $\mu' = 0,7 \dots 2,8$ ,  $\mu'' = 0,8 \dots 1,3$ . Плоский образец в сечении имеет форму квадрата со стороной 200 мм.

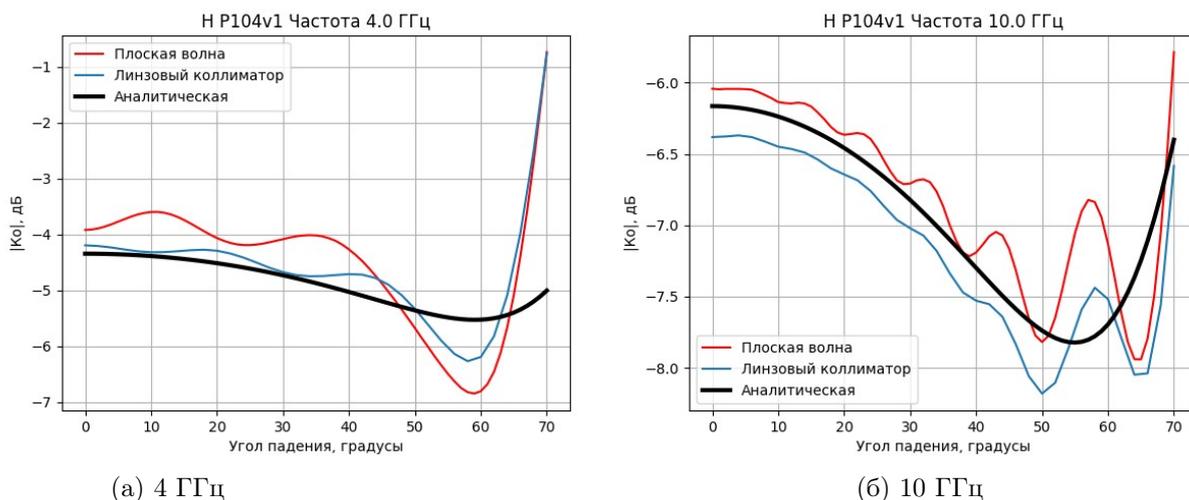


Рисунок 7 – Кривые зависимостей МКО от частоты, полученные при облучении образца различными способами, Н-поляризация

Перейдем к анализу результатов численного и аналитического расчётов и их сравнению с экспериментом.

На рисунке 8 представлены графики зависимости МКО от угла падения, полученные разными способами: моделирование в поле антенны с корректирующей линзой и при облучении плоской волной, а также при измерении в квазиплоском поле и с использованием антенн с корректирующими линзами. Видно, что в диапазоне углов 0-45° кривые МКО, рассчитанные в поле антенны с корректирующей линзой (кривые «ФЕКО линза»), ближе к аналитическим значениям МКО, чем результаты расчетов МКО в поле плоской волны (кривые «ФЕКО плоское»).

На частоте 4,5 ГГц (умещается 3 длины волны на образце при нормальном падении) две экспериментальные кривые хорошо различимы между собой и хорошо согласуются со своими расчетами. В нижней части исследуемого диапазона частот определяющей погрешностью измерений является именно методическая, связанная с дифракционными эффектами на краях образца. С увеличением частоты уменьшается влияние дифракционных эффектов.

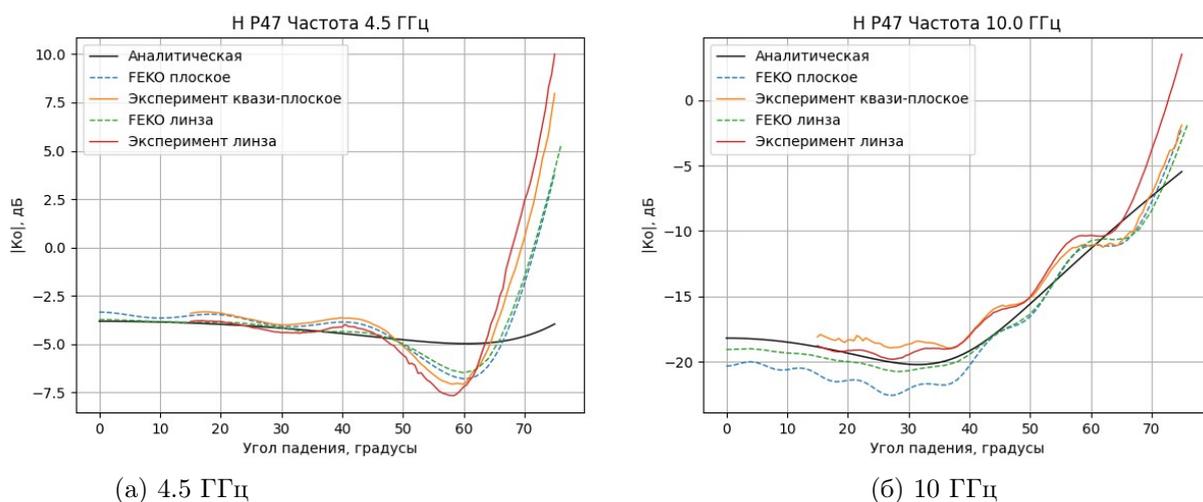


Рисунок 8 – Кривые зависимостей МКО от частоты, полученные при облучении образца различными способами, Н-поляризация

Исследуемый материал имеет интерференционный минимум (толщинный резонанс) вблизи частоты 10 ГГц, поэтому в верхней части исследуемого диапазона сами значения коэффициента отражения существенно меньше. На графиках, представленных на рисунке 8б), имеются более сильные отличия между результатами численных расчетов и эксперимента в плоском поле. Имеющиеся отличия между экспериментальными и расчетными кривыми в резонансной области могут быть связаны с неточностью

определения материальных параметров образца. Вблизи резонанса небольшое изменение в параметрах влечет сильное изменение в коэффициенте отражения. Отличия между результатами численных расчетов и аналитической кривой определяют методическую погрешность, которая составляет  $\pm 3$  дБ для плоского поля и  $\pm 1,5$  дБ при использовании линзы. С учетом таких методических погрешностей экспериментальные кривые описывают представленную аналитическую кривую. Результаты при использовании линзы лежат, очевидно, ближе к аналитической кривой, чем результаты для плоского поля.

Применение антенн с корректирующими линзами позволяет уменьшить методическую погрешность измерения МКО с 1 до 0,5 дБ при характерном значении МКО  $-5$  дБ и с 2,5 до 1 дБ при значении МКО  $-15$  дБ в области углов до  $50^\circ$ .

## 5. Заключение

Аналитическими, экспериментальными и численными методами исследованы характеристики рассеяния образцов материалов при облучении квазиплоским полем антенны и полем, сформированным антенной с корректирующей линзой. Проведенные исследования показали, что антенна с корректирующей линзой формирует электромагнитное поле с заданным распределением амплитуды в рабочей зоне измерительного стенда в широкой полосе частот.

Для верификации расчётных моделей была напечатана на 3D-принтере гиперболическая линза, и с помощью антенн с корректирующими линзами измерены характеристики рассеяния образцов магнитодиэлектрика с частотной дисперсией материальных параметров.

Показано, что антенну с корректирующей линзой можно использовать в диапазоне частот 4.5 – 10 ГГц и углов  $15-45^\circ$  для уменьшения методической погрешности, вызванной краевыми эффектами при измерении МКО материалов. Методическая погрешность уменьшается с 1,0 до 0,5 дБ при характерном значении МКО  $-5$  дБ и с 2,5 до 1 дБ при значении МКО  $-15$  дБ.

## Список литературы

- [1] Handbook of Antenna Technologies, Zhi Ning Chen (Editor), Springer 2016, section "Dielectric lens Antennas" by Fernandes C.A., Lima E.B. and Costa J.R. doi: [10.1007/978-981-4560-44-3](https://doi.org/10.1007/978-981-4560-44-3)
- [2] Зелкин Е.Г., Петрова Р.А. Линзовые антенны. М.: Советское радио, 1974.
- [3] Garcia N. C., Chisum J. D. High-Efficiency, Wideband GRIN Lenses with Intrinsically Matched Unit Cells // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 68, no. 8, pp. 5965-5977, Aug. 2020, doi: [10.1109/TAP.2020.2990289](https://doi.org/10.1109/TAP.2020.2990289)
- [4] Piksa, Petr & Zvanovec, Stanislav & Cerny, Petr. (2011). Elliptic and Hyperbolic Dielectric Lens Antennas in mm-Waves. Radioengineering. 20. 270-275.
- [5] Mentzer J. R. The Use of Dielectric Lenses in Reflection Measurements // Proceedings of the IRE, vol. 41, no. 2, pp. 252-256, Feb. 1953, doi: [10.1109/JRPROC.1953.274215](https://doi.org/10.1109/JRPROC.1953.274215)
- [6] Balabukha N.P., Menshikh N.L., Shapkina N.E. A Study of Electromagnetic Fields in Conical and Pyramidal Tapered Anechoic Chambers. Moscow University Physics Bulletin, 2021, Vol. 76, No. 3, pp. 126-135. doi: [10.3103/s0027134921030024](https://doi.org/10.3103/s0027134921030024), EDN: [YDSFIY](https://www.edn.net/YDSFIY)
- [7] Korolev D.P., Menshikh N., Solosin V., Poddubny D. Flat Lens as a Collimator for Tapered Anechoic Chamber // 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon), Saint Petersburg, Russian Federation, 2024, pp. 652-655, doi: [10.1109/ElCon61730.2024.10468408](https://doi.org/10.1109/ElCon61730.2024.10468408)
- [8] Röding M., Sommerkorn G., Häfner S., Ihlow A., Jovanoska S., Thomä R. S. A Double-Arch Positioner for Bistatic RCS Measurements with Four Degrees of Freedom. Proc. of the 47th European Microwave conf. Oct. 2017. doi: [10.23919/EuMC.2017.8231083](https://doi.org/10.23919/EuMC.2017.8231083)
- [9] Saleh H., Geffrin J.-M., Tortel H. Bistatic scattering measurement on low permittivity spheroidal objects // 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), Paris, 2017, pp. 259-262. doi: [10.23919/EuCAP.2017.7928273](https://doi.org/10.23919/EuCAP.2017.7928273)
- [10] Daout F., Schmitt F., 2014 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA), Antibes Juan-les-Pins, France, 16-19 Nov. 2014. doi: [10.1109/CAMA.2014.7003455](https://doi.org/10.1109/CAMA.2014.7003455)
- [11] Umari M. H., Ghodgaonkar D. K., Varadan V.V., Varadan V.K. A free-space bistatic calibration technique for the measurement of parallel and perpendicular reflection coefficients of planar samples

- // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 40, no. 1, pp. 19-24, Feb. 1991. doi: [10.1109/19.69942](https://doi.org/10.1109/19.69942)
- [12] Fedorov S.A., Gilmutdinov R.V., Menshikh N.L. Reducing Error of Position When Measuring the Bistatic Reflection Coefficient // 2020 7th All-Russian Microwave Conference (RMC), 2020, pp. 276-278, doi: [10.1109/RMC50626.2020.9312243](https://doi.org/10.1109/RMC50626.2020.9312243), EDN: SYIAMJ
- [13] Гильмутдинов Р.В., Меньших Н.Л., Федоров С.А., Брук Л.В. Методика обработки сигналов, позволяющая уменьшить погрешности измерений бистатических характеристик рассеяния образцов материалов. // Журнал радиоэлектроники. 2024. №. 10. doi: [10.30898/1684-1719.2024.10.10](https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.10.10), EDN: LJZIAE
- [14] Fedorov S.A., Menshikh N.L., Gilmutdinov R.V., Korolev D.P. Improving the Accuracy of Bistatic Measurements Using a Reference Target // 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon), Saint Petersburg, Russian Federation, 2024, pp. 637-640, doi: [10.1109/ElCon61730.2024.10468125](https://doi.org/10.1109/ElCon61730.2024.10468125)
- [15] Fedorov S.A., Menshikh N.L., Gilmutdinov R.V., Solosin V. S. Comparison of the Measurement Accuracy of Material Sample Specular Reflection Coefficient for Two Types of Measuring Facilities // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), 2021, pp. 332-336, doi: [10.1109/RSEMW52378.2021.9494032](https://doi.org/10.1109/RSEMW52378.2021.9494032), EDN: DYQWUA
- [16] Фридман А. Э. Основы метрологии. Современный курс. СПб.: НПО "Профессионал 2008. 284 с.
- [17] Gilmutdinov R. V., Krasnolobov I. I., Menshikh N. L., Fedorov S. A. Procedural Measurement Error in Specular Reflection Coefficient from Planar Samples Using Two Different Types of Test Stands. Measurement Techniques, 2021, vol. 64, pp. 481-487, doi: [10.1007/s11018-021-01957-7](https://doi.org/10.1007/s11018-021-01957-7), EDN: NVSVAQ
- [18] Balabukha N. P., Fedorov S.A., Gilmutdinov R.V., Menshikh N. L., Sapoznikov D. V. The Impact of the Sizes of a Planar Sample to Methodical Errors in Measuring the Specular Reflection Coefficient // 2021 Antennas Design and Measurement International Conference (ADMInC), Saint Petersburg, Russian Federation, 2021, pp. 54-57, doi: [10.1109/ADMInC54110.2021.9671006](https://doi.org/10.1109/ADMInC54110.2021.9671006), EDN:EYYASH
- [19] Menshikh N.L., Fedorov S.A., Gilmutdinov R.V. Application of Antenna - Lens System for Measurement of Bistatic Parameters of Materials // International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT), Astrakhan, Russian Federation, 2022, pp. 1-4, doi: [10.1109/ICCT56057.2022.9976617](https://doi.org/10.1109/ICCT56057.2022.9976617)
- [20] Gilmutdinov R.V., Fedorov S.A., Menshikh N.L. Modernization of the Electromagnetic Field Formation System for Bistatic Measurements // Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, Russian Federation, 2023, pp. 92-95, doi: [10.1109/RSEMW58451.2023.10202125](https://doi.org/10.1109/RSEMW58451.2023.10202125)
- [21] Гильмутдинов Р.В., Меньших Н.Л., Федоров С.А. Краевые эффекты в бистатических измерениях характеристик рассеяния образцов материалов. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №10. doi: [10.30898/1684-1719.2020.10.6](https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.10.6), EDN:EHDSUM
- [22] Гильмутдинов Р. В., Меньших Н. Л., Федоров С. А. Повышение точности измерений бистатических характеристик рассеяния материалов образцов различных конфигураций. Измерительная техника, 73(6), 46-54 (2024). doi: [10.32446/0368-1025it.2024-6-46-54](https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2024-6-46-54), EDN: ZFEEQA
- [23] Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 503 с.
- [24] Semenenko V. N., Chistyayev V. A., Politiko A. A., Kibets S. G., Complex permittivity and permeability of composite materials based on carbonyl iron powder over an ultrawide frequency band. Physical Review Applied, 16(1), APS (2021). doi: [10.1103/PhysRevApplied.16.014062](https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.16.014062), EDN: KKKPQC
- [25] Иванова В.И., Кибец С.Г., Краснолобов И.И., Лагарьков А.Н., Политико А.А., Семененко В.Н., Чистяев В.А. Разработка широкополосного радиопоглощающего покрытия с высокими эксплуатационными свойствами // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2016. №7. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jul16/5/text.pdf>. EDN: WNDAUB
- [26] Семененко В.Н., Чистяев В.А., Политико А.А., Басков К.М. Стенд для измерения в свободном пространстве радиофизических параметров материалов в сверхширокой полосе сверхвысоких частот // Измерительная техника. 2019. №2, 55-59. doi: [10.32446/0368-1025it.2019-2-55-59](https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-2-55-59)

**Usage an antenna with a corrective lens  
to measurement scattering parameters of materials  
on a bistatic facility**

**R.V. Gilmutdinov<sup>\*1</sup>, N.L. Menshikh<sup>1</sup>, S.A. Fedorov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Institute for Theoretical and Applied Electromagnetics of RAS, Moscow, Russia

<sup>\*</sup> psevduch777@gmail.com

**Abstract**

In this paper a bistatic measuring facility for the centimeter wavelength range, modified by using antennas with correcting lenses as a receiver and transmitter is presented. An optimized lens with the calculated parameters was printed on a 3D printer (2 pieces). This design allows creating a field distribution with acceptable characteristics in the area of the studied object in a wide frequency band. When measuring the specular reflection coefficient of a material in free space, the measurement results are greatly influenced by diffraction effects at the edges of the sample, which can be reduced by forming an optimal field in the area of the studied sample. Using the method of moments, numerical simulation of measuring the specular coefficient on a modified bistatic facility with a lens and in a flat field were carried out. Experimental studies of the reflection coefficient from the material in a quasi-flat field and in the field created by an antenna with a correcting lens were carried out. The results of calculations and experiments showed that the use of an antenna with a correcting lens allows increasing the accuracy of measuring the specular reflection coefficient in a wide frequency and angular ranges.

**Key words:** FEKO, method of moments, hyperbolic lens, edge effects, bistatic measurements, reflection coefficient, anechoic chamber

---