

Плоская линза как коллиматор для рупорной безэховой камеры

Д.П. Королев * ^{1,2}, Н.Л. Меньших ^{1,2}, С.А. Федоров ¹

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

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)", Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 20.08.2025
Одобрена после рецензирования 29.08.2025
Принята к публикации 29.08.2025

Аннотация

В работе исследуется применение плоской линзы в качестве коллиматора для рупорной безэховой камеры. Предложен способ реализации градиентной среды и оценки её диэлектрической проницаемости. Описан процесс расчёта и создания плоской линзы. Проведён эксперимент по измерению распределения поля, формируемого плоской линзой в масштабной модели рупорной камеры. Показано, что линза позволяет сформировать достаточно однородное по фазе электромагнитное поле в рабочей зоне камеры, однако увеличивает неоднородность амплитуды. Проведены эксперименты с различным расположением линзы в рупорной части камеры и найдено оптимальное положение линзы, при котором неоднородность фазы не превышает 10° . Рассмотрена электродинамическая модель, позволяющая провести численный расчёт амплитуды и фазы поля в рабочей зоне рупорной камеры. Сопоставлены результаты эксперимента и численного моделирования, показано, что они достаточно хорошо сходятся.

Ключевые слова: градиентная линза, плоская линза, компактный полигон, рупорная безэховая камера, линзовый коллиматор

EDN: [NTLFIE](#)

doi:[10.24412/2949-0553-2025-418-13-23](#)

Flat lens as a collimator for a tapered anechoic chamber

D.P. Korolev*^{1,2}, N.L. Menshikh ^{1,2}, S.A. Fedorov¹

¹ Institute for Theoretical and Applied Electromagnetics of RAS, Moscow, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technologies, Moscow, Russia

* dpkorolev@gmail.com

Abstract

This paper investigates the use of a flat lens as a collimator for a tapered anechoic chamber. A method for realization of a gradient medium and estimation of its effective permittivity is proposed. The design and creation process is described. The field distribution formed by the flat lens was measured in the experiment using a scaled model of a tapered anechoic chamber. It is shown that the lens enables the formation of a sufficiently phase-uniform electromagnetic field in the chamber's quiet zone, although it increases amplitude non-uniformity. Experiments with different lens positions within the horn were carried out, and the optimal lens placement – where phase non-uniformity does not exceed 10° – was determined. An electrodynamic model allowing numerical calculation of the amplitude and phase of the field in the horn chamber's working area is considered. A comparison between experimental results and numerical simulations demonstrates good agreement.

Key words: gradient lens, flat lens, compact range, tapered anechoic chamber, lens collimator

* Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Павлович Королев, dpkorolev@gmail.com

Введение

Компактные полигоны представляют собой измерительные системы, позволяющие создать квазиплоскую волну на небольших расстояниях от источника излучения по сравнению с открытыми полигонами [1]. Для того, чтобы избежать нежелательных переотражений, используют безэховые камеры, стены которых покрыты специальным радиопоглощающим материалом. Чаще всего плоский волновой фронт в рабочей зоне достигается за счёт использования коллиматоров, например, в форме параболического зеркала, в фокусе которого расположен источник [1].

Для низких частот, порядка 100 МГц, из-за того, что длина волны велика, наиболее эффективной конструкцией является рупорная безэховая камера (рисунок 1) [2]. Отраженный от стен сигнал в рупорных безэховых камерах также присутствует и влияет на принимаемый сигнал, однако благодаря форме камеры отражённые от её поверхностей лучи не сильно отличаются по направлению и фазе от лучей, излучённых антенной, не сильно влияют на результат [2]. Однако, размер рабочей зоны резко убывает с ростом частоты, и для решения этой проблемы можно использовать коллиматор в виде гиперболической линзы, которая позволяет увеличить рабочую зону в широком диапазоне частот [3, 4].

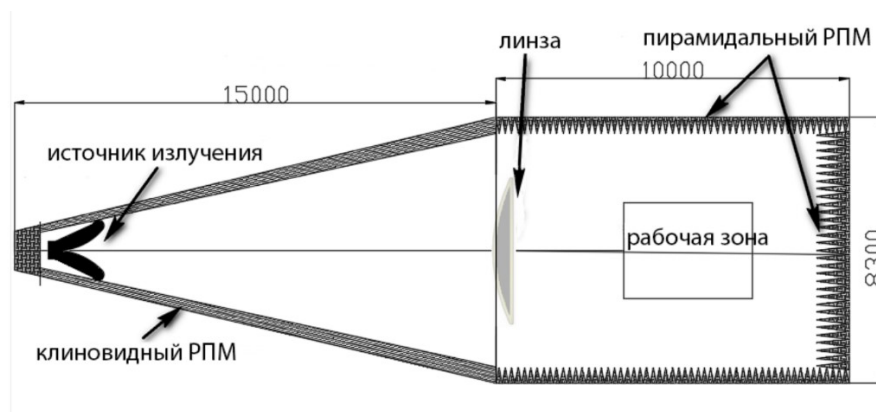


Рисунок 1 – Схема рупорной безэховой камеры

В работе [5] рассматривается задача подбора оптимальных параметров гиперболической линзы для использования в рупорной безэховой камере (рисунок 1). Данная камера предназначена для работы в диапазоне частот от 100 МГц до 1 ГГц. В работе [6] было показано, что в качестве коллиматора для рупорной безэховой камеры можно использовать плоскую линзу вместо гиперболической. У такой линзы есть ряд преимуществ: показатель преломления уменьшается к краю, что снижает влияние дифракции на краях; она создаёт однородное распределение поля даже без необходимости просветления; линза не требует создания параболической поверхности, а содержит только две плоские поверхности, которые технически значительно проще в реализации. Один из возможных методов реализации плоских линз – 3D печать структуры с меняющимся количеством филамента. Чаще всего такие линзы используются в антенной технике, например, для увеличения направленности антенны [7].

Целью данной работы является разработка и создание модели линзового коллиматора для рупорной безэховой камеры и экспериментальные исследования формируемого им поля.

1. Создание плоской линзы

1.1. Плоские линзы

Плоская линза — это одна из разновидностей градиентных линз [8]. В гиперболических линзах требуемое для фокусировки изменение оптического пути достигается за счёт формы линзы, в случае же плоской линзы оптический путь изменяется из-за градиентно меняющегося показателя преломления. В такой линзе преломлённые лучи движутся не по прямой, а по более сложной траектории (рисунок 2).

Одно из решений для описания параметрической зависимости показателя преломления от радиальной координаты точки на линзе было получено А.Л. Микаэляном и затем обобщено Ю.А. Зайцевым:

$$n(y) = \frac{n_0 d_0 - f(\sec \theta - 1)}{d_0 \cosh\left(\frac{\pi(y-y_1)}{2d_0}\right)}, \quad (1)$$

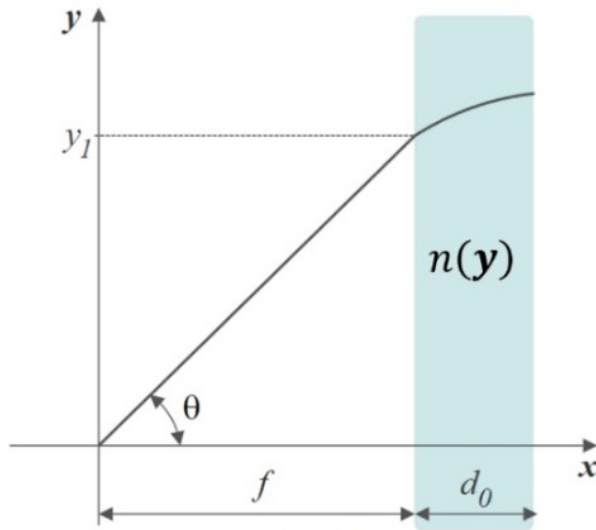


Рисунок 2 – Ход лучей в плоской линзе

$$y = y_1 + \frac{2d_0}{\pi} \operatorname{artanh} \left(\frac{d_0 y_1}{\sqrt{f^2 + y_1^2} (n_0 d_0 + f - \sqrt{f^2 + y_1^2})} \right), \quad (2)$$

где n_0 – значения показателя преломления в центре линзы ($y = 0$), d_0 – толщина линзы, f – фокусное расстояние, $\theta = \arctan \left(\frac{y_1}{f} \right)$. Линза с такой зависимостью показателя преломления от радиуса (рисунок 3) называется обобщённой линзой Микаэляна. Реализовать такую линзу можно, если разбить линзу на несколько слоёв с постоянной диэлектрической проницаемостью в каждом слое (рисунок 3, красный график). Характерные размеры слоёв определяются диапазоном частот, на которые рассчитана линза.

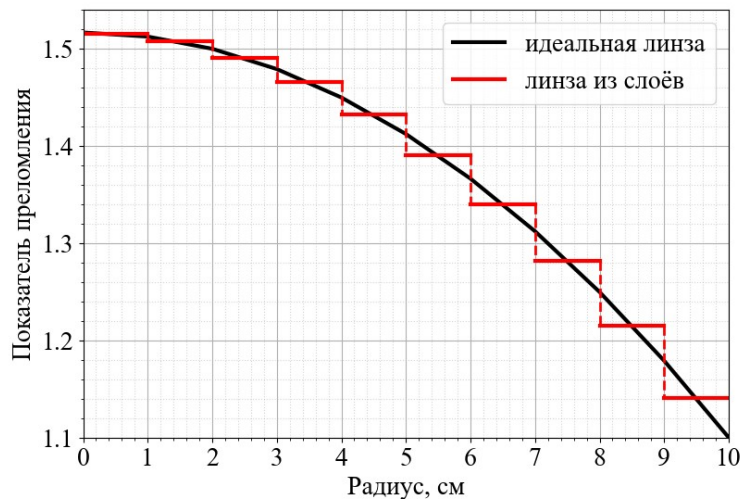


Рисунок 3 – Зависимость показателя преломления от радиуса линзы для идеальной линзы и линзы из слоёв

1.2. Модель линзы

Модель плоской линзы (рисунок 4 состоит из квадратных ячеек со стороной 1 см и отверстиями разного размера. Размер ячейки задан исходя из рабочего диапазона частот. Полноразмерная рупорная камера рассчитана для работы на частотах порядка 500 МГц. Так как линза предназначена для использования в масштабной модели 1:22, то диапазон частот также следует отмасштабировать, поскольку модель линзы проектировалась для работы на частотах порядка 10 ГГц. Размер ячейки был выбран так, чтобы на основной частоте она была меньше половины длины волны в среде для PLA пластика с диэлектрической проницаемостью 2,53 [9].

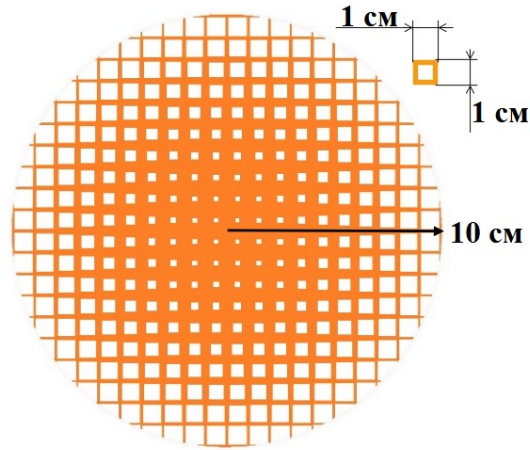


Рисунок 4 – Модель плоской линзы

Фокусное расстояние линзы составляет 80 см, толщина 1,5 см. Толщина линзы подобрана исходя из того, чтобы она позволяла достичь наибольшего диапазона эффективной диэлектрической проницаемости, определяемого размером отверстий. Изменение показателя преломления достигается за счёт структуры линзы, состоящей из массива квадратных ячеек с квадратными отверстиями (рисунок 5), размер которых определяет эффективную диэлектрическую проницаемость данной ячейки. Такая структура симметрична, легка в изготовлении, например, при помощи 3D-печати, а также проста для моделирования и оценки её электродинамических характеристик [10, 11].

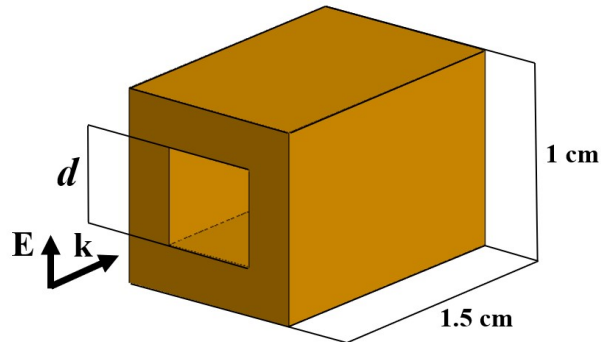


Рисунок 5 – Элементарная ячейка линзы и падающая электромагнитная волна

1.3. Оценка эффективной диэлектрической проницаемости

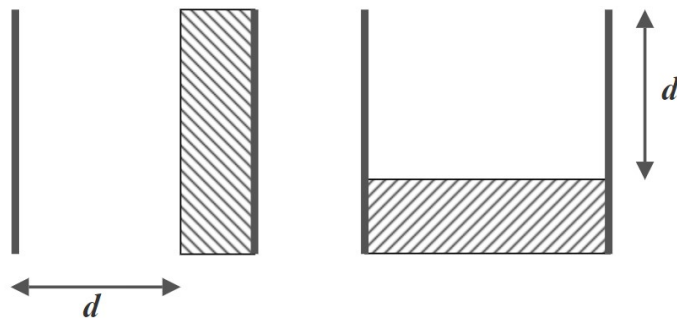


Рисунок 6 – Конденсаторы, заполненные диэлектриком

Для оценки показателя преломления были рассмотрены структуры, состоящие из параллельных слоёв диэлектрика (с диэлектрической проницаемостью ϵ) и воздуха (рисунок 6). Если поместить такую

структуру в конденсатор, то в зависимости от расположения вдоль или поперёк обкладок конденсатора, изменятся его ёмкости. Сопоставляя изменение ёмкости, можно оценить эффективную диэлектрическую проницаемость по формуле:

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon(1 - d) + \frac{\varepsilon d}{\varepsilon d + 1 - d}, \quad (3)$$

где d – длина стороны квадратного отверстия, отнесённая к размеру ячейки.

Оценка правильности формулы производилась при помощи сравнения с результатами численного моделирования. С использованием ФЕКО строилась зависимость коэффициента отражения от частоты для бесконечного массива из описанных ранее ячеек с заданным размером отверстия. Для заданного размера отверстия по формуле (3) вычислялась эффективная диэлектрическая проницаемость, и для неё по формуле Френеля строилась аналогичная зависимость. Пример полученных графиков показан на рисунке 7.

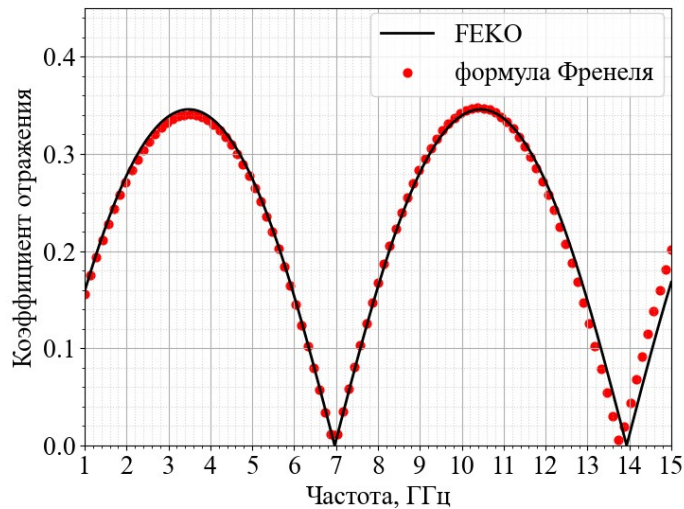


Рисунок 7 – Сравнение зависимости коэффициента отражения от частоты, полученной с помощью расчёта на ФЕКО и по формулам Френеля

Зависимости эффективной диэлектрической проницаемости, рассчитанной по формуле (3), и фактической (вычисленной при помощи ФЕКО) от размера отверстия в ячейке для материала, состоящего из бесконечного периодического массива таких ячеек, показаны на рисунке 8 [11]. Рисунки 7 и 8 показывают, что предложенная формула позволяет достаточно точно оценить эффективную диэлектрическую проницаемость структуры.

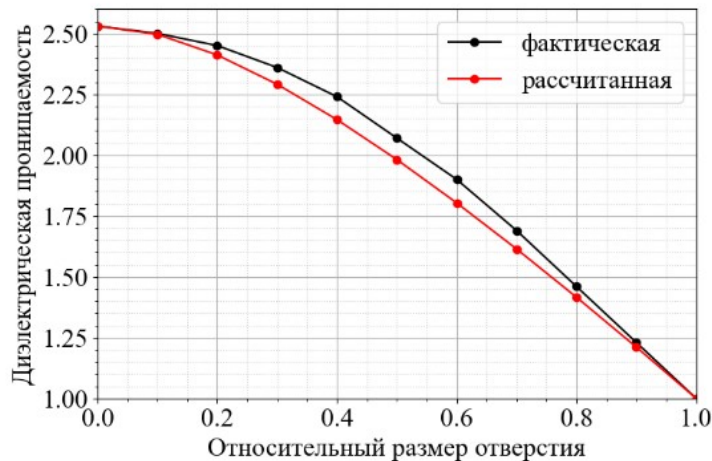


Рисунок 8 – Зависимость рассчитанной по формуле (3) и фактической эффективных диэлектрических проницаемостей от размера отверстия в ячейке

2. Эксперимент в модели рупорной камеры

2.1. Постановка эксперимента

Эксперимент проводился в модели рупорной камеры (рисунок 9), выполненной в масштабе 1:22. Модель не является точной копией камеры с рисунка 1, некоторые размеры изменены, так как камера и модель предполагают использование разных источников. Рупорная часть камеры имеет форму квадратной пирамиды и составляет 80 см в длину, а прямоугольная часть составляет 50 см и не имеет задней стенки для возможности сканирования поля. Линза располагалась в апертуре рупора, т. е. на расстоянии 80 см от источника. Источником являлся рупорный облучатель, который создаёт почти такое же поле в рупорной камере, как и дипольная антенна [12], а в качестве зонда использовался открытый конец прямоугольного волновода. Использованный сканер имеет точность позиционирования менее 0,01 см и позволяет измерять электромагнитное поле в области 80×80 см [13], с его помощью измерялся двумерный срез амплитуды и фазы электромагнитного поля в центре прямоугольной части камеры (на расстоянии 25 см от линзы), в плоскости, перпендикулярной оси симметрии камеры. Измерения проводились в области 25×25 см с шагом 1 см в диапазоне частот от 8 до 12 ГГц с шагом 0,25 ГГц. Далее проводились аналогичные измерения, в которых линза располагалась на расстоянии 60 см и 70 см от источника (рисунок 10).

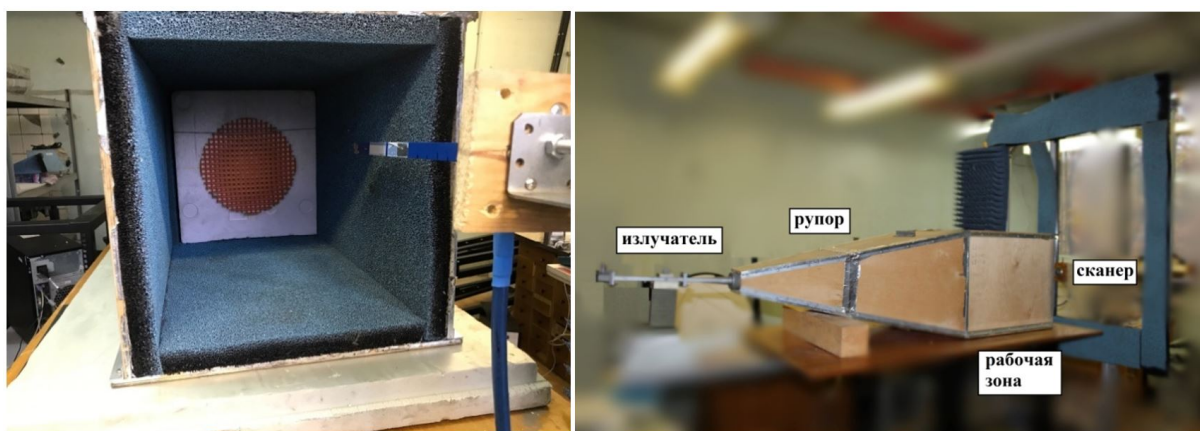


Рисунок 9 – Схема экспериментальной установки для измерения поля в модели рупорной камеры с коллиматором в виде плоской линзы

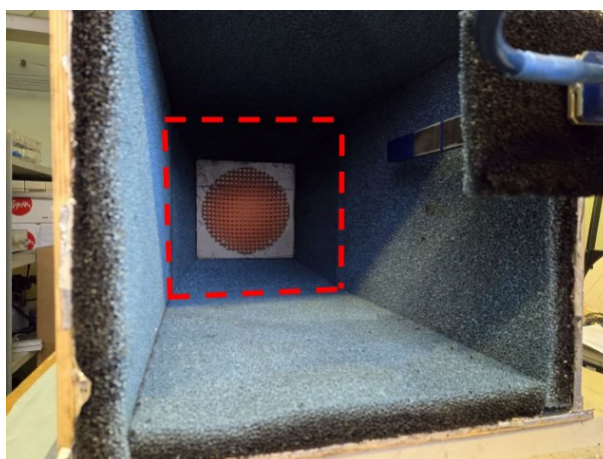


Рисунок 10 – Эксперимент с линзой, расположенной на расстоянии 60 см от источника, красным пунктиром показано сечение апертуры рупорной части камеры

2.2. Результаты эксперимента

Результаты эксперимента представлены на рисунках 11- 12. Показаны срезы распределения амплитуды и фазы в двух перпендикулярных направлениях для самой низкой, средней и самой высокой частот диапазона. На одном графике представлены срезы поля без линзы и полей с линзой в трёх различных положениях. Красными пунктирными линиями отмечены границы рабочей зоны рупорной камеры. Поле источника имеет вертикальную поляризацию, вектор \mathbf{E} направлен вдоль координаты Y .

2.2. Анализ результатов

На рисунке 11 видно, что неоднородность амплитуды поля, формируемого линзой, всегда выше, чем поля без линзы, что является предсказуемым результатом [14]. Неоднородность амплитуды поля без линзы составляет менее 1 дБ, что удовлетворяет критерию квазиплоского поля [1]. В среднем, наиболее хорошее распределение поля позволяет сформировать линза, расположенная на расстоянии 80 см от источника, однако неоднородность поля всё равно в разы выше, чем без линзы.

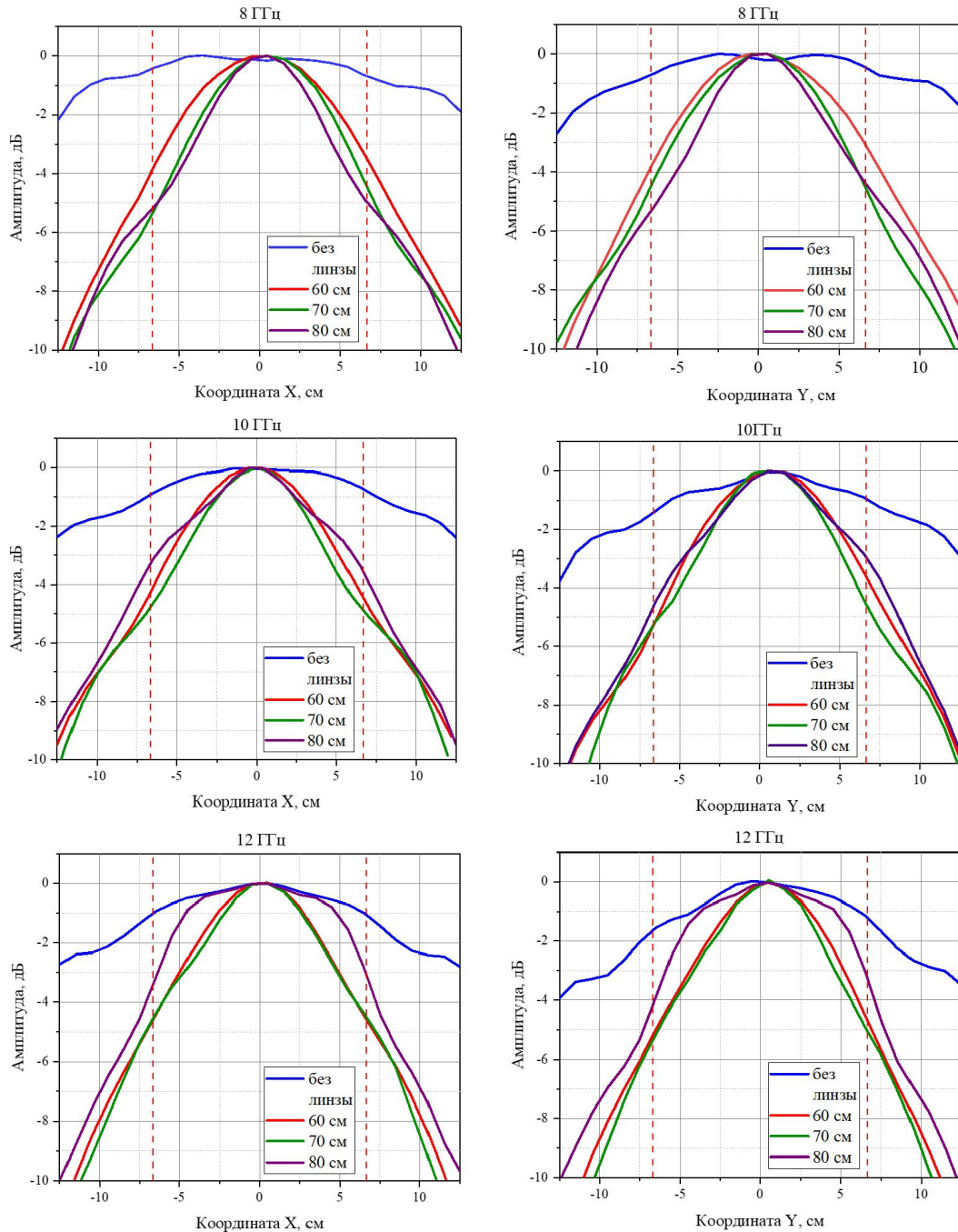


Рисунок 11 – Распределение амплитуды электромагнитного поля вдоль координат X и Y и на частотах 8, 10 и 12 ГГц

На рисунке 12 представлены распределения фазы поля. Видно, что неоднородность распределения фазы электромагнитного поля в рупорной камере без линзы заметно выше, чем с линзой в любом положении. Линза работает наиболее эффективно, если она расположена на 70 см от источника, тогда как рассчитанное фокусное расстояние составляет 80 см. В такой конфигурации неравномерность фазы составляет менее 10° в рабочей зоне (срез рабочей зоны в поперечном направлении представляет собой круг диаметром $2/3$ диаметра линзы [12] от $-66,6$ мм до $66,6$ мм). Также видно, что линза, расположенная на расстоянии 80 см от источника, перефокусирует, а линза, расположенная на расстоянии 60 см,

недофокусирует пучок лучей от источника.

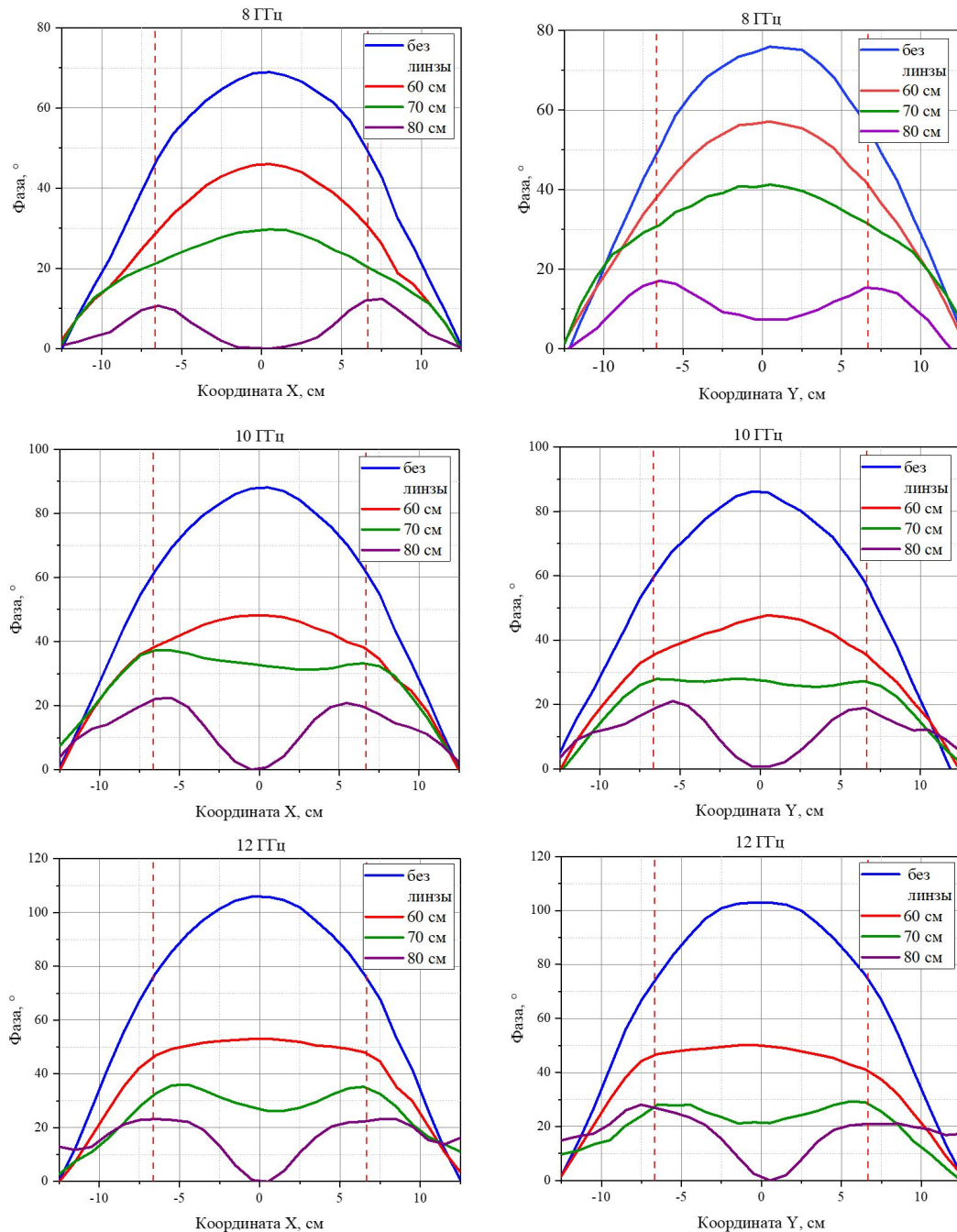


Рисунок 12 – Распределение фазы электромагнитного поля вдоль координат X и Y и на частотах 8, 10 и 12 ГГц

3. Моделирование в FEKO

Численный расчёт амплитуды и фазы поля, создаваемого плоской линзой в модели рупорной камеры, производился при помощи электродинамического моделирования в программе Altair FEKO. Использовался метод моментов с сеткой, средняя длина стороны треугольников которой составляла 2 мм. Так как моделирование камеры сильно бы усложнило задачу, вместо этого использовался специальный точечный источник с диаграммой направленности, такой, что, распределение поля имитировало распределение поля в апертуре рупорной камеры (рисунок 13).

Сравнение расчётов и экспериментальных измерений показано на рисунках 14 и 15. Видно, что результаты моделирования достаточно похожи на экспериментальные, что доказывает верность модели. Таким образом, эту модель можно использовать для оценки эффективности конкретной структуры на этапе проектирования.



Моделирование в FEKO



Рисунок 13 – Схема рупорной камеры и её моделирование в FEKO

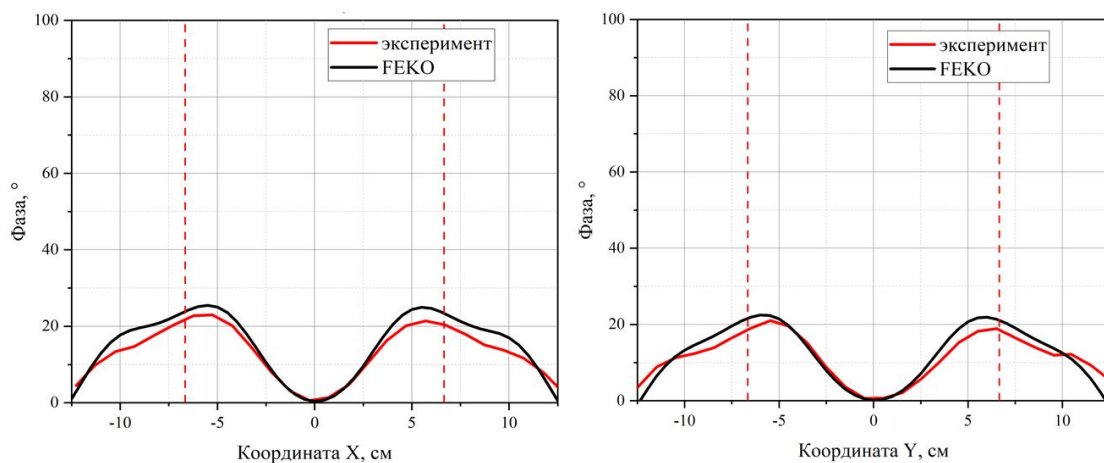


Рисунок 14 – Сравнение экспериментального и расчётного распределения фазы электромагнитного поля вдоль координат X и Y на частоте 10 ГГц

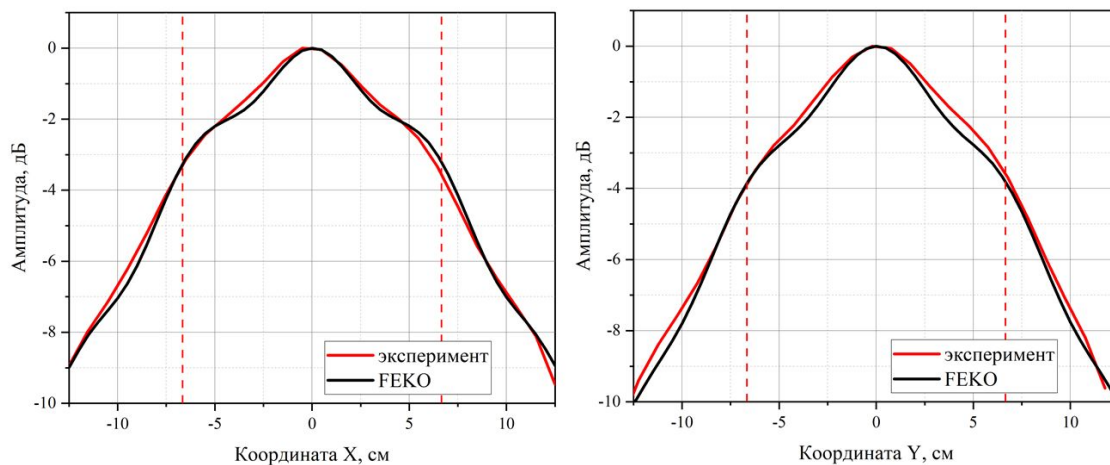


Рисунок 15 – Сравнение экспериментального и расчётного распределения амплитуды электромагнитного поля вдоль координат X и Y на частоте 10 ГГц

Заключение

В данной работе рассмотрена возможность использования плоской градиентной линзы в качестве коллиматора для рупорной безэховой камеры. Предложена простая конструкция линзы, основанная на массиве квадратных ячеек с переменными отверстиями, позволяющая реализовать требуемую зависимость эффективного показателя преломления от радиуса. Модель линзы была изготовлена при помощи 3D-печати. Разработан способ оценки эффективной диэлектрической проницаемости ячеек, результаты которого подтвердились при помощи численного моделирования с помощью FEKO.

Эксперименты в масштабной модели рупорной камеры показали, что использование плоской линзы позволяет заметно снизить неоднородность фазы электромагнитного поля в рабочей зоне. При этом наблюдается рост неоднородности амплитуды. Дополнительные эксперименты показали, что оптимальное расположение линзы – на расстоянии 70 см от источника, что меньше фокусного. В такой конфигурации неоднородность фазы в рабочей зоне модели рупорной камеры не превышает 10° , что показывает эффективность применения плоской линзы в качестве коллиматора.

Сопоставление результатов эксперимента с данными численного моделирования показало их хорошее соответствие, что подтверждает корректность предложенной модели. Таким образом, плоская линза может быть эффективно использована для расширения рабочей зоны рупорной безэховой камеры в широком диапазоне частот при условии точного подбора её параметров и положения, например, при помощи моделирования.

Список литературы

- [1] Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния объектов / Н.П. Балабуха, А.С. Зубов, В.С. Солосин. М.: Наука, 2007. 266 с. ISBN: 978-5-02-032738-2, EDN: [QMRWHF](#)
- [2] Characteristics of a tapered anechoic chamber / H. E. King, F. I. Shimabukuro, J. L. Wong // IEEE Trans. Antennas Propagat. 1967. Vol. 15. No. 3. 488-490 pp. doi: [10.1109/TAP.1967.1138921](#)
- [3] Cone Shaped Tapered Chamber for Antenna Measurements Both in Near Field and Far Field in the 200 MHz to 18 GHz Frequency Range and Extension of the Quiet Zone using an RF Lens / V. Rodriguez, S. Matitsine, T.-T. Chia, P. Lagoiski, L. Matytsine, M. Matytsine, P. Tan // ACES Journal. 2013. Vol. 28. No. 12. Pp. 1162-1170.
- [4] Extension of Tapered Chamber Quiet Zone with Large RF Lens / S. Matitsine, P. Lagoiski, L. Matytsine, M. Matytsine, T.-T. Chia, P.-K. Tan, V. Rodriguez // Proceedings of AMTA. 2012. Pp. 153-156.
- [5] Оптимизация линзового коллиматора, расположенного в рупорной безэховой камере / Н.П. Балабуха, Н.Л. Меньших, В.С. Солосин // Журнал Радиоэлектроники. 2017. № 9. С. 1684-1719. EDN: [ZRJEFJ](#)
- [6] Development of a Plane Lens for a Tapered Anechoic Chamber / N.P. Balabukha, N.L. Menshikh, V.S. Solosin // Proceedings - 2022 IEEE 8th All-Russian Microwave Conference. Pp. 187-190. doi: [10.1109/RMC55984.2022.10079487](#)
- [7] Printing Materials and Techniques for Antennas and Metamaterials: A survey of the latest advances / T. Whittaker, S. Zhang, A. Powell, C. J. Stevens, J. Y. C. Vardaxoglou, W. Whittow // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2023. Vol. 65. No. 3. Pp. 10-20. doi: [10.1109/map.2022.3229298](#), EDN: [YYZJVI](#)
- [8] Линзовые антенны / Е.А. Зелкин, Р.А. Петрова. М.: Советское радио, 1974. 280 с.
- [9] Creating a Luneburg Lens by 3D Printing / K.M. Baskov, V.N. Semenenko, S.Y. Bobrovskii, D.Y. Poddubnii, V.V. Yatsenko, T.A. Furmanova // 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). 2023. Pp. 204-207. doi: [10.1109/RSEMW58451.2023.10202135](#)
- [10] Модель плоской линзы / Д.П. Королев, Д.Ю. Поддубный, Н.Л. Меньших, В.С. Солосин // Сборник тезисов двадцать четвертой ежегодной научной конференции ИТПЭ РАН. М.: ИТПЭ РАН. 2023. С. 48-49.
- [11] Flat Lens as a Collimator for Tapered Anechoic Chamber / D. P. Korolev, N.L. Menshikh, V.S. Solosin, D.Y. Poddubny // 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](#)
- [12] Математическое моделирование электромагнитных характеристик рупорной безэховой камеры / Балабуха Н.П., Меньших Н.Л., Солосин В.С // Антенны. 2015. № 9 (220). С. 61-66. EDN: [VJZFXL](#)
- [13] Экспериментальное и численное исследование распределения поля в ближней зоне широкополосной рупорной антенны / Ю.А. Амчиславский, И.М. Купцов, Е.В. Булычев, Н.Л. Мень-

ших, С.А. Федоров // Журнал радиоэлектроники [Электронный журнал]. 2019. № 10. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct19/10/text.pdf>, doi: [10.30898/1684-1719.2019.10.10](https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.10.10), EDN: [YGLPAX](#)

- [14] Моделирование распределения поля в рабочей зоне рупорной безэховой камеры с линзой. / Н.П. Балабуха, Н.Л. Меньших, В.С. Солосин // Антенны. 2017. № 2 (236). С. 42- 49. EDN: [YHFKZN](#)

Ссылка для цитирования:

Королев Д.П., Меньших Н.Л., Федоров С.А. Плоская линза как коллиматор для рупорной безэховой камеры // Современная электродинамика. 2025. Т. 4, № 4(18). С. 13-23. EDN [NTLFIE](#), doi: [10.24412/2949-0553-2025-418-13-23](https://doi.org/10.24412/2949-0553-2025-418-13-23)

Citation link:

Korolev D.P., Menshikh N.L., Fedorov S.A. Flat lens as a collimator for a tapered anechoic chamber // Modern Electrodynamics. 2025. Vol. 4, No. 4(18). P. 13-23. EDN [NTLFIE](#), doi: [10.24412/2949-0553-2025-418-13-23](https://doi.org/10.24412/2949-0553-2025-418-13-23)