

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В РУПОРНЫХ БЕЗЭХОВЫХ КАМЕРАХ

Балабуха Н.П.<sup>1</sup>, Меньших Н.Л.<sup>1</sup>, Сахно А.Д. \*<sup>2</sup>, Шапкина Н.Е.<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия*

Статья поступила в редакцию 01.09.2022

Одобрена после рецензирования 27.10.2022

Принята к публикации 28.12.2022

## Аннотация

Методом математического моделирования анализируются два типа рупорных безэховых камер: конической и пирамидальной форм, которые часто используются при измерениях на низких частотах. Для того, чтобы сравнение имело смысл, необходимо, чтобы камеры были в какой-то мере эквивалентными. В работе эквивалентность достигается путем выбора одинаковых углов раскрытия и площадей апертур раскрытов безэховых камер. Радиопоглощающий материал внутренней поверхности обеих камер моделируется однородным слоем диэлектрика. Сравняются характеристики поля в рабочей зоне в камерах при использовании линзы. В обоих случаях линзы гиперболические, имеют одинаковый диаметр и параметры материала, устанавливаются в апертуре рупорной части камеры. При этом у каждой линзы подбиралось оптимальное фокусное расстояние, позволяющее исправлять фазу в максимальном объеме. Электромагнитное поле внутри рупорных камер рассчитывается методом моментов при помощи программного вычислительного комплекса FEKO. Результаты моделирования показали, что обе камеры имеют схожие размеры рабочей зоны на выбранных частотах. Диаметр рабочей зоны в камерах с линзой составил около 3 м. При этом линза в обоих случаях хорошо исправляет фазу, но увеличивает неравномерность распределения амплитуды поля.

**Ключевые слова:** безэховая камера, линза, линзовый коллиматор, рупорные безэховые камеры, коническая безэховая камера, пирамидальная безэховая камера

---

## Введение

Безэховая камера (БЭК) – это специальное помещение, стенки которого покрыты радиопоглощающим материалом, имеющим в широкой полосе частот и углов низкий коэффициент отражения при падении плоской электромагнитной волны. Первые безэховые камеры появились в начале 50-х годов. С тех пор интерес к ним только возрастал, так как БЭК имели ряд преимуществ по сравнению с открытыми полигонами [1].

Для измерения электромагнитных характеристик исследуемых объектов на разных частотах используются различные БЭК. Так, для низкочастотных измерений используются рупорные безэховые камеры (РБЭК), а для исследования рассеивающих характеристик объектов и параметров антенн на более высоких частотах используются компактные полигоны с зеркальным коллиматором [2, 3].

В настоящее время в задачах радиолокации все чаще используют низкочастотный диапазон, что значительно повышает интерес к исследованию характеристик электромагнитного поля в рупорных безэховых камерах [4].

На данном этапе развития измерительных комплексов существует целый ряд проблем, возникающих при измерениях на низких частотах: высокая стоимость строительства, существенные краевые эффекты на элементах конструкции и т.п. В силу этого перед строительством компактных полигонов на основе рупорных БЭК необходимо заранее проводить математическое моделирование формирования квазиплоской волны и исследовать характеристики электромагнитного поля в рабочей зоне [5].

---

\* Автор, ответственный за переписку: Артём Дмитриевич Сахно, sakhno.ad18@physics.msu.ru

Камера в форме рупора впервые была предложена Эмерсоном (Emerson) в 1965 году [6]. Эта конфигурация была необходима для уменьшения влияния отраженных от стенок прямоугольной камеры лучей. Такие БЭК позволяли получать приемлемое распределение электромагнитного поля (отклонение амплитуды и фазы от поля плоской волны не более 2 дБ и 22,5° соответственно) в рабочей зоне [2]. Практически одновременно появилось две формы РБЭК: коническая и пирамидальная [7, 8].

Современный подход к проектированию БЭК предполагает использование компьютерного моделирования для уточнения деталей конструкции и предсказания ряда характеристик будущего измерительного стенда. Математические модели процессов рассеяния волны в камере предлагались почти сразу после появления рупорных камер [7] и были основаны на методе геометрической оптики. Сегодня все чаще используют строгие методы расчета [9] и гибридный подход к расчету [10] полей в камере, что позволяет повысить точность получаемых результатов.

Распределение поля в рупорной БЭК пирамидального типа исследовалось в работе [9] с использованием строгого метода интегральных уравнений. Аналогичные исследования были проведены и для конической камеры [11]. Эти исследования позволили оценить размеры рабочей зоны камеры заданной геометрии и выявить некоторые требования, предъявляемые к РПМ на стенках камеры. В частности, в работе [9] было показано, что для покрытия широкого диапазона частот необходима коррекция фазы. Обычно это делается с помощью диэлектрической линзы [4].

В [13] была исследована линза диаметром 2 метра с фокусным расстоянием равным 10 м и весом всего 35 кг благодаря использованию композитного материала. Применение такой линзы позволило получить поле с приемлемой неравномерностью распределения амплитуды 1 дБ и фазы 10° в области диаметром 140 см для диапазона частот 2-8 ГГц. Авторы работы [14] исследовали влияние линзы с диаметром 4 м и фокусным расстоянием 17 м на распределение поля внутри рупорной безэховой камеры для частот 100-800 МГц. Как оказалось, на низкой частоте (100 МГц) линза не вносит значимого вклада в изменение поля, при более высоких частотах заметно улучшается фазовое распределение поля, однако амплитудное распределение несколько ухудшается.

В работе [15] было проведено сравнение характеристик распределения поля в рабочей зоне эквивалентных (эквивалентность достигается равенством углов раскрытия и площадей апертур безэховых камер) конической и пирамидальной камер. Электромагнитное поле, прошедшее через линзу, рассчитывалось методом геометрической оптики. При использовании линзы неравномерность распределения поля в конической камере меньше.

Помимо использования линзы, уменьшить неравномерность распределения электромагнитного поля в рабочей зоне камеры можно при помощи оптимального расположения источника. В [14] было показано, что диаграмма направленности излучателя в секторе углов, определяемых раскрытием камеры, мало отличается от диаграммы диполя, поэтому при моделировании РБЭК реальный источник излучения можно заменить диполем с достаточно высокой точностью. Так, в работе [16] оценивалось влияние выдвигания источника на характеристики электромагнитного поля в рабочей зоне конической и пирамидальной РБЭК. Было показано, что на низкой частоте (300 МГц) при выдвигании источника на некоторое расстояние от устья камеры можно получить значительное увеличение размера рабочей зоны в  $H$ -плоскости.

Данная работа является продолжением исследований, начатых нами в работе [15]. Целью работы является проведение сравнения характеристик двух эквивалентных камер: конической и пирамидальной формы. В отличие от предыдущих работ, для исследования характеристик электромагнитного поля, прошедшего через линзу, в рабочей полосе частот камеры выбран более строгий метод моментов.

## Параметры рассматриваемых рупорных безэховых камер

Рассматриваемые безэховые камеры состоят из рупорной части и области с постоянной площадью поперечного сечения (рисунок 1). В данной работе углы раскрытия конической и пирамидальной частей камер одинаковы. Также одинаковы и площади апертур поперечных сечений конической и пирамидальной частей камер.

Рупорная часть камеры представляет собой либо конус, либо пирамиду с квадратным сечением. Углы раскрытия рупорных частей камер одинаковы и равны 33,4°. Так как угол раскрытия рупора определяет изменение фазы поля в апертуре рупорной части камеры, а площадь апертуры определяет размеры области с квазиплоским полем, то можно говорить об адекватном сравнении двух камер.

Поперечное сечение пирамидальной камеры представляет собой квадрат со стороной 9 м, а сечение конической камеры представляет собой круг радиуса  $R$ , равного 5,08 м. Высота  $h$  пирамидальной камеры равна 15 м, в то время как высота  $h$  конической камеры равна 16,93 м. Такая разница в длине

необходима, чтобы сохранить равенство углов раскрыва и площадей апертур. Камеры с близкими углами раскрыва и близкими апертурами назовем эквивалентными. Области камеры с постоянным поперечным сечением имеют одинаковую длину 10 м.

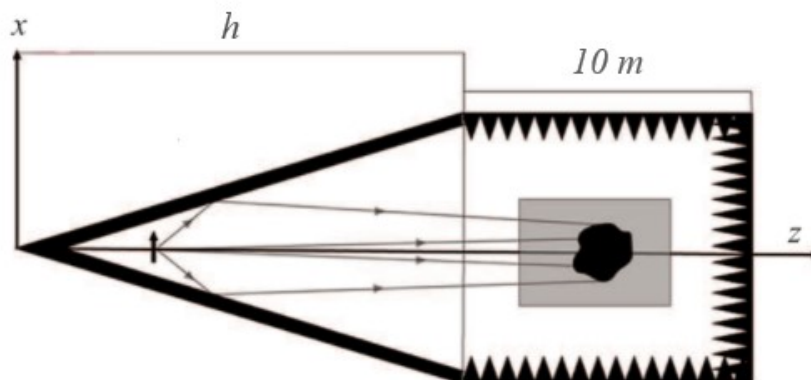


Рисунок 1 – Модель рупорной безэховой камеры

## Модели камер

Для расчета характеристик камер использовался вычислительный пакет FEKO. В обеих моделях рупорная часть – идеально проводящая и покрыта радиопоглощающим материалом, который в модели представлен однородным диэлектрическим слоем с потерями. Толщина слоя диэлектрика равна 300 мм. Моделирование проводилось на отдельных частотах, представлены результаты для 250 и 800 МГц. Диэлектрическая проницаемость составляет  $\varepsilon = 1,54 + 1,39i$  для частоты 250 МГц и  $\varepsilon = 1,37 + 0,65i$  для частоты 800 МГц. Моделируется реальный материал с частотной дисперсией, параметры которого в данной задаче считаются известными с хорошей точностью. Боковая и задняя стенки секции постоянного сечения также покрыты РПМ и обеспечивают коэффициент отражения по нормали не менее -20 и -40 дБ соответственно.

Источником излучения служит диполь. Первоначальное положение источника выбирается разное для разных частот: для 250 МГц это 4,4 м от вершины, для 800 МГц – 1,6 м. Положение определяется фазовым центром антенны соответствующего диапазона при ее размещении максимально близко к устью камеры [2].

В качестве корректора фазы в обеих исследуемых РБЭК применялась гиперболическая линза как наиболее простая линза с одной преломляющей поверхностью. В обеих моделях камер рассматривалась линза из однородного диэлектрика с  $\varepsilon = 1,6$ . Диаметр линзы  $d = 4$  м, фокусное расстояние  $F = 17$  м для пирамидальной камеры и  $F = 20$  м для конической.

Так как моделируются камеры реальных размеров, задача является очень ресурсоемкой. Поэтому в данной работе были предложены несколько упрощений. Линза находится в свободном пространстве, на нее падает электромагнитное поле, заданное на плоскости перед ней. Это поле соответствует полю в апертуре рупорной части камеры. Ранее было показано, что предложенный метод пересчета не вносит существенной погрешности в результаты расчетов.

## Результаты расчетов

Итак, анализ распределения поля в конической и пирамидальной камерах показал, что в диапазоне частот 100 – 400 МГц камеры дают схожие результаты.

Рабочие зоны в обеих камерах при частоте 250 МГц оказались примерно одинаковыми (3,2×2,9 м в конической камере, 3,3×2,8 м в пирамидальной). Так как размеры рабочей зоны в обеих камерах примерно равны трем метрам в обеих плоскостях, фазовая коррекция на этой частоте не требуется.

На частотах выше 400 МГц фазовое распределение в обеих камерах значительно ухудшается. Хотя амплитуда поля и становится более равномерной, но из-за того, что фаза быстро спадает от центра к краю, размеры рабочей зоны в обеих камерах заметно уменьшаются. Размер рабочей зоны при частоте 800 МГц составил 1,8×1,8 м в обеих камерах. Как видно, распределение поля в обеих РБЭК на частоте 800 МГц нуждается в фазовой коррекции.

На рисунке 2 представлены распределения амплитуды поля в центре рабочей зоны в камерах с линзой. Как можно заметить, амплитудное распределение значительно ухудшается в обеих камерах. В центре графиков есть некоторые колебания, которых не было при моделировании камеры без линзы. Данный эффект связан в основном с дифракцией на краях линзы. Видно, что в конической камере неравномерность амплитуды меньше, чем в пирамидальной, как при расчетах с линзой, так и без нее.

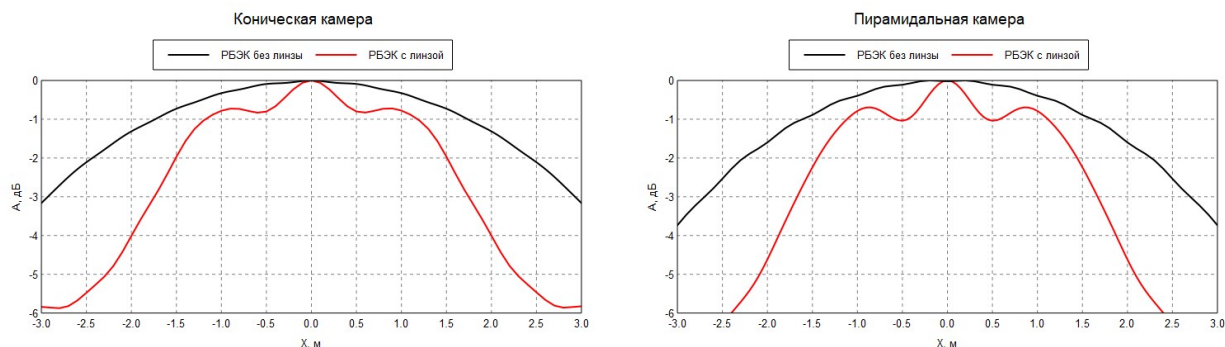


Рисунок 2 – Распределение амплитуды электромагнитного поля в E-плоскости в центре рабочей зоны конической и пирамидальной камер с линзой и без нее

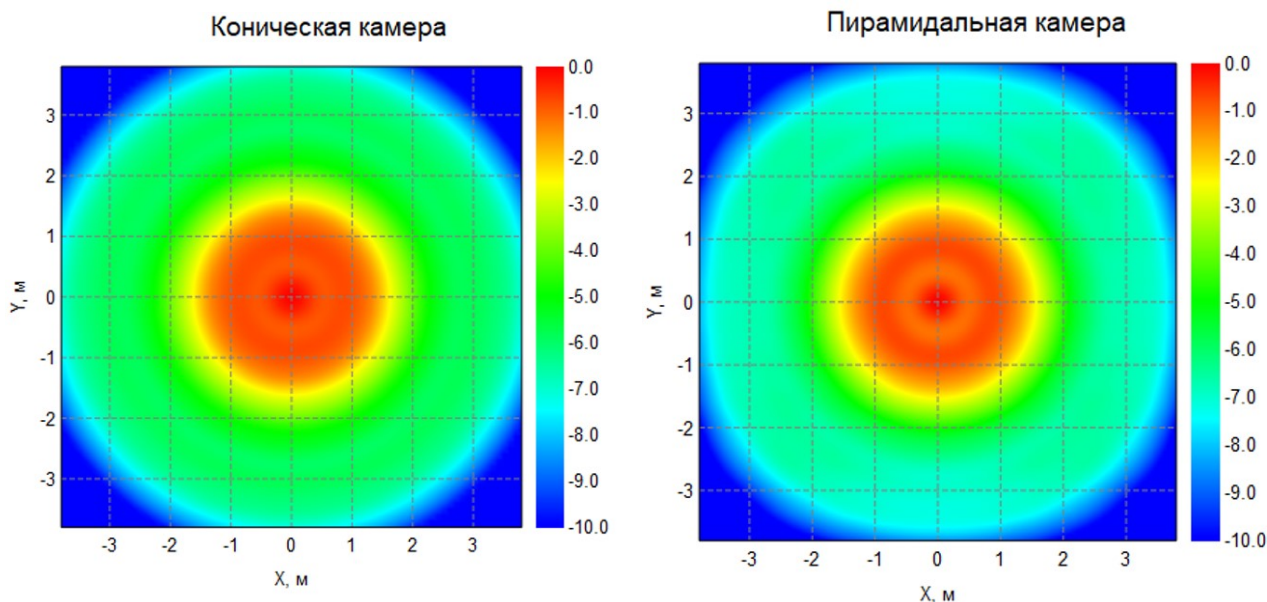


Рисунок 3 – Распределение амплитуды электромагнитного поля в центре рабочей зоны конической и пирамидальной камер с линзой и без нее

Если же рассмотреть поперечное сечение, проходящее через центр рабочей зоны (рисунок 3), то можно заметить, что распределение амплитуды в конической и пирамидальной камерах очень схожи. Приемлемая неравномерность распределения поля в рабочей зоне занимает область, очень близкую к кругу для обеих камер.

Фаза же при использовании линзы исправляется практически полностью. Размеры рабочей зоны теперь определяются исключительно амплитудным распределением электромагнитного поля. Как видно из рисунка 4, при удалении на 1,5 метра от центра неравномерность фазы составляет менее  $15^\circ$ , что является очень хорошим результатом.

## Заключение

Как видно из графиков, линзы в обеих камерах увеличивают неравномерность распределения амплитуды поля в рабочей зоне, но при этом существенно исправляют фазу. Схожесть результатов подтверждает предположение о корректности подхода к эквивалентности рассматриваемых камер. С помощью линзы удалось увеличить размеры рабочей зоны до  $3,0 \times 3,0$  м в конической камере и  $2,9 \times 2,8$  м

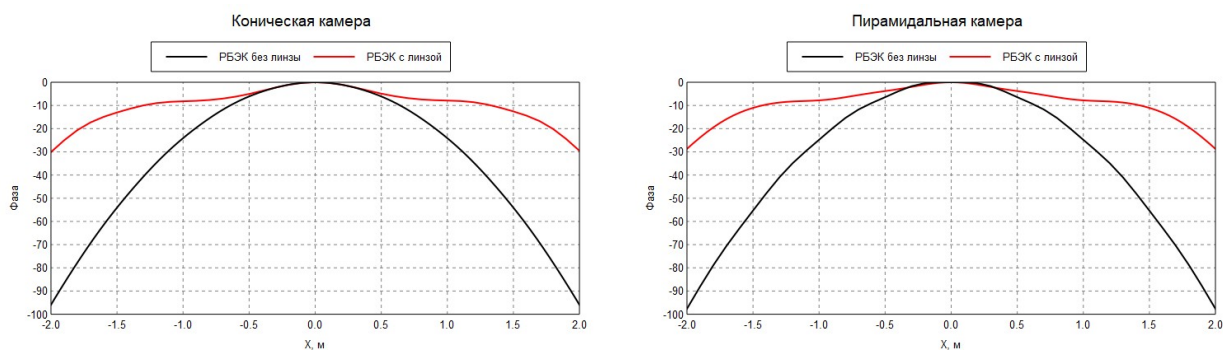


Рисунок 4 – Распределение фазы электромагнитного поля в Е-плоскости в центре рабочей зоны конической и пирамидальной камер с линзой и без нее

в пирамидальной на частоте 800 МГц. Фаза исправляется хорошо в обеих камерах. Из этого можно заключить, что фазовая коррекция положительно сказывается на распределении поля в рабочей зоне обеих камер.

Размер рабочей зоны конической РБЭК оказался немного больше, чем пирамидальной. Однако при проектировании конической камеры и моделировании не учитывается ряд сложностей, связанных с формой поверхности стенок и изгибом РПМ, поэтому данные результаты пока не позволяют заключить, что коническая камера имеет преимущество по сравнению с пирамидальной.

## Список литературы

- [1] Appel-Hansen J. Reflectivity level of radio anechoic chambers // Trans. On Anten. And Prop. – 1973.– Vol. 21, N.4.– pp. 490–498.
- [2] Electromagnetic Anechoic Chambers. Hemming L.H. - NY, USA: IEEE Press and Wiley Interscience. – 2002. – p. 239.
- [3] Компактные полигоны для измерений характеристик рассеяния объектов. Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С. – М.: Наука, 2007. 266 с.
- [4] Shang J.-P., Sun L.-C., Xu P. et al. A novel lower frequency dual-polarized broadband horn antenna for use as a source in tapered anechoic chambers// The 10th International Symposium on Antennas Propagation & EM Theory. N.Y.: IEEE. – 2012. – p. 198.
- [5] Campbell D., Gampala G., Reddy C. J. et al. Modeling and analysis of anechoic chamber using CEM tools// Proc. 34th Annu. Symp. Antenna Meas. Techn. Assoc. 2012. P. 157.
- [6] Emerson W., Sefton H. An improved design for indoor ranges // Proceedings of the IEEE. – 1965. – Vol. 53, № 8.– pp. 1079-1081.
- [7] King H., Shimabukuro F. and Wong J. Characteristics of a Tapered Anechoic Chamber// IEEE Trans. on Anten. and Prop., - 1967. – Vol. 15, No. 3. – pp. 488-490.
- [8] Holloway A. L. Anechoic chamber. US 3,806,943 – Patented 1974.
- [9] Балабуха Н.П., Меньших Н.Л., Солосин В.С. Математическое моделирование электромагнитных характеристик рупорной безэховой камеры // Антенны. – 2015. - №9, с.61-66.
- [10] 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.
- [11] T. A. Kuz'mich, N. E. Shapkina, and N. P. Balabukha. Analysis of the tapered anechoic chamber applying mathematical modeling// In Proceedings of the Conference on Acousto-optic and Radar Methods for Information Measurements and Processing (Moscow, 2019). – p. 26.
- [12] Zhi Ning Chen. Handbook of Antenna Technology, Springer 2016.
- [13] 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. – 2012. – A12. – p.81.

- [14] 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.
- [15] N. P. Balabukha, N. L. Menshikh, A. D. Sakhno and N. E. Shapkina. Mathematical Simulating of Electromagnetic Field in the Quiet Zone of Pyramidal and Conical Tapered Anechoic Chambers: Comparison of Results // 2021 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS). – 2021. – pp. 2552-2561.
- [16] N. P. Balabukha, N. L. Men'shikh, and N. E. Shapkina. Study of electromagnetic fields in conical and pyramidal tapered anechoic chambers // Moscow University Physics Bulletin. – 2021. – Vol. 76. – No. 3. – pp. 126–135.
- 

## Mathematical modeling of characteristics of electromagnetic field in tapered anechoic chambers

Balabukha N.P.<sup>1</sup>, Menshikh N.L.<sup>1</sup>, Sakhno A.D.<sup>2\*</sup>, Shapkina N.E.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institute for Theoretical and Applied Electromagnetics of RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

\* sakhno.ad18@physics.msu.ru

### Abstract

Two types of tapered anechoic chambers are analyzed by mathematical modeling: conical and pyramidal, which are often used in measurements at low frequencies. For the comparison to be meaningful, the chambers need to be somewhat equivalent. In the work, equivalence is achieved by choosing the same flare angles and aperture areas of anechoic chambers. The radio-absorbing material of the inner surface of both chambers is modeled by a uniform dielectric layer. The characteristics of the field in the quiet zone in both chambers are compared when using a lens. Lenses in both cases are hyperbolic, have the same diameter and material parameters, and are installed in the aperture of the tapered part of the chamber. In this case, for each lens, the optimal focal length was selected, which made it possible to correct the phase to the maximum extent. The electromagnetic field inside the tapered chambers is calculated by the method of moments using the FEKO software package. The simulation results showed that both chambers have similar quiet zone sizes at the selected frequencies. The diameter of the quiet zone in the chambers with a lens was about 3 m. In both cases, the lens corrects the phase very well, but increases the uneven distribution of the field amplitude.

**Key words:** anechoic chamber, lens, lens collimator, tapered anechoic chambers, conical anechoic chamber, pyramidal anechoic chamber

---