

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕОТРАЖЕНИЙ МЕЖДУ ЛИНЗОЙ И ОБЪЕКТОМ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ЕГО ЭПР В РУПОРНОЙ БЕЗЭХОВОЙ КАМЕРЕ

Балабуха Н.П.¹, Меньших Н.Л. *¹, Солосин В.С.¹

¹ *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук, Москва, Россия*

Статья поступила в редакцию 01.09.2022

Одобрена после рецензирования 25.10.2022

Принята к публикации 28.12.2022

Аннотация

Статья посвящена численному исследованию одной из важнейших характеристик измерительного стенда – погрешности измерения ЭПР объекта. Исследуется низкочастотный измерительный стенд на основе рупорной безэховой камеры с линзой. Моделирование характеристик данного стенда проводилось ранее методом моментов в программе FEKO. В данной статье рассмотрено моделирование измерения ЭПР диска в рупорной безэховой камере с линзой. Проведено сравнение «измерения» ЭПР диска при использовании линзы с просветлением и без. Для нормировки в качестве эталонного объекта рассматривался этот же диск. Это сделано специально для того, чтобы максимально скомпенсировать погрешности измерения ЭПР диска, связанные с неравномерностью распределения поля в рабочей зоне камеры. Таким образом, в рассматриваемом случае основным фактором, вызывающим погрешности измерения ЭПР объекта, является наличие переотражения между диском и линзой. Результаты исследования показали, что просветленная линза может существенно снижать погрешность определения ЭПР объекта, причем в полосе частот, а не только на частоте просветления. При частоте просветления 600 МГц просветленная линза обеспечивает существенное увеличение точности измерения ЭПР объекта в полосе частот 400 – 800 МГц.

Ключевые слова: рупорная безэховая камера, метровые длины волн, эффективная площадь рассеяния, метод моментов, моделирование измерения

Введение

Для проведения экспериментальных исследований характеристик рассеяния объектов и параметров антенн в диапазоне метровых длин волн используются рупорные безэховые камеры (РБЭК) [1]. За счет своей формы эти камеры позволяют сформировать распределение поля, близкое к полю плоской волны, в рабочей зоне с поперечным размером примерно треть от размера апертуры РБЭК [2]. С ростом частоты размер рабочей зоны будет быстро уменьшаться, если не выполнить коррекцию фазы с помощью коллимирующего устройства типа зеркала или линзы [3]. Для геометрии РБЭК предпочтительнее использовать линзу [4].

В литературе почти не обсуждаются рупорные камеры с линзами, хотя в целом интерес исследователей к низкочастотным измерительным стендам заметен, в том числе по части моделирования их характеристик.

Исследование линз радиочастотного диапазона началось еще в середине XX века [5], но в составе измерительного стенда линзы используются и по сей день редко. Главная причина в том, что технически создать линзу большого размера, удовлетворяющую требованиям по однородности, не деформирующуюся под собственным весом [4], довольно трудно. Активно применяются линзы только в миллиметровом диапазоне длин волн, где исследования и сравнения разных типов линз проводятся довольно давно [6, 7]. Однако с появлением современных материалов ситуация меняется. Из композитного материала можно сделать линзу большого диаметра, при этом достаточно легкую, так что ее можно установить в измерительном стенде. Такая линза из метаматериала была разработана и установлена в Сингапуре [8]. Масса линзы диаметром 2 м составила всего 35 кг. Материал линзы можно считать однородным для частот, далеких от частоты резонанса метаматериала.

* Автор, ответственный за переписку: Николай Леонидович Меньших, n.menshikh@gmail.com

Для уменьшения взаимодействия с линзой в оптике часто используют просветляющий слой [9]. Это четвертьволновый согласованный слой, позволяющий на данной частоте избавиться от многократных переотражений [10]. Линзы с просветлением также активно исследуются теоретически и используются в настоящее время в антенной технике [11, 12].

Современные вычислительные мощности позволяют провести численную оценку некоторых параметров измерительного стенда еще на этапе его проектирования. Разрабатываются математические модели РБЭК, которые позволяют оценить распределение поля в рабочей зоне камеры с использованием строгих методов расчета [13, 14].

РБЭК с линзой с просветлением уже исследовалась нами ранее с точки зрения формирования поля в рабочей зоне, близкого к полю плоской волны [15, 16]. В этих работах была рассмотрена РБЭК заданной геометрии, и для нее выполнена оптимизация ряда параметров линзы. Результаты оптимизации параметров гиперболической линзы использованы в данной работе.

Целью данной работы является определение погрешностей измерения ЭПР объектов в рупорной камере с линзой, связанных главным образом с переотражениями между объектом и линзой. Оценка проводилась путем численного моделирования параметров системы формирования поля с рассматриваемой линзой. Для этого были созданы компьютерные модели рупорной камеры с линзой, в одной из которых рассматривалась линза с нанесенным на обе ее поверхности просветляющим слоем, а в другой – эта же линза без просветления. Сравнение полученных в результате численного эксперимента характеристик рассеяния эталонного объекта позволяет оценить погрешность измерения ЭПР объектов в РБЭК с обеими линзами.

Геометрия камеры

Размеры рассматриваемой рупорной камеры определены размерами помещения и тех объектов, которые в ней предполагается измерять. Поэтому геометрию компьютерной модели камеры тоже считаем заданной.

Схема РБЭК представлена на рисунке 1. Длина рупорной части камеры составляет 15 м, длина части с постоянным сечением – 10 м. Стенки камеры покрыты радиопоглощающим материалом (РПМ), который моделируется плоским слоем диэлектрика с заданными параметрами. Параметры диэлектрика выбираются для каждой исследуемой частоты, чтобы соответствовать примерным характеристикам реального РПМ. Данный подход к моделированию РБЭК использовался нами в работе [13].

Диапазон рабочих частот камеры: 0,1 ГГц – 1 ГГц.

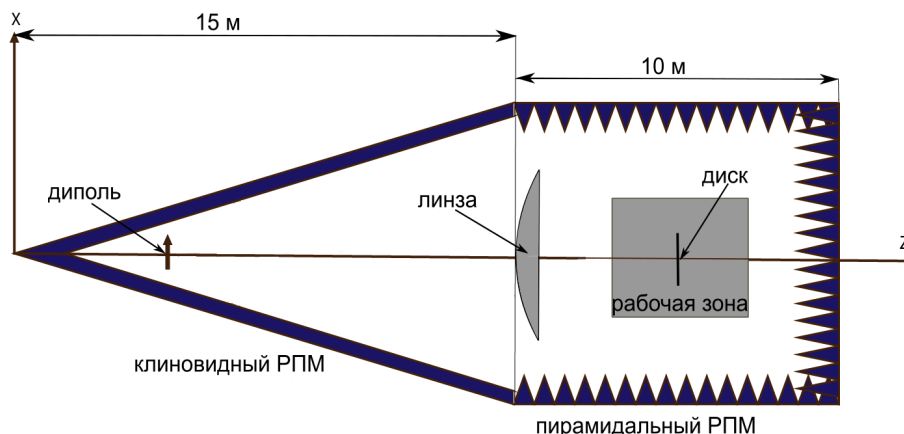


Рисунок 1 – Геометрия рупорной камеры с линзой, в рабочей зоне которой установлен объект измерения – проводящий диск

В апертуре рупорной части камеры установлена гиперболическая линза плоской поверхностью к рабочей зоне. Диэлектрическая проницаемость материала линзы – 1,6, диаметр линзы – 4 м, фокусное расстояние – 17 м. Просветление выполнено для частоты 600 МГц, толщина просветляющего слоя составляет 111 мм, диэлектрическая проницаемость 1,265. Диаметр линзы по просветляющему слою составляет 4,5 м. На рисунке 2 представлена схема и геометрические размеры линзы с просветлением.

Как было показано в работах [15, 16], наличие слоя просветления, оптимизированного для частоты 600 МГц, позволяет существенно уменьшить неравномерность распределения амплитуды и фазы поля в рабочей зоне рупорной безэховой камеры. В настоящей работе рассмотрено влияние

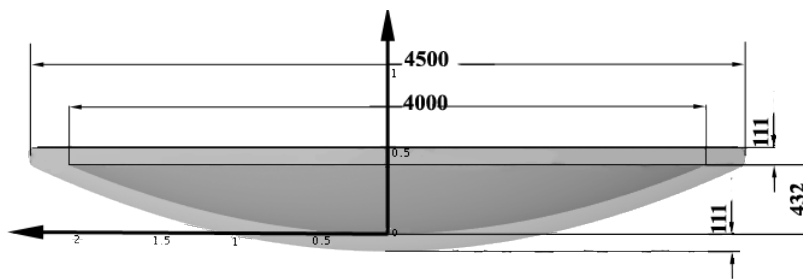


Рисунок 2 – Линза с просветляющим слоем на обеих сторонах

переотражений между объектом и линзой на точность измерения его ЭПР. В качестве объекта выбран плоский проводящий диск диаметром 1 м (треть размера рабочей зоны).

Модель расчета

Расчеты проводились в программе FEKO строгим методом моментов. Для всех металлических тел ставились граничные условия для идеального проводника. Рассматривалось поле в двух областях: внутри камеры, где среда считается вакуумом, и внутри диэлектрика с заданными для каждой частоты параметрами среды. В качестве источника излучения используется диполь. Диапазон исследуемых частот: 400 – 800 МГц.

Задача решалась в несколько этапов. На первом этапе рассчитывалось поле в апертуре рупорной части камеры при нескольких частотах. На втором этапе полученные поля использовались в качестве источника излучения и рассматривалась система линза + диск в свободном пространстве, где диск стоит на расстоянии, соответствующем его положению в рабочей зоне камеры. Для учета фонового сигнала рассматривалась линза в свободном пространстве без диска.

В измерениях ЭПР важно сделать корректную нормировку поля. В статье предложена следующая процедура. Рассматривается линза в свободном пространстве, на которую падает поле, получившееся в рупорной части камеры. На небольшом расстоянии после линзы получаем новое распределение поля. Это поле используется как источник излучения волны, падающей на исследуемый диск (используем калибровку на сам объект), стоящий нормально к оси камеры. В этой части задачи линза и остальные элементы камеры отсутствуют. Результатом расчета является распределение рассеянного диском поля в сечении, близком к положению поля излучения. Снова используем это поле как источник излучения проходящей через линзу волны, чтобы получить значение поля в дальней зоне, которое можно пересчитать в ЭПР диска.

Такая нормировка позволяет оценить погрешность измерения ЭПР диска в идеализированном случае при нормировке на сам этот же диск. В этом случае неравномерность распределения поля в области расположения диска практически полностью компенсируется, и вся погрешность измерения обуславливается именно переотражением между линзой и диском.

Результаты расчета

На рисунке 3 представлена частотная зависимость ЭПР диска. Сплошной линией показаны результаты расчета ЭПР диска в свободном пространстве строгим методом. Линиями с метками показаны результаты моделирования измерения ЭПР диска в камере с просветленной (РБЭК, линза с просв.) и обычной линзой (РБЭК с линзой) в зависимости от частоты излучения.

Диск установлен перпендикулярно оси камеры в центре рабочей зоны. В данном моделировании диск стоит неподвижно, изменяется только частота излучения.

Из графика видно, что колебания на кривой ЭПР диска при моделировании измерения в РБЭК с обычной линзой существенно сильнее, чем на кривой для РБЭК с просветленной линзой. В области частот около 600 МГц результаты измерения ЭПР диска с просветленной линзой практически совпадают с точным расчетом. Но и на крайних частотных точках, на 400 и 800 МГц, погрешность определения ЭПР диска при использовании просветленной линзы существенно ниже, т.е. просветление обеспечивает более высокую точность измерений в широком диапазоне частот.

Однако результаты моделирования при одном положении диска не дают всей полноты картины. Поэтому для трех частотных точек было проведено моделирование измерения ЭПР диска при разных его положениях. Диск сдвигался на максимальное расстояние $\pm\lambda/4$ от центра рабочей зоны, где λ –

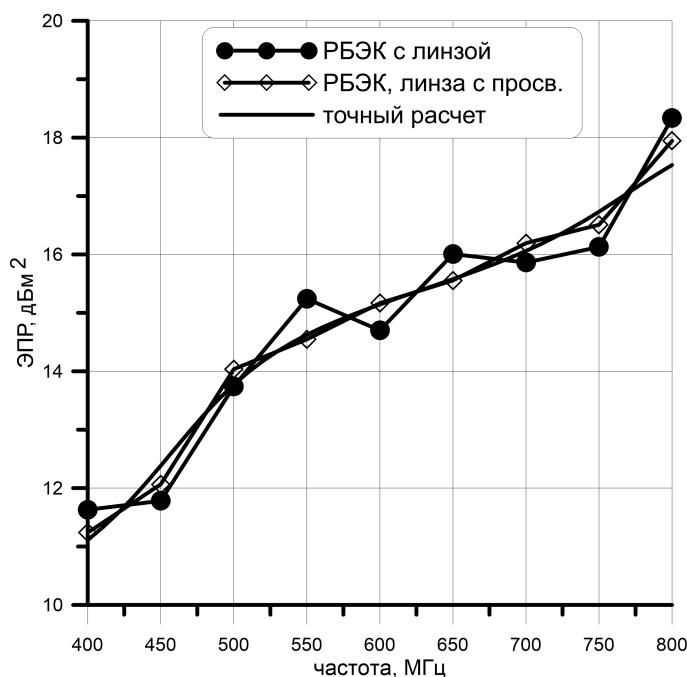


Рисунок 3 – ЭПР диска в зависимости от частоты

длина волны на заданной частоте. «Измерение» ЭПР диска в зависимости от его положения в рабочей зоне проводилось с шагом $\lambda/20$. Понятно, что, в зависимости от положения диска, переотражения между ним и линзой могут как увеличивать, так и уменьшать полученные значения его ЭПР.

Оценим максимальные колебания измеренных значений ЭПР диска и их среднее отклонение от точного значения. В таблице 1 приведены результаты моделирования измерения ЭПР диска при его установке в разных положениях вдоль оси камеры. Среднее значение будем считать как среднее арифметическое – при достаточном количестве точек это будет вполне правильный результат.

Таблица 1 – Погрешности «измерения» ЭПР диска

Частота, МГц	Усредненные погрешности, дБ		Максимальные погрешности ЭПР, дБ	
	Линза обычная	Линза с просветлением	Линза обычная	Линза с просветлением
400	0,27	0,16	1,25	0,86
600	0,36	0,02	1,02	0,06
800	0,14	0,10	1,74	0,96

Из данных таблицы 1 видно, что просветленная линза дает значительно более низкие погрешности измерения ЭПР диска по сравнению с линзой без просветления, причем не только на частоте просветления, 600 МГц, но и во всем исследуемом диапазоне частот.

Заключение

Наличие переотражений между гиперболической линзой и объектом может существенно влиять на точность измерения его ЭПР. Для диска диаметром 1 м погрешность измерения его ЭПР, вызванная наличием переотражения между ним и линзой, оценивается как 0,5 – 1 дБ в полосе частот 400 – 800 МГц.

Использование просветления на линзе позволяет снизить переотражения между объектом и линзой, уменьшить неравномерность распределения амплитуды поля в рабочей зоне камеры, и, как следствие, уменьшить погрешность измерения характеристик рассеяния объекта. Результаты проведенных исследований показали, что просветление эффективно в достаточно широком диапазоне частот.

Список литературы

- [1] Emerson W.H., Sefton H.B. An improved design for indoor ranges // J. Proceedings of the IEEE. – 1965. – Vol. 53, no. 8. – P. 1079-1081.
- [2] Electromagnetic Anechoic Chambers. Hemming L.H. - NY, USA: IEEE Press and Wiley Interscience, 2002. – p. 239.
- [3] Линзовые антенны. Зелкин Е.Г., Петрова Р.А. - М.: Советское радио, 1974. – с. 280.
- [4] Компактные полигоны для измерений характеристик рассеяния объектов. Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С. - М.: Наука, 2007. 266 с.
- [5] Mentzer J.R. The Use of Dielectric Lenses in Reflection Measurements // Proc. IRE. - 1953. - vol. 41, no. 2. - pp. 252-256.
- [6] Piksa P., Zvanovec S., Cerny P. Elliptic and Hyperbolic Dielectric Lens Antennas in mm-Waves // Radioengineering. – 2011. –Vol. 20, no. 1. – pp. 270-275.
- [7] Silveirinha M.G.M.V., Fernandes Shaped C.A. Double-Shell Dielectric Lenses for Wireless Millimeter Wave Communications // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. – 2000. – V.3, P.1674.
- [8] Matitsine S., Lagoiski P., Matytsine L., Matytsine M., Chia T.-T., Tan P.-K., Rodriguez V. Extension of Tapered Chamber Quiet Zone with Large RF Lens // AMTA. October 2012, pp. 153-156.
- [9] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Изд. 2-е., исправленное. М.: Наука 1973 г. (перевод 4-го издания от 1968 г.)
- [10] Modern antenna design. T. Milligan, 2nd ed. - New Jersey, USA: Wiley, 2005.
- [11] Costa J.R., Silveirinha M.G., Fernandes C.A. Evaluation of a Double-Shell Integrated Scanning Lens Antenna // IEEE Antenna and Wireless Propagation letters. – 2008. - Vol.7. - P.781.
- [12] Garcia N.C., Chisum J.D. High-Efficiency, Wideband GRIN lenses with intrinsically matched unit cells // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2020. –Vol. 68, no. 8 - p.5965.
- [13] Балабуха Н.П., Меньших Н.Л., Солосин В.С. Математическое моделирование электромагнитных характеристик рупорной безэховой камеры // Антенны. –2015.- №9, с.61-66.
- [14] Xiong Z. and Chen Z. Modeling of tapered anechoic chambers // Proceedings of the Conference of Antenna Measurement Techniques Association, Williamsburg, VA, Nov. 4–9, 2018 (IEEE, New York, 2018), p. 13.
- [15] Балабуха Н.П., Меньших Н.Л., Солосин В.С. Моделирование распределения электромагнитного поля в рабочей зоне рупорной безэховой камеры с линзой // Антенны. – 2017. - №2. - с. 42-49.
- [16] Балабуха Н.П., Меньших Н.Л., Солосин В.С. Оптимизация линзового коллиматора, расположенного в рупорной безэховой камере // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №9. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/sep17/5/text.pdf>.

EFFECT OF RE-REFLECTIONS BETWEEN A LENS AND AN OBJECT ON THE ACCURACY OF MEASURING ITS RCS IN A TAPERED ANECHOIC CHAMBER

Balabukha N.P, Menshikh N.L.*, Solosin V.S.

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

* n.menshikh@gmail.com

Abstract

The article is devoted to the numerical study of one of the most important characteristics of the measuring facility - the error in measuring the RCS of an object. A low-frequency measuring facility based on an anechoic tapered chamber with a lens is investigated. Modeling of the characteristics of this facility was carried out earlier by the method of moments in the FEKO program. This article discusses the simulation of measuring the RCS of a disk in a tapered anechoic chamber with a lens. A comparison was made of the "measurement" of the RCS of the disk when using a lens with and without matching layer. For normalization, the same disk was considered as a reference object. It was done specifically in order to maximally compensate for errors in measuring the RCS of the disk associated with the nonuniformity distribution of the field in the quiet zone of the chamber. Thus, in the case under consideration, the main factor causing errors in measuring the RCS of an object is the presence of re-reflection between the disk and the lens. The results of the study showed that a coated lens can significantly reduce the error in determining the RCS of an object, moreover, in the frequency band, and not only at the frequency of matching. At a matching frequency of 600 MHz, the coated lens provides a significant increase in the accuracy of measuring the RCS of an object in the frequency band of 400–800 MHz.

Key words: tapered anechoic chamber, microwave range, radar cross-section, method of moments, simulations of measurements
