

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОТРАЖЕНИЯ ОТ ПОТОЛКА БЭК НА ПОЛЕ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ КОМПАКТНОГО ПОЛИГОНА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УГЛА ПОВОРОТА ПИРАМИДАЛЬНОГО РПМ

Балабуха Н.П.¹, Зубов А.С.¹, Меньших Н.Л.¹, Никитенко А.В. *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 01.02.2023

Одобрена после рецензирования 15.02.2023

Принята к публикации 14.03.2023

Аннотация

В безэховых камерах и компактных полигонах стены, пол и потолок, как правило, покрывают радиопоглощающим материалом (РПМ) пирамидального типа. Отраженное этим материалом поле включает в себя не только зеркальное отражение, но и гармоники Флоке, направление распространения которых зависит в том числе от частоты. Как правило, РПМ пирамидальной формы располагают на потолке, ориентируя основания пирамидок вдоль краев потолка, однако возможно и расположение под некоторым углом к краю потолка. Угол, под которым размещен РПМ, влияет на то, попадает поле от гармоник Флоке в рабочую зону или нет. В данной работе предложен способ численной оценки влияния поворота РПМ на потолке БЭК на поле в рабочей зоне. Задача отражения от двухпериодической структуры решена методом связанных волн с некоторыми модификациями, улучшающими сходимость и увеличивающими скорость счета. Точное решение этой задачи позволяет определить амплитуды гармоник Флоке. Используя выражения для углов, определяющих направления распространения этих гармоник, проведена оценка геометрических параметров области рабочей зоны, в которую попадают гармоники. Суммирование полей гармоник с рассчитанными амплитудами позволило оценить вклад гармоник Флоке в неравномерность поля рабочей зоны.

Ключевые слова: радиопоглощающий материал, безэховая камера, компактный полигон

EDN FIBZUP

Введение

Двухпериодические пирамидальные радиопоглощающие материалы (РПМ) получили широкое распространение в безэховых камерах (БЭК) [1]. Такие РПМ представляют собой периодическую решётку из пирамид, выполненных из материала с электрическими потерями. Стороны основания пирамид необязательно равны, соответственно, периоды повторения по осям X и Y - Λ_x , Λ_y - могут быть различными. РПМ пирамидальной формы обладают низким коэффициентом зеркального отражения при нормальном падении волны, например, при падении на заднюю стенку БЭК. Однако вблизи устройств формирования поля, таких как коллиматор, волна падает на РПМ под скользящими углами [2]. В случае такого падения волны на РПМ возрастает не только отражение в зеркальном направлении, которое зачастую не попадает в рабочую зону БЭК, но и возрастает отражение в направлениях, определяемых гармониками Флоке [3]. Амплитуда гармоник Флоке определяется как периодом пирамидального материала, так и углом поворота пирамид φ (рис. 1, справа) по отношению к направлению распространения падающей волны.

Описание метода и результаты

В данной работе рассматривалась задача оценки влияния гармоник Флоке на неравномерность поля в рабочей зоне с целью выбора оптимального угла поворота пирамид при размещении РПМ на потолке БЭК. Для анализа был выбран РПМ пирамидальной формы высотой 31.5 см и равными периодами вдоль осей X и Y : $\Lambda_x = \Lambda_y = 10.2$ см. Зависимость диэлектрической проницаемости материала,

* Автор, ответственный за переписку: Алексей Викторович Никитенко, kocheku@gmail.com

из которого состоит РПМ, от частоты представлена на рисунке 2. Оценка вклада в неравномерность поля в рабочей зоны проводилась в два этапа. Сначала вычислялась зависимость коэффициентов отражения от РПМ от частоты при различных углах падения плоской волны θ и углах поворота $\varphi = 0, 22.5$ и 45 градусов. Угол θ - угол между волновым вектором и высотой пирамиды, угол φ - угол между плоскостью падения и одной из сторон основания пирамиды, угол ψ , задающий поляризацию волны, - угол между вектором электрической напряженности и плоскостью падения (рис. 1, справа). Расчет был выполнен с помощью программы, реализующей метод связанных волн [4] для двухпериодических дифракционных структур [5]. Примеры расчетов для двух поляризаций приведены на рис. 3 и 4. На этих рисунках представлены зависимости коэффициентов отражения гармоник Флоке. Распространение этих гармоник определяется углом $\theta_{h_x h_y}$ (угол между осью Z и волновым вектором) и углом $\varphi_{h_x h_y}$ (угол между осью X и плоскостью отражения), которые зависят от углов падения θ, φ , и длины волны λ_0 следующим образом:

$$\theta_{h_x h_y} = \sin^{-1} \sqrt{(\sin \theta \cos \varphi - h_x(\lambda_0/\Lambda_x))^2 + (\sin \theta \sin \varphi - h_y(\lambda_0/\Lambda_y))^2},$$

$$\varphi_{h_x h_y} = \tan^{-1} \frac{\sin \theta \sin \varphi - h_y(\lambda_0/\Lambda_y)}{\sin \theta \cos \varphi - h_x(\lambda_0/\Lambda_x)},$$

где (h_x, h_y) - индекс гармоники.

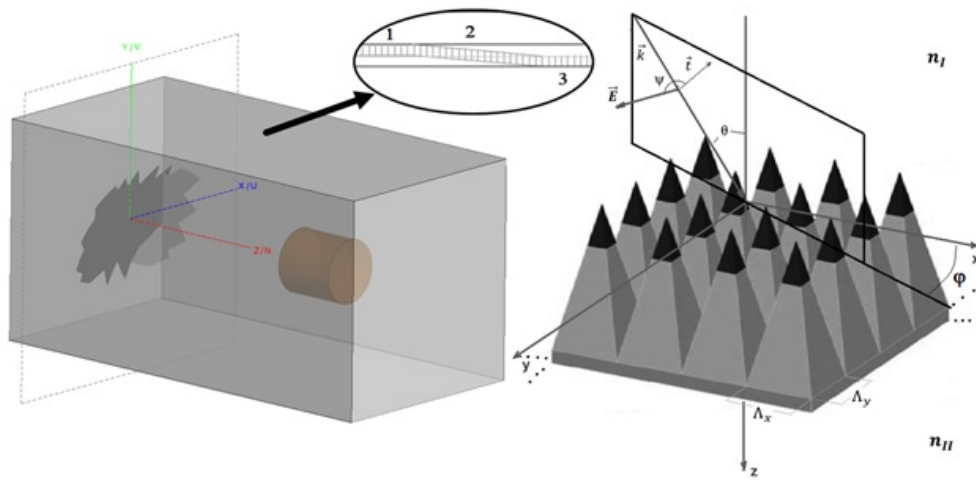


Рисунок 1 – Слева – условное изображение компактного полигона. Показана особенность потолка. Справа – постановка задачи отражения плоской волны от пирамидального РПМ

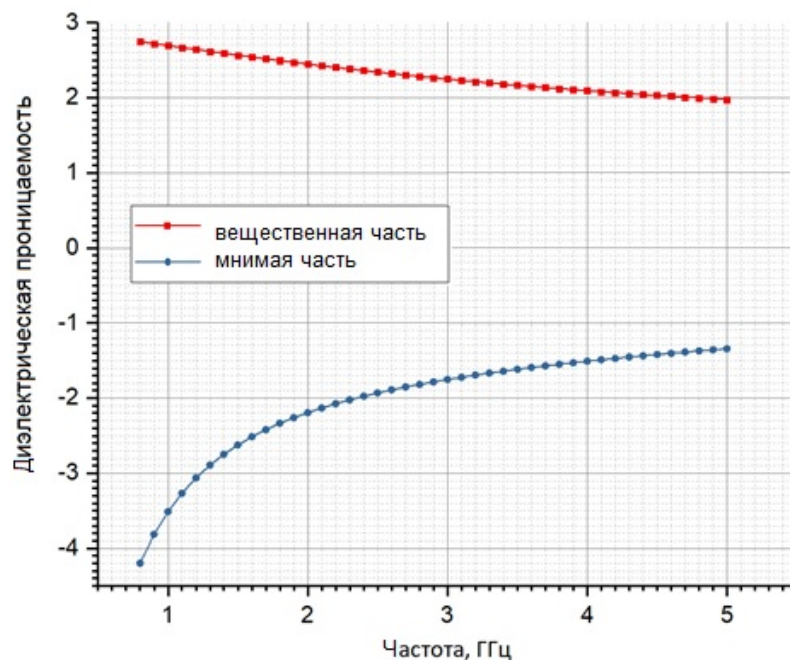


Рисунок 2 – Зависимость диэлектрической проницаемости материала, из которого состоит РПМ, от частоты

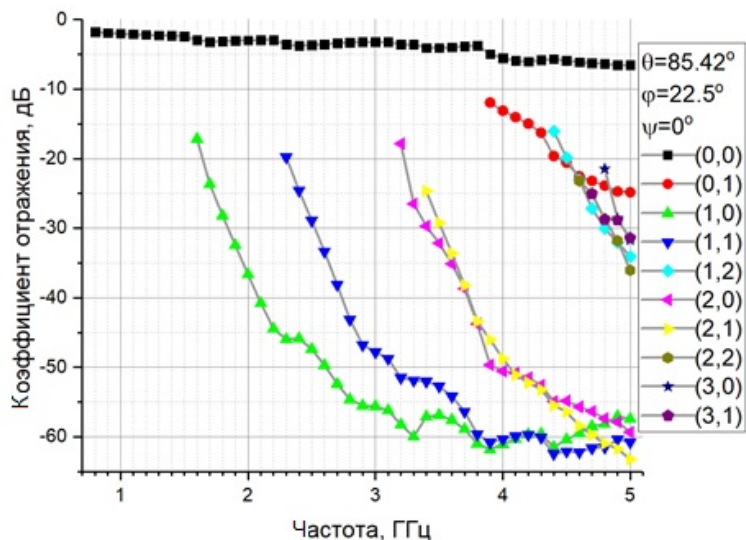


Рисунок 3 – Зависимости коэффициентов отражения зеркально отраженной волны и гармоник Флоке от частоты, ТМ-поляризация

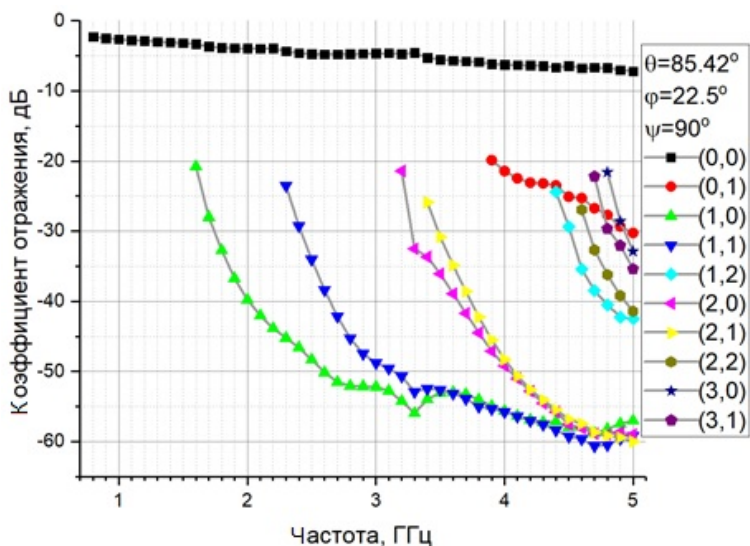


Рисунок 4 – Зависимости коэффициентов отражения зеркально отраженной волны и гармоник Флоке от частоты, ТЕ-поляризация

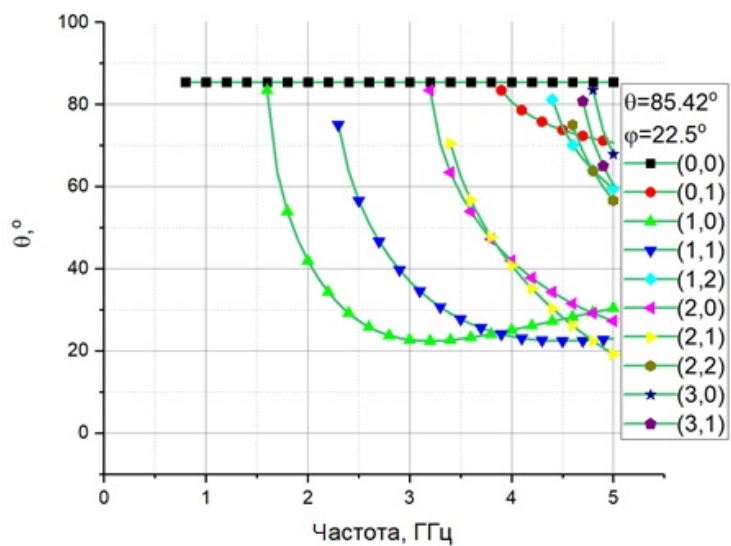


Рисунок 5 – Зависимости угла $\theta_{h_x h_y}$ от частоты для гармоник Флоке

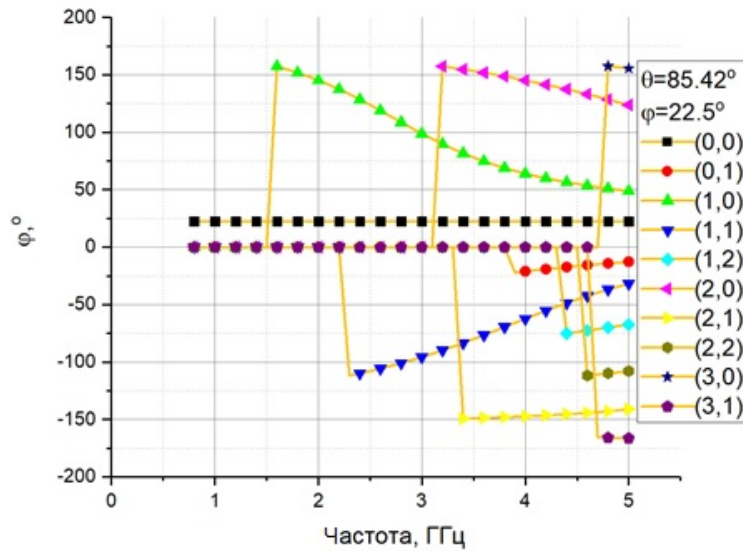


Рисунок 6 – Зависимости угла $\varphi_{h_x h_y}$ от частоты для гармоник Флоке

Графики зависимости $\theta_{h_x h_y}$, $\varphi_{h_x h_y}$ от частоты приведены на рис. 5, 6. Далее был проведен анализ вклада отражения от потолка в неравномерность поля в рабочей зоне. Потолок БЭК состоит из трех сегментов – двух горизонтальных (отмечены на рис. 1, слева, цифрами 1 и 3), расположенных на разной высоте, и соединяющего скошенного сегмента (отмечен на рис. 1 цифрой 2). Угол скоса составляет 4.58° . Расчет проводился для сегмента 2, который попадает в область засветки полем коллиматора в геометрическом приближении. Для этого сегмента находилось направление падающей волны в геометрическом приближении, далее вычислялись направления и амплитуды зеркально отраженной волны и гармоник Флоке, часть из которых попадает в рабочую зону. В качестве примера на рисунках 7 и 8 показан результат расчета суммарного поля, образованного гармониками Флоке, на частоте 5 ГГц, при поляризации $\psi = 90^\circ$ и угле поворота РПМ $\varphi = 22.5^\circ$. Отмеченная на рисунке 7 (а также и на рисунках 8 - 10 голубым цветом рабочая зона представляет собой цилиндр радиусом 3 метра и длиной образующей 12 метров. Внутри рабочей зоны выделяется также основная рабочая область вдвое меньшей длины и радиусом 3 метра. Указанные на рисунке 7 значения определялись как максимальные по всем сечениям камеры плоскостями $X = \text{const}$, а на рисунке 8 – плоскостями $Z = \text{const}$. Для наглядности на рисунке 8 гармоники, не попадающие в рабочую зону, опущены. Как видно, одна из гармоник Флоке попадает непосредственно в рабочую зону. На рис. 9 и 10 приведены результаты, аналогичные приведенным на рис. 7, на той же частоте 5 ГГц, но при двух других углах поворота РПМ – 45° и 0° соответственно.

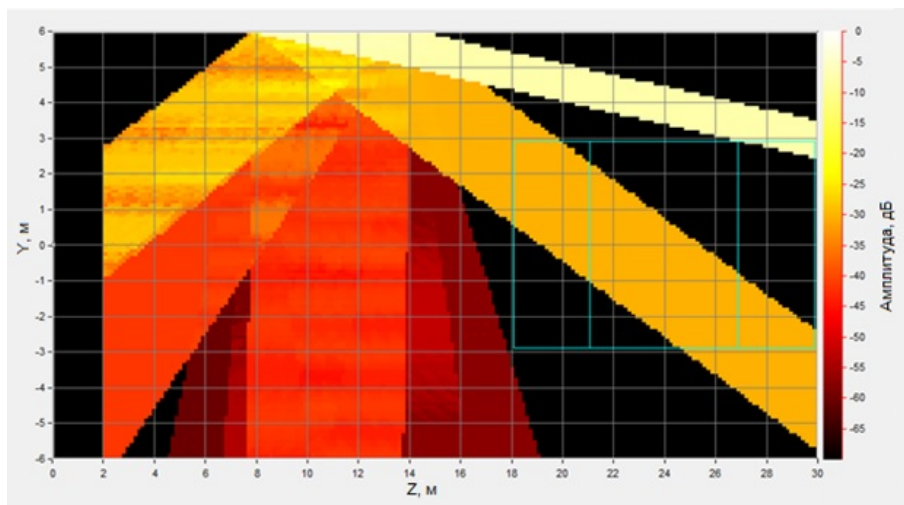


Рисунок 7 – Максимум отражения от скошенного сегмента потолка среди сечений БЭК $X = \text{const}$, частота 5 ГГц, ТЕ-поляризация. Угол поворота РПМ 22.5°

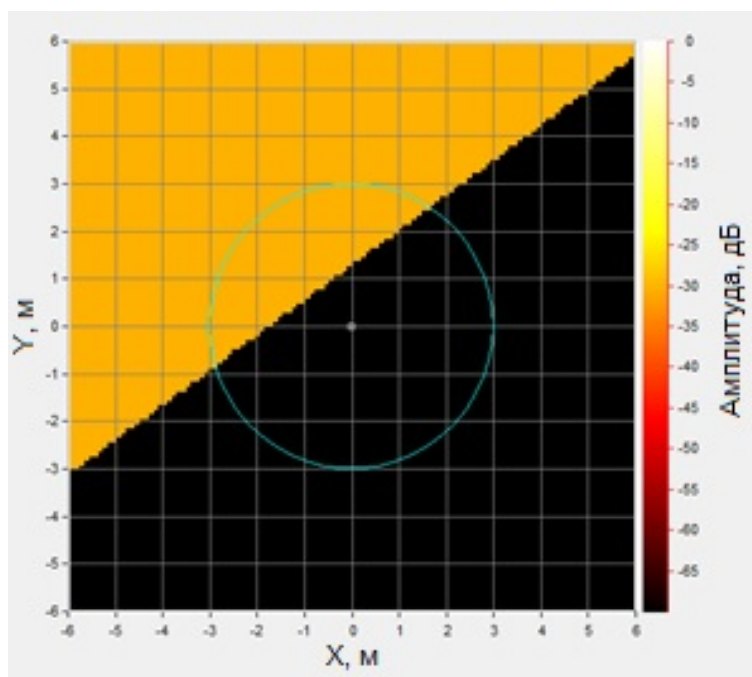


Рисунок 8 – Максимум отражения от скошенного сегмента потолка среди сечений БЭК $Z = \text{const}$, частота 5 ГГц, ТЕ-поляризация. Угол поворота РПМ 22.5° . Гармоники, не попадающие в рабочую зону, опущены

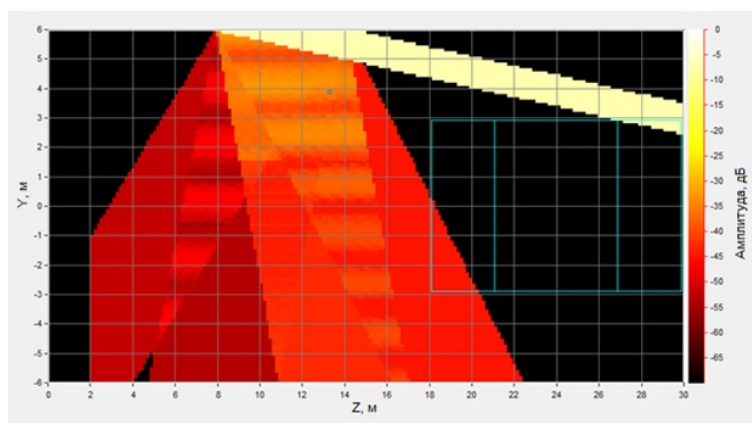


Рисунок 9 – Максимум отражения от скошенного сегмента потолка среди сечений БЭК $X = \text{const}$, частота 5 ГГц, ТЕ-поляризация. Угол поворота РПМ 45°

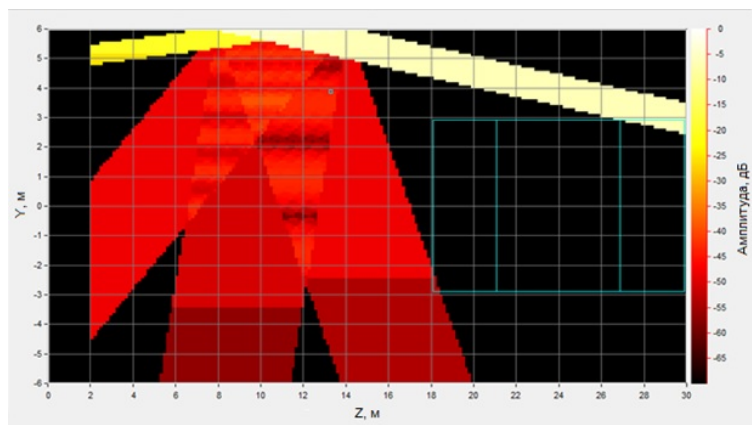


Рисунок 10 – Максимум отражения от скошенного сегмента потолка среди сечений БЭК $X = \text{const}$, частота 5 ГГц, ТЕ-поляризация. Угол поворота РПМ 0°

Заклучение

Анализ в широком диапазоне частот показал, что оптимальным углом поворота пирамид на скосе потолка является угол $\varphi = 0^\circ$, а при угле $\varphi = 22.5^\circ$ гармоники Флоке вносят максимальный вклад в неравномерность поля в рабочей зоне, которая может достигать ± 0.3 дБ.

Список литературы

- [1] Hemming L.H. Electromagnetic Anechoic Chambers: A Fundamental Design and Specification Guide. Wiley-IEEE Press, July 2002, 248 p.
- [2] Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С. Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния. М.: Наука, 2007.
- [3] Амитей Н., Галиндо В., Ву Ч.. Теория и анализ фазированных антенных решеток. Издательство Мир, 1974.
- [4] 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).
- [5] А.В. Никитенко, А.С. Зубов, Е.В. Булычев. 3D моделирование электромагнитного рассеяния на рпм методом связанных волн. // Журнал Радиоэлектроники (электронный журнал), номер 12, 2014 год. <http://jre.cplire.ru/jre/dec14/15/text.pdf>

IMPACT ESTIMATE OF DIFFERENT CEILING RAM ORIENTATIONS ON THE QUIET-ZONE FIELD IN THE COMPACT RANGE

Balabukha N.P.¹, Zubov A.S.¹, Menshikh N.L.¹, Nikitenko A.V.^{1*}, Solosin V.S.¹

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

*kocheku@gmail.com

Abstract

Pyramidal shaped radio-absorbing materials are commonly used in modern anechoic chambers as anechoic covering of the floor, ceiling and walls. Electro-magnetic field reflected from such materials includes Floquet's harmonics - fields propagating in several different directions. These directions depend on frequency, angle of incidence and angle of orientation of the pyramids to the plane of incidence. Different orientations may result in different impact on quiet-zone field. In this article we suggest a method of getting an estimate of this impact and its orientation angle dependence. Three-dimensional diffraction problem with periodic boundary conditions is solved using modified rigorous coupled-wave analysis. Modifications were made to increase numeric stability and efficiency. This strict-solution method allows getting values of the amplitudes of distinct Floquet's modes. Geometrical estimations of the localization of these modes can be made using appropriate expressions for the angles that set directions of propagation for the modes. The impact on the quiet-zone ripple has been estimated using summation of all the Floquet's fields non-evanescent at given frequency.

Key words: radio absorbing material, anechoic chamber, compact range