

УДК 537.876.4

ОПТИМИЗАЦИЯ ЛИНЗОВОГО КОЛЛИМАТОРА, РАСПОЛОЖЕННОГО В РУПОРНОЙ БЕЗЭХОВОЙ КАМЕРЕ

Н. П. Балабуха¹, Н. Л. Меньших^{1,2}, В. С. Солосин¹

¹ Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН,

125412, г. Москва, ул. Ижорская 13

² Московский физико-технический институт (Государственный университет)

141700, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Статья поступила в редакцию 7 сентября 2017 г.

Аннотация. Выполнен анализ электромагнитного поля в рабочей зоне рупорной безэховой камеры с линзой, проведена оптимизация некоторых параметров линзы. Расчет был проведен методом интегральных уравнений с использованием программы FEKO. Разработано просветляющее покрытие, позволяющее уменьшить неравномерность распределения поля в рабочей зоне камеры на 0,5 - 1 дБ по сравнению с линзой без просветления в частотном диапазоне 0.4-1.0 ГГц. Показано, что линза, покрытая просветляющим слоем, позволяет получить неравномерность амплитуды поля менее 2,2 дБ и фазы не более 15 градусов. Просветление достаточно наносить только с одной стороны линзы.

Ключевые слова: рупорные безэховые камеры, диэлектрическая линза, просветляющий слой, радиопоглощающий материал, метод моментов, FEKO.

Abstract. Electromagnetic field analysis was performed for the quiet zone of a tapered anechoic chamber with a lens. Some parameters of the lens like focus distance and diameter were optimized. The numerical calculations were performed by the method of integral equations in FEKO program. Using cluster of ITAE RAS allowed carrying out simulation of the field distribution in the quiet zone of the tapered chamber in frequency range of 0.4 – 1 GHz.

Matching layers are used for improving lens properties. The matching pursues two goals: firstly, it reduces reflections inside the lens and, secondly, it provides a

smother “lens – air” transition, thus reducing diffraction effects at the edges. Both the lens and the matching layer are made of a new lightweight composite material with unchangeable low dielectric permittivity. The diameter of the lens is 4.5 meters.

The matching layer was developed, which makes it possible to reduce the non-uniformity distribution of the field in the quiet zone of the chamber by 0.5-1 dB within the frequency range of 0.4-1.0 GHz compared with the chamber with the lens without a matching layer. It is shown that the field amplitude non-uniformity may become less than 2.2 dB with the lens coated by a matching layer within the frequency range of 0.4 – 1 GHz and with the phase distribution non-uniformity not exceeding 15 degrees.

It is sufficient to make the matching layer only on a plane surface of the lens. This matching layer ensures the non-uniformity field distribution is the same as a large lens of 4.5 meters in diameter.

Keywords: tapered anechoic chamber, dielectric lens, matching layer, method of moments, FEKO.

1. Введение

В области низких частот почти безальтернативными измерительными стендами являются рупорные безэховые камеры (РБЭК). Хотя идея таких измерительных стендов появилась давно [1], только в последние годы в связи с возросшим интересом к области метровых длин волн заметно увеличилось количество публикаций, посвященных рупорным камерам. Специальная форма камеры обеспечивает приемлемую неравномерность распределения поля в рабочей зоне, уровень безэховости в РБЭК лучше, чем в прямоугольной БЭК с близкими размерами рабочей зоны [2, 3].

Для того, чтобы с ростом частоты размер рабочей зоны не уменьшался, нужно использовать коллимирующее устройство, например, линзу. Наиболее простыми линзами, трансформирующими сферический расходящийся фронт в плоский фронт, являются линзы с одной преломляющей поверхностью [4]. Благодаря простой конструкции такие линзы привлекают внимание

исследователей и в наши дни. Сравнению эллиптической и гиперболической линз в радиочастотном диапазоне посвящена работа [5], где приведены результаты экспериментальных измерений поля для линз диаметром 80 мм (измерялось с помощью 2D сканера) на 40 ГГц и на 90 ГГц.

Чтобы использовать линзу в диапазоне дециметровых волн, линза должна иметь соответствующие размеры. Самая большая линза, используемая в безэховых камерах, была разработана и изготовлена в Сингапуре [6]. Линза сделана из композитного материала, имеющего почти не меняющуюся с частотой диэлектрическую проницаемость, равную 1.8. Благодаря этому линза диаметром 2 метра весит всего 35 кг. Диапазон рабочих частот линзового коллиматора составляет 0.5 – 10 ГГц, фокусное расстояние 10 м, в фокусе установлена антенна ETS Lindgred. Полученное поле имеет неравномерность амплитуды ± 1 дБ и фазы $\pm 10^\circ$ в рабочей зоне диаметром 1.4 м на частотах 2 – 8 ГГц.

Для улучшения свойств линзы в оптическом диапазоне используются просветляющие покрытия.

В области сантиметровых длин волн впервые просветление было применено еще полвека назад [7]. Авторами было показано, что в этом диапазоне частот вполне можно выполнять просветляющий слой из материала самой линзы, просто создавая на ней слой толщиной четверть длины волны, где часть материала линзы удалена. Структура слоя создана так, чтобы проницаемость была равна $\sqrt{\epsilon_L}$, где ϵ_L – диэлектрическая проницаемость линзы.

Просветляющее покрытие в виде слоя диэлектрика с постоянной проницаемостью рассматривалось в [8]. Для выбранной линзы было сделано просветление, работающее в диапазоне частот от 20 ГГц до 30 ГГц.

В настоящее время в области миллиметровых длин волн стали активно использоваться линзовые антенны. Для уменьшения потерь на переотражения внутри линзы разрабатываются просветляющие покрытия, которые почти не сужают рабочий диапазон частот антенны. Например, это можно сделать за счет создания просветляющего слоя изменяющейся толщины [9].

Однако, в области метровых и дециметровых длин волн линзы изучены очень мало. В мире почти нет измерительных комплексов на основе РБЭК для измерений ЭПР и ДН антенн, а РБЭК с линзами метровых размеров на сегодняшний день нет. Поэтому очень важно провести оценку характеристики распределения поля в камере и попробовать ее улучшить.

Авторами ранее было исследовано [10-11] распределение поля в рабочей зоне РБЭК с гиперболической линзой. Данная работа посвящена исследованию возможностей оптимизации линзового коллиматора для уменьшения неравномерности поля в рабочей зоне камеры.

2. Геометрия камеры с линзой

Геометрия рупорной безэховой камеры показана на рис. 1.

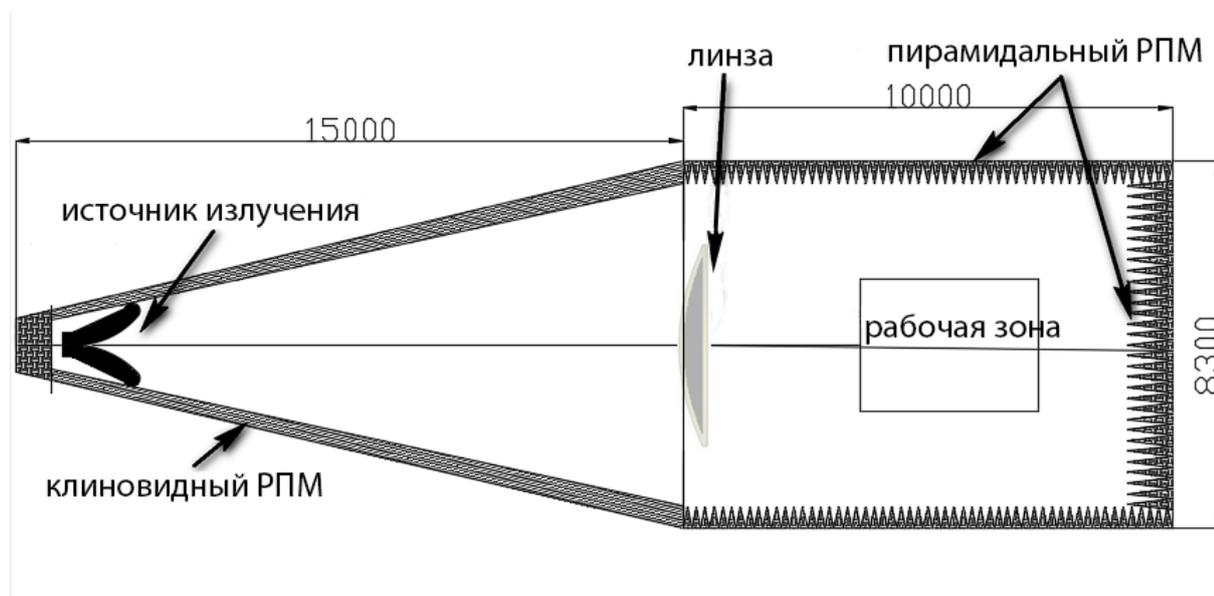


Рис.1. Геометрия РБЭК

РБЭК имеет 25 метров в длину: 15 из них занимает рупорная часть. В устье рупорной части находится источник излучения, в качестве него используется антенна QN400. Радиопоглощающий материал (РПМ) на стенках рупорной части имеет толщину 60 см. Прямоугольная часть камеры имеет поперечные размеры 8,3 м × 8,3 м. Рабочая зона представляет собой горизонтально расположенный круговой цилиндр диаметром 3 м и длиной 3 м, центр рабочей зоны находится на расстоянии 4 метров от апертуры рупорной части камеры.

Для коррекции фазы в апертуре рупорной части камеры установлена линза. Ее параметры: диэлектрическая проницаемость материала 1.6, диаметр 4 метра. Линза выполнена из композитного материала [7], диэлектрическую проницаемость которого остается постоянной во всем диапазоне частот. Освещенная поверхность линзы имеет форму гиперboloида вращения, поверхность, обращенная к рабочей зоне, – плоская. Вершина гиперboloида вращения находится в плоскости раскрыва рупора на оси камеры, как показано на рис. 1.

3. Расчет распределения поля в рабочей зоне камеры

Расчет распределения поля в рабочей зоне РБЭК был выполнен методом интегральных уравнений с использованием программы ФЕКО.

При расчетах рупорной части камеры РПМ на ее стенках рассматривался как слой однородного диэлектрика с постоянной ϵ . Диэлектрическая проницаемость слоя определялась методом плоскостоего приближения, а вычисление коэффициента отражения от РПМ опиралось на результаты работы [12].

В прямоугольной части РБЭК РПМ аппроксимировался тонким слоем диэлектрика с постоянным импедансом. Отражение от такого слоя рассчитывается как отражение от полупространства с поверхностным импедансом $Z_{\text{пов}}$, заданным формулой

$$Z_{\text{пов}} = \frac{Z_{\text{РПМ}}Z_0}{Z_{\text{РПМ}} + Z_0},$$

где Z_0 – импеданс вакуума, $Z_{\text{РПМ}}$ – импеданс слоя РПМ.

В этой части камеры нам важно не только падение основной волны на РПМ, но также и волны, отраженные от излома камеры. Адекватность данного подхода к моделированию РПМ подтвердилась в экспериментальных исследованиях на масштабной модели камеры [10].

Материал линзы предполагается однородными диэлектриками.

4. Фокусное расстояние линзы

Обычно фокус линзы выбирается так, чтобы в нем располагался источник излучения. В данном случае, если источник поместить в самое устье камеры, то фокусное расстояние линзы необходимо выбрать 15 метров.

Однако, такой подход не всегда бывает оптимальным. Простые соображения геометрической оптики говорят нам о том, что более длиннофокусная линза сформирует слегка расходящийся пучок лучей, что позволит расширить поле в рабочей зоне. При этом фаза волны будет иметь квадратичное искажение, но при правильном выборе параметров это отклонение остается в пределах допустимых значений.

Расчет с использованием строгого метода показал, что линза с фокусным расстоянием 17 метров может обеспечить более равномерное поле в рабочей зоне, чем линза с 15 метровым фокусным расстоянием.

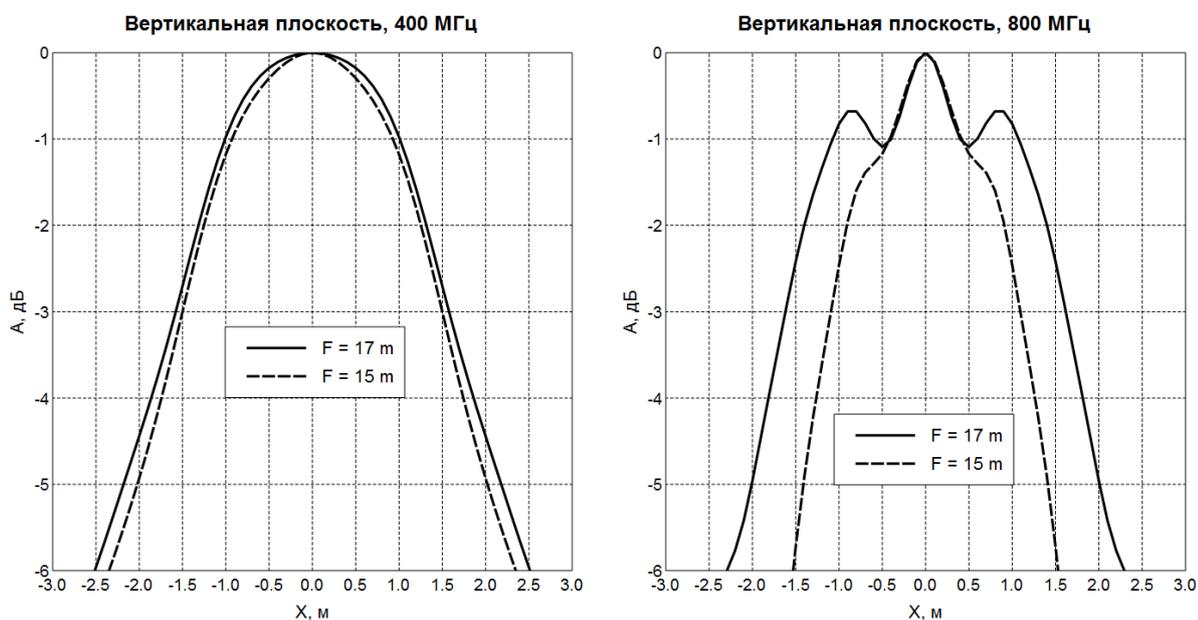


Рис. 2. Распределение амплитуды поля вдоль оси X на частотах 400 МГц (а) и 800 МГц (б) в сечении, проходящем через центр рабочей зоны камеры с линзой с $F=17$ метров (сплошная линия) и с $F=15$ метров (штриховая).

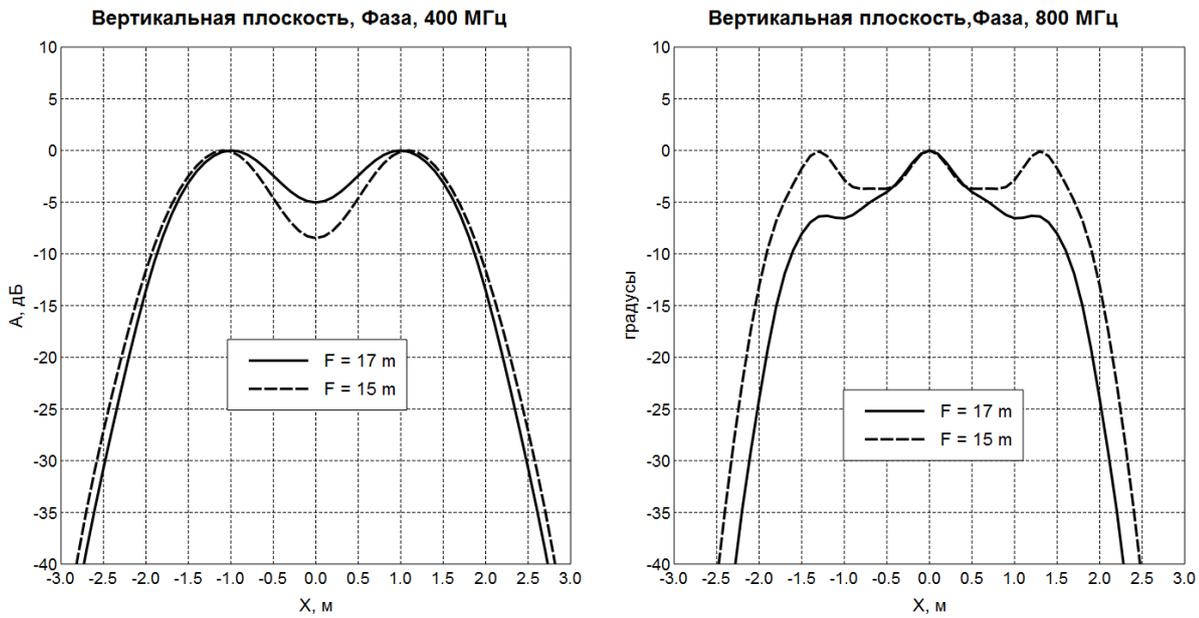


Рис. 3. Распределение фазы поля вдоль оси X на частотах 400 МГц (а) и 800 МГц (б) в сечении, проходящем через центр рабочей зоны камеры с линзой с F=17 метров (сплошная линия) и с F=15 метров (штриховая).

На размерах рабочей зоны (диаметр 3 метра) более длиннофокусная линза формирует распределение поля с неравномерностью амплитуды на 2-3 дБ меньше, чем более короткофокусная линза (рис. 2), при этом неравномерность фазы поля (рис. 3) остается в пределах нормы (меньше, чем $\pi/4$).

5. Просветляющий слой

В работе [11] было показано, что линза исправляет распределение фазы поля в рабочей зоне, но, к сожалению, ухудшает амплитудное распределение. Как было сказано выше, просветляющий слой зачастую позволяет улучшить поле после линзы.

Рассчитаем параметры просветляющего слоя. Коэффициент преломления материала просветления рассчитывается как среднее геометрическое коэффициентов преломления окружающей среды $n_1 = 1$ и линзы $n_2 \approx 1,265$, $n_{пр} = \sqrt{n_1 n_2} \approx 1.125$, толщина слоя h на поверхности линзы должна быть

$$h = \frac{\lambda_0}{4n_{пр} \cos \theta_2}$$

где λ_0 – длина волны в свободном пространстве, θ_2 – угол, под которым луч проходит внутрь просветляющего слоя.

Толщина просветляющего слоя зависит от частоты и от угла падения. Углы падения волны в рассматриваемой камере на линзу близки к нормальным. Нам нужно достигнуть улучшения распределения поля на частотах 400 МГц – 1 ГГц, перекрытие более чем в два раза. Наибольшее влияние на распределение поля в рабочей зоне линза оказывает на частотах, близких к 400 МГц. Соответственно, нам важно выбрать частоту, оптимальную для просветляющего слоя, так, чтобы слой точно работал на 400 МГц (толщина больше, чем $\lambda/8 \approx 93,75$ мм), но при этом еще не ухудшал поле на 1 ГГц (т.е. толщина меньше, чем $\lambda/2 \approx 150$ мм). По этим соображениям выбираем частоту для просветляющего слоя 600 МГц.

В отличие от оптики, на дециметровых волнах толщина просветляющего слоя сравнима с общей толщиной линзы, в частности в рассматриваемом в данной работе случае, толщина просветляющего слоя составляет 111 миллиметров. Поэтому возникает вопрос: надо ли наносить просветление только на поверхности линзы или стоит продлить этот слой дальше. Кроме того, как будет показано ниже просветляющий слой целесообразно наносить только на плоскую поверхность линзы.

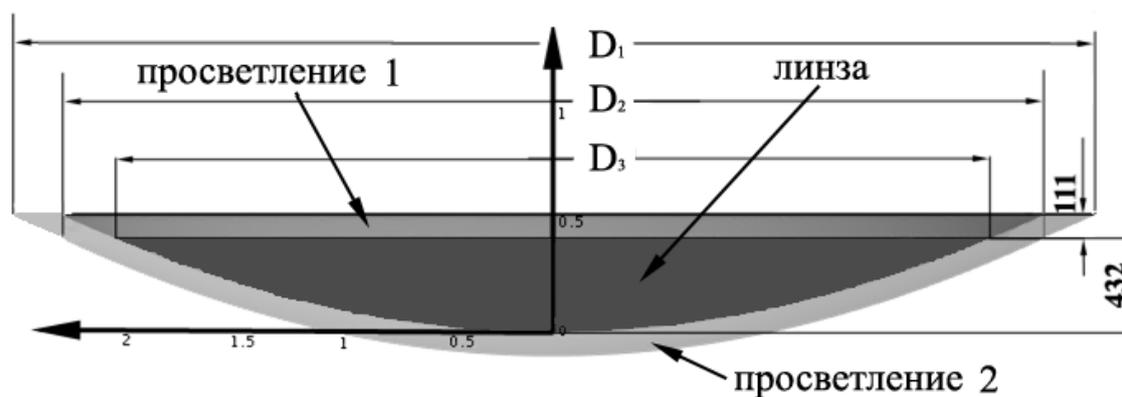


Рис.4. Линза с просветлением

На рисунке 4 показаны четыре варианта конструкции линзового коллиматора. Варьируется общий диаметр линзы: просветление выполнено до пересечения двух поверхностей линзы $D_1=4,96$ метра, просветляющий слой

обрезан по диаметру $D_2=4,5$ метра, просветление наносится только на поверхности линзы $D_3=4$ метра. В этих вариантах просветляющие слои 1 и 2 имеют одинаковые характеристики, описанные выше. В четвертом варианте просветляющий слой нанесен только на плоскую поверхность линзы, просветляющий слой 2 отсутствует. К нему вернемся позже.

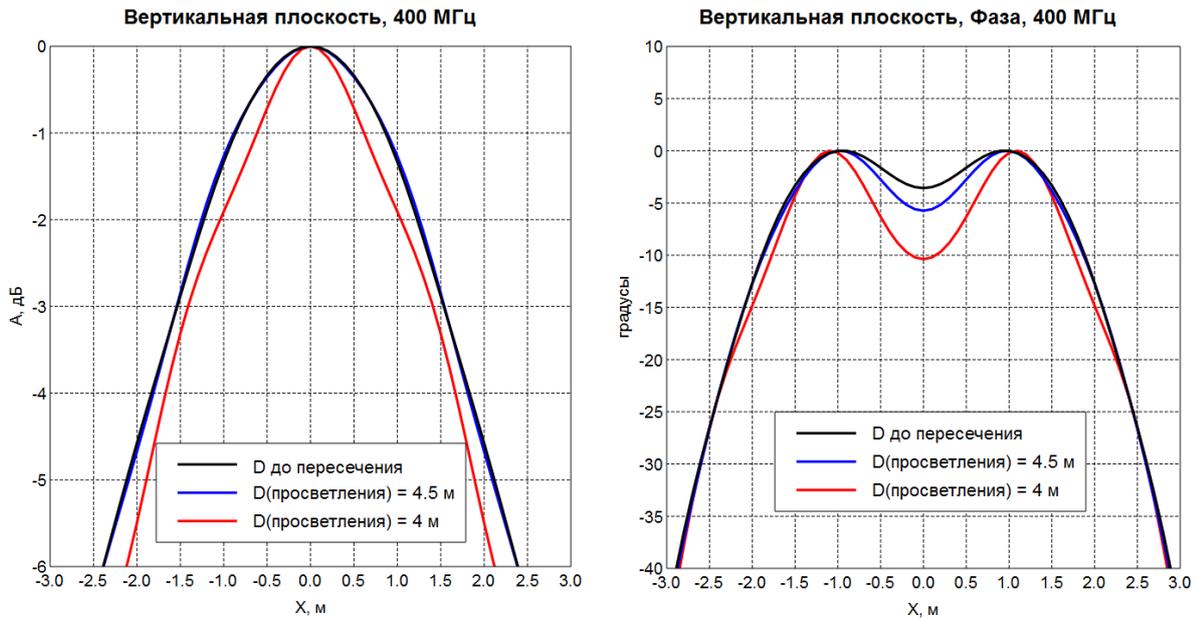


Рис. 5. Распределение амплитуды (а) и фазы (б) поля вдоль оси X (вертикальная (V) плоскость) в сечении, проходящем через конец рабочей зоны камеры с линзой с просветлением разных диаметров, на частоте 400 МГц.

На рисунке 5 показаны распределения полей в наихудшем сечении рабочей зоны камеры для вариантов конструкции линзового коллиматора с разным диаметром. Результаты расчета показали, что распределения полей в рабочей зоне камеры с линзой общим диаметров 4,5 метра и почти 5 метров практически совпадают. А линза с общим диаметром 4 метра обеспечивает большую неравномерность распределения амплитуды и фазы поля в рабочей зоне.

Итак, общий диаметр линзы с просветлением логично выбрать 4,5 метра. Сравним распределение поля в рабочей зоне в камере с линзой и в камере с просветленной линзой.

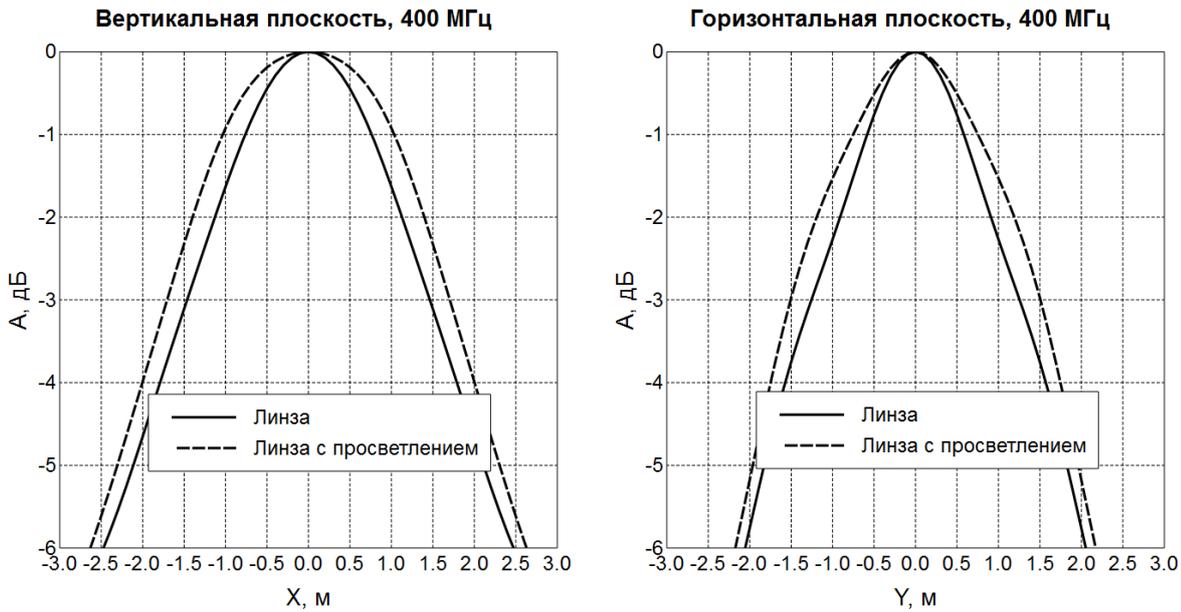


Рис. 6. Распределение амплитуды поля вдоль оси X (а, вертикальная (V) плоскость) и Y (б, горизонтальная (H) плоскость) в сечении, проходящем через центр рабочей зоны камеры с линзой (сплошная линия) и камеры с линзой с просветлением (штриховая линия), на частоте 400 МГц.

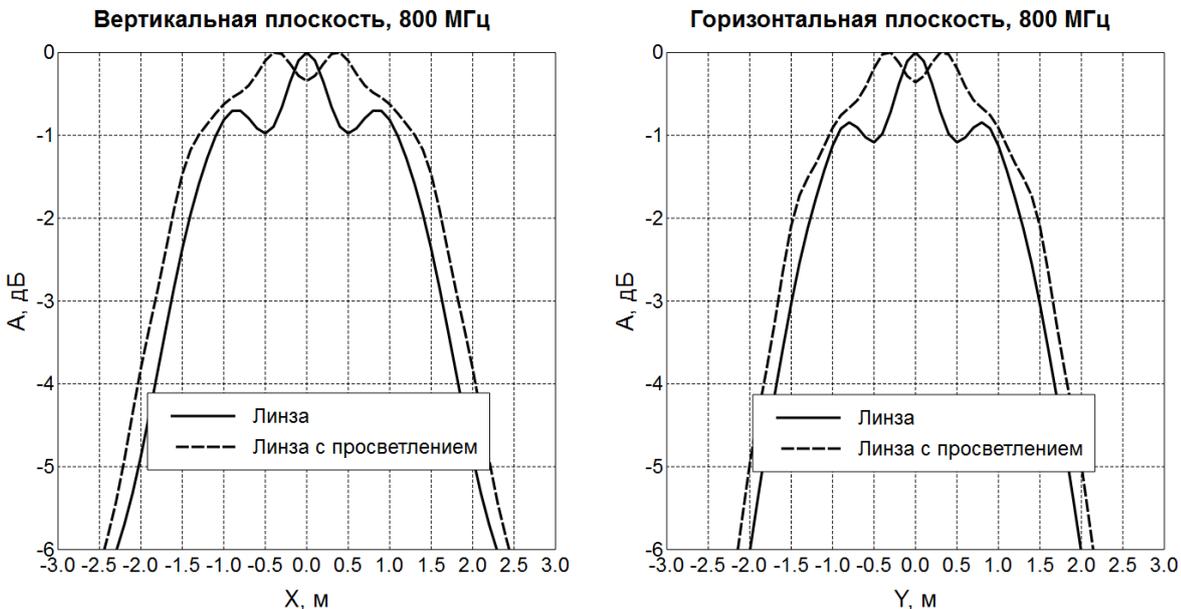


Рис. 7. Распределение амплитуды поля вдоль оси X (а, вертикальная (V) плоскость) и Y (б, горизонтальная (H) плоскость) в сечении, проходящем через центр рабочей зоны камеры с линзой (сплошная линия) и камеры с линзой с просветлением (штриховая линия), на частоте 800 МГц.

Результаты расчетов показали, что неравномерность амплитуды поля в рабочей зоне диаметром 3 метра для линзы с просветляющими слоями заметно меньше и составляет 1.5-2.2 дБ в рабочем диапазоне частот (рис. 6 – 7). Это

приемлемая неравномерность амплитуды поля для квазиплоской волны. Отметим, что просветление позволило улучшить распределение поля на 0,5 – 1 дБ для частот выше 400 МГц.

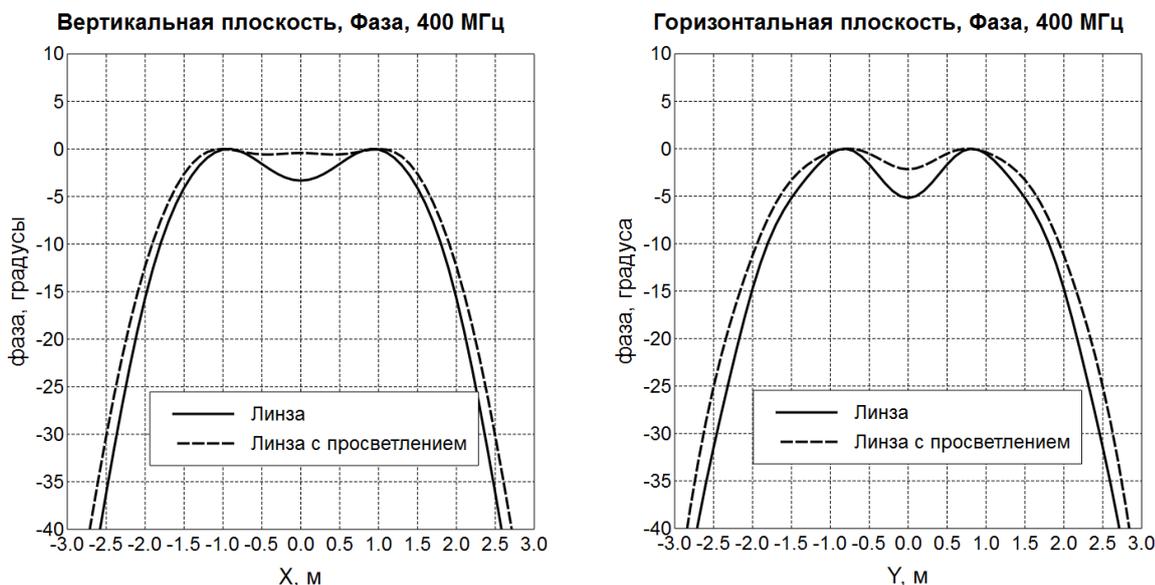


Рис. 8. Распределение фазы поля вдоль оси X (а, вертикальная (V) плоскость) и Y (б, горизонтальная (H) плоскость) в сечении, проходящем через центр рабочей зоны камеры с линзой (сплошная линия) и камеры с линзой с просветлением (штриховая линия), на частоте 400 МГц.

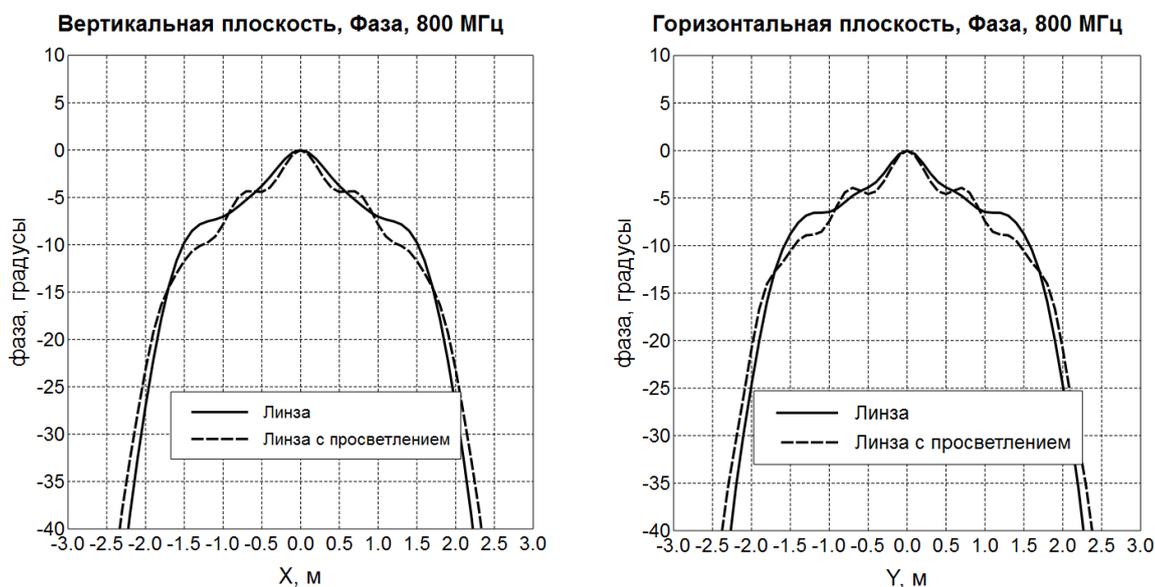


Рис. 9. Распределение фазы поля вдоль оси X (а, вертикальная (V) плоскость) и Y (б, горизонтальная (H) плоскость) в сечении, проходящем через центр рабочей зоны камеры с линзой (сплошная линия) и камеры с линзой с просветлением (штриховая линия), на частоте 800 МГц.

Неравномерность фазы в рабочей зоне диаметром 3 метра не превышает 15 градусов, что удовлетворяет критерию дальней зоны ($\pi/8$). Просветляющий слой не существенно влияет на распределение фазы в рабочей зоне, что видно из графиков на рисунках 8 – 9.

Создание достаточно однородного просветляющего слоя на изогнутой поверхности линзы непростая технологическая задача. Потому возникает вопрос, нельзя ли ограничиться просветлением только на плоской поверхности линзы, что соответствует последнему варианту конструкции линзы, представленному на рис. 4. В этом варианте просветляющий слой 1 ограничен продолжением искривленной поверхности самой линзы, что обеспечивает общий диаметр $D_2=4.5$ метра. Ниже приведены результаты расчеты поля в рабочей зоне камеры для линзы с просветлением как на обеих сторонах линзы, так и только на плоской поверхности линзы. Для сравнения тут же приведены расчеты для линзы без просветления, но с диаметром 4,5 метров.

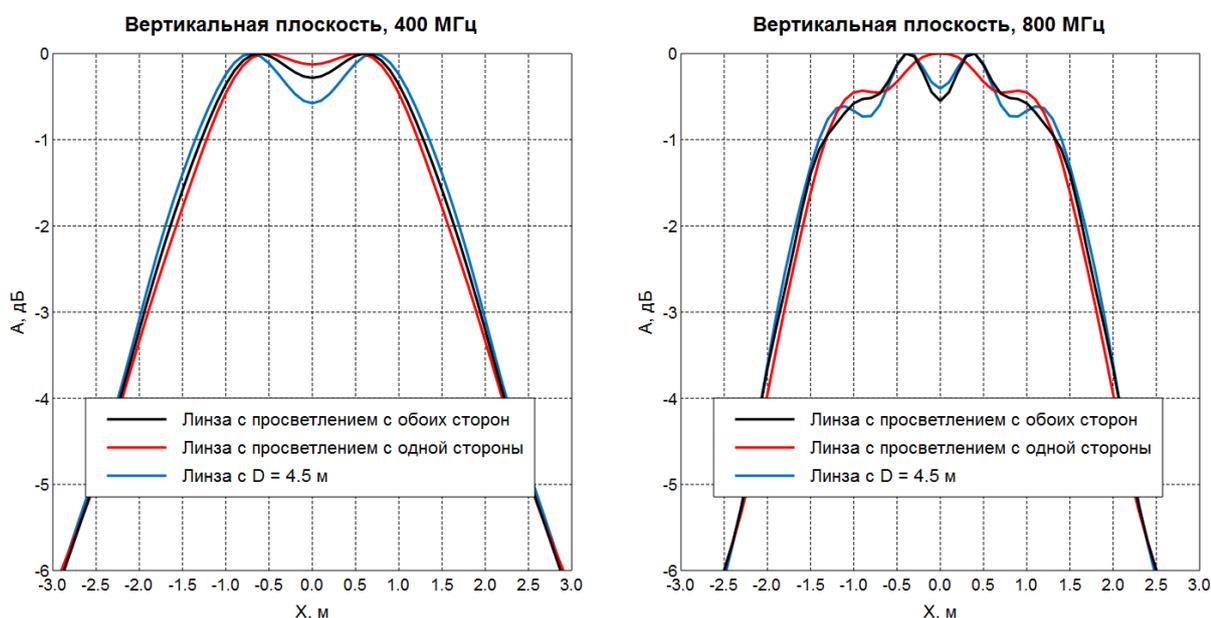


Рис. 10. Распределение амплитуды поля вдоль оси X (вертикальная (V) плоскость) на частотах 400 МГц (а) и 800 МГц (б) в сечении, проходящем через центр рабочей зоны камеры с линзой с просветлением на обеих поверхностях (сплошная линия) и камеры с линзой с просветлением только на плоской поверхности (штриховая линия).

Из графиков на рисунке 10 видно, что распределения поля в рабочей зоне почти не отличается для линзы с просветлением на обеих сторонах и только на плоской поверхности. Причем надо отметить, что и просто линза диаметра 4,5 м обеспечивает примерно такую же неравномерность поля. Значит, для получения оптимального поля в рабочей зоне можно выполнить просветление только на второй, плоской поверхности линзы, что будет дешевле и технологически проще, чем изготовление большой линзы.

6. Заключение

Выполнено исследование распределения поля в рупорной безэховой камере с линзой, покрытой просветляющим слоем. Проведена оптимизация некоторых параметров линзы для уменьшения неравномерности распределения поля в рабочей зоне камеры.

Показано, что использование просветления на линзе позволяет уменьшить неравномерность амплитуды поля в рабочей зоне диаметром 3 м на 0,5 – 1 дБ. На частотах от 400 МГц до 800 МГц неравномерность распределения амплитуды поля в рабочей зоне составляет 1,5-2,2 дБ, неравномерность распределения фазы не превосходит 15 градусов.

Показано, что для формирования оптимального поля в рабочей зоне достаточно использовать просветление только с одной, плоской стороны линзы.

Литература

1. W.H. Emerson, H.B. Sefton. An improved design for indoor ranges. //J. Proceedings of the IEEE, 1965. V. 53, N. 8, August. pp. 1079-1081.
2. L. H. Hemming, Electromagnetic Anechoic Chambers. New-York, NY, USA: IEEE Press and Wiley Interscience, 2002.
3. Н.П. Балабуха, А.С. Зубов, В.С. Солосин, Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния. М., Россия: Наука, 2007. 266 с.
4. У.Г. Зелкин, Р.А. Петрова, Линзовые антенны. М.: Советское радио, 1974. 280 с.

5. P. Piksa, S. Zvanovec, P. Cerny. Elliptic and Hyperbolic Dielectric Lens Antennas in mm-Waves. // Radioengineering, 2011. V. 20, N. 1, January. pp. 270-275.
6. S. Matitsine, P. Lagoiski, L. Matytsine, M. Matytsine, T.-T. Chia, P.-K. Tan, V. Rodriguez. Extension of Tapered Chamber Quit Zone with Large RF Lens. // AMTA, October 2012, pp. 153-156.
7. T. Morita, S.B. Cohn. Microwave lens matching by simulated quarter-wave transformers. // IRE Transactions on Antennas and Propagation, 1956. V. 4, N. 1, January. pp. 33-39.
8. P.L. Bachman. Dielectric lens model. // E-systems Inc. Report for air Development center. 1972. URL:
<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/753914.pdf>
9. 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. V.7, P.781.
10. Н.П. Балабуха, Н.Л. Меньших, В.С. Солосин. Математическое моделирование электромагнитных характеристик рупорной безэховой камеры. // Антенны, 2015. Т. 220, №9, С.61-66.
11. Н.П. Балабуха, Н.Л. Меньших, В.С. Солосин. Моделирование распределения поля в рабочей зоне рупорной безэховой камеры с линзой. // Антенны, 2017. Т. 236, №2, С. 42-49.
12. А. В. Никитенко, А. С. Зубов, Н. Е. Шапкина. Моделирование электромагнитного рассеяния на радиопоглощающем материале методом связанных волн. // Мат. моделирование, 2014. Т. 26, №9, С. 18–32.

Ссылка на статью:

Н.П. Балабуха, Н.Л. Меньших, В.С. Солосин. 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>