

РАЗМЕРНЫЙ ЭФФЕКТ В МЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН ПРИ МАСКИРОВКЕ ПОВЕРХНОСТИ ПИРАМИДАЛЬНЫМ ПОГЛОТИТЕЛЕМ

Лебедев А.М. *¹, Семенов В.Н.¹, Фурманова Т.А.¹, Краснолобов И.И.¹

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

Статья поступила в редакцию 22.11.2022
Одобрена после рецензирования 16.12.2022
Принята к публикации 28.12.2022

Аннотация

Пирамидальный поглотитель из пористого материала с потерями широко используется для радиолокационной маскировки элементов конструкций при проведении измерений характеристик рассеяния объектов. Размерный эффект проявляется как значительно меньшее снижение рассеяния от поверхности в результате маскировки путём помещения поглотителя на поверхность, чем это имело бы место для поверхности много больших размеров. Поэтому размерный эффект определяет нижнюю границу интервала по размерам маскируемой поверхности, в котором сохраняется эффективность использования поглотителя. Задача ослабления проявлений размерного эффекта для пирамидального поглотителя наиболее актуальна в низкочастотной части радиолокационного диапазона (дециметровые, метровые волны), где эффективная маскировка многих достаточно больших поверхностей не может быть выполнена именно из-за этого эффекта. В данной работе на электродинамических моделях численно исследовалась ситуация, характерная для проявления размерного эффекта при метровой длине волны, когда маскируемая поверхность имеет размеры порядка длины волны, сторона основания пирамид много меньше длины волны, высота пирамид составляет долю длины волны, а тангенс диэлектрических потерь материала пирамид возрастает до значений порядка единицы и более. Исследовано влияние размерного эффекта на уменьшение эффективной поверхности обратного рассеяния квадратной и круглой металлических пластин в направлении нормали к поверхности при маскировке пластин пирамидальным поглотителем. Сделан вывод о том, что основной причиной усиления проявления размерного эффекта для пирамидального поглотителя, по сравнению с поглотителем постоянной толщины, является дифракционный эффект вследствие неполного усреднения вкладов в поле рассеяния от отдельных пирамид. По результатам исследований выявлены два способа существенно понизить порог проявления размерного эффекта для пирамидального поглотителя: уменьшение размеров оснований пирамид и введение магнитного подслоя в состав поглотителя.

Ключевые слова: пирамидальный поглотитель, размерный эффект, нижняя граница интервала, дифракционный эффект, основание пирамиды, магнитный подслой

Введение

Пирамидальный поглотитель, представляющий двумерную решётку пирамид из пористого материала с потерями, находящуюся на основании постоянной толщины из того же материала, широко применяется для радиолокационной маскировки поверхностей при проведении измерений характеристик рассеяния объектов. Такой поглотитель помещают на стены безэховой камеры, его используют для маскировки элементов конструкции измерительного стенда, а при необходимости - и для маскировки отдельных поверхностей объекта измерений.

Размерный эффект имеет место для поглотителя любого типа и состоит в значительно меньшем снижении рассеяния от поверхности малых размеров в результате помещения на неё поглотителя, чем это имело бы место для поверхности много больших размеров. Таким образом, при маскировке поверхности достаточно больших размеров поглотитель продолжает “работать” практически так, как и при маскировке поверхности с размерами, стремящимися к бесконечности, а размерный эффект

* Автор, ответственный за переписку: Андрей Михайлович Лебедев, lebedev_am@mail.ru

определяет нижнюю границу интервала по размерам маскируемой поверхности, в котором закрытие поверхности поглотителем сохраняет свою эффективность.

В данной работе рассматривается маскировка поверхности металлического объекта помещением на неё пирамидального поглотителя. Есть все основания полагать, что проявления размерного эффекта при применении пирамидального поглотителя имеют свою специфику, по сравнению с размерным эффектом при применении поглотителя постоянной толщины. Особенностью данной работы является анализ проявлений размерного эффекта для волн метровой длины – вблизи низкочастотной границы радиолокационного диапазона. Здесь неизбежно ухудшаются свойства пирамидального поглотителя как такового из-за уменьшения толщины покрытия в длинах волн, а также роста тангенса диэлектрических потерь в материале пирамид вплоть до значений порядка единицы и более. Размерный эффект дополнительно ухудшает ситуацию. Так, в метровом диапазоне он не позволяет эффективно маскировать даже, казалось бы, большие поверхности с размерами порядка метра.

Постановка задачи исследования размерного эффекта для пирамидального поглотителя в метровом диапазоне длин волн

В данной работе было выполнено исследование проявлений размерного эффекта для пирамидального поглотителя при маскировке квадратной и круглой идеально проводящих пластин, рисунок 1. Путём численного решения значительного числа задач дифракции плоской волны на замаскированных и незамаскированных пластинах с использованием программы электродинамического моделирования ФЕКО [1] была исследована ситуация, характерная для проявления размерного эффекта в метровом диапазоне волн. А именно, маскируемые пластины имели размеры порядка длины волны и более, размеры основания пирамид были много меньше длины волны, высота пирамид составляла долю длины волны, а материал пирамид был взят практически металлоподобным. Далее под размером пластины понимается либо длина стороны квадратной пластины, либо диаметр круглой пластины. Приведённые на рисунке 1 характерные размеры пирамиды в составе поглотителя и значение комплексной диэлектрической проницаемости материала пирамид были взяты такими же, как для реального образца поглотителя, в соответствии с необходимостью интерпретации проявлений размерного эффекта в метровом диапазоне длин волн на частоте 0.2 ГГц (длина волны 1.5 м) при проведении серии измерений. Указанная частота и была зафиксирована в расчётах.

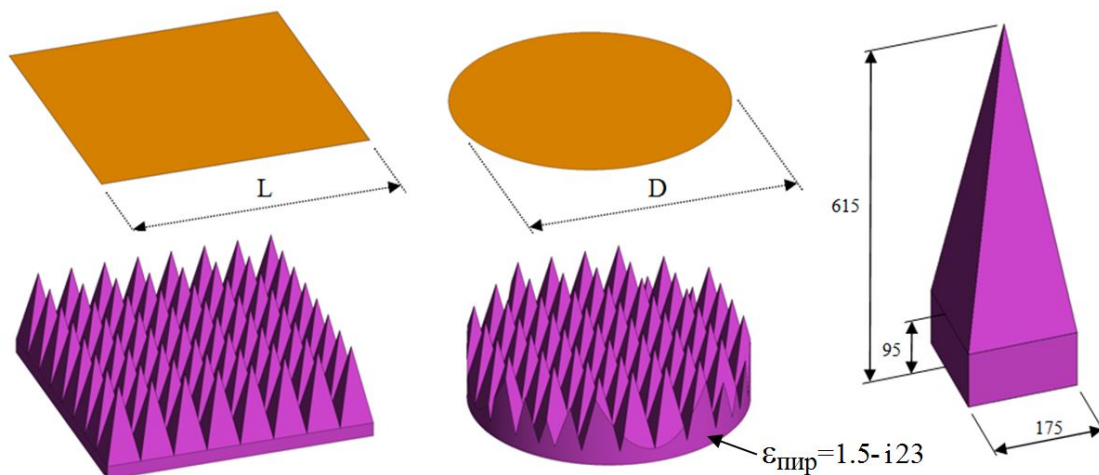


Рисунок 1 – Электродинамические модели, использованные при исследованиях размерного эффекта

В данной работе прослеживалось изменение обратного рассеяния плоской волны в направлении нормали к пластине. Снижение интенсивности обратного рассеяния пластиной с пирамидальным поглотителем характеризовалось отношением эффективных поверхностей рассеяния (ЭПР, смотри определение в [2, 3]) пластин с поглотителем и без. Это отношение для краткости будем называть коэффициентом отражения по мощности от пластины $R_P = \sigma / \sigma_{\text{мет}}$, здесь σ и $\sigma_{\text{мет}}$ – ЭПР замаскированной и незамаскированной пластины. В отдельной серии расчётов с помощью программы ФЕКО рассчитывался также коэффициент отражения по мощности $R_{P\infty}$ от бесконечной плоской границы идеального проводника с пирамидальным покрытием на ней.

Дифракционные эффекты, связанные с конечностью размеров поверхности, маскируемой пирамидальным поглотителем, как причина размерного эффекта

Причиной размерного эффекта для маскируемых пластин являются дифракционные эффекты (ДЭ), связанные с конечностью размеров пластин – при маскировке плоскости эти ДЭ отсутствуют. Тогда судить о наличии ДЭ, как и о степени проявления размерного эффекта, следует по отклонению R_P от $R_{P\infty}$. Выделим следующие два ДЭ. Во-первых, это ДЭ, обусловленный влиянием краёв маскируемой пластины, он существует и при маскировке поглотителем постоянной толщины. Во-вторых, это ДЭ вследствие неполного усреднения вкладов в поле рассеяния от отдельных пирамид.

На ход зависимости коэффициента отражения R_P от размеров пластины влияют также дифракционные эффекты при рассеянии волны на непокрытой металлической пластине. Действительно, ЭПР пластины входит в знаменатель выражения для R_P . Расчёты показывают, что при размерах пластин менее половины длины волны ДЭ при рассеянии на пластине приводят к существенным отклонениям ЭПР пластины от значений, вычисленных по физической оптике (ФО), но при размерах пластин порядка и более длины волны они почти не проявляются. Для исключения влияния ДЭ на отдельно взятой пластине сотрудниками ИТПЭ РАН Зубовым А.С. и Солосиным В.С. было предложено при вычислении R_P подставлять в знаменатель отношения значение ЭПР пластины $\sigma_{мет_ФО}$, вычисленное в приближении ФО, – этот приём был апробирован в данной работе.

Количественные оценки размерного эффекта для пирамидального поглотителя

На рисунке 2 представлены зависимости коэффициента отражения R_P от размеров пластины при её маскировке пирамидальным поглотителем: красным цветом показана зависимость для квадратной пластины, синим – для круглой. Синим пунктиром показан уровень коэффициента отражения $R_{P\infty}$ от плоскости с пирамидальным поглотителем. Для сравнения на рисунке 2 зелёным цветом показана также зависимость R_P от размеров для круглой пластины с поглотителем постоянной толщины. Этот поглотитель имеет близкий к пирамидальному поглотителю коэффициент отражения от замаскированной плоскости, который на рисунке представлен пунктирной прямой зелёного цвета.



Рисунок 2 – Зависимость коэффициентов отражения R_P от квадратной и круглой металлических пластин с поглотителем, как пирамидальным, так и постоянной толщины, от размеров пластины

Полученные результаты показывают, что ДЭ вследствие неполного усреднения вкладов в поле рассеяния от отдельных пирамид существенно усиливает проявления размерного эффекта. Так, наблюдавшееся превышение R_P над $R_{P\infty}$ для круглой пластины с пирамидальным поглотителем составило 12 дБ при размерах пластины, равных длине волны, 5 дБ при двух длинах волн, 3 дБ при четырёх длинах волн.

На рисунке 2 графики зависимостей коэффициентов отражения R_P от размеров пластин с пирамидальным поглотителем представлены в двух вариантах: сплошными линиями в случае, когда при

вычислении R_P выполняется деление на ЭПР пластины, вычисленную в приближении ФО, и показанными точками линиями в случае деления на ЭПР пластины, определённую из численного решения дифракционной задачи. Сравнение показывает целесообразность использования оценки коэффициента отражения от пластины с поглотителем именно при нормировке на физико-оптическое значение ЭПР пластины: тогда R_P остаётся на уровне единицы при уменьшении размеров пластины до значений много меньше длины волны.

Приёмы сдвигания порога заметного проявления размерного эффекта в сторону меньших размеров пластин

В работе было выявлено два приёма, позволяющие сдвинуть порог заметного проявления размерного эффекта для пластин, замаскированных пирамидальным поглотителем, в сторону меньших размеров пластин. Полученные результаты показали, что уменьшение размеров оснований пирамид и введение магнитного подслоя в состав пирамид приводят к ускорению сходимости R_P к $R_{P\infty}$ с увеличением размеров маскируемой поверхности.

Как показывает сравнение зависимостей коэффициентов отражения R_P от размера круглой пластины на рисунке 3, действие ДЭ вследствие неполного усреднения вкладов в поле рассеяния от отдельных пирамид действительно заметно ослабляется при более частом следовании пирамид, как это имеет место при уменьшении размеров оснований пирамид со 175 x 175 мм до 90 x 90 мм.

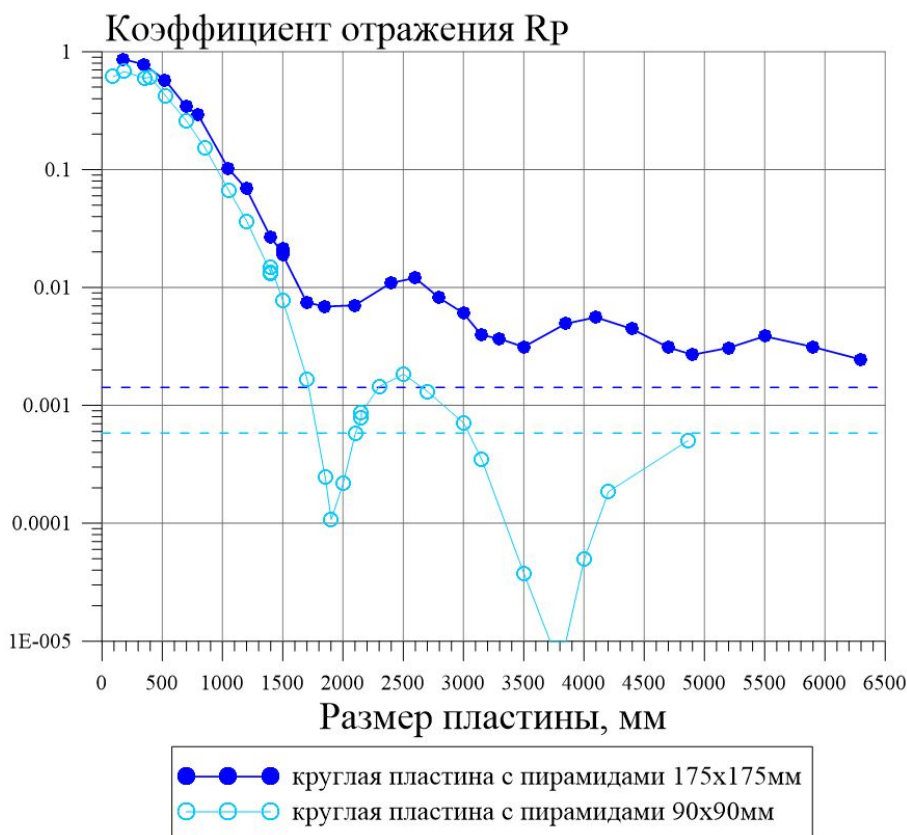


Рисунок 3 – Сдвиг границы размерного эффекта в сторону меньших размеров пластины при уменьшении размеров основания пирамид

Из практики применения магнитного подслоя известно, что его введение до некоторой степени подавляет размерный эффект при использовании поглотителей постоянной толщины. Таким образом, этот приём ослабляет действие ДЭ, связанного с наличием краёв маскируемой пластины. Расчёты показали, что для случая применения пирамидального поглотителя описанной выше геометрии введение магнитного подслоя под основанием выбранной толщины практически не оказывает никакого действия на ход зависимости коэффициента отражения R_P от размеров пластины. Однако при уменьшении толщины основания до нескольких миллиметров, смотри изображение пирамид в правой части рисунка 4, ослабление размерного эффекта было получено. Это видно из сопоставления скоростей выхода представленных на рисунке 4 зависимостей R_P для круглой пластины с пирамидальным поглотителем, не имеющим и имеющим магнитный подслой, на уровне коэффициентов отражения от плоскости с соответствующими поглотителями, показанные пунктирными прямыми. Полученный результат, по-видимому, объясняется

значительным увеличением длин краёв участков оснований отдельных пирамид, применительно к которым после введения магнитного подслоя подавляется соответствующий дифракционный эффект.

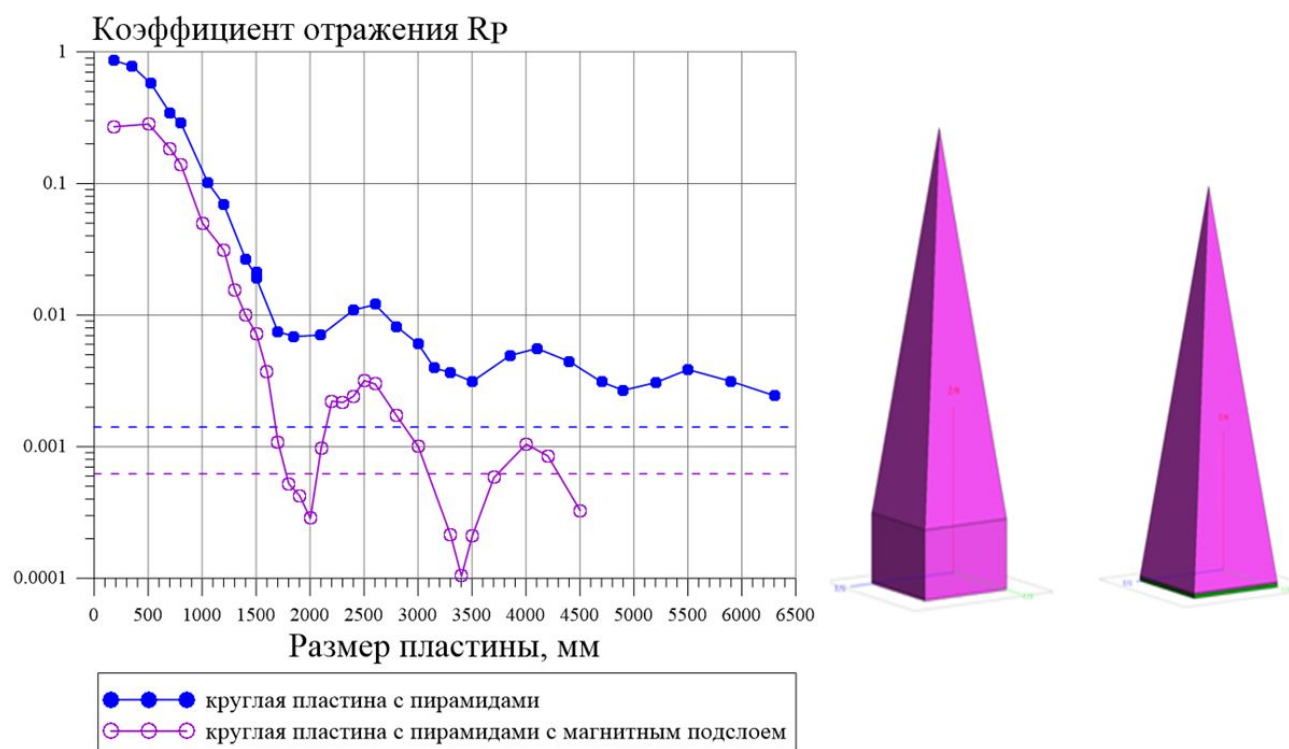


Рисунок 4 – Сдвиг границы размерного эффекта в сторону меньших размеров пластины при уменьшении размеров основания пирамид

И уменьшение размеров оснований пирамид, и введение магнитного подслоя привели к улучшению качества пирамидального поглотителя - в обоих случаях заметно, приблизительно в два раза, падает коэффициент отражения от плоской металлической поверхности с таким поглотителем $R_{P\infty}$. Более существенно, однако, то, что выход зависимости R_P от размеров пластины на уровень $R_{P\infty}$ приобретает осциллирующий характер. В результате в отдельных, достаточно значительных интервалах размеров пластины R_P становится меньше, чем $R_{P\infty}$, а порог заметного проявления размерного эффекта, соответствующий минимальному размеру пластины, при котором R_P совпадает с $R_{P\infty}$, наблюдается при размерах пластины, приблизительно равных длине волны.

Заключение

Апробирован более информативный способ оценки коэффициента отражения по мощности R_P от металлической пластины с помещённым на неё поглотителем как отношения ЭПР пластины с поглотителем к ЭПР пластины, вычисленной в приближении физической оптики. Этот приём даёт методическую основу для отработки мер подавления размерного эффекта при малых размерах пластины до половины волны и менее.

В работе также показано, что уменьшение размеров оснований пирамид и введение магнитного подслоя в состав пирамид приводят к ускорению сходимости R_P к $R_{P\infty}$ с увеличением размеров маскируемой пластины. Фактически это позволяет эффективно использовать пирамидальный поглотитель в метровом диапазоне при заметно меньших размерах маскируемой поверхности – вплоть до размеров порядка длины волны.

Список литературы

- [1] Feko, <https://www.altair.com>.
- [2] Кобак В.О. Радиолокационные отражатели. - М.: Советское радио, 1975. - 248 с.
- [3] 3. Radar Cross Section / E.F. Knott, J.F. Shaeffer, M.T. Tuley. - 2nd ed., SciTech Publishing, Inc., USA. 2004. - 637 p.

DIMENSIONAL EFFECT IN CONCEALMENT WITH PYRAMYD-SHAPED ABSORBERS

Lebedev A.M.*, Semenenko V.N., Furmanova T.A., Krasnolobov I.I.

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

* lebedev_am@mail.ru

Abstract

A pyramid-shaped absorber made of porous material with losses is widely used for radar concealment of structural elements in measuring of object's scattering characteristics. Dimensional effect manifests itself as a much smaller reduction of scattering from the surface as a result of masking it through the absorber application, than that would be the case for a surface of much larger sizes. So the effect determines the lower limit of the masked surface dimension interval, in which the efficiency of the absorber usage is maintained. The task to weaken the manifestation of the dimensional effect for a pyramidal absorber is most relevant in the low-frequency part of the radar frequency band (decimeter, meter waves), where effective masking of many rather big surfaces cannot be performed due to the dimensional effect. Using electrodynamic models, characteristic situation of the dimensional effect manifestation in case of a meter order wavelength was numerically investigated: the masked surface had dimensions of the wavelength order, the side of the absorbing pyramid's base was much smaller than wavelength, the pyramid's height was a fraction of wavelength, and the tangent of dielectric losses of the pyramid's material was up to values of order one or more. Influence of the dimensional effect on the backscattering radar cross section of square and round metal plates, masked with the pyramid-shaped absorber, in normal to the plate's surface direction was investigated. The conclusion was made that the main reason for the increased manifestation of the dimensional effect for the pyramid-shaped absorber, when compared with the absorber of constant thickness, is the diffraction effect due to incomplete averaging of contributions from separately taken pyramids into the scattered field. The research resulted in identification of two ways to lower the threshold of the dimensional effect manifestation for the pyramid-shaped absorber: reducing the size of the pyramid's base and insertion of a magnetic sublayer into the absorber.

Key words: pyramid-shaped absorber, dimensional effect, lower limit of the interval, diffraction effect, pyramid's base, magnetic sublayer
