

УДК 621.396.67

К.С. Лукас, Т.Ф. Данг, Т.Р. Газизов

## Разреженные электромагнитные экраны из проводной сетки

Уменьшение массы и площади электромагнитных экранов важно для ряда радиоэлектронных устройств. С этой целью впервые представлена аппроксимация оптимальной токовой сеткой (АОТС) для создания разреженных экранов. Из квадратной проводной сетки (ПС) получены разреженные экраны с помощью АОТС с допусками удаления элементов сетки (ДУЭС) 2, 5, 20 и 30%. Проанализированы их характеристики в сравнении с исходным экраном из ПС. Приведены частотные зависимости в диапазоне 10–1000 МГц и зависимости от расстояния для напряженности электрического и магнитного полей и эффективности экранирования экранов. Выбран оптимальный ДУЭС = 20% со снижением массы в 2,1 раза и приемлемыми отклонениями характеристик.

**Ключевые слова:** аппроксимация оптимальной токовой сеткой, метод моментов, уменьшение массы, проводная сетка, разреженный экран, электромагнитная совместимость, эффективность экранирования.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2025-28-4-13-19

Электромагнитные экраны широко применяются для защиты радиоэлектронных устройств (РЭУ) от помех. Они предотвращают повреждение чувствительных элементов, обеспечивают электромагнитную совместимость и электромагнитную маскировку [1, 2]. Создание РЭУ с меньшей массой актуально в современных условиях, что стимулирует создание экранов из ПС благодаря их легкости и гибкости по сравнению со сплошными металлическими при сохранении эффективности экранирования (ЭЭ) [3, 4]. Кроме того, ПС дает прозрачность для видимости и хорошую циркуляцию воздуха для охлаждения защищаемых РЭУ. Вместе с тем проектирование экранов, обладающих требуемыми характеристиками при сохранении низкой себестоимости, требует затратной оптимизации в дорогих системах автоматизированного проектирования (САПР).

Одним из распространенных методов анализа электромагнитных устройств является метод моментов (МоМ) [5]. Он имеет простой алгоритм и низкие вычислительные затраты по сравнению с другими методами и дает приемлемые результаты. Совмещение МоМ с аппроксимацией поверхности структур с помощью ПС упрощает программную реализацию модели в МоМ [6]. ПС для экранов рассматривались ранее [7]. Между тем в них есть провода с малыми токами, которые мало влияют на характеристики, но увеличивают массу конструкции. Исключение этих проводов с помощью АОТС позволит дополнительно оптимизировать экран.

Один из простых экранов – плоская пластина [8, 9]. Поэтому проще вначале рассмотреть снижение массы экрана из ПС в форме квадрата в небольшом диапазоне частот (10–1000 МГц) [10]. АОТС ранее применялась для антенн [11] и рассеивателей из ПС [12], показав при этом высокую эффективность. Она использовалась и для разреженных экранов [13, 14], но рассматривалась только напряженность рассеянного электрического поля в ближней зоне. Цель данной работы – проанализировать напряженность электрического и магнитного полей рассеяния в ближней зоне в сумме с падающей волной для оценки ЭЭ разреженных экранов, полученных с помощью АОТС из квадратной ПС.

### АОТС для проводных экранов

Применение МоМ со ступенчатыми базисными функциями (СБФ) к ПС дает матрицу импедансов  $\mathbf{Z}$  и вектор напряжения  $\mathbf{v}$ . Решение системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ)  $\mathbf{Z}\mathbf{i} = \mathbf{v}$  дает вектор тока  $\mathbf{i}$ . После этого определяют модули элементов  $i_i$ , которые нормируют относительно их максимума. Далее элементы вектора нормированных модулей тока сравниваются с заданным ДУЭС. Провода, у которых они меньше ДУЭС, исключаются из ПС. Полученный разреженный экран состоит только из проводов с нормированными модулями тока, превышающими ДУЭС. Индексы оставшихся проводов сохраняются для вычисления других параметров.

Далее получают матрицу импедансов ( $\mathbf{Z}_S$ ) и вектор возбуждения ( $\mathbf{v}_S$ ) для разреженного экрана, чтобы определить его характеристики. Есть два подхода к этому. Первый включает непосредственный пересчет элементов  $\mathbf{Z}_S$  и  $\mathbf{v}_S$  по МоМ со СБФ для разреженной структуры. Он прост для реализации. Однако реальные проводные экраны состоят из множества проводов, так что их моделирование с использованием ПС требует значительного числа сегментов ( $N$ ). Даже после разреживания структуры их остается достаточно много. Следовательно, пересчет  $\mathbf{Z}_S$  и  $\mathbf{v}_S$  по этому подходу увеличивает вычислительные затраты при формировании  $\mathbf{Z}$  и  $\mathbf{v}$ .

Второй подход использует важное преимущество формирования исходной  $\mathbf{Z}$  по МоМ со СБФ: когда  $i$ -й сегмент удаляется из структуры, достаточно лишь удалить  $i$ -ю строку и  $i$ -й столбец  $\mathbf{Z}$ . Иными словами, используется независимость каждого сегмента от других, отличающая этот подход от случаев других базисных функций. Более того, он ускоряет вычисление не только  $\mathbf{Z}_S$ , но и  $\mathbf{v}_S$ : удалением  $i$ -го элемента (по индексу  $i$  удаленного сегмента) из  $\mathbf{v}$ . В результате вычислительные затраты для анализа разреженной структуры снижаются.

Наконец, решается СЛАУ  $\mathbf{Z}_S \mathbf{i}_S = \mathbf{v}_S$ . Из  $i_S$  находится напряженность рассеянного поля, а затем результирующего (через сумму с воздействующим). По отношению напряженностей воздействующего и результирующего полей оценивается ЭЭ.

АОТС отличается от остальных методов (генетические алгоритмы, топологическая оптимизация, методы машинного обучения и т.д.) простотой и тем, что строится на аппроксимации распределения тока, а не поисковых или статистических процедурах. Это делает её более подходящей для предстоящей задачи, как следует из [15, 16]. В этих же работах выявлены некоторые ограничения применимости АОТС в части влияния: частоты, на которой выполняется разреживание, на диапазон частот, в котором изменения характеристик минимальны; выбора длины ячейки ПС относительно длины волны; частотного диапазона; типов экранов (плоские/объемные). Между тем специфика применения АОТС именно к экранам (например, влияние углов падения волны, применимость к сложным формам экранов) пока не исследована.

#### Сравнение ЭЭ экранов из пластины и ПС

Экраны из пластины и ПС изображены на рис. 1. Они расположены в плоскости  $xOz$ , а ось  $y$  направлена от неё. Их центры совпадают с центром координат.

Обе структуры имеют размеры  $60 \times 60$  см. На них падает плоская волна с  $f = 10\text{--}1000$  МГц (с шагом 10 МГц) и амплитудой 1 В/м под углом  $\theta^{\text{пад}} = \varphi^{\text{пад}} = 90^\circ$ . Экран из ПС аппроксимирован на  $f = 500$  МГц. Данная частота рассматриваемого диапазона выбрана на основе рекомендации из [12], согласно которой разреженные структуры генерируются на основе распределения тока на центральной или самой низкой частоте рабочего диапазона.

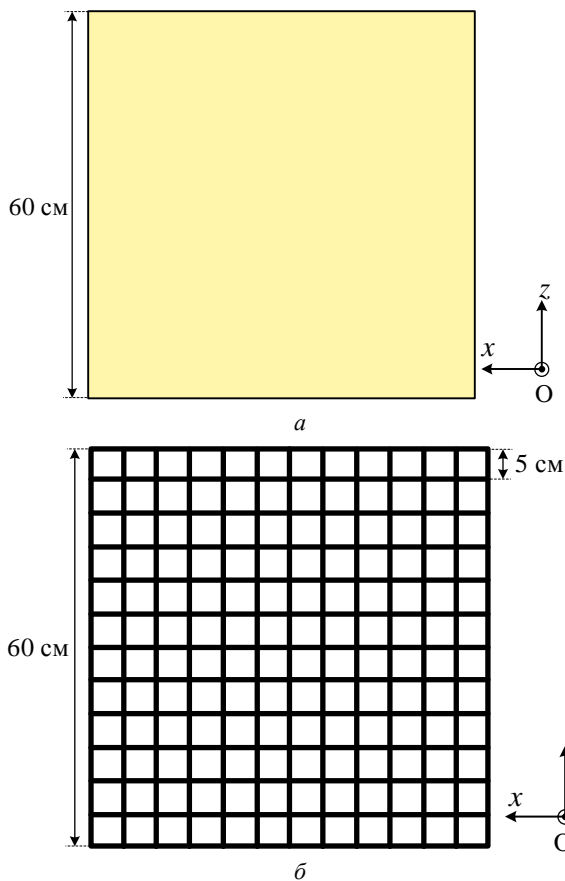


Рис. 1. Квадратные экраны из пластины (а) и ПС (б)

Такая частота (500 МГц) дает размер ячейки 5 см, равный  $\lambda/12$  ( $\lambda = 60$  см), что считается приемлемым для экрана из ПС [17, 18]. Экран из ПС имеет  $12 \times 12$  ячеек из 312 проводов радиусом 0,8 см по правилу равной площади. В системе FEKO\_2024 моделировались  $|E|$  и  $|H|$  в ближней зоне ПС и ЭЭ с помощью МоМ для всех структур. Ранее точность моделирования характеристик разреженных антенн в данной САПР подтверждалась их совпадением с экспериментальными [19].

Частотные зависимости ЭЭ в 30 см за пластиной и ПС представлены на рис. 2. ЭЭ варьирует от  $-0,37$  до 5,2 дБ на рис. 2, а и от 48,8 до 55,7 дБ на рис. 2, б. Максимумы ЭЭ по  $|E|$  и  $|H|$  отмечаются на  $f \approx 390$  МГц, а минимумы – на  $f \approx 160$  МГц. Это объяснимо тем, что при 160 МГц большие токи в проводниках создают значительную напряженность поля в ближней зоне, которая снижает ЭЭ, а при 390 МГц токи меньше и ЭЭ выше. Видно хорошее согласие ЭЭ пластины и ПС.

Далее приведены зависимости ЭЭ от расстояния (рис. 3, 4). Видно, что с удалением от центра экрана (с шагом 0,1 м) ЭЭ уменьшается до минимума при  $y = -1$  м на рис. 3, а, б и при  $x = 0,6$  м на рис. 4, а, б. Это обусловлено ростом результирующего поля за счет влияния воздействующего поля в указанных точках, так как чем больше результирующее поле, тем меньше ЭЭ. Здесь тоже хорошо совпадают ЭЭ ПС и пластины, особенно на рис. 3, а. Максимальные отклонения по  $|E|$  и  $|H|$  составляют около 1 дБ при  $y = -0,1$  м на рис. 3, б;  $x = 0$  на рис. 4, а и  $x = 0,2$  м на рис. 4, б.

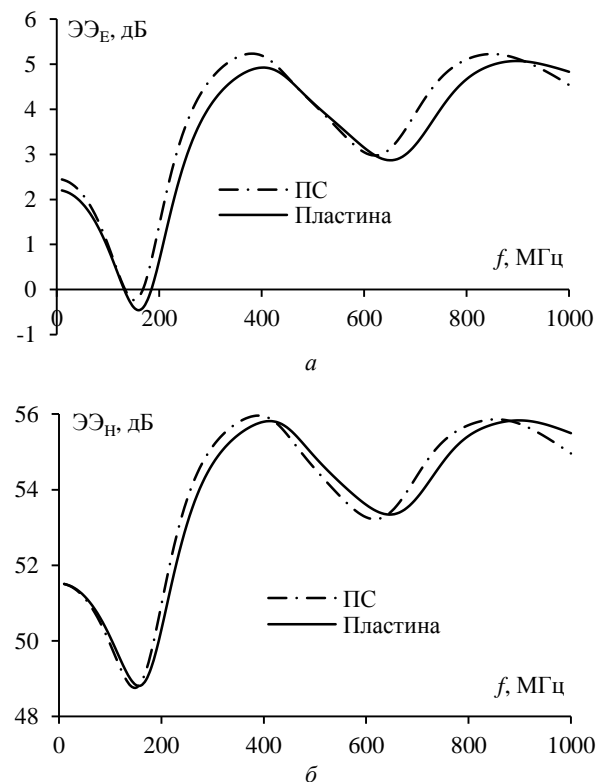


Рис. 2. Частотные зависимости ЭЭ по  $|E|$  (а) и  $|H|$  (б) в точке  $(0, -0,3, 0)$

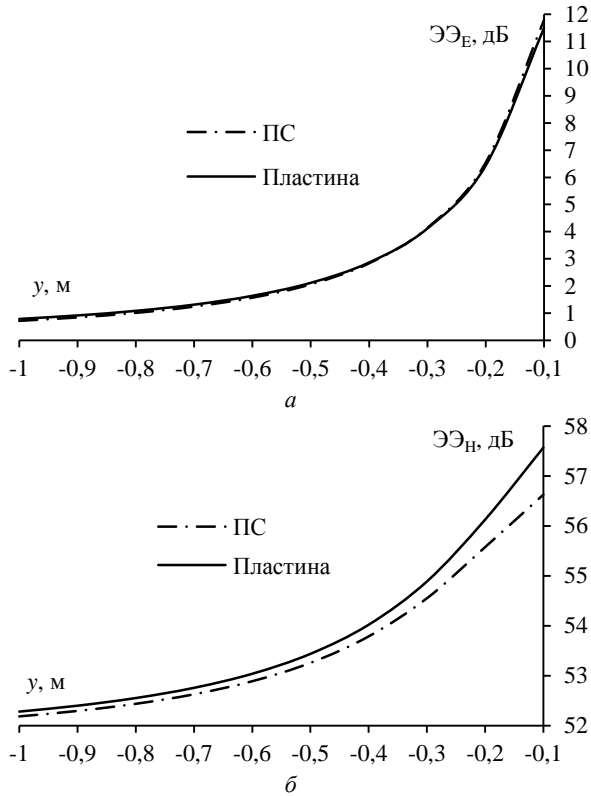


Рис. 3. ЭЭ по  $|E|$  (а) и  $|H|$  (б) в точках  $(0, y, 0)$

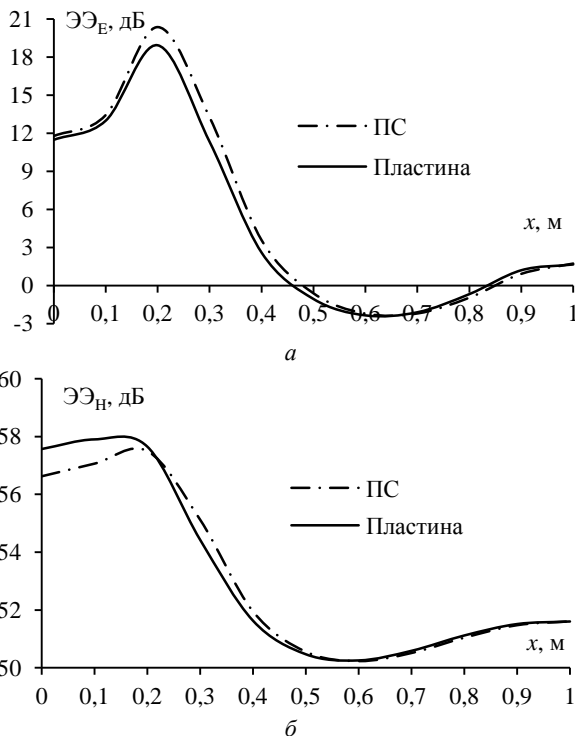


Рис. 4. ЭЭ по  $|E|$  (а) и  $|H|$  (б) в точках  $(x, -0.1, 0)$

В некоторых точках ЭЭ ПС лучше, чем у пластины. Полученные результаты подтверждают эффективность экрана из ПС, поскольку сплошные металлические пластины используются в качестве эталонных экранов в соответствии с [4].

### Разреженные экраны из ПС

Модели разреженных экранов из ПС после АОТС на  $f = 500$  МГц при ДУЭС = 2, 5, 20, 30% представлены на рис. 5. Удалены горизонтальные провода, тогда как вертикальные сохранены. Это объяснимо тем, что при возбуждении ПС падающей волной с  $\theta$  (вертикальной) поляризацией в вертикальных проводах возникает значительно больший ток, чем в горизонтальных. (Удаление горизонтальных проводов приводит к появлению свободных, не соединённых с основной структурой проводов и уменьшению структурной жёсткости. Этот недостаток устраним применением «соединяющей» АОТС, как в [19]. Кроме того, на практике можно использовать более жесткий металл или легкие поддерживающие диэлектрические структуры). Уменьшения массы и вычислительных затрат для этих моделей приведены в табл. 1.

На рис. 6 показаны частотные зависимости  $|E|$  и  $|H|$  в ближней зоне.  $|E|$  меняется от 0,55 до 1,26 В/м, а  $|H|$  – от 0,0015 до 0,0034 А/м. Пик тока достигается при  $f \approx 170$  МГц на вертикальных проводах по краям ПС, а к центру ток постепенно уменьшается. При ДУЭС = 2, 5% результаты разреженных и исходного (0%) экранов из ПС хорошо совпадают почти во всем диапазоне частот. Однако при ДУЭС = 20% ближнее поле разреженного экрана заметно отклоняется, а ДУЭС = 30% – еще больше. Это объяснимо тем, что из структуры удалены многие провода с существенными токами.

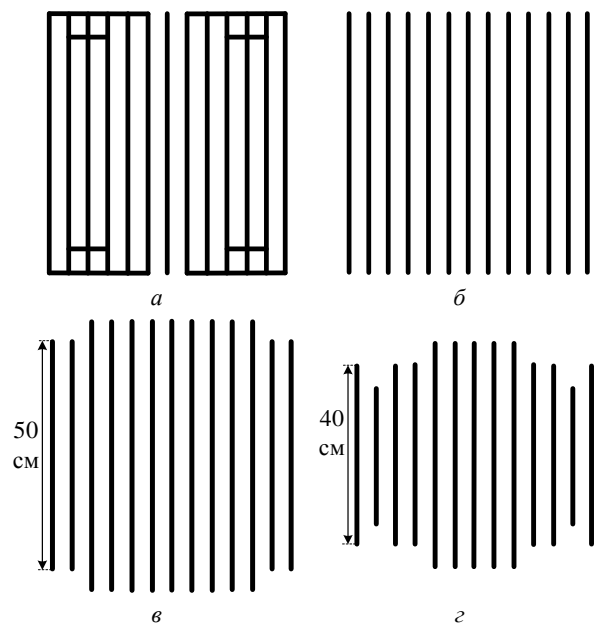


Рис. 5. Экран при ДУЭС=2 (а), 5 (б), 20 (в), 30 (г) %

Таблица 1

Число сегментов и уменьшения массы, памяти и времени для экрана после АОТС с разными ДУЭС				
ДУЭС, %	N	Масса, раз	Память, раз	Время, раз
2	184	1,7	2,9	4,9
5	156	2	4	8
20	148	2,1	4,4	9,2
30	110	2,8	7,8	21,9

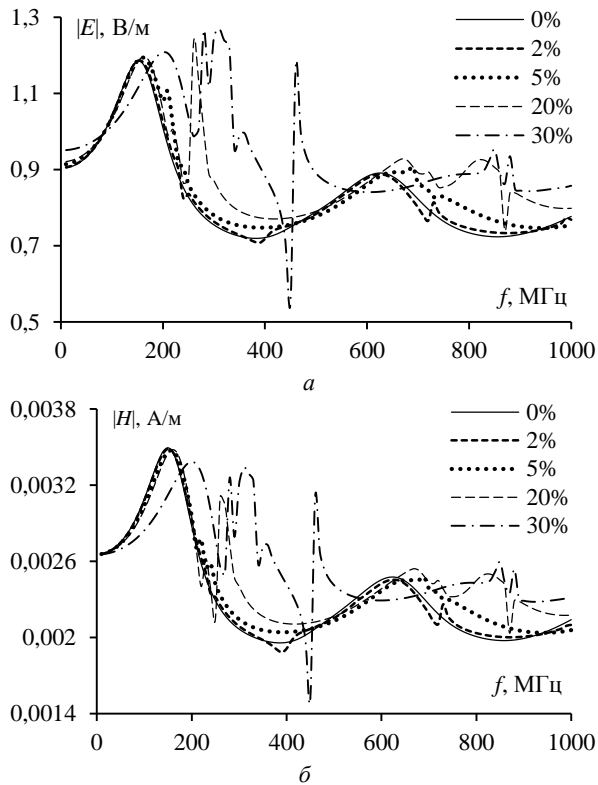


Рис. 6. Частотные зависимости  $|E|$  (а) и  $|H|$  (б) экранов с разными ДУЭС в точке  $(0, -0,5, 0)$

Вместе с тем масса и площадь поверхности конструкции при этом уменьшаются сильнее, чем при ДУЭС = 2, 5%. При этом есть резонансы ( $f \approx 280, 310, 450, 460, 840, 870, 880$  МГц). Они могут быть из-за получения разреженной структуры по распределению тока только на одной частоте (500 МГц).

Между тем распределение тока зависит от частоты. Провода с малым током на 500 МГц, удаленные по АОТС, на других частотах могут иметь токи больше. Их исключение меняет напряженность рассеянного поля. При его суперпозиции с полем падающей волны характеристики экранирования разреженной структуры меняются по сравнению с исходной. Другой причиной возрастания напряженности поля при удалении проводов из экрана может быть то, что токи в них были в противофазе токам в оставшихся проводах. Удаление некоторых вертикальных проводов по краям приводит также к сильному снижению поля.

Частотные зависимости ЭЭ показаны на рис. 7. Для 210–1000 МГц ЭЭ выше, а для 10–190 МГц ниже из-за сдвига по частоте.

Зависимости  $|E|$  и  $|H|$  от расстояния показаны на рис. 8, 9. Они совпадают не только при ДУЭС = 2, 5%, но и при ДУЭС = 20%, а при ДУЭС = 30% сильно отклоняются. Для  $(x, -0,1, 0)$   $|E|$  и  $|H|$  при ДУЭС = 2, 5, 20% ведут себя аналогично, как для  $(0, y, 0)$ , но отклонения при ДУЭС = 30% меньше.

Результирующие ЭЭ по  $|E|$  и  $|H|$  представлены на рис. 10, 11. Отклонения при ДУЭС = 2, 5, 20% малы, а при 30% значительны. Среднее и максимальное отклонения ЭЭ разреженных экранов от ЭЭ исходного представлены в табл. 2.

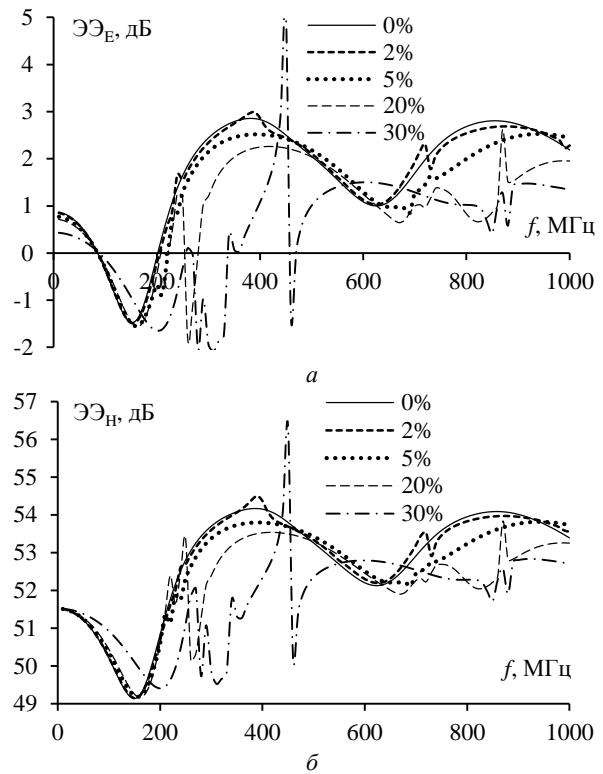


Рис. 7. Частотные зависимости ЭЭ по  $|E|$  (а) и  $|H|$  (б) экранов с разными ДУЭС в точке  $(0, -0,5, 0)$

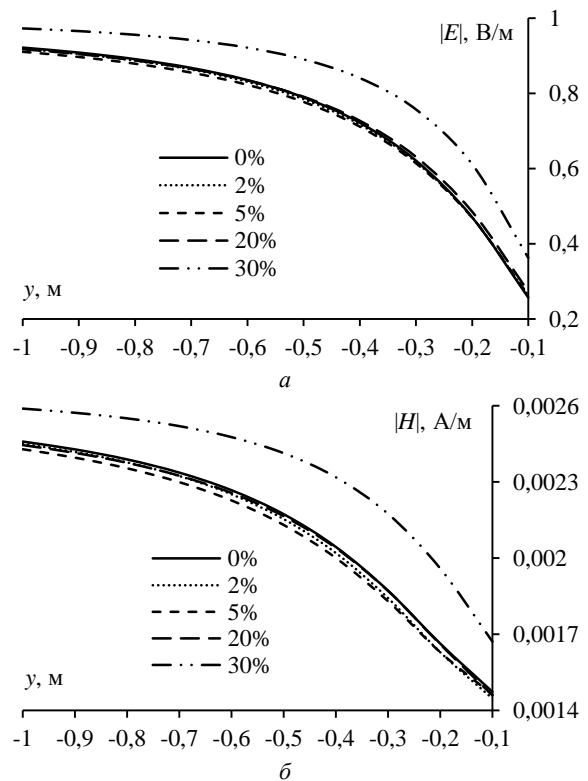


Рис. 8. Зависимости  $|E|$  (а) и  $|H|$  (б) экранов с разными ДУЭС от расстояния в точках  $(0, y, 0)$

АОТС работает даже при больших диапазонах частот, но главное – выбирать ДУЭС исходя из конкретных требований. При этом надо учитывать как желаемые ЭЭ, так и уменьшение массы и площади экрана.

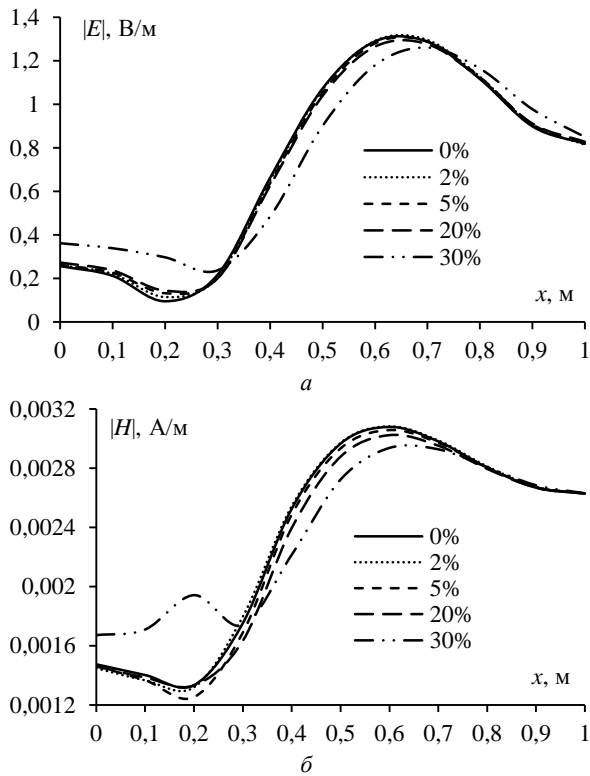


Рис. 9. Зависимости  $|E|$  (а) и  $|H|$  (б) экранов с разными ДУЭС от расстояния в точках  $(x, -0,1, 0)$

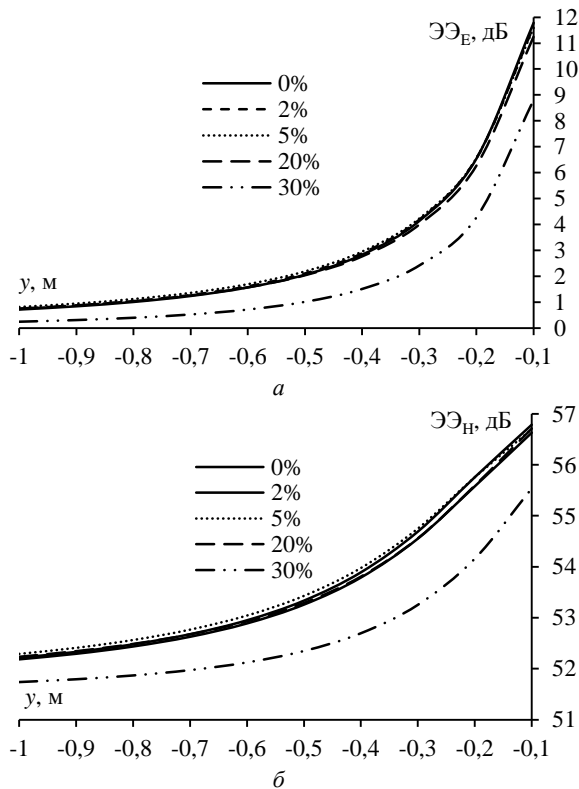


Рис. 10. Зависимости ЭЭ по  $|E|$  (а) и  $|H|$  (б) экранов с разными ДУЭС от расстояния в точках  $(0, y, 0)$

Большой ДУЭС уменьшит массу и площадь экрана, но может ухудшать ЭЭ. При низком ДУЭС характеристики разреженных экранов будут, как у исходного, но уменьшения массы и площади будут малы. Следовательно, ДУЭС следует выбирать в

зависимости от конкретных применений. Для нашего примера ДУЭС = 5% дает уменьшение массы в 2 раза при сохранении характеристик исходного экрана из ПС. Между тем могут быть приемлемы отклонения и при оптимальном ДУЭС = 20% с ростом уменьшения массы до 2,1 раза. При этом показательно укорочение вертикальных проводов в отличие от естественного удаления горизонтальных.

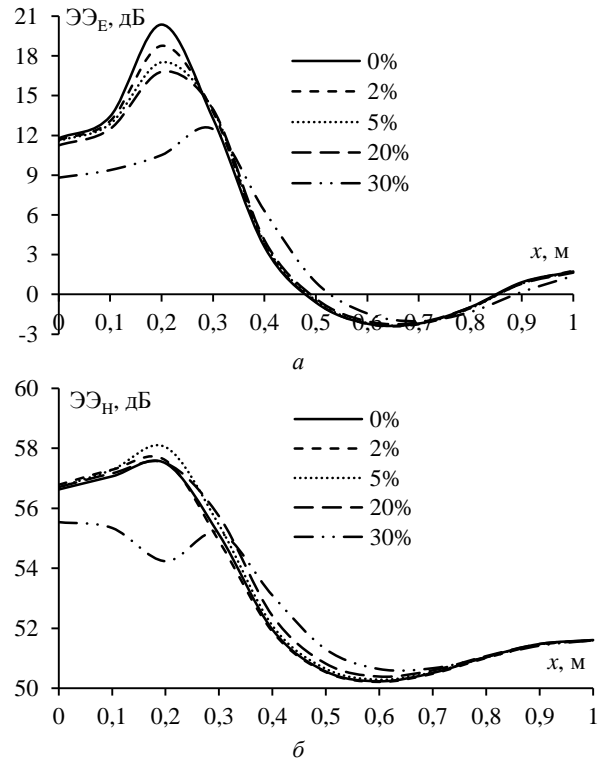


Рис. 11. Зависимости ЭЭ по  $|E|$  (а) и  $|H|$  (б) экранов с разными ДУЭС от расстояния в точках  $(x, -0,1, 0)$

Таблица 2

**Отклонения ЭЭ разреженных экранов от ЭЭ исходного**

Среднее отклонение (дБ)						
ДУЭС, %	$f = 10-000$ МГц					
	$(0, y, 0)$		$(x, -0,1, 0)$			
	$\text{ЭЭ}_E$	$\text{ЭЭ}_H$	$\text{ЭЭ}_E$	$\text{ЭЭ}_H$	$\text{ЭЭ}_E$	$\text{ЭЭ}_H$
2	0,02	0,0005	0,02	0,08	0,1	0,01
5	0,2	0,16	0,07	0,1	0,2	0,1
20	0,1	0,5	0,08	0,04	0,3	0,16
30	1	0,9	1	0,8	1	0,3
Максимальное отклонение (дБ)						
ДУЭС, %	$f = 10-000$ МГц					
	$(0, y, 0)$		$(x, -0,1, 0)$			
	$\text{ЭЭ}_E$	$\text{ЭЭ}_H$	$\text{ЭЭ}_E$	$\text{ЭЭ}_H$	$\text{ЭЭ}_E$	$\text{ЭЭ}_H$
2	0,3	0,38	0,057	0,18	0,4	0,2
5	0,25	0,35	0,1	0,19	0,6	0,5
20	0,18	0,6	0,5	0,08	0,7	0,6
30	2,6	2,5	2,9	1	2,7	1

**Заключение**

Впервые АОТС применена к экранам: с оценкой ЭЭ на примере квадратной ПС. Показано, что АОТС работоспособна для создания разреженных экранов, что подтверждает её применимость для улучшения их характеристик. Масса и площадь исходного экрана из ПС уменьшены до 2,1 раза при приемлемом отклонении характеристик. Это открывает перспективы создания реальных разреженных экранов.

Далее планируется рассмотреть более сложные формы экрана, поскольку применение к ним АОТС может затрудниться из-за появления открытых мест в экране, в частности, при изменении направления падающей волны. Полезно и сравнение с традиционными методами оптимизации экранов. Кроме того, важно детальнее исследовать изменения частотных характеристик с ростом ДУЭС, а также неожиданные изменения в некоторых диапазонах параметров, выявленные в ряде зависимостей. Эти изменения могут быть связаны с фазами токов в удаляемых проводниках сетки, из-за чего результирующее поле может не уменьшаться, как ожидается, а возрасти.

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

#### Литература

- Vidaković M. Hardware-based methods for electronic device protection against invasive and non-invasive attacks / M. Vidaković, D. Vinko // *Electronics*. – 2023. – Vol. 12. – P. 4507.
- MIL-STD-461G. Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment. – Washington, D.C.: U.S. Department of Defense, 2015. – 340 p.
- 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.
- 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. – P. 52.
- Gibson W.C. The method of moments in electromagnetics. – 3rd Ed. – New York, 2021. – P. 510.
- Dang T.P. Square trihedral corner reflector analysis using wire-grid and MoM with pulse basis functions / T.P. Dang, A.F.A. Hasan, T.R. Gazizov // 2024 Antennas Design and Measurement International Conference (ADMInC). – St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», 2024. – P. 12–15.
- Magnetic field shielding behavior of mesh wire in low frequencies / I.F. Elshami, M.Z.M. Jenu, K. Elwrfalli, A.I. Elgayar, N. Elmangosh, F.H. Yousuf // 2022 IEEE 2nd International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (MI-STA). – Sabratha city, Libya: IEEE, 2022. – P. 411–415.
- 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). – Ankara, Turkey: IEEE, 2017. – P. 1–3.
- Моделирование эффективности экранирования металлической пластиной для бортовой аппаратуры космического аппарата / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов, А.С. Дементьев // Доклады ТУСУР. – 2011. – Т. 24, № 2. – С. 133–136.
- ASTM D4935-18. Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials. – West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018. – P. 11.
- Nguyen M.T. Generating sparse wire-grid antennas using maximum current-based optimal current grid approximation / M.T. Nguyen, A.F.A. Hasan, T.R. Gazizov // *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*. – 2025. – 14 p. DOI: 10.1109/OJAP.2025.3543559.
- 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. – P. 171.
- Лукас К.С. Исследование электрического поля в ближней зоне разреженных проводных экранов в разных САПР / К.С. Лукас, Т.Ф. Данг // VII Междунар. науч. конф. ведущих научных школ в области радиолокации, радионавигации и радиоэлектронных систем передачи информации «Шарыгинские чтения», посвященная памяти профессора Г.С. Шарыгина, 15–17 октября 2025 г., г. Томск: матер. конф. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2025. – С. 166–169.
- Лукас К.С. Моделирование влияния разреживания прямоугольного экрана из проводной сетки на электрическое поле в ближней зоне // 31-я Междунар. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (Сибресурс-31–2025)». – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2025. – С. 79–84.
- Нгуен М.Т. Антенны из разреженной проводной сетки: монография / М.Т. Нгуен, А.Ф. Алхадж Хасан, Т.Р. Газизов. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2025. – 324 с.
- Газизов Т.Т. Синтез оптимальных проводных антенн: моногр. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2013. – 120 с.
- Ott H.W. *Electromagnetic Compatibility Engineering*. Hoboken. – NJ: John Wiley & Sons, 2009. – 872 p.
- Electromagnetic shielding behavior of different metallic wire-meshes and thin metal plate / F. Bulut, H.S. Efendioğlu, V. Solak, M. Yabuloğlu and H. Özer // 2017 IV International Electromagnetic Compatibility Conference (EMC Turkiye). – Ankara, Turkey: IEEE, 2017. – P. 35–38.
- Нгуен Мань Туан. Антенны, моделируемые оптимальной токовой сеткой: дис. ... канд. техн. наук. – Томск: ТУСУР, 2025. – 255 с.

#### Лукас Канга Самуел

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: 0009-0009-7809-9745  
Тел.: +7-999-841-48-50  
Эл. почта: lukas.k.2214-2024@e.tusur.ru

#### Данг Туан Фьонг

Канд. техн. наук, м.н.с. каф. ТУ ТУСУР Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: 0009-0002-9646-6907  
Тел.: +7-913-101-23-47  
Эл. почта: dang.p.2213-2023@e.tusur.ru

#### Газизов Тальгат Рашитович

Д-р техн. наук, проф., зав. каф. ТУ ТУСУР Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: 0000-0002-1192-4853  
Тел.: +7-913-826-07-24  
Эл. почта: talgat.r.gazizov@tusur.ru

Поступила в редакцию: 22.01.2026.

Принята к публикации: 06.03.2026.

Lucas C.S., Dang T.P., Gazizov T.R.

#### Sparse electromagnetic shields obtained from wire grid

Reducing the mass and area of electromagnetic shielding is important for a range of radio electronic devices. To achieve this goal, an optimal current grid approximation (OCGA) for

creating sparse shields is presented for the first time. The sparse shields were obtained from a square wire grid (WG), using OCGA with grid element elimination tolerances (GEET) of 2, 5, 20, and 30%. Their characteristics were analyzed in comparison with the original WG shield. Frequency dependencies in the 10–1000 MHz range, as well as distance-dependent variations for the electric and magnetic field strengths and shielding effectiveness are presented. The optimal GEET of 20% was selected, resulting in a 2.1-fold mass reduction and acceptable performance tolerances.

**Keywords:** optimal current grid approximation, method of moments, mass reduction, wire grid, sparse shield, electromagnetic compatibility, shielding effectiveness.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2025-28-4-13-19

#### References

1. Vidaković M., Vinko D. Hardware-based methods for electronic device protection against invasive and non-invasive attacks. *Electronics*, 2023, vol. 12, pp. 4507.
2. MIL-STD-461G. Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment. Washington, D.C., U.S. Department of Defense, 2015, 340 p.
3. Ferrone K., Willis C., Guan F., Ma J., Peterson L., Kry S. A review of magnetic shielding technology for space radiation. *Radiation*, 2023, vol. 3, pp. 46–57.
4. 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.
5. Gibson W.C. The method of moments in electromagnetics. 3rd Ed. New York, 2021, 510 p.
6. Dang T.P., Hasan A.F.A., Gazizov T.R. Square trihedral corner reflector analysis using wire-grid and MoM with pulse basis functions. 2024 Antennas Design and Measurement International Conference (ADMInC). St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», 2024, pp. 12–15.
7. Elshami I.F., Jenu M.Z.M., Elwrfalli K., Elgayar A.I., Elmagosh N., Yousuf F.H. Magnetic field shielding behavior of mesh wire in low frequencies. 2022 IEEE 2nd International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (MI-STA). Sabratha city, Libya, IEEE, 2022, pp. 411–415.
8. Bulut F., Efendioğlu H.S., Solak V., Yabuloğlu M., Özer H. Electromagnetic shielding behavior of different metallic wire-meshes and thin metal plate. 2017 IV International Electromagnetic Compatibility Conference (EMC Turkiye). Ankara, Turkey, IEEE, 2017, pp. 1–3.
9. Komnatov M.E., Gazizov T.R., Dementyev A.S. [Simulation of metal plate shielding effectiveness for airborne equipment of space vehicle]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 2011, vol. 24, no. 2, pp. 133–136 (in Russ.).
10. ASTM D4935-18. Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials. West Conshohocken, PA, ASTM International, 2018, 11 p.
11. Nguyen M.T., Hasan A.F.A., Gazizov T.R. Generating sparse wire-grid antennas using maximum current-based optimal current grid approximation. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, 2025, 14 p. DOI: 10.1109/OJAP.2025.3543559.
12. Dang T.P., Nguyen M.T., Alhaj Hasan A.F., Gazizov T.R. Generation of Sparse Antennas and Scatterers Based on Optimal Current Grid Approximation. *Algorithms*, 2025, vol. 18, no. 3, pp. 171.
13. Lucas K.S., Dang T.F. *Issledovanie elektricheskogo polya v blizhney zone razrezhennykh provodnykh ekranov v raznykh SAPR* [Study of the electric field in the near zone of sparse wire

shields in different CAD systems]. *VII mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya vedushchih nauchnykh shkol v oblasti radiolokatsii, radionavigatsii i radio-elektronnykh sistem peredachi informatsii «Sharyginskije chteniya», posvyashchennaya pamyati professora G.S. Sharygina. Materialy konferentsii* [Proceedings of VII International scientific conference of leading scientific schools in the field of radar, radio navigation and radio electronic information transmission systems «Sharygin readings» dedicated to the memory of professor G.S. Sharygin, October 15–17, 2025]. Tomsk, TUSUR Publ., pp. 166–169 (in Russ.).

14. Lucas K.S. *Modelirovanie vliyaniya razrezhivaniya pryamougol'nogo ekrana iz provodnoi setki na elektricheskoe pole v blizhnei zone* [Simulation the influence of the sparse of a rectangular wire grid on the electric field in the near zone]. *31-ya mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Prirodnye i intellektual'nye resursy Sibiri (Sibresurs-31–2025)»* [Proceedings of 31 International scientific and practical conference on Natural and intellectual resources of Siberia (Sibresurs-31–2025)]. Tomsk, TUSUR Publ., 2025, pp. 79–84 (in Russ.).

15. Nguen M.T., Alhadzh Hasan A.F., Gazizov T.R. *Antenny iz razrezhennoi provodnoi setki: monografiya* [Sparse Wire Mesh Antennas: a monograph]. Tomsk, TUSUR Publ., 2025, 324 p.

16. Gazizov T.T. *Sintez optimal'nykh provodnykh anten: monografiya* [Synthesis of Optimal Wire Antennas: a monograph]. Tomsk, TUSUR Publ., 2013, 120 p.

17. Ott H.W. *Electromagnetic Compatibility Engineering*. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2009, 872 p.

18. Bulut F., Efendioğlu H.S., Solak V., Yabuloğlu M., Özer H. Electromagnetic shielding behavior of different metallic wire-meshes and thin metal plate. 2017 IV International Electromagnetic Compatibility Conference (EMC Turkiye), Ankara, Turkey, IEEE, 2017, pp. 35–38.

19. Nguyen M.T. *Antenny, modeliruemye optimal'noj tokovoi setkoi* [Antennas Modeled by an Optimal Current Grid], PhD Thesis. Tomsk, TUSUR, 2025, 255 p.

#### Kanga S. Lucas

Postgraduate student, Department of Television and Control (TC), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0009-0009-7809-9745  
Phone: +7-999-841-48-50  
Email: lukas.k.2214-2024@e.tusur.ru

#### Tuan Ph. Dang

Candidate of Engineering Sciences,  
Junior Researcher, Department of TC, TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0009-0002-9646-6907  
Phone: +7-913-101-23-47  
Email: dang.p.2213-2023@e.tusur.ru

#### Talgat R. Gazizov

Doctor of Engineering, Professor,  
Head of the Department of TC, TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0000-0002-1192-4853  
Phone: +7-913-826-07-24  
Email: talgat.r.gazizov@tusur.ru

Received: 22.01.2026.

Accepted: 06.03.2026.