

УДК 001.891.573

РАССЕЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ КОЛЛИМАТОРА НА БОКОВОЙ СТЕНКЕ КОМПАКТНОГО ПОЛИГОНА

А. В. Никитенко, А. С. Зубов

¹Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, 13

Статья поступила в редакцию 15 декабря 2017 г., после доработки – 20 января 2018 г.

Аннотация. В работе рассмотрены некоторые особенности расчета рассеяния электромагнитного поля коллиматора от радиопоглощающего материала, состоящего из элементов пирамидальной формы на боковой стенке компактного полигона. В частности, рассмотрены особенности расчета в случае рассеяния от боковой стенки камеры, не возникающие при расчете в случае рассеяния от задней стенки. Проведены оценки вклада полей высших гармоник, рассеянных боковой стенкой, в распределение поля в рабочей зоне коллиматора. Показано, что величина рассеянного поля некоторых побочных гармоник в рабочей зоне может достигать -35 дБ относительно максимума поля в рабочей зоне.

Ключевые слова: метод связанных волн, радиопоглощающий материал, безэховая камера, компактный полигон.

Abstract. Several issues concerning diffraction from pyramidal radio absorber that covers walls of a compact range are considered in this paper. In particular, differences in convergence and localization of higher order diffraction fields are demonstrated in comparison with those scattered on the back wall. In the case of the diffraction from the back wall, the incidence is almost normal to the wall, thus zero-order field is significantly lower than higher-order reflected harmonics (-70 dB compared to -30 dB). In the case of the back wall, the angle of incidence can be very close to even 90 degrees, thus zero-order harmonic's amplitude becomes higher than amplitudes of high diffraction orders (-20 dB compared to -35 dB). However, the distribution of these fields in compact range's space is different: there are regions in which amplitudes of high diffraction orders are bigger than the amplitude of zero-

order diffraction. In this paper we develop a method of calculating zero order and higher order diffraction from the side walls of a compact range. Convergence of the algorithm is studied; recommendations on parameters of the calculation, such as size of the grid are given. Higher order harmonic's amplitude distribution is calculated and studied. We show that the values of the higher orders can reach -35 dB and even higher. Considering the fact that single-periodic radio-absorbers, for example wedge-shaped absorbers scatter significantly less higher orders, one can use algorithms from this study for more accurate compact range design and choice of absorber in particular.

Key words: 3D RCWA, radio-absorbing material, anechoic chamber, compact range.

Введение

Точность измерений, проводимых в компактных полигонах, зависит от характеристик отражения и рассеяния его стенок [1-3]. Модель компактного полигона включает в себя коллиматор, создающий квазиплоское поле в рабочей зоне, и стенки помещения полигона, покрытые радиопоглощающим материалом (РПМ), который позволяет избежать искажения распределения поля в рабочей зоне, связанные с отражением и рассеянием от стенок.

Существует ряд работ, посвященных математическому моделированию влияния отражающих свойств поглотителя на распределение поля в рабочей зоне компактного полигона, а также рассеянию на периодической структуре материала. В работах [4, 5] вместо коллиматора используются более простые модели, например точечный излучатель с заданной диаграммой направленности, а радиопоглощающий материал заменяется на однородную эффективную среду, для вычисления электромагнитных характеристик которой предлагаются различные способы. В работах [6, 7] рассматривается рассеяние от периодических структур с учетом высших гармоник, однако в качестве падающего поля выступает не поле коллиматора, а плоская волна. В работе [8] изложен метод расчета поля в рабочей зоне, учитывающий зеркальное отражение от боковых стенок, потолка и пола и рассеяние на задней стенке.

Рассеяние на боковых стенках не рассматривалась, поскольку при углах падения, близких к 90 градусам, амплитуда поля зеркального отражения существенно превышает амплитуды полей побочных гармоник. В данной работе мы рассмотрим рассеяние на боковой стенке камеры, покрытой периодической структурой из элементов пирамидальной формы, так как высшие гармоники могут вносить наибольший вклад в распределение поля в рабочей зоне в тех точках пространства, где амплитуда зеркально отраженного поля мала.

Математическая модель и алгоритм расчета

Кратко изложим математическую модель, в рамках которой проводится расчет, и сам алгоритм расчета. В модели компактного полигона используются следующие приближения:

- 1) Для расчета поля коллиматора в свободном пространстве используется метод физической оптики, непосредственно расчет проведен с помощью пакета программ *FEKO*.
- 2) Особенности переотражения от стенок камеры не учитываются, отражение от каждой стенки рассчитывается отдельно, независимо друг от друга.
- 3) Поле коллиматора в приближении физической оптики отлично от нуля на прямоугольнике размером W x L метров, поэтому задачу дифракции на конечной стенке можно заменить задачей отражения от бесконечной стенки, покрытой радиопоглощающим материалом.

Введем декартову систему координат, как показано на рис.1. Ось Z направим вглубь радиопоглощающего материала, оси X и Y – вдоль сторон основания радиопоглощающего материала. Необходимо найти поле, возникшее в результате дифракции на РПМ.

Поле коллиматора, падающее на РПМ, рассчитывается методом физической оптики с помощью программы *FEKO*, на плоскости $z=0$ в системе координат, связанной с РПМ. Введем соответствующие обозначения:

$$\vec{E}^{inc}(x, y, 0) = E_x^{inc}(x, y, 0)\vec{e}_x + E_y^{inc}(x, y, 0)\vec{e}_y + E_z^{inc}(x, y, 0)\vec{e}_z.$$

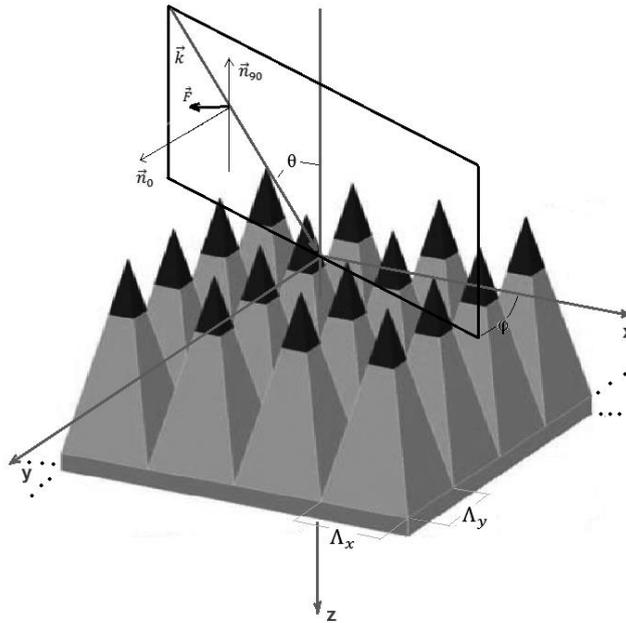


Рис. 1. Постановка задачи с условиями Флоке.

Запишем интеграл Фурье для этого поля :

$$\vec{F}(k_x, k_y) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}} \int \vec{E}(x, y, 0) e^{-j(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y.$$

Для того, чтобы найти рассеяное поле, воспользуемся методом связанных волн [8, 10]. В постановке задачи для этого метода падающее поле записывается следующим образом:

$$\vec{E}_{rcwa}^{inc} = \vec{u} \exp[-jk_0 n_l (\sin \theta \cos \varphi x + \sin \theta \sin \varphi y + \cos \theta z)], \text{ где}$$

$$\vec{u} = \vec{e}_x (\cos \psi \cos \theta \cos \varphi - \sin \psi \sin \varphi) + \vec{e}_y (\cos \psi \cos \theta \sin \varphi + \sin \psi \cos \varphi) - \vec{e}_z \cos \psi \sin \theta,$$

k_0 – модуль волнового вектора падающей волны, j - мнимая единица. Здесь и в дальнейших выражениях зависимость от времени $e^{j\omega t}$ опущена. Кроме того, в условия, которым должно удовлетворять отраженное поле, добавляются т.н. периодические граничные условия, или условия Флоке.

Таким образом, чтобы свести рассматриваемую задачу расчета дифракции на РПМ к задаче, решенной методом связанных волн, необходимо представить падающее поле в виде суммы полей, для которых известно решение задачи отражения, и для каждого из рассеянных полей - слагаемых дополнить постановку задачи следующим условием:

$$\left\{ \vec{E}(x + \Lambda_x, y + \Lambda_y, z), \vec{H}(x + \Lambda_x, y + \Lambda_y, z) \right\} = e^{j(k_x \Lambda_x + k_y \Lambda_y)} \left\{ \vec{E}(x, y, z), \vec{H}(x, y, z) \right\}.$$

Поскольку в постановке задачи для метода связанных волн на материал падает линейно поляризованная волна, необходимо представить \vec{F} в виде суммы амплитуд двух линейно поляризованных волн. В качестве двух поляризаций используем $\psi = 0^\circ$ и $\psi = 90^\circ$. Единичный вектор \vec{n}_0 перпендикулярен плоскости падения, единичный вектор \vec{n}_{90} лежит в плоскости падения.

Определим углы θ и φ , задающие направление волнового вектора:

$$k_x = k_0 \sin \theta \cos \varphi,$$

$$k_y = k_0 \sin \theta \sin \varphi,$$

$$k_z = k_0 \cos \theta.$$

Искомое выражение для отраженного поля имеет вид:

$$\vec{E}_{ref} \Big|_{k_x, k_y} = \sum_{h_1, h_2} \left(A_0 \vec{R}_{0, h_1 h_2} + A_{90} \vec{R}_{90, h_1 h_2} \right) e^{j(\vec{k}_{h_1 h_2}, \vec{r})},$$

где

$$A_0 = F_x \cos \theta \cos \varphi + F_y \cos \theta \sin \varphi - F_z \sin \theta.$$

$$A_{90} = -F_x \sin \varphi + F_y \cos \varphi.,$$

а пара индексов h_1, h_2 задают гармоники с амплитудами $\vec{R}_{0, h_1 h_2}$, и $\vec{R}_{90, h_1 h_2}$, распространяющиеся в направлении вектора $\vec{k}_{h_1 h_2}$, компоненты которого определяются следующим образом:

$$k_{x, h_1} = k_0 \left[\sin \theta \cos \varphi - h_1 (\lambda_0 / \Lambda_x) \right],$$

$$k_{y, h_2} = k_0 \left[\sin \theta \sin \varphi - h_2 (\lambda_0 / \Lambda_y) \right],$$

$$k_{z, h_1 h_2} = \begin{cases} - \left[k^2 - k_{x, h_1}^2 - k_{y, h_2}^2 \right]^{1/2}, & (k_{x, h_1}^2 + k_{y, h_2}^2) \leq k^2, \\ j \left[k_{x, h_1}^2 + k_{y, h_2}^2 - k^2 \right]^{1/2}, & (k_{x, h_1}^2 + k_{y, h_2}^2) < k^2. \end{cases}$$

где Λ_x, Λ_y - периоды РПМ вдоль осей X и Y .

Величины $\vec{R}_{0, h_1 h_2}$, и $\vec{R}_{90, h_1 h_2}$ рассчитываются методом связанных волн [10].

Соответственно, проинтегрировав по всем отраженным волнам, получим полное рассеянное поле:

$$\vec{E}_{ref} = \int \sum_{h1, h2} (A_0 \vec{R}_{0, h1h2} + A_{90} \vec{R}_{90, h1h2}) e^{j(\vec{k}_{h1h2} \cdot \vec{r})} dk_x dk_y.$$

Численная реализация изложенного метода решения описана в работе [8]. Для расчета интеграла Фурье от неперiodической функции используется следующее приближение. Падающее поле рассчитано на сетке размером N на N точек. Поскольку интеграл Фурье численно берется с помощью быстрого преобразования Фурье, сетка должна содержать в себе число точек, равное какой-либо степени двойки. Поэтому сетка дополняется точками до необходимого размера и в каждой новой точке значение поля полагается равным нулю.

Пример расчета

В качестве примера был выбран компактный полигон с прямоугольной камерой 6.4 x 4.8 x 15 метров (рис. 2). В качестве коллиматора был выбран наиболее распространенный в российских компактных полигонах микроволновый антенный коллиматор размером 4.5 x 6.03 метров. Расстояние от вершины параболоида зеркала до задней стенки – 10 метров, до центра рабочей зоны – 7 метров. Расчеты были выполнены для частоты падающего поля 1.5 ГГц. Прямоугольники внутри камеры соответствуют сечениям рабочей зоны камеры. Рабочая зона представляет собой цилиндр диаметром 1.8 м, длиной 3.6 м. Ось цилиндра совпадает с оптической осью зеркала коллиматора.

Все рассчитанные поля нормированы на максимальную амплитуду падающего на боковую стенку поля.

На рисунке 3 представлено падающее на боковую стенку поле. Максимальная амплитуда – 22.4 дБ. Расчет был проведен с помощью программы *FEKO*.

В качестве радиопоглощающего материала в рассчитываемой камере использовался широко распространенный материал пирамидальной формы, а именно *Eccosorb VHP-12* фирмы-производителя *Emerson & Cuming*. Период поглощающей структуры по обеим осям равен 0.102 м, высота – 0.305 м, его

электродинамические характеристики и коэффициенты отражения можно найти в работе [10].

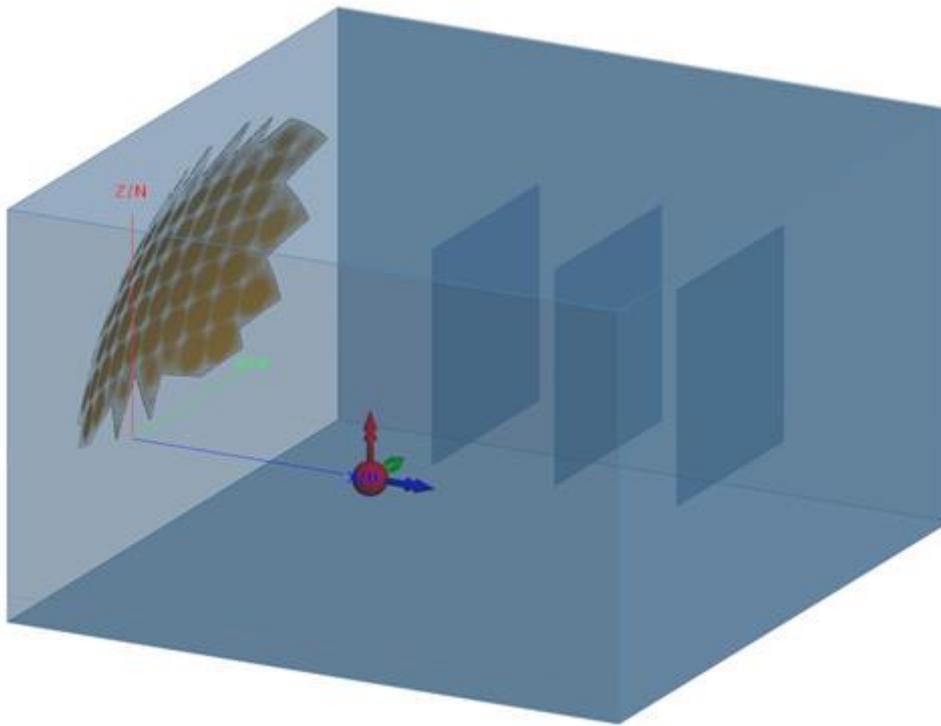


Рис. 2. Схематичное изображение компактного полигона.

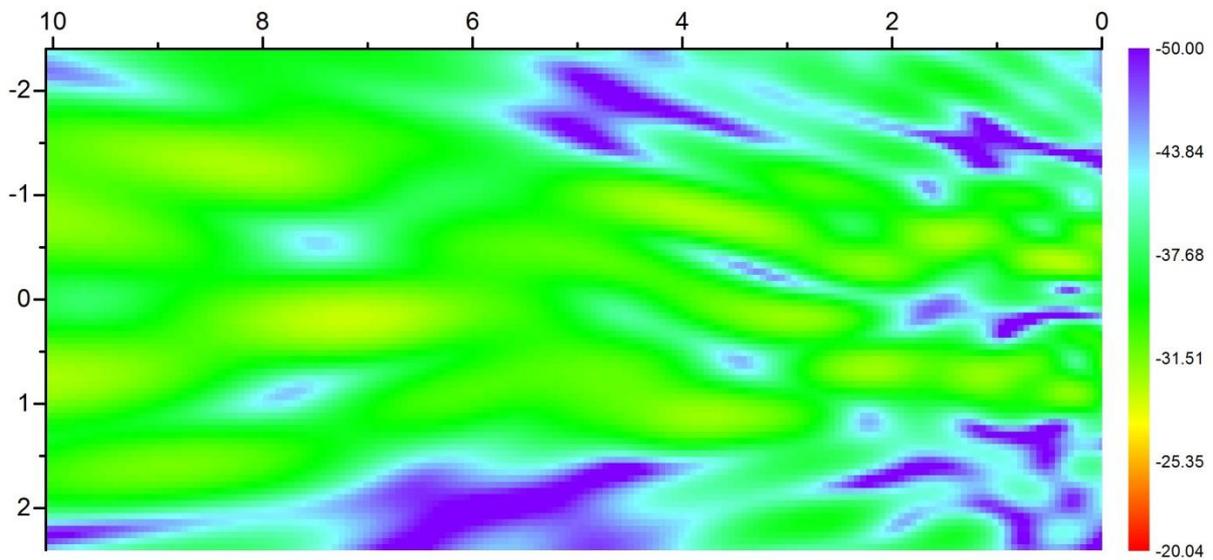


Рис. 3. Поле коллиматора, частота 1.5 ГГц, сечение параллельно боковой стенке.

В задаче отражения от задней стенки можно считать, что поле коллиматора падает под углами, близкими к нормали к стенке. В случае боковой стенки, напротив, большинство плоских волн, на которые раскладывается падающее поле, имеют волновой вектор, направленный под большим углом к нормали к стенке. Рассеянные на структуре РПМ плоские волны находятся на плоскостях, расположенных на разных расстояниях от стенки, чтобы получить распределение рассеянного поля во всем объеме безэховой камеры.

На рисунках 4 и 5 представлены результаты расчетов в зависимости от параметра – показателя степени двойки, например, 10 соответствует 1024 точкам по одной оси. Расчет на рис.4 дан на прямой $Z=0$ м, $Y=0.2$ м, на рис.5 на прямой $X=8$ м, $Y=0.2$ м.

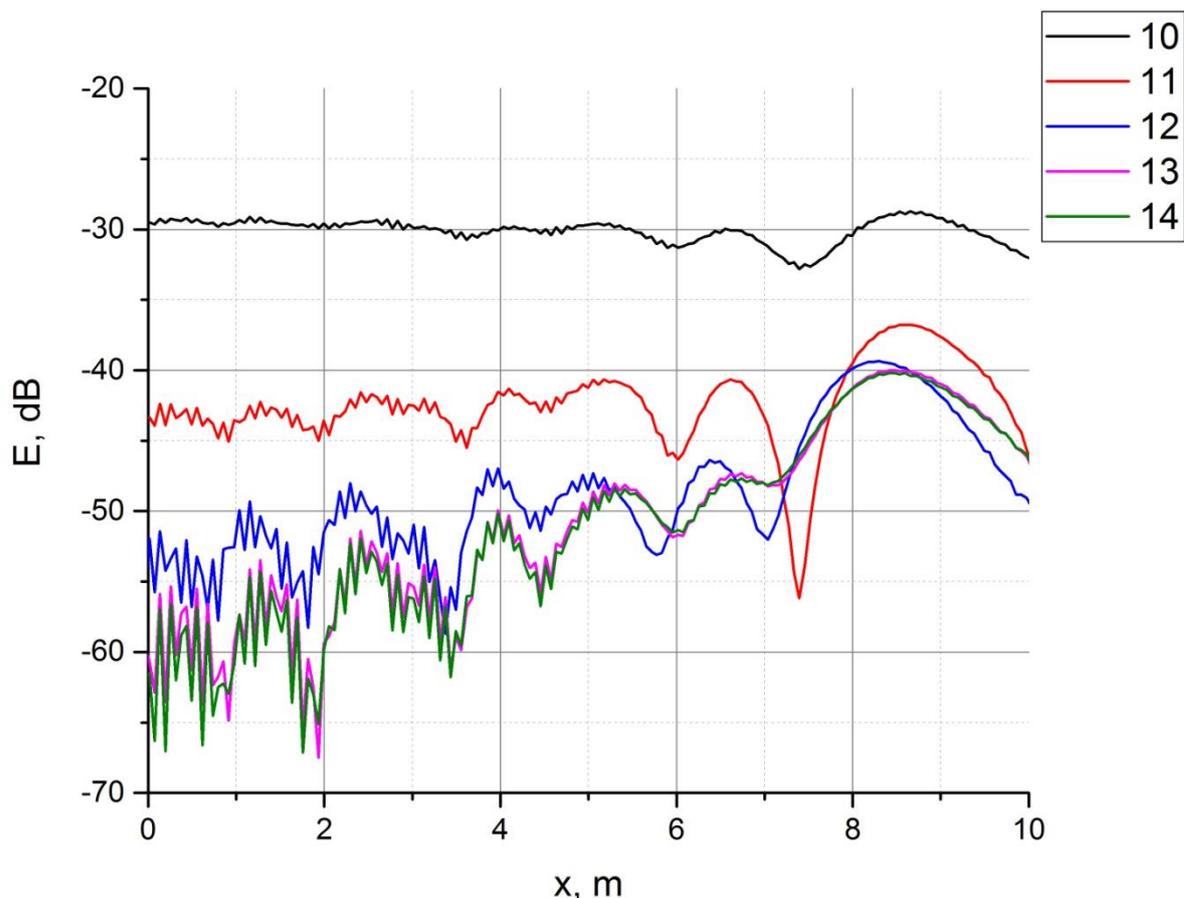


Рис. 4. Расчет рассеянного поля вдоль боковой стенки. Указанные на рисунке числа – показатели степени двойки, определяющие число точек в сетке по одной оси.

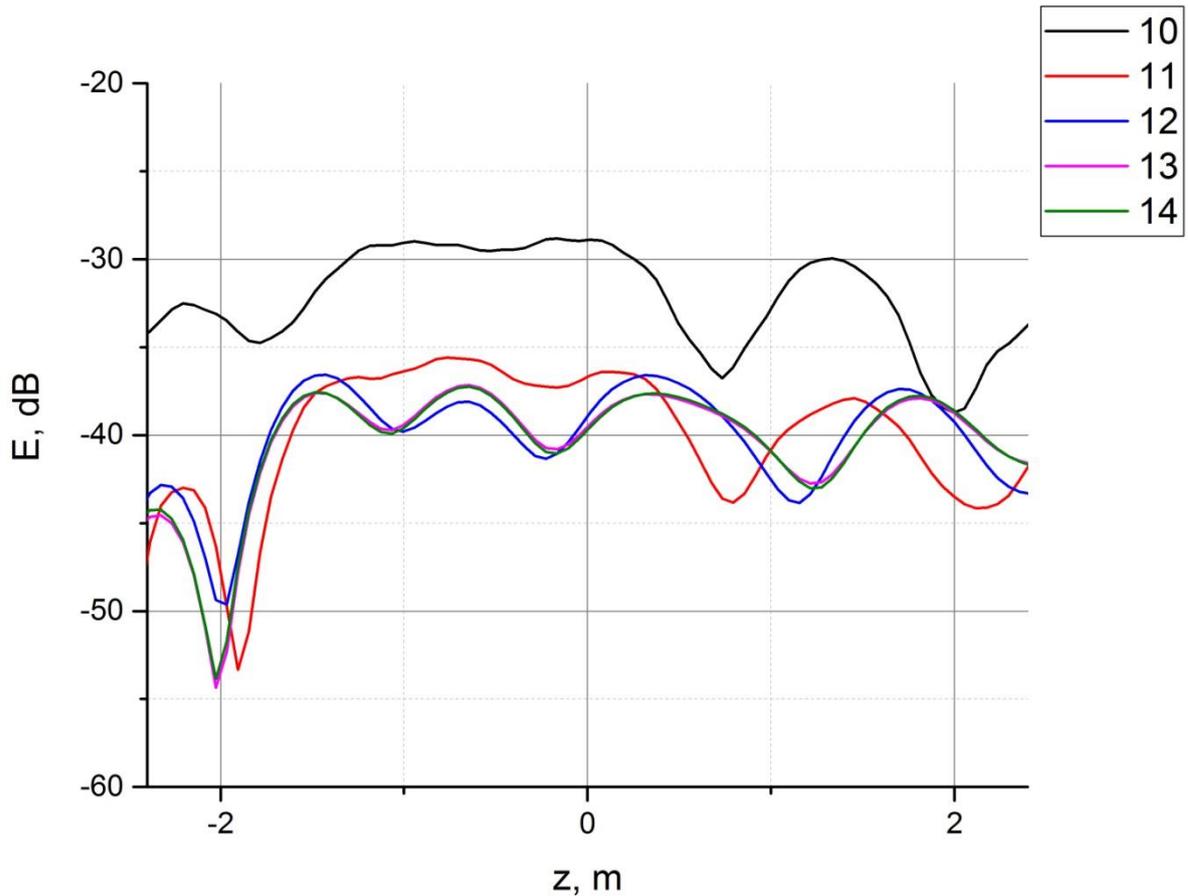


Рис. 5. Расчет рассеянного поля вдоль боковой стенки. Указанные на рисунке числа – показатели степени двойки, определяющие число точек в сетке по одной оси.

Видно, что для получения результата с точностью 1 дБ достаточно использовать 8192 точки по одной оси. Однако и 4096 точек дают неплохую (2.5 дБ) точность, особенно в области рабочей зоны.

Напомним, что углы, под которыми распространяется каждая гармоника, зависят от частоты следующим образом:

$$\theta_{pq,h1h2} = \sin^{-1} \sqrt{\left(\sin \theta_{pq} \cos \varphi_{pq} - h_1 \left(\lambda_0 / \Lambda_x\right)\right)^2 + \left(\sin \theta_{pq} \sin \varphi_{pq} - h_2 \left(\lambda_0 / \Lambda_y\right)\right)^2},$$

$$\varphi_{pq,h1h2} = \tan^{-1} \frac{\sin \theta_{pq} \sin \varphi_{pq} - h_2 \left(\lambda_0 / \Lambda_y\right)}{\sin \theta_{pq} \cos \varphi_{pq} - h_1 \left(\lambda_0 / \Lambda_x\right)}.$$

Видно, что если один из периодов стремится к бесконечности, часть гармоник (как у материала из элементов клиновидной формы) не существует.

На частоте 1.5 ГГц гармоника (1, 0) может попадать в рабочую зону. Что и подтверждают расчеты. На рисунке 6 представлен результат расчета этой гармоники в сечении $Y = 2.8$ м. Видно, что амплитуда этой гармоники превышает -35дБ.

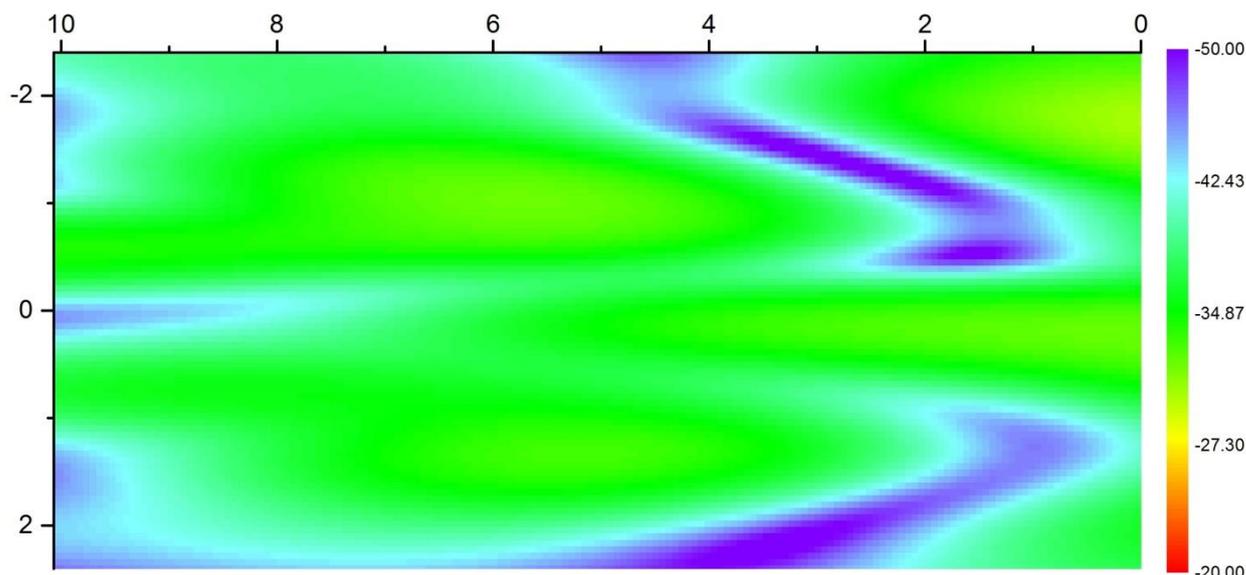


Рис. 6. Рассеяние от боковой стенки, частота 1.5 ГГц, Гармоника (1, 0).
Сечение $Y = 2.8$ м.

Выводы

В работе рассмотрен расчет дифракции поля коллиматора на пирамидальном РПМ в компактном полигоне. Проведено исследование сходимости результата в зависимости от размера сетки, на которой производится расчет интегралов Фурье. Если для случая отражения от задней стенки размер сетки в первую очередь был ограничен снизу максимальным расстоянием между точками, зависящим от длины волны падающего поля, то в случае боковой стенки возникают ограничения, связанные с ресурсами компьютера. Показано, что для достижения точности порядка 1 дБ необходим размер сетки не менее 8192 точек по одной оси. Однако, для оценочных расчетов возможно использование 4092 точек по одной оси.

Побочные гармоники, возникающие в результате дифракции на пирамидальном РПМ на боковой стенке полигона, хоть и существенно меньше

зеркального отражения по амплитуде, но имеют иную локализацию в пространстве камеры и при этом достаточно большую амплитуду (порядка -35 дБ), поэтому расчет и анализ полей этих гармоник необходим при моделировании полигона. Такие расчеты позволяют уточнить рекомендации к расположению рабочей зоны и к радиопоглощающему материалу.

Литература

1. Hemming L.H. *Electromagnetic Anechoic Chambers: A Fundamental Design and Specification Guide*. Wiley-IEEE Press, July 2002, 248 p.
2. Emerson W. H. *Electromagnetic wave absorbers and anechoic chambers through the years. IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 484–490, July 1973.
3. Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С. *Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния*. М.:Наука, 2007.
4. Mazanek M., Klepal K., Pechac P. *Electromagnetic Field in Anechoic and EMC Chambers – Part 1 – Modelling. Radioengineering*, Vol. 9, No. 1, April 2000.
5. Kuester E. F., Holloway C. L. *Improved low-frequency performance of pyramid-cone absorbers for application in semi-anechoic chambers. Proc. 1989 IEEE Int. Symp. EMC*, pp.394 -398, 1989.
6. S. P. Skobelev and O. N. Smolnikova, "Analysis of Doubly Periodic Inhomogeneous Dielectric Structures by a Hybrid Projective Method," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 61, No. 10, Oct. 2013, pp. 5078-5087.
7. Morahan M.G., Grann E.B., Pommet D.A., Gaylord T.K. *Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings. J. Opt. Soc. Am. A* 12, 1068-1076 (1995).
8. А.В. Никитенко, А.С. Зубов, А. Н. Боголюбов. *Математическое моделирование дифракции электромагнитного поля на радиопоглощающем материале в компактном полигоне. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2015. № 11. Режим доступа <http://jre.cplire.ru/jre/nov15/11/text.pdf>

9. Шестопалов В.П., Литвиненко Л.Н., Масалов С.А., Сологуб В.Г. Дифракция волн на решетках. - Харьков: Изд-во Харьк. ун-та, 1973.- 288 с.
10. А.В. Никитенко, А.С. Зубов, Е.В. Булычев. 3D моделирование электромагнитного рассеяния на рпм методом связанных волн. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2014. № 12. Режим доступа <http://jre.cplire.ru/jre/dec14/15/text.pdf>

Для цитирования:

А. В. Никитенко, А. С. Зубов. Рассеяние электромагнитного поля коллиматора на боковой стенке компактного полигона. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. №1. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan18/8/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719-2018-1-9