

Методические погрешности измерений коэффициента зеркального отражения плоских образцов материалов на измерительных стендах двух типов

Руслан Валерьевич Гильмутдинов¹, Игорь Иванович Краснолобов², Николай Леонидович Меньших^{3✉}, Сергей Александрович Федоров⁴

^{1, 3} Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный, Московская обл., Россия

^{2, 3, 4} Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН, Москва, Россия

¹gipponn555@gmail.com, ²krasnobov__ig@mail.ru, ³n.menshikh@gmail.com✉, ⁴fys99@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены два метода измерений бистатистических характеристик рассеяния плоских образцов материалов. Проведены экспериментальные исследования и численное моделирование коэффициента зеркального отражения образцов магнетодиэлектриков в зависимости от угла падения волны в бистатистической схеме постановки эксперимента (вращение приёмной и передающей антенн) и в моностатической схеме с использованием двугранного углового отражателя (вращение объекта). Характеристики магнетодиэлектрического плоского образца измерены в Институте теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук на двух стендах с соответствующей схемой эксперимента. Для выявления погрешностей используемых методов проведено численное моделирование измерения коэффициента зеркального отражения исследуемого образца методом интегральных уравнений (методом моментов) в программе FEKO в постановке двух схем экспериментов. Проведено сравнение полученных результатов между собой и с результатами аналитических расчётов коэффициента зеркального отражения, проведённых по формулам Френеля при рассмотрении бесконечного плоского слоя материала. Данные расчёты позволяют сравнить методические погрешности измерения коэффициента зеркального отражения в двух рассматриваемых схемах эксперимента. Показано, что методическая погрешность результатов измерений с использованием углового отражателя (отклонение от аналитического расчёта) на 1–2 дБ больше, чем при измерениях на бистатистическом стенде. Результаты экспериментов и численного моделирования находятся в соответствии друг с другом. Выводы, полученные в данной работе применимы к любым экспериментальным установкам для исследования плоских материалов.

Ключевые слова: бистатистические измерения, коэффициент отражения, метод моментов, FEKO, безэховая камера, двугранный угловой отражатель

Для цитирования: Гильмутдинов Р. В., Краснолобов И. И., Меньших Н. Л., Федоров С. А. Методические погрешности измерений коэффициента зеркального отражения плоских образцов материалов на измерительных стендах двух типов // Измерительная техника. 2021. № 6. С. 44–50. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-6-44-50>

Methodical errors in measuring the specular reflection coefficient from a planar sample of material for two types of measuring facilities

Ruslan V. Gilmutdinov¹, Igor I. Krasnobov², Nikolay L. Menshikh^{3✉}, Sergey A. Fedorov⁴

^{1, 3} Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region, Russia

^{2, 3, 4} Institute of Theoretical and Applied Electrodynamics RAS, Moscow, Russia

¹gipponn555@gmail.com, ²krasnobov__ig@mail.ru, ³n.menshikh@gmail.com✉, ⁴fys99@mail.ru

Abstract. This paper is discussed two methods for measuring the bistatic scattering characteristics of flat samples of the material. The experimental studies and numerical simulations of the dependence of the specular reflection coefficient on the incident angle of wave on a flat material sample carried out in the bistatic scheme of the experiment (rotation of the receiving and transmitting antennas) and in the monostatic scheme using a dihedral corner reflector (rotation of the object). Measurements for the magnetodielectric flat sample were carried out in ITAE RAS on two test facilities with the corresponding scheme of the experiment. To identify the errors of the methods used, we carried out numerical simulations of the measurement of the specular reflection coefficient of the sample under test by the method of integral equations (method of moments) in the FEKO program in the formulation of two experimental schemes. The obtained results were compared with each other and with the results of analytical calculations of the specular reflection coefficient carried out using the Fresnel formulas when considering an infinite flat layer of material. These calculations make it possible to compare the methodical errors in measuring the reflection coefficient in the two considered experimental schemes. It was shown that the results of the measurements using the corner reflector give methodical errors (deviations from the analytical calculation) by 1–2 dB more than the measurements on the bistatic facility. The results of experiments and numerical simulations are in agreement with each other. The conclusions obtained in this work are applicable to any experimental facilities for the study of planar materials.

Keywords: bistatic measurements, reflection coefficient, method of moments, FEKO, anechoic chamber, dihedral corner reflector

Введение. В последние десятилетия в связи с интенсивным развитием бистатической радиолокации изменяются требования к используемым в авиационной технике материалам [1]. При разработке современных радиоматериалов всегда учитываются их бистатические рассеивающие свойства, такие как двухпозиционная диаграмма рассеяния и модуль коэффициента отражения (МКО) [2]. Измерять МКО в зависимости от угла падения волны на материал можно на специальных стендах для бистатических исследований [3]. В последние годы растёт число стендов для исследований характеристик рассеяния объектов, имеющих большое число степеней свободы [4, 5]. В [6] описана бистатическая установка, позволяющая измерять рассеивающие свойства с высокой точностью. В [7] описан стенд для бистатических исследований и разработан специальный метод калибровки при измерениях коэффициента зеркального отражения плоских образцов материалов. Разрабатываются методы обработки измеренного сигнала, позволяющие качественно вырезать помеховые сигналы во временной области [8].

Часто провести прямые бистатические измерения в дальней зоне не представляется возможным. Например, в [9] описан метод инверсного апертурного синтеза, позволяющий восстановить диаграмму рассеяния по измерениям в ближней зоне, а МКО определяется по разности между диаграммами рассеяния исследуемого образца и металлической пластины такого же размера.

Создание бистатических стендов сопряжено с определёнными трудностями. В [10] исследована возможность использования двугранного уголкового отражателя (УО) для моностатического измерения коэффициента зеркального отражения. В [11] проведено численное моделирование измерения МКО с использованием двугранного УО и плоской металлической пластины. Анализ переотражений электромагнитной волны в системе из N гладких идеально-проводящих поверхностей, и в частности отражения волны от УО, проведён в [12] методом геометрической теории дифракции.

При бистатических исследованиях возникает множество препятствий, не позволяющих получить приемлемую точность результатов. К основным систематическим погрешностям относятся: измерительные погрешности на стенде, включающие в себя фоновый помеховый сигнал безэховой камеры, в которой проходят измерения; погрешности позиционирования объектов и антенн; погрешность радиоизмерительных приборов; методические погрешности [13], связанные с выбранным методом измерения характеристик. Методическая погрешность вызвана конечными размерами образца.

Цель работы – сравнение методических погрешностей измерений коэффициента зеркального отражения образца материала на стенде для исследования бистатических свойств объектов и моностатическом стенде с использованием УО. В дальнейшем изложении именно такой коэффициент отражения будем понимать под МКО.

Постановка задачи исследования. Для измерений характеристик магнитодиэлектрика использован образец материала конечных размеров, расположенный на металлической

подложке. В связи с таким расположением образца при экспериментальных исследованиях невозможно исключить влияние дифракционных эффектов на краях образца. Кроме сигнала, отражённого от поверхности материала, наблюдаются сигналы, связанные с рассеянием волны на ребрах образца, переотражениями от краёв, излучением ползучих волн и других эффектов [14]. В дальнейшем изложении все эти явления будем называть краевыми эффектами [15]. Влияние краевых эффектов на результаты измерений сильно зависит от выбранного метода. Любой метод измерения МКО имеет недостатки, связанные с приближением геометрической оптики.

Для пластины малого размера (в длинах волн) будут иметь большое значение рёберные и поверхностные волны, которые обычно описываются поверхностными токами. Для системы из слоя магнитодиэлектрика на металлической подложке необходимо рассмотреть фиктивные электрический и магнитный токи на поверхности магнитодиэлектрика и электрический ток на проводящей поверхности. Для металлической пластины достаточно ввести только электрический ток на проводящей поверхности. Таким образом, в двух рассматриваемых системах условия излучения этих типов волн на ребре будут разные. Поэтому в точке наблюдения созданное ими электромагнитное поле (помеховый сигнал) не может быть скомпенсировано полностью при калибровке измеренных или рассчитанных сигналов. Чтобы уменьшить влияние излучения ползучих волн, целесообразно обратную сторону пластины покрыть радиопоглощающим материалом.

Для метода измерения с использованием двугранного УО необходимо учитывать не только дифракционные эффекты на краях объекта, но ещё и то, что в целом применение лучевой оптики возможно только при достаточной площади «засветки» самого исследуемого образца и при близких к нормали углах падения.

Рассмотрим измерения МКО образца магнитодиэлектрика на двух различных экспериментальных стендах, а также проведём численные эксперименты в программном пакете FEKO, позволяющие сравнить два метода натурального исследования без привязки к конкретным стендам (в поле плоской волны). Полученные данные сопоставим между собой и с результатами аналитического расчёта по формулам Френеля.

Измерения МКО на бистатическом стенде. Установка для бистатических измерений состоит из опорно-поворотного устройства с размещённым на нём исследуемым образцом, приёмной и передающей антенн, вращающихся в горизонтальной плоскости по дуге окружности на жёстко связанных с центром вращения тележках [16, 17]. Объект измерения устанавливается на полую пенопластовую опору, закреплённую на поворотном столе. Оси вращения антенн и поворотного стола совпадают. Тележки перемещаются в диапазоне углов $10\text{--}75^\circ$. Безэховая камера размером $5\times 4\times 4$ м и механические части конструкции стенда покрыты радиопоглощающим материалом. Расстояние между антенной и объектом измерения составляет 2,0 м.

Для уменьшения влияния краевых эффектов задняя сторона образца покрыта плоским слоистым широкополосным радиопоглощающим материалом толщиной 3 мм.

Эксперимент проводили в три этапа методом замещения. Сначала измеряли фон камеры, затем сигнал, отражённый от металлической калибровочной пластины в зеркальном направлении. После этого измеряли сигнал, отражённый от исследуемого образца в зеркальном направлении. Значение МКО (в децибелах) рассчитывали по формуле

$$K_0(f, \varphi) = 20 \lg \left| \frac{E_{\text{обр}}(f, \varphi) - E_{\text{б.о.}}(f, \varphi)}{E_{\text{к}}(f, \varphi) - E_{\text{б.о.}}(f, \varphi)} \right|,$$

где $E_{\text{обр}}(f, \varphi)$ – поле, отражённое от исследуемого образца; $E_{\text{б.о.}}(f, \varphi)$ – поле, измеренное без исследуемого образца;

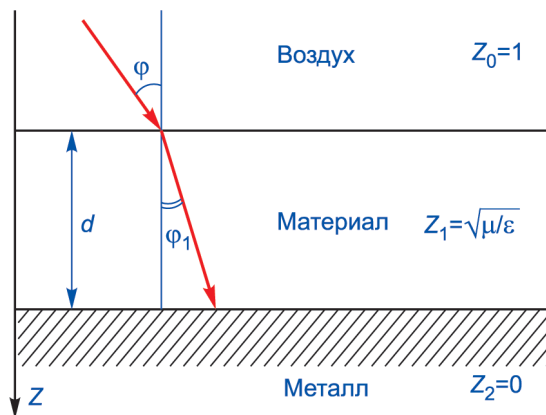


Рис. 1. Схема аналитического расчёта МКО слоя материала на металлической подложке; ϵ , μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости материала, соответственно

Fig. 1. Scheme of analytical calculation of $|K_0|$ from a layer of material on a metal substrate; ϵ and μ – dielectric permittivity and magnetic permeability of the material respectively

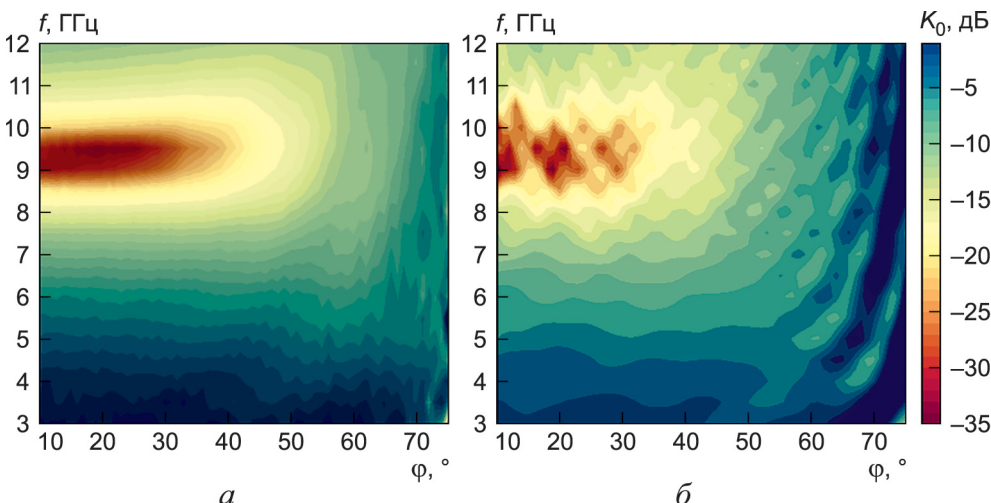


Рис. 2. Зависимость МКО $|K_0|$ от частоты f и угла φ падения (H -поляризация) для бистатического стенда (a) и моностатического стенда с УО (б)

Fig. 2. Dependence of $|K_0|$ on frequency and angle of incidence (H -polarization) for bistatic facility (a) and dihedral corner (б)

$E_{\text{к}}(f, \varphi)$ – поле, отражённое от калибровочной металлической пластины (нормировочное поле).

Измерения МКО на угольном отражателе. Измерить бистатические характеристики рассеяния материала можно на моностатическом стенде с использованием двугранного УО. По принципу геометрической оптики луч, отражаясь от проводящей поверхности УО, падает на исследуемый образец, расположенный на другой грани УО под углом 90° к первой поверхности. После отражения от магнитоэлектрика луч возвращается обратно к источнику излучения. Таким образом, измерять МКО можно без разнесения приёмной и передающей антенн.

Измерение МКО материала с использованием УО также основано на методе замещения. В зависимости от угла падения волны измеряется сигнал от двугранного УО, на одной из граней которого расположен исследуемый образец (при этом образец занимает всю грань). Далее измеряется сигнал от УО без образца в качестве калибровочного объекта. Фон можно не измерять, так как амплитуда принятого поля волны, отражённого назад от двугранного УО (при любом его положении), существенно больше (не менее чем на 60 дБ) амплитуды поля, измеренного без объекта [18]. Нормируем сигнал от исследуемого образца к сигналу от УО без образца и получаем МКО.

Расчёт коэффициента зеркального отражения. В работе исследован образец магнитоэлектрика с известными зависящими от частоты материальными параметрами [19, 20]. Образец представляет собой металлическую подложку размером 200×200 мм и толщиной 3 мм с нанесённым на неё слоем магнитоэлектрика толщиной 1,48 мм.

Для аналитического расчёта МКО материала использовали формулы Френеля [21] для плоского бесконечного слоя, расположенного на идеально-проводящей поверхности. На рис. 1 изображён ход лучей и основные параметры, необходимые для расчёта. Плоская волна под углом φ падает на границу раздела сред воздух – материал. По закону Снеллиуса угол преломления

$$\varphi_1 = \arcsin(n_{01} \sin \varphi),$$

где n_{01} – относительный коэффициент преломления.

Обозначим входной поверхностный импеданс как

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

где k_{1z} – проекция волнового вектора в материале на ось, перпендикулярную границе раздела сред; d – толщина материала; Z_0 , Z_1 , Z_2 – импедансы соответственно свободного пространства, материала и металла.

Пусть вектор $\mathbf{E}$ лежит в плоскости падения при H -поляризации, вектор $\mathbf{E}$ перпендикулярен плоскости падения при V -поляризации. Тогда МКО рассчитаем по формулам

$$K_V = \frac{Z_{BX}/\cos\varphi_1 - Z_0/\cos\varphi}{Z_{BX}/\cos\varphi_1 + Z_0/\cos\varphi},$$

$$K_H = \frac{Z_{BX}\cos\varphi_1 - Z_0\cos\varphi}{Z_{BX}\cos\varphi_1 + Z_0\cos\varphi}.$$

Для сравнения результатов измерения МКО двумя методами созданы приближенные к условиям экспериментов компьютерные модели в программе FEKO. Вычисления проводили с использованием метода интегральных уравнений с характерным шагом сетки 1/12 длины волны в свободном пространстве. Такое разбиение обеспечивает высокую точность результатов расчётов [22].

Моделирование проводили следующим образом. На исследуемый объект падала плоская линейно-поляризованная волна. В модели, воссоздающей измерения МКО на бистатическом стенде, для каждого угла падения волны рассчитывали зеркально отражённое от объекта поле. Помимо исследуемого образца объектом являлась калибровочная металлическая пластина такого же размера для нормировки полученного сигнала. Аналогично эксперименту на обратной стороне объектов моделировали слоистый радиопоглощающий материал.

При моделировании эксперимента с использованием УО вычисляли поле, отражённое от объекта в обратном направлении. Калибровочным объектом являлся УО без образца.

Вычисления проводили в диапазоне 3–12 ГГц с шагом 500 МГц при углах падения волны в диапазоне 0–90°. В этом же диапазоне частот и углов экспериментально исследовали характеристики данного образца на бистатическом стенде и моностатическом стенде с помощью УО.

МКО (в децибелах) представлен следующей формулой:

$$K_0(f, \varphi) = 20 \lg \left| \frac{E_{\text{обр}}(f, \varphi)}{E_{\text{к}}(f, \varphi)} \right|.$$

В рассматриваемом случае коэффициент отражения зависит от угла падения φ и частоты f .

Результаты численных и натурных экспериментов.

На рис. 2 изображены двумерные картины распределения МКО, измеренного с помощью двух экспериментальных методов в зависимости от частоты и угла падения при H -поляризации. Картины визуально похожи. На обеих диаграммах имеется провал значений МКО вблизи частоты 9,5 ГГц, что связано с интерференционным минимумом: толщина материала примерно составляет четверть длины волны в материале. Результаты расчёта для бистатического стенда (рис. 2, а) характеризуются плавным изменением значений МКО. При использовании УО распределение МКО имеет колебания большой амплитуды (рис. 2, б), связанные с методической погрешностью. Отражённый от объекта сигнал является суммой отражений от поверхности и краёв объекта. Если для бистатического стенда наблюдается

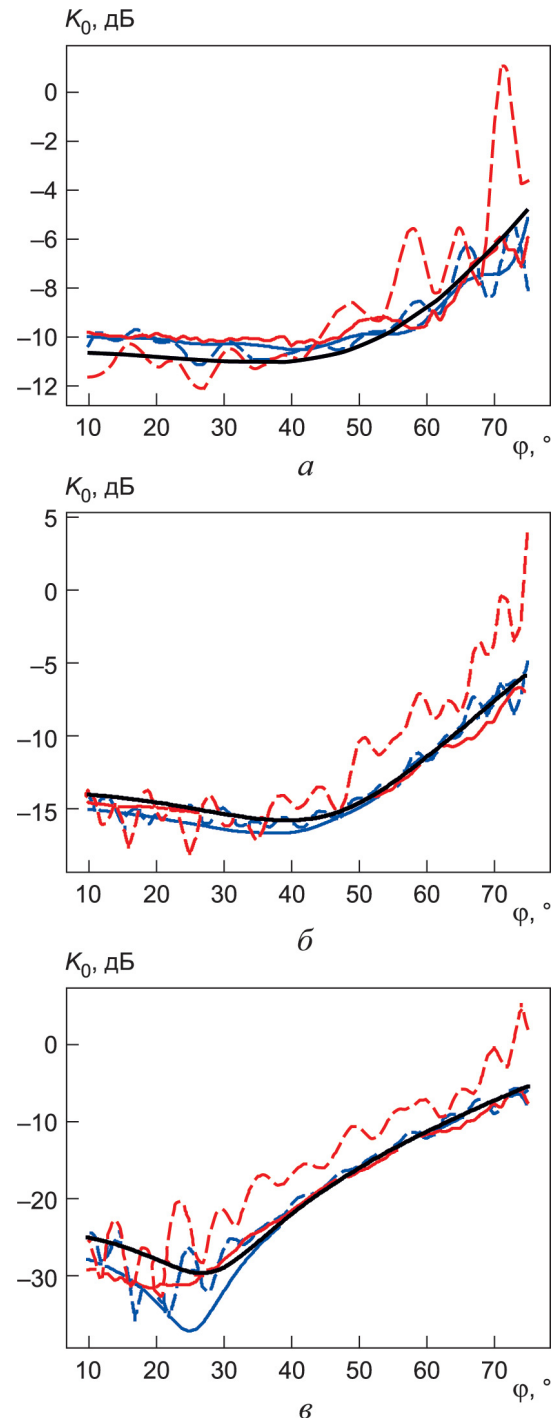


Рис. 3. Зависимости МКО $|K_0|$ от угла φ падения волны на частотах 7; 11; 9,5 ГГц соответственно (а), (б), (в) (H -поляризация): численный расчёт (FEKO) соответственно для бистатического стенда и с помощью УО (—, - - -); измерения на бистатическом стенде и с помощью УО (—, - - -); аналитический расчёт по формулам Френеля (—)

Fig. 3. Dependences of $|K_0|$ on the angle of incidence φ at frequencies 7, 11, and 9.5 GHz, respectively (a), (b), (c) (H -polarization): numerical calculation (FEKO) for the bistatic facility and using the dihedral, respectively (—, - - -); measurements on the bistatic facility and using the dihedral, respectively (—, - - -), analytical calculation using Fresnel formulas (—)

дифракция волны на двух рёбрах пластины, лежащих в одной плоскости, то для УО волна дифрагирует уже на трёх рёбрах (на четырёх рёбрах для V -поляризации), которые разнесены в пространстве. Для УО в области близких к нормальному падению углов значительный вклад в принятый сигнал вносит обратное рассеяние от образца материала.

На рис. 3 представлены графики зависимости МКО от угла падения для различных частот при H -поляризации. При углах больше 45° значения МКО, полученные различными методами, за исключением эксперимента с использованием УО, хорошо согласуются с аналитическими расчётами. Отсутствуют структурные различия между экспериментальными и численными результатами расчётов, проведённых на бистатическом стенде с аналитическими расчётами. Для любой фиксированной частоты в исследуемом диапазоне наблюдаются колебания значений МКО в зависимости от угла падения, полученных с использованием УО. При этом экспериментальные кривые всегда имеют заметно большую амплитуду колебаний. Характерные значения амплитуды колебаний МКО на нерезонансных частотах, полученных экспериментальным путём, составляют 1,5 дБ, на FEKO – 0,3 дБ, при углах падения меньше 50° . В области резонанса амплитуды колебаний достигают 5 дБ и 3 дБ, соответственно, в том же диапазоне углов. С ростом частоты характерный период колебаний уменьшается. В области низких частот экспериментальные и численные значения МКО, полученные в бистатической схеме измерения, больше аналитических значений МКО, а при частотах больше 9,5 ГГц – меньше. Отличия между экспериментальными и расчётными кривыми связаны с погрешностями установки, а также с погрешностью определения материальных характеристик исследуемого образца.

При построении гладкой интерполяционной кривой для вычислений МКО по данным, полученным с использованием УО, и применении математических методов обработки данных достоверность результатов будет невысока, особенно на резонансных частотах или вблизи угла Брюстера, если данные эффекты наблюдаются.

В таблице приведены значения методической погрешности для бистатического стенда $\Delta K_{\text{бст}}$ и УО $\Delta K_{\text{УО}}$ как

Методические погрешности $\Delta K_{\text{бст}}$, $\Delta K_{\text{УО}}$, дБ, для бистатического стенда и моностатического стенда с УО

f, ГГц	H -поляризация		V -поляризация	
	$\varphi < 50^\circ$	$\varphi \geq 50^\circ$	$\varphi < 50^\circ$	$\varphi \geq 50^\circ$
$\Delta K_{\text{бст}}$, дБ				
7,0	0,7	1,5	0,7	1,0
9,5	7,8	0,6	2,0	0,4
11,0	1,1	0,4	0,9	0,5
$\Delta K_{\text{УО}}$, дБ				
7,0	1,1	3,2	4,8	0,9
9,5	9,1	2,4	9,7	1,1
11,0	1,7	2,1	5,4	0,7

максимальной разницы между численными значениями МКО соответствующих методов и аналитическим расчётом МКО для заданных углов и частот. Приведённые значения на частоте 7,0 ГГц являются характерными значениями погрешностей в диапазоне 3–7 ГГц (образец имеет линейные размеры 3,0–4,5 длин волн в свободном пространстве), 9,5 ГГц – области интерференционного минимума, 11,0 ГГц – соответствуют области 10,5–12 ГГц (характерные размеры 7–8 длин волн).

Аналогичные измерения и вычисления МКО были проведены для V -поляризации падающей волны, результаты также представлены в таблице. Погрешности измерительной установки, связанные с помеховыми сигналами безэховой камеры и приборными шумами, слабо зависят от поляризации. Значения методических погрешностей при измерении с использованием УО зависят от поляризации в отличие от методических погрешностей, возникающих на бистатическом стенде. С увеличением угла падения амплитуда колебаний МКО, измеренного с помощью двугранного УО, при V -поляризации уменьшается в отличие от амплитуды колебаний для H -поляризации.

Вывод. Результаты экспериментов и численного моделирования находятся в соответствии друг с другом. Измеренные и рассчитанные значения МКО, полученные на бистатическом стенде, лежат близко к аналитическому расчёту по формулам Френеля. Наблюдаются экспериментальные трудности применения УО для измерения характеристик при больших углах (50° и больше). В целом методическая погрешность измерений МКО с помощью УО больше чем на бистатическом стенде. Измерения МКО на бистатическом стенде при углах падения больше 75° приводят к дополнительным погрешностям из-за прямого прохождения сигнала между антеннами, но с помощью УО возможно получение хотя бы оценочных значений МКО. Полученные выводы о влиянии методической погрешности на значения МКО являются характерными и не имеют привязку к конкретным стендам, так как в одном частотном диапазоне исследуется один и тот же образец в плоском поле электромагнитной волны.

При этом в области интерференционного минимума необходимо использовать бистатический стенд. Для исследованного образца методическая погрешность при больших углах в численном эксперименте с использованием УО примерно на 2 дБ выше, чем на стенде при H -поляризации.

Список литературы

1. Sudha Rani K., Krishna Chaitanya T., *International Journal of Engineering and Technical Research*, 2015, vol. 3, no. 7, pp. 84–93.
2. Álvarez H. F., Gómez M. E., Las-Heras F., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, vol. 69, no. 4, pp. 1737–1744. <https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2913721>
3. Knott E. F., Shaeffer J. F., Tuley M. T., *Radar cross section*, Boston, SciTech Publ., 1993, second edition, 477 p.
4. Eyraud C., Geffrin J.-M., Sabouroux P., Chaumet P. C., Torteil H., Giovannini H., Litman A., *Radio Science*, 2008, vol. 43, no. 4, p. RS4018. <https://doi.org/10.1029/2008RS003836>

5. Röding M., Sommerkorn G., Häfner S., Ihlow A., Jovanoska S., Thomä R. S., *Proc. of the 47th European Microwave conf.*, Nuremberg, Germany, 10–12 Oct. 2017. <https://doi.org/10.23919/EuMC.2017.8231083>
6. Daout F., Schmitt F., *2014 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA)*, Antibes Juan-les-Pins, France, 16–19 Nov. 2014. <https://doi.org/10.1109/CAMA.2014.7003455>
7. Umari M. H., Ghodgaonkar D. K., Varadan V. V., Varadan V. K., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1991, vol. 40, no. 1, pp. 19–24. <https://doi.org/10.1109/19.69942>
8. Fedorov S. A., Gilmudtinov R. V., Menshikh N. L., *2020 7th All-Russian Microwave Conference (RMC)*, Moscow, Russia, 25–27 Nov. 2020. <https://doi.org/10.1109/RMC50626.2020.9312243>
9. Варенцов Е. Л., Дудкин М. И., Илларионов И. А. Измерение коэффициента отражения радиопоглощающих материалов в широком диапазоне частот методом инверсного апертурного анализа // XXIV Международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии» ИСТ-2018. Н. Новгород, Россия, 20 апреля 2018. Н. Новгород: НГТУ им. Алексеева, 2018. С. 27.
10. Гаврилов А. А., Кирьянов О. В., Мартынов Н. А., Забалуев В. Е., Баранов С. О., Дубровин Ю. А. Измерение угловой зависимости модуля коэффициента отражения радиопоглощающих материалов и покрытий в свободном пространстве // Измерительная техника. 2012. № 7. С. 58–62.
11. Ведюшкин Г. А., Чернышов М. Г. Угловой отражатель в полосной линии при измерении коэффициента отражения // Измерительная техника. 1991. № 12. С. 29–31.
12. Hua Yan, Hong-Cheng Yin, Sheng Li, and Liang-Sheng Li, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, vol. 67, no. 7. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2911268>
13. Фридман А. Э. Основы метрологии. Современный курс. СПб.: НПО «Профессионал», 2008. 284 с.
14. Балабуха Н. П., Зубов А. С., Солосин В. С. Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния. М.: Наука, 2007.
15. Гильмутдинов Р. В., Меньших Н. Л., Федоров С. А. Краевые эффекты в бистатических измерениях характеристик рассеяния образцов материалов // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. № 10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.10.6>
16. Федоров С. А., Меньших Н. Л., Солосин В. С. Стенд для измерений бистатических параметров рассеяния маломерных объектов // XI Всероссийская научно-техническая конференция «Метрология в радиоэлектронике», Менделеево, Московская обл., 19–21 июня 2018 г. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2018.
17. Федоров С. А., Меньших Н. Л. Измерительный комплекс для определения параметров двухпозиционного рассеяния ЭМВ // VI Микроволновая конференция, Москва, 27–29 ноября 2018. М.: ИРЭ РАН, с. 109.
18. Кобак В. О. Радиолокационные отражатели. М.: Советское радио, 1975. 212 с.
19. Иванова В. И., Кибец С. Г., Краснолобов И. И., Лагарьков А. Н., Политико А. А., Семенов 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> (дата обращения: 30.04.2021).
20. Семенов В. Н., Чистяев В. А., Политико А. А., Басков К. М. Стенд для измерения в свободном пространстве радиофизических параметров // Измерительная техника. 2019. № 2. С. 55–59. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-2-55-59>
21. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 503 с.
22. Jakobus U., Marchand R. G., Ludick D. J., *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2014, vol. 56, no. 4. <https://doi.org/10.1109/TEM.2014.2299408>

References

1. Sudha Rani K., Krishna Chaitanya T., *International Journal of Engineering and Technical Research*, 2015, vol. 3, no. 7, pp. 84–93.
2. Álvarez H. F., Gómez M. E., Las-Heras F., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, vol. 69, no. 4, pp. 1737–1744. <https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2913721>
3. Knott E. F., Shaeffer J. F., Tuley M. T., *Radar cross section*, Boston, SciTech Publ., 1993, second edition, 477 p.
4. Eyraud C., Geffrin J.-M., Sabouroux P., Chaumet P. C., Tortel H., Giovannini H., Litman A., *Radio Science*, 2008, vol. 43, no. 4, p. RS4018. <https://doi.org/10.1029/2008RS003836>
5. Röding M., Sommerkorn G., Häfner S., Ihlow A., Jovanoska S., Thomä R. S., *Proc. of the 47th European Microwave conf.*, Nuremberg, Germany, 10–12 Oct. 2017. <https://doi.org/10.23919/EuMC.2017.8231083>
6. Daout F., Schmitt F., *2014 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA)*, Antibes Juan-les-Pins, France, 16–19 Nov. 2014. <https://doi.org/10.1109/CAMA.2014.7003455>
7. Umari M. H., Ghodgaonkar D. K., Varadan V. V., Varadan V. K., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1991, vol. 40, no. 1, pp. 19–24. <https://doi.org/10.1109/19.69942>
8. Fedorov S. A., Gilmudtinov R. V., Menshikh N. L., *2020 7th All-Russian Microwave Conference (RMC)*, Moscow, Russia, 25–27 Nov. 2020. <https://doi.org/10.1109/RMC50626.2020.9312243>
9. Varentsov Ye. L., Dudkin M. I., Illarionov I. A., *Proc. XXIV International Scientific and Technical Conference "Information Systems and Technologies" ICT-2018*, Nizhny Novgorod, Russia, April 20, 2018, NGTU Publ., 2018, p. 27. (In Russ.)
10. Gavrilov A. A., Kir'yanov O. E., Martynov N. A., Zabaluev V. E., Baranov S. O., Dubrovin Yu. A., *Measurement Techniques*, 2012, vol. 55, no. 7, pp. 826–833. <https://doi.org/10.1007/s11018-012-0046-4>
11. Vedyushkin G. A., Chernyshov M. G., *Measurements Techniques*, 1991, vol. 34, no. 12, pp. 1245–1248. <https://doi.org/10.1007/BF00982566>
12. Hua Yan, Hong-Cheng Yin, Sheng Li, and Liang-Sheng Li, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, vol. 67, no. 7. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2911268>

13. Fridman A. E., *Osnovy metrologii. Sovremennyy kurs. [Fundamentals of Metrology. Modern course]*, St. Petersburg, NPO "Professional" Publ., 2008, 284 p. (In Russ.)
14. Balabukha N. P., Zubov A. S., Solosin V. S., *Kompaktnyye poligony dlya izmereniya kharakteristik rasseyaniya [Compact polygons for measuring scatter characteristics]*, Moscow, Nauka Publ., 2007. (In Russ.)
15. Gilmudinov R. V., Menshikh N. L., Fedorov S. A., *Journal of Radio Electronics*, 2020, no. 10. (In Russ.)
<https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.10.6>
16. Fedorov S. A., Menshikh N. L., Solosin V. S., *Proc. XI All-Russian Scientific and Technical Conference "Metrology in Radio Electronics"*, Mendeleevo, Moscow region, June 19–21, 2018, Mendeleevo, VNIIFTRI, 2018.
17. Fedorov S. A., Menshikh N. L., *Proc. 6th All-Russian Microwave Conference*, Moscow, 27–29 November 2018, Moscow, 2018, Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, p. 109. (In Russ.)
18. Kobak V. O., *Radiolokatsionnyye otrazhateli [Radar reflectors]*, Moscow, Sovetskoye radio Publ., 1975, 212 p. (In Russ.)
19. Ivanova V. I., Kibets S. G., Krasnolobov I. I., Lagarkov A. N., Politiko A. A., Semenenko V. N., Chistyaev V. A., *Journal Radio Electronics*, 2016, no. 7, available at: <http://jre.cplire.ru/jre/jul16/5/text.pdf> (accessed: 11.05.2021).
20. Semenenko V. N., Chistyaev V. A., Politiko A. A., Baskov K. M., *Measurements Techniques*, 2019, vol. 62, no. 2, pp. 161–166.
<https://doi.org/10.1007/s11018-019-01601-5>
21. Brekhovskikh L. M., *Waves in layered media*, Imprint, Academic Press, 1976, 520 p.
22. Jakobus U., Marchand R. G., Ludick D. J., *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2014, vol. 56, no. 4.
<https://doi.org/10.1109/TEM.2014.2299408>

Статья поступила в редакцию 26.02.2021; принята к публикации 01.04.2021.