

Разработка структур образца для повышения точности измерений коэффициента зеркального отражения

Гильмутдинов Р.В. *¹, Меньших Н.Л.¹, Фёдоров С.А.¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук

Статья поступила в редакцию 01.09.2022

Одобрена после рецензирования 19.10.2022

Принята к публикации 31.10.2022

Аннотация

В данной работе сравнивалось влияние различных структур плоских образцов материалов на методическую погрешность метода замещения в бистатической постановке при измерении модуля коэффициента зеркального отражения (МКО) и определении угла Брюстера. Структуры представляют собой образец, ребра и тыльная сторона которого покрыты радиопоглощающими материалами. Методом моментов в программе ФЕКО были исследованы структуры на основе материала из модельных магнитодиэлектриков с не зависящими от частоты параметрами среды. Проведено сравнение полученных результатов между собой и с результатами аналитических расчётов по формулам Френеля МКО, проведённых при рассмотрении бесконечного плоского слоя материала. Путем численных экспериментов показано, что применение структур позволяет уменьшить влияние краевых эффектов и повысить точность измерений, включая минимум МКО при угле Брюстера. Выделены виды структур, уменьшающие влияние как первичной, так и вторичной дифракции. Также в работе исследовалось влияние рёбер на эффекты первичной дифракции. Применение представленных в работе структур образцов позволяет уменьшить влияние дифракционных эффектов во всем рабочем частотном и угловом диапазоне. Выводы о преимуществе структур, полученные в данной работе, применимы к любым магнитодиэлектрическим материалам с потерями.

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

Введение

В последнее время увеличилось число исследований, посвященных бистатическим измерениям. В работе [1] исследована возможность использования многопозиционной радиолокации, применение бистатической схемы в передаче сигналов. Большое значение получило изучение бистатических характеристик рассеяния типовых объектов [2] - [4]. Особый практический интерес вызывает применение двухпозиционного рассеяния радиоволн в геофизических методах зондирования земной поверхности [5]. В связи с этим при создании современных изделий необходимо учитывать их бистатические свойства рассеяния.

Важным радиофизическим параметром любого материала является его коэффициент зеркального отражения. В последнее время активно разрабатываются измерительные стенды, на которых можно проводить экспериментальные исследования этого параметра [6, 7]. Причем сегодня активно задействуется компьютерное моделирование радиофизического измерения для оценки возможностей установки, а также для разработки и модернизации имеющихся измерительных стендов [8].

Целью настоящей работы является исследование возможностей повышения точности измерения параметров материала на бистатическом стенде ИТПЭ РАН за счет использования специальных образцов.

Постановка задачи

Для плоского образца материала конечных размеров могут наблюдаться существенные отличия между измеренными характеристиками рассеяния и аналитическими значениями для бесконечного

* Автор, ответственный за переписку: Руслан Валерьевич Гильмутдинов, gilmutdinov.rv@phystech.edu

слоя [9]. Это связано с дифракционными эффектами на краях, такими как рассеяние электромагнитной волны на ребре, излучением ползучих волн [10] и др. Влияние этих эффектов определяется геометрией, размерами (в длинах волн) и параметрами материалов образцов.

В данной работе представлены разработанные структуры образцов материала для уменьшения влияния краевых эффектов. Результаты численных расчетов, сделанных в программе ФЕКО методом моментов, сравнивались между собой, а также с аналитическим расчетом по формулам Френеля [11] для бесконечного слоя материала с заданными параметрами.

Исследование структур

Измерение параметров материалов можно проводить в свободном пространстве. При этом, как правило, используется метод замещения: сигнал, полученный при зеркальном отражении от материала, нормируется на сигнал, отраженный от проводящего образца такой же геометрии.

На рисунке 1 представлены схемы четырех структур плоских квадратных образцов в сечении. На рисунке 1а представлена структура ‘Классическая’, представляющая собой материал, нанесенный на металлическую подложку. На рисунке 1б изображена структура ‘Обертка’, где в качестве исследуемого образца выступает пластина, со всех сторон покрытая материалом. Структура ‘Поролон’ (рисунок 1в) предполагает укрытие обратной стороны образца с материалом и нормировочной пластины слоем РПМ. На рисунке 1г изображена структура ‘Поролон+Обертка’, являющаяся объединением структур ‘Обертка’ и ‘Поролон’.

В качестве исследуемых материалов представлены модельные магнитодиэлектрики (резонансного типа и с углом Брюстера) без частотной дисперсии.

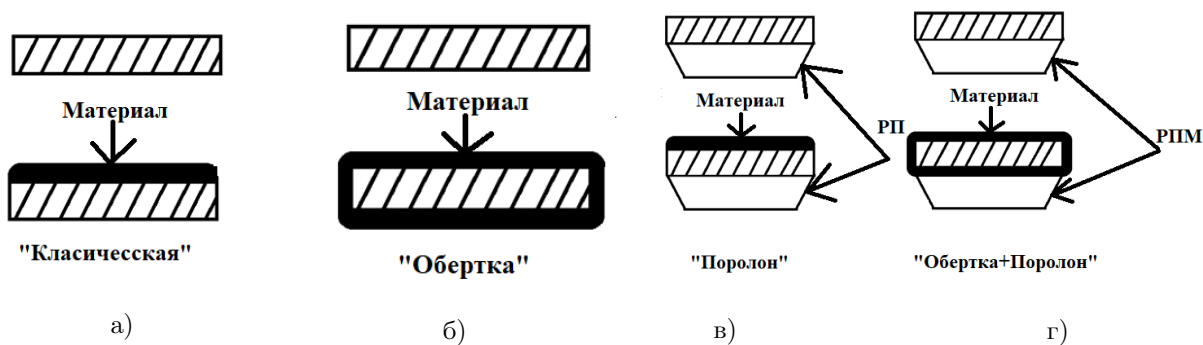


Рисунок 1 – Схемы структур образцов в разрезе

На рисунке 2 представлены кривые зависимостей значений модуля коэффициента зеркального отражения (МКО) от угла падения для различных структур образцов, а также сравнение со структурой без РПМ (‘Классическая’) и аналитическим расчетом. На графиках видно, что в области малых углов наилучший результат показывают структуры ‘Обертка’ и ‘Поролон+Обертка’. В то же время в области больших углов необходимо использовать структуры ‘Поролон’ и ‘Поролон+Обертка’.

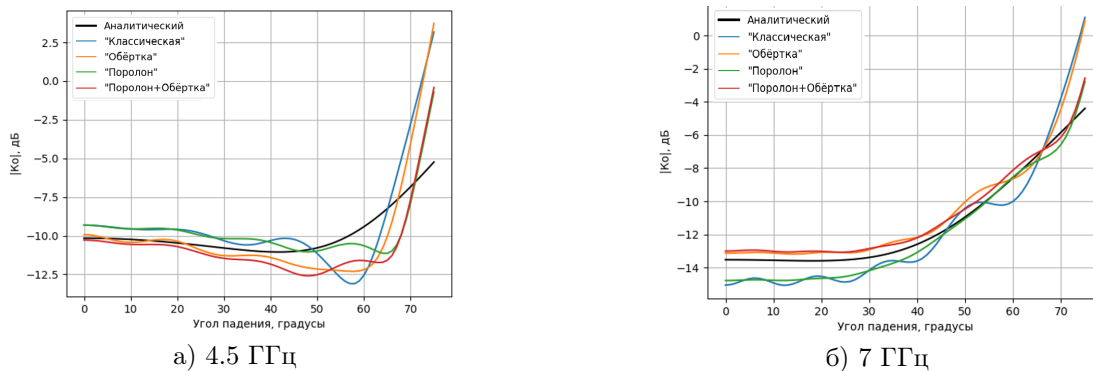


Рисунок 2 – Графики зависимостей МКО от угла падения различных структур образца (Н-поляризация)

Особый интерес вызывает влияние первичной дифракции на бистатистические характеристики рассеяния. На рисунке 3 изображены подвиды структуры ‘Обертка’. В структуре ‘Обертка’ V2 материалом покрываются только перпендикулярные ребра, в ‘Обертка’ V3 только параллельные. Нормировка в обоих случаях происходит на металлическую пластину.

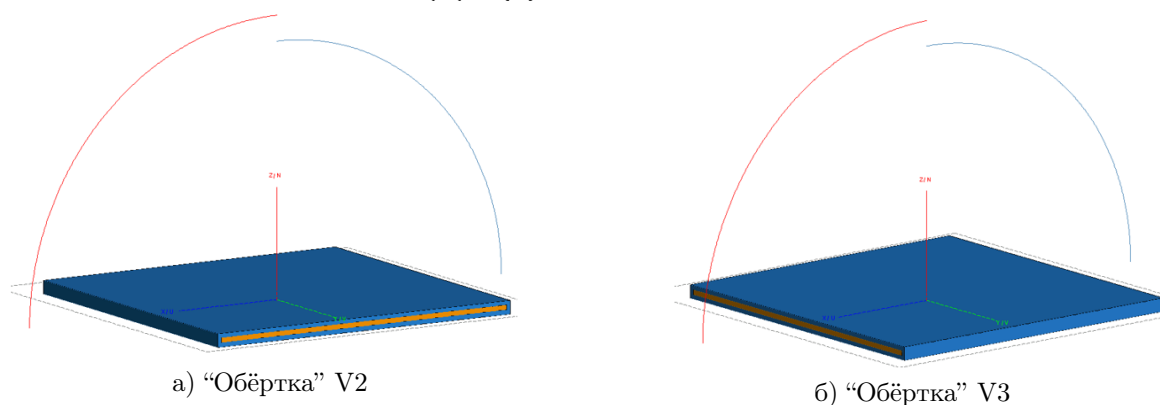


Рисунок 3 – Подвиды структур “Обёртка”

На рисунке 4 изображены кривые зависимостей МКО для разных видов структур “Обёртка”, а также сравнение со структурой “Классическая” и аналитическим расчётом. На графиках видно, что значения МКО, полученные на структуре “Обёртка” V3, практически не отличаются от результатов структуры “Обёртка” V2 в то время как кривая значений МКО структуры “Обёртка” V2 асимптотически ведет себя как кривая структуры “Классическая”.

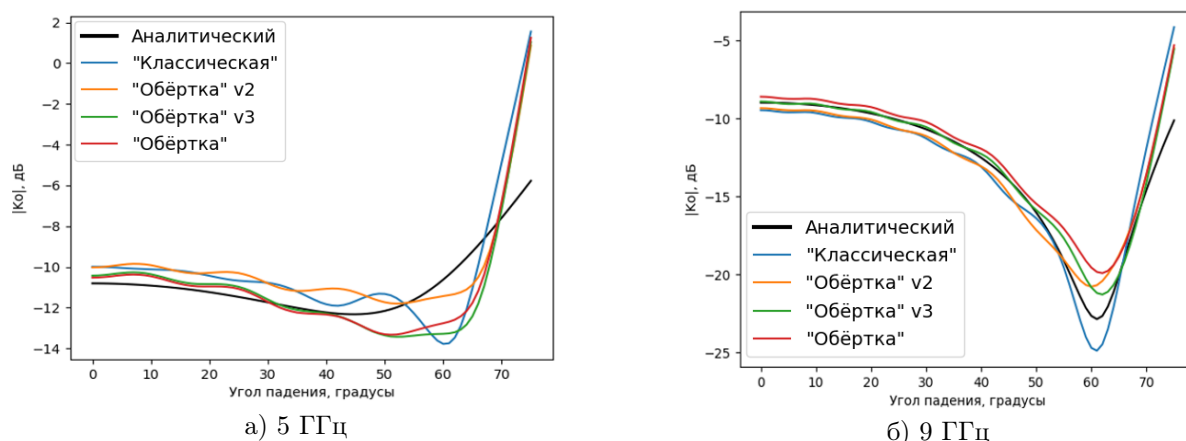


Рисунок 4 – Графики зависимостей МКО от угла падения подвидов структуры “Обёртка” (H-поляризация)

Заключение

Результаты численного моделирования показали, что в области малых углов нанесение материала на ребра образца позволяет существенно увеличить точность измерения значений МКО. В области больших углов необходимо наличие слоя РПМ и материала на обратной стороне образца. Таким образом, наилучшей структурой является “Поролон+Обёртка” как объединение структур “Обёртка” и “Поролон”. Также можно отметить, что ребра, параллельные плоскости падения, вносят определяющий вклад в первичную дифракцию. Применение представленных выше структур образцов позволяет уменьшить влияние дифракционных эффектов во всем частотном и угловом диапазоне.

Список литературы

- [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.
- [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] Röding M., Sommerkorn G., Häfner S., Ihlow A., Jovanoska S., Thomä R. S. A double-arch positioner for Bistatic measurements with four degrees of freedom // Proc. of the 47th European Microwave conf., Nuremberg, Germany, 10–12 Oct. 2017. <https://doi.org/10.23919/EuMC.2017.8231083>.
- [7] 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 and Applications (CAMA), Antibes Juan-les-Pins, France, 16–19 Nov. 2014. <https://doi.org/10.1109/CAMA.2014.7003455>.
- [8] 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>.
- [9] N. P. Balabukha, S. A. Fedorov, R. V. Gilmutdinov, N. L. Menshikh and D. V. Sapozhnikov, "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), 2021, pp. 54-57, [doi:10.1109/ADMInC54110.2021.9671006](https://doi.org/10.1109/ADMInC54110.2021.9671006).
- [10] Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С. Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния М., Россия: Наука, 2007.
- [11] Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 503 с.

CREATING OF SAMPLE STRUCTURES TO INCREASE THE ACCURACY OF MEASUREMENTS OF THE SPECULAR REFLECTION COEFFICIENT

Gilmutdinov R.V.*, Menshikh N.L., Fedorov S.A. Balabukha N.P.

Institute for Theoretical and Applied Electromagnetics of RAS, Moscow, Russia

* gilmutdinov.rv@phystech.edu

Abstract

In this paper, the effect of different structures of flat material samples on the methodological error of substitution methods in the bistatic statement are compared when measuring the specular reflection coefficient ($|R|$) and the Brewster angle. The Structures are a sample, the edges and the back side of which are covered with radar absorbing materials. The method of moments in the FEKO program was used to study structures based on a material of model magnetodielectrics with frequency-independent parameters of the medium. The results of $|R|$ are compared with each other and with the results of calculations using the Fresnel formulas, carried out in the study of an infinite flat layer of material. By calculating the effects of experiments, it is shown that the use of Structures makes it possible to reduce the influence of edges and increase the measurement accuracy, including the minimum $|R|$ at the Brewster angle. The types of structures that reduce both primary and secondary diffraction are distinguished. The influence of edges was studied on the observed diffraction effects. The use of the structures presented in the work makes it possible to reduce the influence of diffraction effects on all operating frequencies and angular manifestations. The conclusions about the advantages of structures obtained in this work are applicable to extensive lossy magnetodielectric materials.

Key words: bistatic measurements, edge effects, reflection coefficient, method of moments, FEKO