

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.10.6>

УДК 537.874.2

КРАЕВЫЕ ЭФФЕКТЫ В БИСТАТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ ОБРАЗЦОВ МАТЕРИАЛОВ

Р. В. Гильмутдинов¹, Н. Л. Меньших^{1,2}, С. А. Федоров^{1,2}

¹Московский физико-технический институт (НИУ),
141700, г. Долгопрудный, Институтский пер. 9

²Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН,
125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13

Статья поступила в редакцию 7 октября 2020 г.

Аннотация. В данной работе определялись ошибки, возникающие за счет краевых эффектов при измерении модуля коэффициента отражения (МКО) и при нахождении угла Брюстера. Рассматривалось влияние краевых эффектов на характеристики рассеяния образцов материалов с различной геометрией. Методом моментов в программе FEKO и аналитически по формулам Френеля исследован модельный материал с не зависящими от частоты параметрами среды. Показано путем численного моделирования, что расположение образца относительно поляризации падающей волны практически не влияет на величину МКО, наблюдается увеличение угла Брюстера в зависимости от частоты. Исследовался коэффициент отражения от квадратного образца с радиопоглощающим материалом (РПМ) на металлической подложке. Проведены измерения его характеристик рассеяния на стенде для бистатических измерений, полученные результаты находятся в соответствии с расчетными данными, полученными методом моментов, и аналитическими. Выявлено заметное влияние краевых эффектов на коэффициент отражения от образца материала, особенно вблизи угла Брюстера.

Ключевые слова: бистатические измерения, краевые эффекты, коэффициент отражения, метод моментов, FEKO, безэховая камера.

Abstract. This work is devoted to studying errors emerging by the edge effects when measuring the reflection coefficient (R) and when finding Brewster angle. The impact

of edge effects on the scattering characteristics of planar material samples with different geometries was considered. The method of moments in the FEKO program and analytical calculations using Fresnel formulas are used to study a model material with frequency-independent parameters of the medium. A plane linearly polarized wave falling on the object was studied. For each incidence angle of the wave, the electromagnetic field reflected from the object in the mirror direction was calculated. To calibrate the received signal a reference metal plate of the same size as the size of sample under study was used. To estimate the contribution of the finite-size of the sample in the of reflection coefficient, the simulation results were compared with analytical calculations using Fresnel formulas. The results of the electrodynamic simulation of the characteristics of the model material showed that the position of the sample relative to the polarization of the incident wave does not affect the R value; an increase in Brewster angle depending on the frequency was observed. The reflection coefficient of a square sample with a radar absorbent material (RAM) on a metal substrate was investigated. Measurements of the sample scattering characteristics were carried out in an indoor electromagnetic test bistatic facility (anechoic chamber) in ITAE RAS. The experimental results are in accordance with the calculated data obtained by the method of moments and analytical data. For the sample under study, the value of Brewster angle was not determined due to the fact that this value is outside the measurement range. A significant influence of edge effects on the reflection coefficient of the material sample was revealed, especially for angles closed to Brewster angle.

Key Words: bistatic measurements, edge effects, reflection coefficient, method of moments, FEKO, anechoic chamber.

Введение

В последнее время в литературе наметилась четкая тенденция увеличения числа исследований, посвященных бистатическим измерениям. Все чаще обсуждаются достоинства применения двухпозиционной радиолокации [1], использования бистатики в передаче сигналов. Особый интерес вызывает

исследование бистатических радиолокационных свойств рассеяния типовых целей и различных стелс-объектов [2-4]. Большое значение двухпозиционное рассеяние радиоволн получило в геофизических методах наблюдения за процессами на Земле [5]. Современные методы позволяют проводить численное моделирование и экспериментальное исследование характеристик рассеяния объектов. Для измерений свойств объектов создаются все новые бистатические стенды [6-7], имеющие актуальные возможности для проведения экспериментов на достойном уровне. В частности, в [8-9] показана возможность измерения объектов с малыми значениями ЭПР и применениями методов регулирования мощности для уменьшения ошибок измерения фона. Большой интерес вызывает исследование характеристик рассеяния плоских магнитодиэлектриков при падении плоской волны под углами, отличными от нормального. В работе [10] представлен стенд для бистатических исследований и разработана специальная методика калибровки при измерении коэффициента отражения плоских образцов материалов. Сегодня особенно актуальна задача по исследованию бистатических свойств рассеяния образцов композитных РПМ. Поглощающие свойства таких материалов на основе ячеистых метаповерхностей исследовались в работах [11-12]. Авторы также провели численный расчет характеристик рассеяния данных метаповерхностей. В работе [13] исследованы численными методами двухпозиционное рассеяние плоской волны на металлической треугольной пластине с характерными размерами много большими длины волны, изучены механизмы возникновения реберных волн, вторичной дифракции.

При проведении бистатических измерений возникает множество трудностей, не позволяющих получить высокую точность результатов. В частности, существует значительная погрешность измерения характеристик рассеяния образцов, связанная с конечностью их размеров. Известно, что диаграммы обратного рассеяния для квадратного образца зависят от ориентации ребер квадрата относительно поляризации падающей волны [14].

Целью настоящей работы является определение ошибок, возникающих за счет краевых эффектов при измерении модуля коэффициента отражения (МКО) различных образцов материалов и положений ребер относительно поляризации на бистатическом стенде, разработанном в ИТПЭ РАН [15-16], а также уменьшение погрешности в определении положения угла Брюстера.

1. Исследование характеристик модельного материала

Под краевыми эффектами будем понимать совокупность всех дифракционных эффектов на краях пластины. При дифракции падающей волны на краях пластины возникают токи, дающие вклад в поле рассеяния. Эти токи могут также набегать на другие края пластины и рассеиваться на них [13], что обычно называют вторичной дифракцией.

Влияние краевых эффектов на характеристики рассеяния объектов при бистатических измерениях исследовалось в серии численных и натуральных экспериментов. Для этого рассматривались зависимости МКО для различных образцов материалов и различных положений образца относительно поляризации падающей волны. На стенде для измерения двухпозиционной диаграммы рассеяния (ДДР) были проведены экспериментальные исследования МКО при зеркальном отражении от плоского образца, в зависимости от угла падения плоской волны на материал. Эти результаты были сопоставлены с соответствующими численными расчетами в электродинамическом пакете FEKO. Полученные данные сравнивались с аналитическими расчетами.

Чтобы исключить влияние всех факторов, кроме краевых эффектов, рассмотрим простейший случай и проведем расчеты характеристик рассеяния для материала, чьи параметры не зависят от частоты. Для исследования зависимости МКО от угла падения и частоты была создана компьютерная модель в программном пакете FEKO со следующими параметрами материала. Плоский образец однослойного покрытия имеет размеры 10×10 см. Слой диэлектрика с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 5 + i5$ и магнитной проницаемостью $\mu = 1$, толщиной 10 мм, находится на подложке из идеального проводника толщиной 2 мм.

На исследуемый объект падает плоская линейно-поляризованная волна. Для каждого угла падения волны рассчитывается поле в дальней зоне, зеркально отраженное от объекта. Помимо исследуемого образца объектом является калибровочная металлическая пластина такого же размера для нормировки полученного сигнала.

Численное моделирование характеристик рассеяния проводилось в диапазоне частот 3 – 12 ГГц с шагом 500 МГц и при углах падения и отражения в диапазоне 0 – 80° от нормали с шагом 1°. Вычисления производились с использованием метода интегральных уравнений, с характерным шагом сетки $\frac{1}{12}$ длины волны в свободном пространстве. Исследовалась только ко-компонента поля. Положение образца зависит от ориентации ребер квадрата относительно вектора \mathbf{E} . Обозначим диагональным расположением образца случай, когда стороны квадрата образуют угол 45° с вектором \mathbf{E} . Обозначим параллельным расположением случай, когда вектор \mathbf{E} параллелен двум сторонам квадрата. Общий вид компьютерной модели исследования характеристик рассеяния образца при диагональном расположении изображены на рисунке 1 для двух типов поляризации: Н-поляризации (вектор \mathbf{E} лежит в плоскости падения) и V-поляризации (вектор \mathbf{E} перпендикулярен плоскости падения).

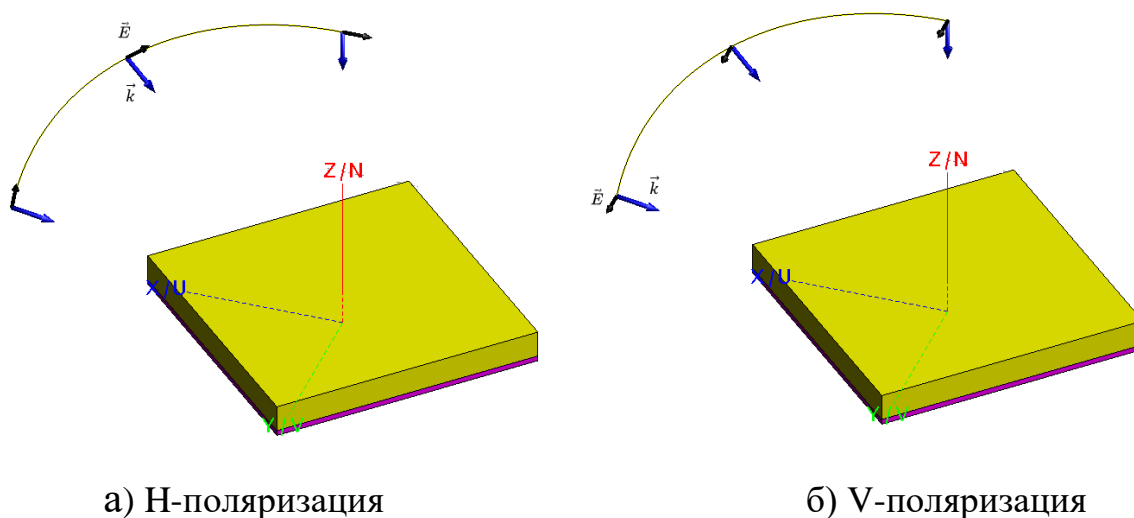


Рис.1. Общий вид компьютерной модели: слой диэлектрика на металле для диагонального расположения образца. а) горизонтальная поляризация, б) вертикальная поляризация.

Из полученных данных выбирались те, в которых угол падения был равен углу отражения. МКО (в децибелах) определяется как $K_0(f, \varphi) = 20 \lg \left| \frac{E_{\text{diel}}(f, \varphi)}{E_{\text{norm}}(f, \varphi)} \right|$, где $E_{\text{diel}}(f, \varphi)$ – напряженность поля, отраженного от образца, $E_{\text{norm}}(f, \varphi)$ – напряженность поля, отраженного от металлической пластины. В нашем случае коэффициент отражения зависит от угла падения φ (который равен углу отражения) и частоты f .

Для оценки влияния размеров образца на коэффициент отражения, результаты моделирования сравнивались с аналитическими расчетами, сделанными по формулам Френеля [17] для плоского бесконечного слоя материала, расположенного на проводящей подложке. На рисунке 2 изображен ход лучей и основные параметры, необходимые для расчета. Если определить входной импеданс как $Z_{\text{in}} = \frac{Z_2 - iZ_0 \text{tg}(k_{1z}d)}{Z_0 - iZ_2 \text{tg}(k_{1z}d)} Z_1$, где k_{1z} проекция волнового вектора в РПМ на ось z , то МКО рассчитывается по формулам

$$K_V = \left| \frac{\frac{Z_{\text{in}}}{\cos(\varphi_1)} - \frac{Z_0}{\cos(\varphi)}}{\frac{Z_{\text{in}}}{\cos(\varphi_1)} + \frac{Z_0}{\cos(\varphi)}} \right|, K_H = \left| \frac{Z_{\text{in}} \cos(\varphi_1) - Z_0 \cos(\varphi)}{Z_{\text{in}} \cos(\varphi_1) + Z_0 \cos(\varphi)} \right| \quad (1)$$

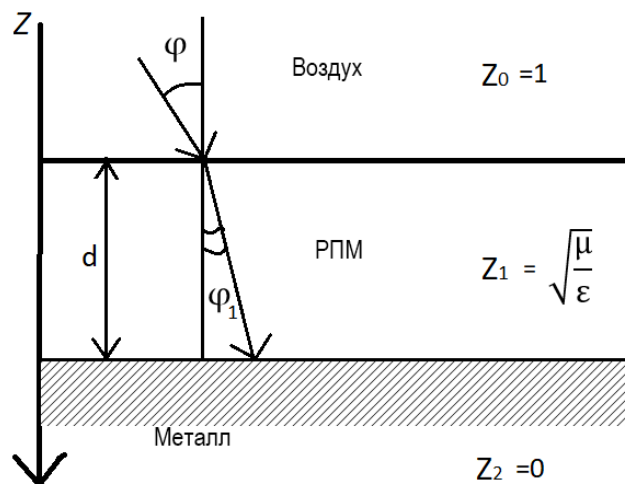


Рис. 2. Схема аналитического расчета МКО от слоистого образца.

На рисунке 3 изображена двумерная картина зависимости МКО от угла падения и частоты при Н-поляризации и для различных положений образца относительно поляризации. Результаты расчета для обоих положений образца

выглядят практически одинаково, нет никаких структурных различий. Заметим, что с ростом частоты увеличивается положения угла Брюстера. Так, например, на частоте 3,5 ГГц угол Брюстера составляет 55° , а на частоте 9 ГГц он равен 65° . При углах выше 70° коэффициент отражения быстро приближается к 1 (0 дБ). Можно отметить, что угол Брюстера в отсутствие краевых эффектов и слоистой структуры для данной среды равен $69,1^\circ$. На частотах выше 6 ГГц коэффициент отражения слабо меняется от частоты, т.е. пластинка размером всего две длины волны уже подходит для таких экспериментальных исследований.

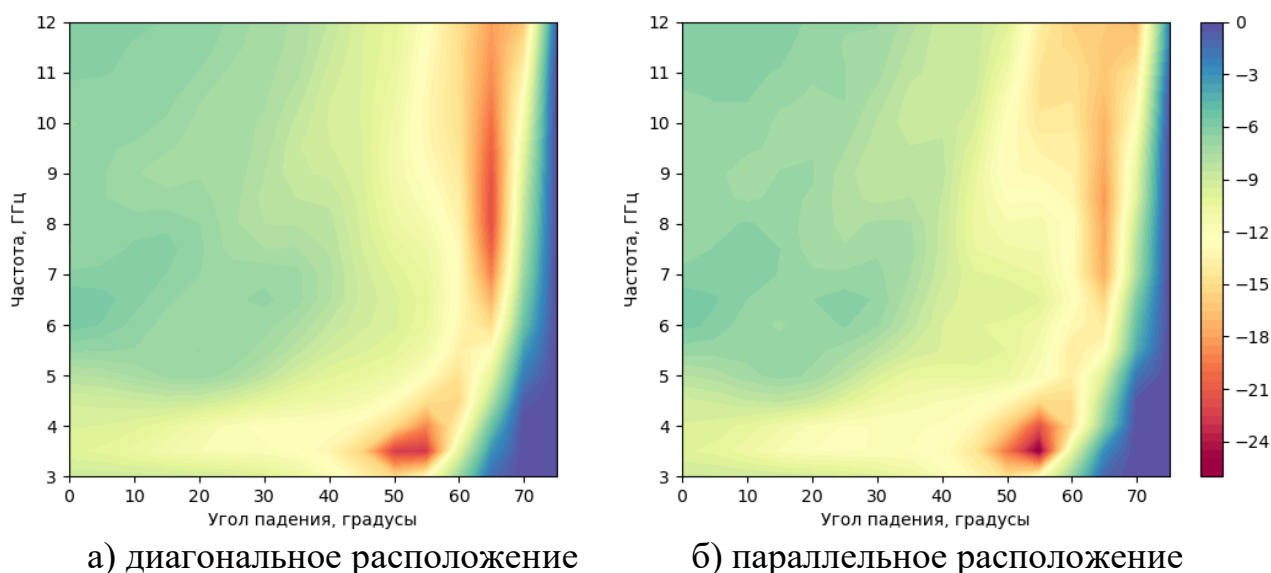


Рис. 3. Зависимость МКО от частоты и угла падения при Н-поляризации волны
а) диагональное и б) параллельное расположение образца.

На рисунке 4 представлены графики зависимости МКО от угла падения при частоте 10 ГГц для обоих положений образца. Видно, что результаты вычислений, проведенных на ФЕКО, согласуются с аналитическими кривыми, полученными по формулам Френеля. При Н-поляризации наблюдается существенное уменьшение значений МКО, полученных численным методом, по сравнению с аналитическим расчётом в области угла Брюстера. Численные кривые для обоих расположений образца относительно поляризации волны колеблются при углах, меньших угла Брюстера. Эти кривые отличаются от аналитической кривой небольшим вертикальным сдвигом, в целом повторяя ее

форму. Отличия между аналитическими и численными кривыми обуславливаются только краевыми эффектами. При этом вблизи угла Брюстера отличия полученных значений МКО могут составлять до 10 дБ в зависимости от частоты. Несмотря на меньшее влияние краевых эффектов на высоких частотах на характеристики рассеяния, угол Брюстера рассчитанный методом моментов меньше, чем угол, полученный аналитическим путем.

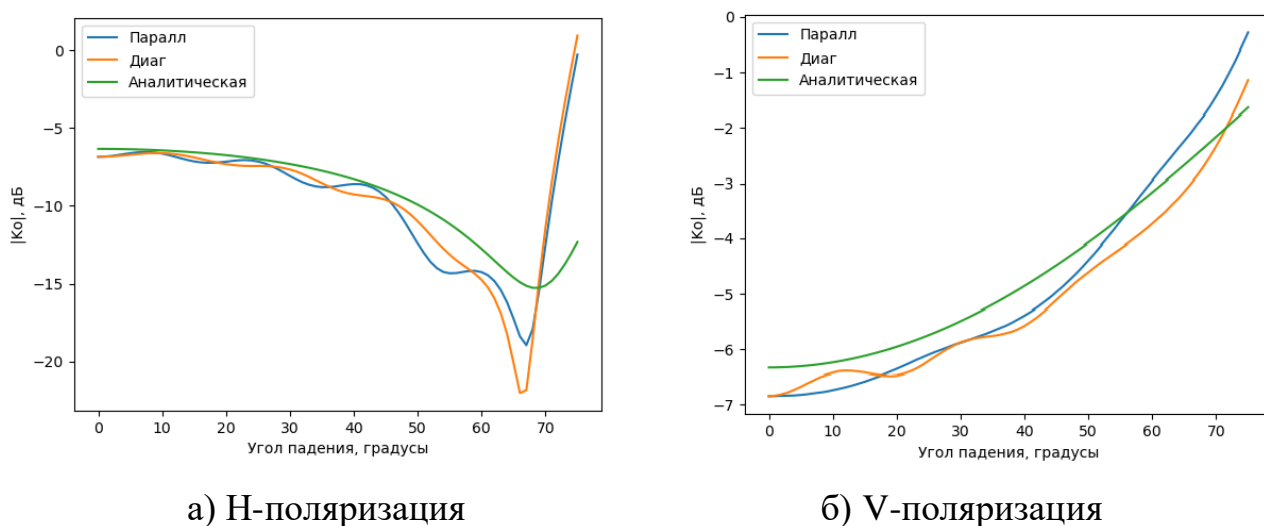


Рис. 4. Графики зависимостей МКО от угла падения при различных положениях образца и различных поляризациях на частоте 10 ГГц.

2. Исследуемый образец РПП

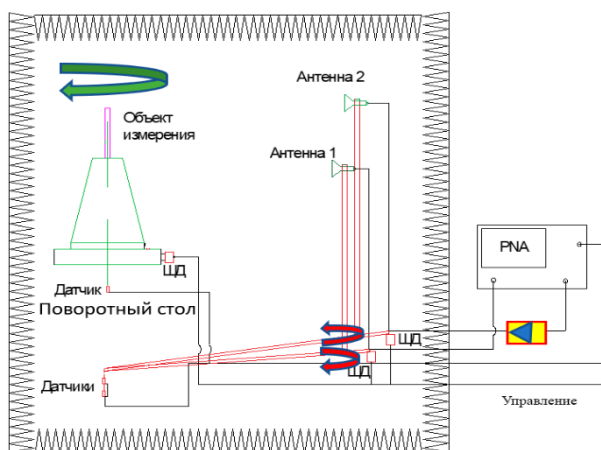
Были проведены экспериментальные исследования рассеивающих свойств образца магнетодиэлектрика [18] с известными материальными параметрами, меняющимися в зависимости от частоты. В исследуемом диапазоне частот параметры материала, измеренные на стенде [19], принимают значения $\varepsilon' = 11 \dots 12$, $\varepsilon'' = 0,2 \dots 0,5$, $\mu' = 0,7 \dots 2,8$, $\mu'' = 0,8 \dots 1,3$. Плоский образец в сечении имеет форму квадрата со стороной 20 см. Толщина РПП составляет 1,48 мм, толщина металлической подложки – 3 мм. Защитное лакокрасочное покрытие имеет пренебрежимо малую толщину и в расчетах не учитывалось.

Для проверки результатов измерения была создана приближенная к условиям эксперимента компьютерная модель в FEKO для расчета коэффициента отражения методом интегральных уравнений. Моделирования

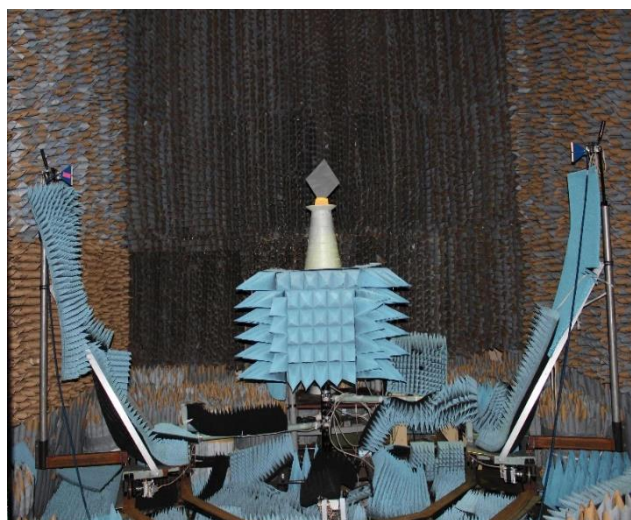
проводились аналогично вычислениям для модельного диэлектрика с той лишь разницей, что характеристики реального магнитодиэлектрика задавались кусочно-линейной функции в диапазоне 3-14 ГГц с шагом 500 МГц. Расчеты проводились в диапазоне 3-14 ГГц с шагом 100 МГц, и углам падения и отражения в диапазоне $0 - 80^\circ$ с шагом 1° .

3. Схема и принцип работы экспериментальной установки

Стенд для измерения МКО состоит из опорно-поворотного устройства (ОПУ), на котором закрепляется объект измерения, передающей и приемной антенн 1 и 2, которые вращаются по дуге окружности на жестко связанных с центром вращения тележках, микроволнового оборудования и системы управления (рисунок 5а). Оси вращения антенн и поворотного стола совпадают. Вращение осуществляется с помощью шаговых двигателей (ШД). Тележки перемещаются в диапазоне углов от 10 до 75° . Для контроля положения антенн и объекта измерения используются датчики поворота.



а) схема



б) фотография

Рис. 5. Блок схема (а) и фотография (б) экспериментальной установки.

Тележки, установленные на рельсах, и ОПУ находятся в безэховой камере размером $5,0 \times 5,0 \times 3,0$ м. Безэховая камера и механические части конструкции стенда покрыты радиопоглощающим материалом. Объект измерения устанавливается на полую пенопластовую опору, закрепленную на ОПУ. На

рисунке 5б представлена фотография механической части стенда. Расстояние между антенной и объектом измерения составляет 2,0 м.

На стенде используются широкополостные антенны с шириной луча более 30° , что позволяет обеспечить рабочую зону диаметром 20 см на частоте 8 ГГц с неравномерностью фазы $\pm\pi/16$. Таким образом, можно считать, что исследуемый образец находится в дальней зоне антенны.

Были проведены экспериментальные исследования МКО с теми же двумя положениями образца относительно поляризации падающей волны.

Эксперимент проводится в три этапа:

1. Измерение сигнала, отраженного от исследуемого образца в зеркальном направлении, $E_{\text{diel}}(f, \varphi)$.
2. Измерение сигнала, отраженного от металлической калибровочной пластинки в зеркальном направлении (нормировка), $E_{\text{norm}}(f, \varphi)$.
3. Измерение сигнала в отсутствии образца (фон камеры), $E_{\text{bkg}}(f, \varphi)$.

Далее значение МКО (в децибелах) вычисляется по следующей формуле:

$$K_0(f, \varphi) = 20 \lg \left| \frac{E_{\text{diel}}(f, \varphi) - E_{\text{bkg}}(f, \varphi)}{E_{\text{norm}}(f, \varphi) - E_{\text{bkg}}(f, \varphi)} \right| \quad (2)$$

Измерения проводились в диапазоне частот 2,6-14 ГГц и в диапазоне углов падения $10-75^\circ$.

4. Анализ полученных результатов

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

На рисунке 6 представлены графики зависимости МКО от угла падения при частоте 10 ГГц для обеих поляризаций и различных положений образца. При углах больше 40° результаты вычислений, проведенных на ФЕКО, согласуются с аналитическими кривыми, полученными по формулам Френеля. При углах меньше 40° расчетные значения, полученные на ФЕКО, на несколько децибел меньше, чем значения, полученные аналитическим путем по формулам (1), что обусловлено конечными размерами образца. Отсутствуют структурные

различия между экспериментальными и численными результатами. Во всех случаях результаты эксперимента лежат ниже на 1,5 – 3 дБ, чем значения МКО, полученные на ФЕКО. Отличия связаны с неточностью определения материальных параметров образца. На исследованном образце не было установлено значение угла Брюстера в связи с большими значениями материальных параметров РПП. Аналитическое значение положения угла Брюстера для данного РПП больше 80° .

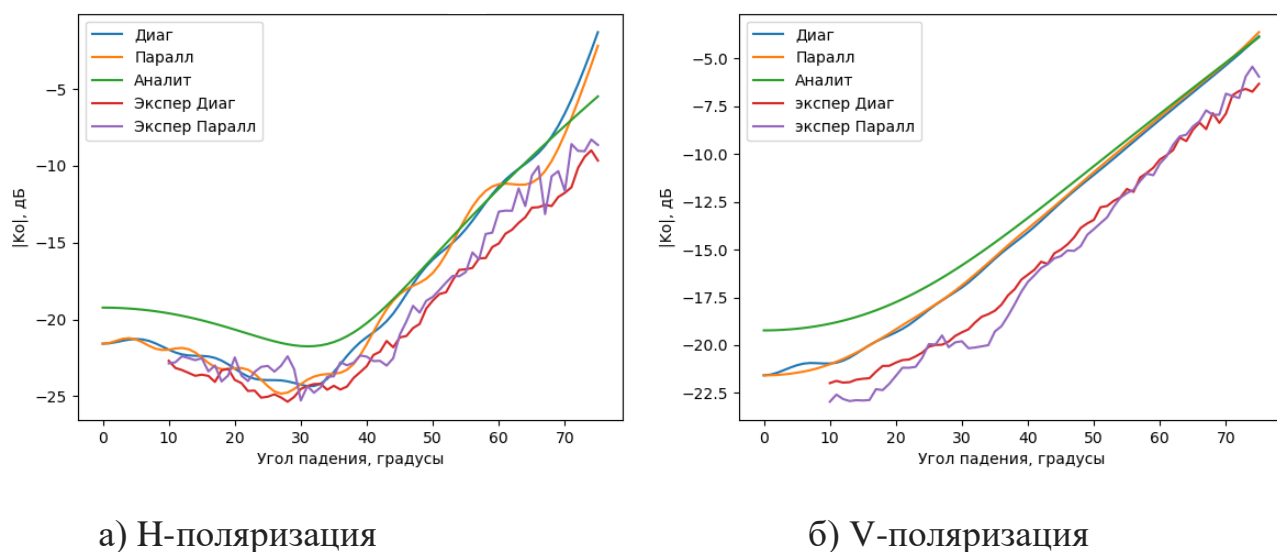


Рис. 6. Графики зависимостей МКО от угла падения при различных положениях образца, при а) горизонтальной и б) вертикальной поляризации на частоте 10 ГГц.

На рисунке 7 изображены кривые зависимостей МКО от частоты при угле падения (отражения) 40° . Аналогично результатам, изображенным на рисунке 6, характер кривых не имеет серьезных различий. Имеется провал значения МКО вблизи частоты 9.5 ГГц, что связано с толщинным резонансом: толщина материала примерно составляет четверть длины волны в среде. При этом экспериментальные кривые имеют более глубокий провал. С ростом частоты различия между экспериментальными и численными данными увеличивается. Это связано с тем, что на частотах больше 8 ГГц размер образца превышает размер рабочей зоны.

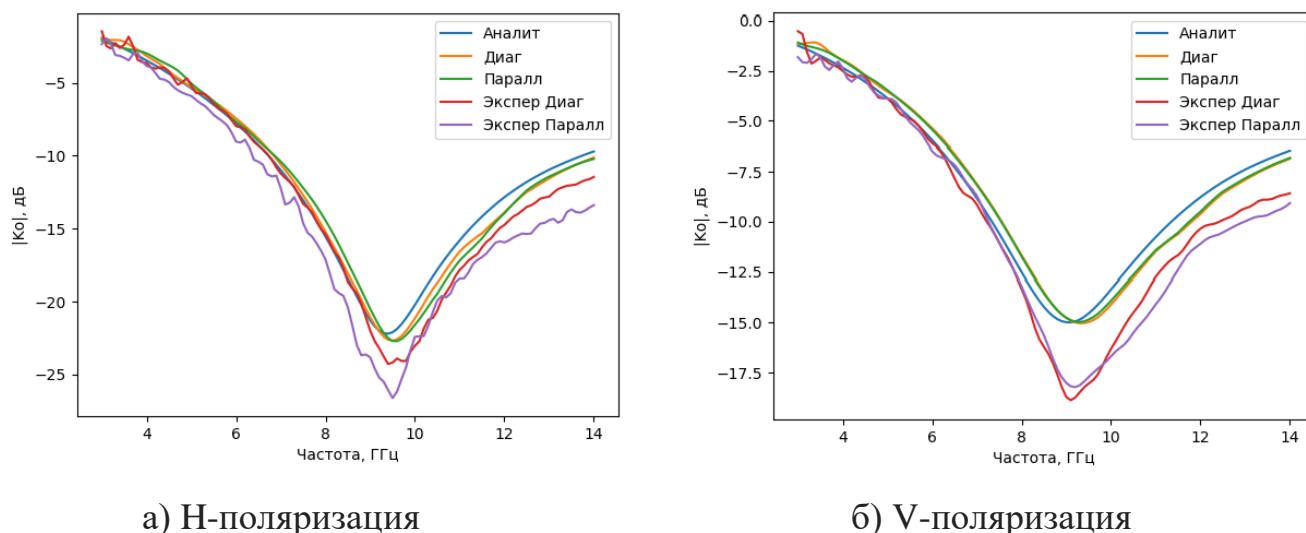


Рис. 7. Кривые зависимостей МКО от частоты при различных положениях реального образца при а) горизонтальной и б) вертикальной поляризации при угле падения 40° .

Заключение

Результаты электродинамического расчёта модельного материала показали, что расположение образца относительно поляризации падающей волны не влияет на величину МКО. Исследования характеристик рассеяния модельного материала позволяют наблюдать с ростом частоты увеличение угла Брюстера. В исследуемом диапазоне частот положение угла Брюстера изменилось на 10° . Также при уменьшении длины волны различия между аналитическими (по формулам Френеля) и численными расчетными значениями МКО уменьшаются, что связано с увеличением целого количества длин волн, укладывающихся на стороне образца.

Теоретические выводы, сделанные на основе исследования модельного материала, проверялись на реальном образце магнитодиэлектрика. Были проведены измерения характеристик рассеяния РПП, а также проведены аналитические и численные расчёты МКО. Результаты эксперимента находятся в соответствии с расчетами, проведенными методом интегральных уравнений, и согласуются с аналитическими данными.

Проведенные исследования позволяют утверждать, что нельзя пренебрегать краевыми эффектами при измерении коэффициента отражения.

Литература

1. Bezoušek P., Schejbal V. Bistatic and multistatic radar systems // Radio engineering. 2008. Vol.17. No.3.
2. Gurel L., Bagci H., Castelli J. C., Cheraly A. and Tardivel F. Validation through comparison: measurement and calculation of the bistatic radar cross section of a stealth target // Radio Science. 2003. Vol.38, No.3.
3. Pienaar M., Odendaal J.W., Joubert J., Cilliers J. E., Smit J.C. Active calibration target for bistatic radar cross-section measurements // Radio Sci. 2016. Vol.51. P.515-523. <https://doi.org/10.1002/2015RS005931>.
4. Potgieter M., Odendaal J.W., Blaauw C., Joubert J. Bistatic RCS measurements of large targets in a compact range // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 2019. Vol.67. No.4. P.2847.
5. Zeng J., Chen K.-S., Bi H., Zhao T., Yang X.A. Comprehensive analysis of rough soil surface scattering and emission predicted by AIEM with comparison to numerical simulations and experimental measurements // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2017. Vol.55. No.3.
6. Eyraud C., Geffrin J.-M., Sabouroux P., Chaumet P.C., Tortel H., Giovannini H., Litman A. Validation of a 3D bistatic microwave scattering measurement setup // Radio Science. 2008. Vol.43. P.4018. 2008.
7. 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.
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). Paris. 2017. P.259-262.
9. Saleh H., Geffrin J.-M., Eyraud C., Tortel H. Upgrading the settings of a microwave experimental setup for better accuracy in bistatic radar cross section measurement // 2017 Mediterranean Microwave Symposium (MMS).
10. 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. 1991. Vol.40. No.1. P.19-24.
11. Masaki T., Ishii Y., Michishita N., Morishita H., Hada H. Monostatic and bistatic RCS measurements for thin metasurfaces // Proceedings of 2017 IEEE CAMA, Tsukuba, Japan.
 12. 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 // 13th European Conference on Antennas and Propagation EuCAP 2019.
 13. Лебедев А.М., Обухов М.Л., Селин И.А., Фурманова Т.А. Закономерности двухпозиционного рассеяния металлическим треугольником // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. No.12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.12.15>
 14. Knott E.F., Shaeffer J.F., Tuley M.T. Radar cross section. Boston: SciTech Publishing. 1993. 477 p.
 15. Федоров С.А., Меньших Н.Л., Солосин В.С. Стенд для измерений бистатических параметров рассеяния малоразмерных объектов // XI Всероссийская научно-техническая конференция "Метрология в радиоэлектронике". Менделеево, Московская обл., 19-21 июня 2018 г.
 16. Федоров С.А., Меньших Н.Л. Измерительный комплекс для определения параметров двухпозиционного рассеяния ЭМВ // VI Микроволновая конференция. Москва, 27-29 ноября 2018.
 17. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 503 с.
 18. 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>
 19. 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.

Для цитирования:

Гильмутдинов Р.В., Меньших Н.Л., Федоров С.А. Краевые эффекты в бистатистических измерениях характеристик рассеяния образцов материалов. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.10.6>