

N. Iranpour, L. Yang, R. Gomez-Garcia, X. Zhu // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. – 2025. – P. 2639–2652.

2. Morgan M. Reflectionless filter structures / M. Morgan, T. Boyd // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 2015. – Vol. 63. No. 4. – P. 1263–1271.

УДК 621.396.67

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ РАЗРЕЖЕННЫХ ЭКРАНОВ ИЗ КУБИЧЕСКОЙ ПРОВОДНОЙ СЕТКИ

К.С. Лукас, аспирант

г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, cangasamuel01@yandex.ru

Выполнено моделирование экранов из кубической проводной сетки (ПС). Получены разреженные экраны с помощью аппроксимации оптимальной токовой сеткой с допуском удаления элементов сетки (ДУЭС) 1, 2, 3%. Приведены уменьшения массы и вычислительные затраты для разреженных экранов. Представлены частотные зависимости эффективности экранирования электрического и магнитного полей для исходного и разреженных экранов в диапазоне частот (10–1000 МГц).

Ключевые слова: проводная сетка, разреженный экран, аппроксимация оптимальной токовой сеткой, эффективность экранирования.

Использование экранов из проводной сетки (ПС) для защиты радиоэлектронных устройств (РЭУ) от электромагнитных помех расширяется благодаря их легкости и гибкости [1, 2]. Помимо этого, ПС также дает прозрачность для видимости защищаемых объектов и хорошую циркуляцию воздуха, что способствует охлаждению РЭУ. Экраны из ПС экранируют почти, как и сплошная конструкция [3, 4], поэтому часто их применяют в тех областях, где важны сочетание характеристик и оптимизация массы. Между тем в ПС есть много проводов с малыми токами, которые почти не влияют на характеристики [5].

Недавно представлено создание разреженных антенн [6] и рассеивателей [7] на основе аппроксимации оптимальной токовой сеткой (АОТС), позволяющей контролировать их массу путем исключения проводов с малым током, сохраняя при этом радиотехнические характеристики. АОТС показала хорошую эффективность в создании разреженных антенн и рассеивателей, поскольку удалось не только значительно уменьшить массу, но и обеспечить контроль характеристик структур. Кроме того, благодаря АОТС впервые созданы разреженные

экраны из квадратной ПС с допуском удаления элементов сетки (ДУЭС) 20%, что уменьшило массу в 2,1 раза с приемлемым изменением характеристик в заданном диапазоне частот [4]. Однако целесообразно рассмотреть ЭЭ разреженных экранов после АОТС для других экранов. Одной из широко используемых конструкций экранов в технике является экран в форме параллелепипеда [3]. Цель данной работы – исследовать частотные зависимости ЭЭ разреженных экранов из кубической ПС.

Исследуемые разреженные экраны из кубической ПС со стороной 0,6 м представлены на рис. 1. Использована АОТС на частоте $f = 500$ МГц. Она дает размер ячейки 5 см, равный $\lambda/12$ ($\lambda = 0,6$ м), что считается приемлемым для экрана из ПС [8]. На них падает плоская волна с $f = 10\text{--}1000$ МГц (с шагом 10 МГц) и амплитудой 1 В/м под углом $\theta_{\text{пад}} = \varphi_{\text{пад}} = 90^\circ$. Точка наблюдения размещена в центре экрана. Все структуры моделировались методом моментов. Исходная ПС состоит из 1 728 сегментов. Результаты уменьшения массы и вычислительные затраты разреженных экранов приведены в таблице.

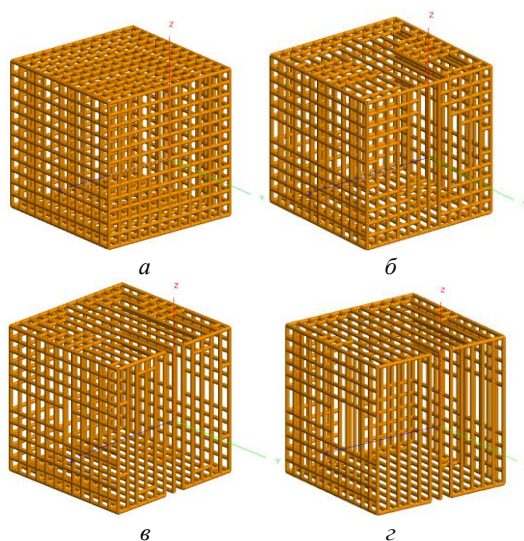


Рис. 1. Экраны с ДУЭС = 0 (а), 1 (б), 2 (в), 3 (г), %

Уменьшение массы и вычислительных затрат после АОТС

ДУЭС, %	Число сегментов	Масса	Память	Время
1	1 500	1,15	1,33	1,52
2	1 360	1,27	1,6	2
3	1 272	1,35	1,84	2,51

Частотные зависимости ЭЭ по $|E|$ и $|H|$ представлены на рис. 2. Видно, что изменение частоты сильно влияет на ЭЭ как для исходного (0%), так и для разреженных экранов. Примечательно, что ЭЭ разреженных экранов даже лучше, чем у исходного, вблизи некоторых частот, особенно при $f = 760\text{--}1000$ МГц (ЭЭ_Е) и $f = 710\text{--}890$ МГц (ЭЭ_Н). В некоторых диапазонах частот разреженные экраны экранируют хуже исходного: при $f = 150\text{--}250$ МГц (ЭЭ_Е) и $f = 10\text{--}300$ МГц (ЭЭ_Н). В то же время при ДУЭС = 1, 2% отклонение характеристик от исходного меньше, чем при ДУЭС = 3%, но уменьшение массы относительно мало. Напротив, при ДУЭС = 3% отклонение больше, но больше уменьшение массы (в 1,35 раза) и лучше ЭЭ_Е в диапазоне $f = 830\text{--}1000$ МГц. В общем случае отмеченные расхождения могут быть из-за удаления проводов с фазами, сильно отличающимися от фаз оставшихся соседних проводов. Кроме того, ДУЭС выбирается исходя из конкретной задачи уменьшения массы и обеспечения нужной ЭЭ разреженных экранов из ПС.

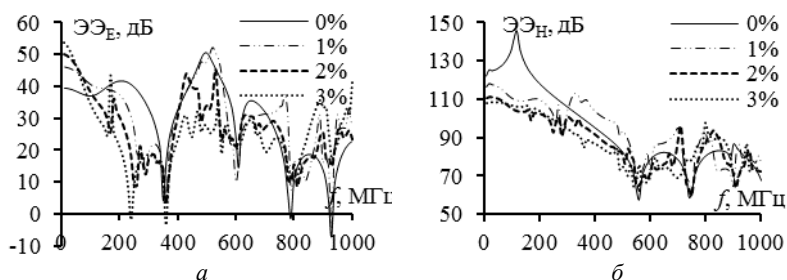


Рис. 2. Частотные зависимости ЭЭ экранов по $|E|$ (а) и $|H|$ (б) в точке $(0; -0,3; 0)$

Таким образом, выполнено моделирование частотных зависимостей ЭЭ разреженных экранов из кубической ПС. Масса экрана может быть уменьшена в 1,35 раза с помощью АОТС. Выявлены диапазоны частот с улучшенной и низкой ЭЭ по сравнению с ЭЭ исходного экрана. В дальнейшем необходимо исследовать ЭЭ на более высоких частотах и при разных углах падающей волны.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2026-0007.

ЛИТЕРАТУРА

1. A review of magnetic shielding technology for space radiation / K. Ferrone, C. Willis, F. Guan, J. Ma, L. Peterson, S. Kry // Radiation. – 2023. – Vol. 3. – P. 46–57.

2. Electromagnetic shielding behavior of different metallic wire-meshes and thin metal plate / F. Bulut, H.S. Efendioğlu, V. Solak, M. Yabuloğlu, H. Özer //

2017 IV International Electromagnetic Compatibility Conference (EMC Turkiye). – 2017. – P. 1–3.

3. IEEE Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures: IEEE Std 299-2006 (Revision of IEEE Std 299-1997). – New York: IEEE, 2006. – 52 p.

4. Лукас К.С. Разреженные электромагнитные экраны из проводной сетки / К.С. Лукас, Т.Ф. Данг, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2025. – № 4 (28). – С. 13–19.

5. Generation of sparse antennas and scatterers based on optimal current grid approximation / T.P. Dang, M.T. Nguyen, A.F. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // Algorithms. – 2025. – Vol. 18, No. 3. – 171 p.

6. Нгуен М.Т. Инновационные подходы к проектированию разреженных проводно-сеточных антенн: разработка алгоритмов и оценка их эффективности // Системы управления, связи и безопасности. – 2024. – Т. 16, № 4. – С. 1–47.

7. Данг Т.Ф. Угловой отражатель и основные методы моделирования электромагнитного рассеяния: обзор за 10 лет // Системы управления, связи и безопасности. – 2025. – № 3. – С. 35–120.

8. Ott H.W. Electromagnetic Compatibility Engineering. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2009. – 872 p.

УДК 621.396.669

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАЯЛЬНОЙ МАСКИ НА ПЕРЕКРЁСТНЫЕ НАВОДКИ В ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПЕЧАТНЫХ ТРАССАХ МИКРОПОЛОСКОВОЙ СТРУКТУРЫ

Д.А. Мазунов, аспирант

Научный руководитель Е.Б. Черникова, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, dmitriy.mazunov@mail.ru

Исследовано влияние паяльной маски на уровень перекрёстных наводок между двумя параллельными печатными трассами микрополосковой структуры, расположенными над опорной плоскостью. Рассмотрена структура печатной платы с фиксированными геометрическими и диэлектрическими параметрами, для которой выполнено моделирование при наличии и отсутствии слоя паяльной маски. В качестве критериев оценки использованы коэффициенты перекрёстных наводок на ближнем и дальнем концах линии. Установлено, что введение паяльной маски существенно изменяет уровень перекрёстных наводок и характер электромагнитной связи между проводниками. Полученные результаты показывают, что влияние паяльной маски должно учитываться при проектировании печатных плат.

Ключевые слова: печатная плата, паяльная маска, перекрёстные наводки, линии передачи, электромагнитная совместимость, целостность сигнала.