

Антясов И. С., Соколов А. Н.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОХОЖДЕНИЯ МНОГОСЛОЙНОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ

Для оценки показателей альтернативной измерительной площадки, намеченной к строительству, смоделированы электродинамические процессы, происходящие на границе многослойной ограждающей конструкции, с помощью метода каналов Флоке. Проведена предварительная оценка диэлектрических и магнитных свойств образца радиопоглощающего материала резонансным методом. Получены коэффициенты прохождения и отражения для бесконечной многослойной структуры ограждающей конструкции измерительной площадки. Рассмотрены коэффициенты затухания в зависимости от толщины исследуемого материала, от расстояния между радиопоглощающим материалом и экраном в каскаде. Исследованы зависимости коэффициентов прохождения и отражения для сетчатых структур в зависимости от расстояния между экранами и от размеров ячейки. Смоделирована при известных параметрах радиопоглощающего материала многослойная структура стенки альтернативной измерительной площадки в строгой постановке с использованием метода каналов Флоке.

Ключевые слова: безэховая камера; канал Флоке; электромагнитные излучения; сетчатые структуры; диэлектрическая проницаемость; магнитная проницаемость; специальные исследования; фоновые индустриальные помехи.

Antyasov I. S., Sokolov A. N.

MODELING TRANSMISSION COEFFICIENT MULTILAYER ELECTRODYNAMIC STRUCTURE

To evaluate the parameters of alternative measurement site, intended for the construction, modeled electrodynamic processes occurring at the interface of the multilayer building envelope, using the method Floquet channels. A preliminary assessment of the dielectric and magnetic properties of a sample radar absorbing material resonance method. Obtained transmission and reflection coefficients for an infinite multilayer structure enclosing structure of the measuring area. Considered damping coefficients depending on the thick-

ness of the material, the distance between the screen and the absorbing materials in the cascade. The dependence of the transmission and reflection coefficients for network structures, depending on the distance between the screen and the size of the cell. Modeled with the known parameters of radar absorbing material multi-layer structure of the wall of alternative measuring sites in the rigorous formulation using the method Floquet channels.

Keywords: anechoic chamber; Floquet channel; electromagnetic radiation; reticulated structure; dielectric permittivity; magnetic permeability; special studies; industrial background noise.

Введение

Для проведения лабораторных специальных исследований (СИ) на побочные электромагнитные излучения и наводки (ПЭМИН) технических средств (ТС) в соответствии с нормативно-методическими документами требуется альтернативная измерительная площадка (АИП). АИП можно назвать «полу-безэховой» камерой, поскольку она отличается от безэховой камеры (БЭК) наличием пластины заземления на полу камеры [1]. К АИП предъявляются определенные требования по коэффициенту затухания и эффективности экранирования внешних промышленных радиопомех [2, 3, 4]. С этой целью проводят ряд испытаний на пригодность построенной АИП. Построение АИП довольно дорогостоящее мероприятие и требует комплексного подхода для решения намеченных задач [5], достигаемых различными способами: геометрией, размерами, применением радиопоглощающих материалов (РПМ), экранирующих материалов, помехоподавляющих фильтров. Все стенки АИП (за исключением нижней) имеют многослойную структуру [6], состоящую из сетчатых экранов с воздушной прослойкой между ними и радиопоглощающего материала.

Для оценки показателей АИП, намеченной к строительству, смоделированы электродинамические процессы, происходящие на границе многослойной ограждающей конструкции АИП [7]. Учитывая, что для экранирования применяется мелкая сетка [6] и РПМ, идеальное моделирование АИП с учетом всех элементов ее конструкции требует значительного объема вычислительных операций (необходимо разбить весь объем, в том числе мелкая сетку порядка 20 длин волны, на конечные элементарные излучатели).

Экспериментальное моделирование АИП ограничено следующими факторами: качество измерений в требуемом диапазоне частот [2] сложно обеспечить из-за проблемы несформированности фронта волны (даль-

няя зона формируется на значительном расстоянии) и фоновых электромагнитных шумов (низкого отношения сигнал-шум). Для моделирования применим систему автоматизированного проектирования (САПР) CST STUDIO.

1. Исследование

радиопоглощающего материала

Стенка АИП может быть представлена многослойной периодической структурой, в которой часть слоев (две периодические сетки) играют роль экрана, а радиопоглощающий слой отвечает за затухание. Поэтому естественным методом анализа бесконечных периодических структур является применение условий периодичности, которые сводят задачу для бесконечной структуры к анализу одного периода [8]. С этой целью применяют метод каналов Флоке, каждый из которых представляет собой часть пространства, ограниченную вертикальными стенками, на которых установлены периодические граничные условия.

Для понимания полноценной картины электродинамических процессов, происходящих в РПМ, необходимо знать диэлектрическую, магнитную проницаемости в комплексном виде и проводимость материала [9]. РПМ может иметь несколько диэлектрических механизмов или поляризационных эффектов, которые вносят вклад в мнимую часть его диэлектрической проницаемости (ионная, дипольная (вращательная), атомная и электронная), связанной с затуханием электромагнитного поля в материале [10].

С целью предварительной оценки достоверности расчетов с применением метода каналов Флоке проведены исследования коэффициента прохождения (по мощности) для комбинации проволочной решетки и диэлектрической пластины в зависимости от расстояния между ними. Результаты моделирования имеют хорошее согласование с расчетными данными, полученными методом усредненных граничных условий.[9]

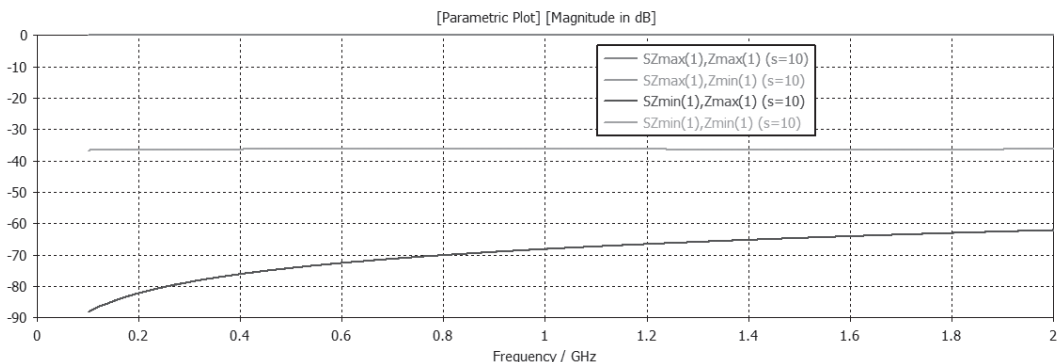


Рис. 1. Коэффициенты прохождения и отражения (отображены соответственно синим и оранжевым) для бесконечной стенки

На основе предъявляемых требований по затуханию и экранированию моделирование позволяет спрогнозировать диэлектрические и магнитные свойства радиопоглощающих материалов. Например, в диапазоне частот от 100 МГц до 2 ГГц коэффициенты затухания (-35 дБ) и экранирования (-60 дБ) обеспечиваются применением сетки с ячейкой размером 2 x 2 мм, диаметром проволоки 1 мм и с установленной пластиной РПМ (толщина 10 мм, относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 10$, проводимость $\sigma = 0,555$ См/м, относительная магнитная проницаемость $\mu = 10$, магнитная проводимость $\sigma^m = 78956,83$ Гн) на расстоянии 10 мм от сетки (рис. 1).

Необходимо заметить, что изготовление материалов с такими параметрами крайне затруднительно, а чаще невозможно.

Существуют различные методы измерения диэлектрической проницаемости, которые имеют свои достоинства и недостатки. Резонансные методы измерения параметров материалов основаны на изменении свойств колебательных систем при введении в них образцов исследуемого вещества. Метод с применением конденсатора с параллельными пластинами включает прослаивание тонкого листа материала между двумя электродами для формирования конденсатора.

Для предварительной оценки исследуемого образца РПМ применен резонансный метод. С этой целью используются выражения [11]:

$$\epsilon = C_\epsilon / C_0,$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{Q_\epsilon} - \frac{1}{Q_0} = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{\sigma}{\omega \epsilon' \epsilon_0} = \frac{\sigma}{2\pi f \epsilon' \epsilon_0}$$

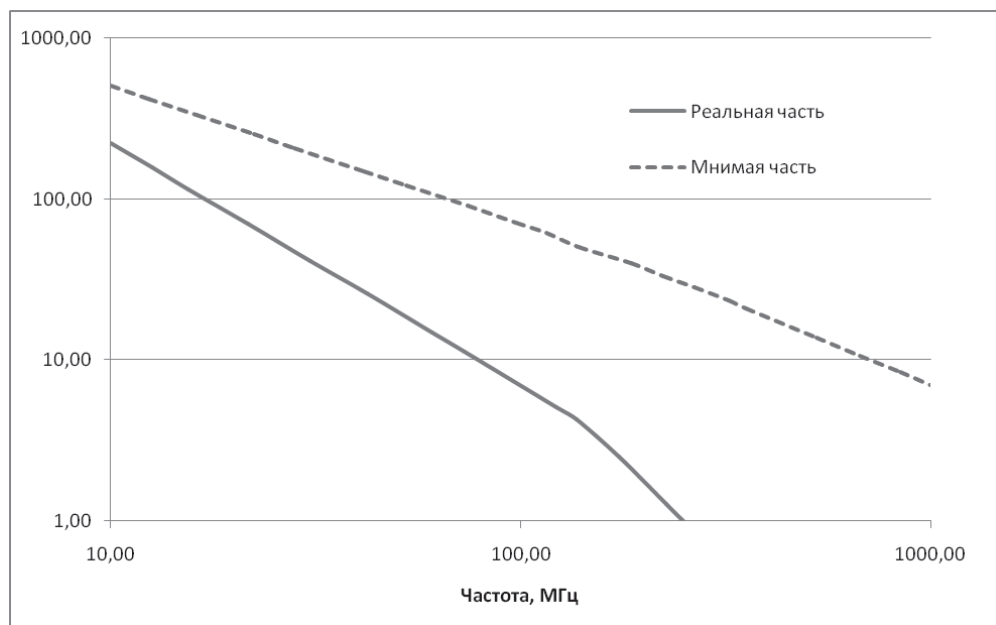


Рис. 2. Магнитная проницаемость исследуемого материала

Исследован образец РПМ толщиной 6 мм. Установлено, что на частоте 2,5 МГц: $\varepsilon=7,08$, $\sigma=3,54 \cdot 10^{-6}$ См/м. Данные по магнитной проницаемости представлены производителем (рис. 2). Это означает, что в исследуемом материале магнитные потери преобладают над диэлектрическими.

Более точным в широком диапазоне частот является исследование материала методом коаксиальной линии передач [9].

2. Исследование зависимости затухания

Зафиксируем значения диэлектрической и магнитной проницаемостей для идеализированного РПМ ($\varepsilon = 10$, $\sigma=0,555$ См/м, $\mu = 10$, $\sigma^m=78956,83$ Гн) и оценим влияние толщины материала при применении в каскаде (расстояние 10мм) с сеткой (размер ячейки 2 мм, диаметр проволоки 1мм).

По зависимости (рис. 3) можно сделать вывод о положительном влиянии утолще-

ния образца, однако это наблюдается только при линейных идеализированных характеристиках РПМ. В испытуемом образце, будут наблюдаться эффекты резонирования, появятся всплески и провалы на различных частотах (рис. 4).

Поэтому необходимо подбирать толщину индивидуально для каждого материала исходя из его диэлектрических и магнитных свойств. Например, для испытуемого материала оптимальной будет толщина 6 мм, что также соответствует данным производителя [12].

Рассмотрим зависимость затухания при отражении от стенки от расстояния между идеализированным РПМ ($\varepsilon = 5$, $\sigma = 0,2783$ См/м, $\mu = 10$, $\sigma^m = 78956,83$ Гн, толщина пластины 6 мм) и экраном (сетка с ячейкой 2 x 2 мм и диаметром 1 мм), к РПМ через 1 мм воздушную прослойку толщиной 3 мм пластина с $\varepsilon = 3$, $\sigma = 0,01$ См/м (табл. 1).

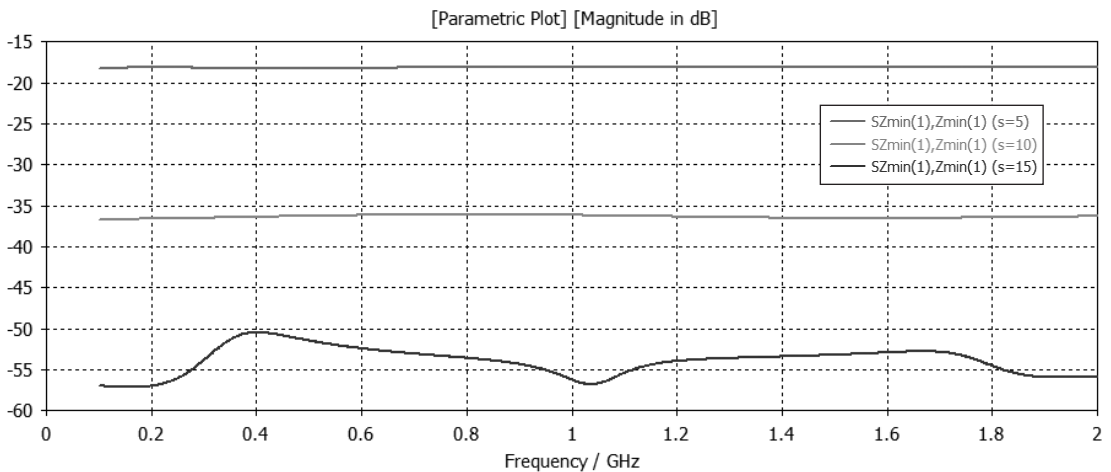


Рис. 3. Зависимость затухания от толщины идеализированного РПМ

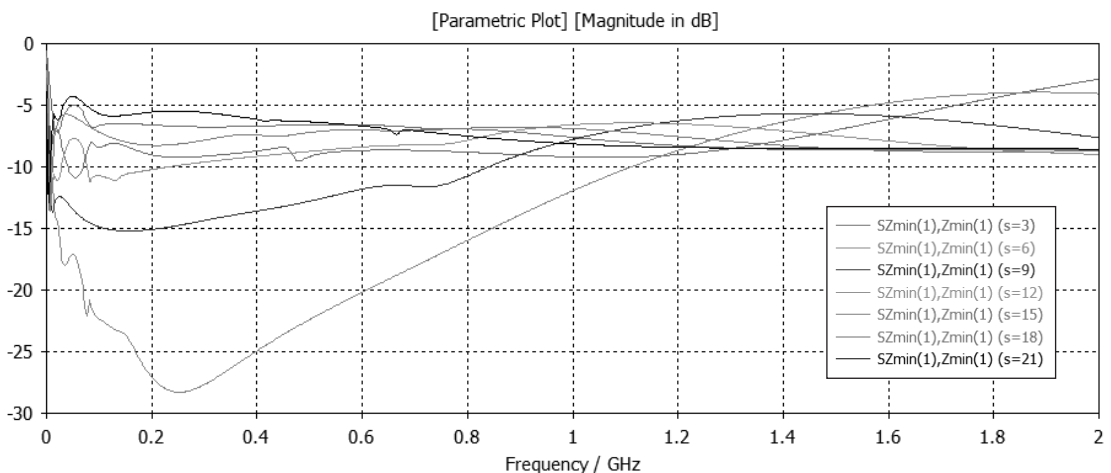


Рис. 4. Зависимость затухания от толщины исследуемого РПМ

Зависимость коэффициента затухания от расстояния между РПМ и экраном

Расстояние, мм	Частота, ГГц									
	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	1,9
0	26,35	20,34	16,85	14,41	12,59	11,17	10,08	9,26	8,67	8,45
2	26,01	20,02	16,54	14,13	12,33	10,96	9,91	9,14	8,60	8,41
4	25,67	19,69	16,24	13,85	12,09	10,75	9,75	9,03	8,55	8,40
6	25,35	19,37	15,94	13,58	11,85	10,56	9,60	8,93	8,52	8,40
8	25,04	19,07	15,66	13,33	11,63	10,38	9,47	8,86	8,51	8,44
10	24,73	18,78	15,39	13,09	11,42	10,22	9,36	8,80	8,53	8,50
12	24,44	18,50	15,13	12,86	11,23	10,06	9,26	8,76	8,57	8,59
14	24,16	18,23	14,88	12,63	11,05	9,92	9,17	8,74	8,64	8,71
16	23,89	17,97	14,64	12,42	10,87	9,79	9,10	8,74	8,74	8,88
18	23,63	17,72	14,41	12,22	10,70	9,67	9,04	8,77	8,88	9,10
20	23,37	17,47	14,18	12,02	10,55	9,57	9,00	8,81	9,06	9,38
40	21,15	15,39	12,32	10,48	9,49	9,26	9,97	12,27	17,99	22,90

Выводы

Таким образом, с увеличением расстояния между РПМ и экраном затухание ослабевает, в то же самое время увеличивается эффективность экранирования. Поэтому необходимо выбрать приоритеты при построении АИП. Стоит заметить, что с определенной частоты наблюдается обратный эффект, его можно связать с тем, что в расстояние начинается укладываться 1/8 длина волны (с учетом двукратного хода получается 1/4 волны).

Исследования коэффициента прохождения при различных размерах ячейки позволяют сделать заключение о том, что резонансные явления возникают на частотах, соответствующих кратным значениям 1/8 дли-

ны волны. Это связано с количеством граней ячейки: 4 грани * 1/8 длины волны = 1/2 длины волны.

Исследование коэффициента прохождения в зависимости от расстояния между сетками выявило наличие резонанса на 1/2 длины волны, а ухудшение характеристик наблюдается, начиная с 1/4 длины волны.

Таким образом, при известных параметрах РПМ многослойная структура стенки АИП моделируется в строгой постановке с использованием метода каналов Флоке. Для оценки пригодности к использованию АИП, намеченной к строительству, необходимо построение объемной модели в оптическом приближении, на основе которой выдаются рекомендации под требования заказчика.

Примечания

1. Антясов И.С., Войтович Н.И., Соколов А.Н. Комплексное экранирование альтернативной измерительной площадки для проведения специальных исследований технических средств. //Вестник ЮУрГУ. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. — Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2014. — № 2(14) – С. 61-69.

2. ГОСТ Р 51320 – 99. Радиопомехи промышленные. Методы испытаний технических средств – источников промышленных помех [Текст]. – Введ. 1999-22-12. – М.: Госстандарт России, 1999. – 27 с.

3. ГОСТ Р 50414 – 92. Совместимость технических средств электромагнитная. Оборудование для испытаний. Камеры экранированные. Классы, основные параметры, технические требования и методы испытаний [Текст]. – Введ. 1992-26-11. – М.: Госстандарт России, 1992. – 28 с.

4. ГОСТ Р 51318.16.1.4 – 2008. Совместимость технических средств электромагнитная. Требования к аппаратуре для измерения параметров промышленных радиопомех и помехоустойчивости и методы измерений. Часть 1-4. Аппаратура для измерения параметров промышленных радиопомех и помехоустойчивости. Устройства для измерения излучаемых радиопомех и испытаний на устойчивость к излучаемым радиопомехам [Текст]. – Введ. 2008-12-25. – М.: Госстандарт России, 2009. – 75 с.
5. Мицмакер М.Ю. Безэховые камеры СВЧ [Текст] / М.Ю.Мицмакер, В.А.Торгованов. – М.: Радио и связь. — 1982. – 128 с.
6. Антясов И.С. Использование сетчатых материалов при экранировании альтернативной измерительной площадки для проведения специальных исследований технических средств [Текст] / И.С.Антясов, А.Н.Соколов // Безопасность информационного пространства: сборник трудов XIII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. — 2015. – С. 8 – 13.
7. Антясов И.С., Соколов А.Н. Граничные условия для векторов электромагнитного поля на поверхности экрана на основе проволочной сетки. //Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2015. – № 2(16). – С. 4 – 6.
8. Курушин А.А. «Использование каналов Флоке для моделирования периодической наноструктуры» [Текст] / А.А. Курушин // "Журнал радиоэлектроники". –2010. –№ 11. – С.1-22.
9. Antyasov I.S. The solution for the electrodynamic problem on the alternative test site border fencing construction to conduct special studies of technical means / I.S. Antyasov // Procedia Engineering (El-sevier Ltd.). – 2015. – Volume 129. – Pages 970–976.
10. Основы измерения диэлектрических свойств материалов. Заметки по применению. Agilent Technologies. 2010. — 32 с.
11. Дворяшин Б.В. Радиотехнические измерения / Б.В.Дворяшин, Л.И.Кузнецов. – М.: Советское радио. — 1978. – 360 с.
12. Техническое Описание 390-5.1. C-RAM FT Ферритовый плиточный абсорбер. http://www.eltm.ru/editor/upload-files/C-RAM_FT__390-5.1_.pdf

Антясов Иван Сергеевич, ассистент кафедры «Защита информации», Южно-Уральский государственный университет. E-mail: antyasov@gmail.com.

Соколов Александр Николаевич, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Защита информации», Южно-Уральский государственный университет. E-mail: ANSokolov@inbox.ru.

Antyasov Ivan Sergeevich, Assistant of the Department «Information protection», South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation. E-mail: antyasov@gmail.com.

Sokolov Alexandr Nikolaevich, PhD, Docent, Head of Department «Information protection», South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation. E-mail: ANSokolov@inbox.ru.