УДК: 621.396

РАЗРЕЖЕННЫЕ АНТЕННЫ, РАССЕИВАТЕЛИ И ЭКРАНЫ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ И КОМПЛЕКСОВ МОНИТОРИНГА

Т.Р. Газизов, д.т.н, профессор, Т.Ф. Данг, к.т.н., С.Б. Чинь, К.С. Лукас
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск

Представлены результаты численного моделирования и экспериментальных исследований, полученных при применении аппроксимации оптимальной токовой сеткой (АОТС) для снижения массы различных устройств из проводной сетки (ПС), которые могут использоваться в системах радиотехнического мониторинга. На основе результатов оценены характеристики разреженных структур следующих типов: рупорная антенна, параболическая антенна с круговой поляризацией, трехгранные уголковые отражатели и электромагнитный экран. Установлено, что исключение проводов ПС с малыми модулями тока снижает массу конструкции в 1,41–2,1 раза, а также ветровую нагрузку. При этом основные радиотехнические характеристики остаются в допустимых пределах. АОТС открывает значительные перспективы для модернизации современных комплексов радиотехнического оборудования.

Ключевые слова: аппроксимация оптимальной токовой сеткой, разреженная проводная сетка, антенна, рассеиватель, экран

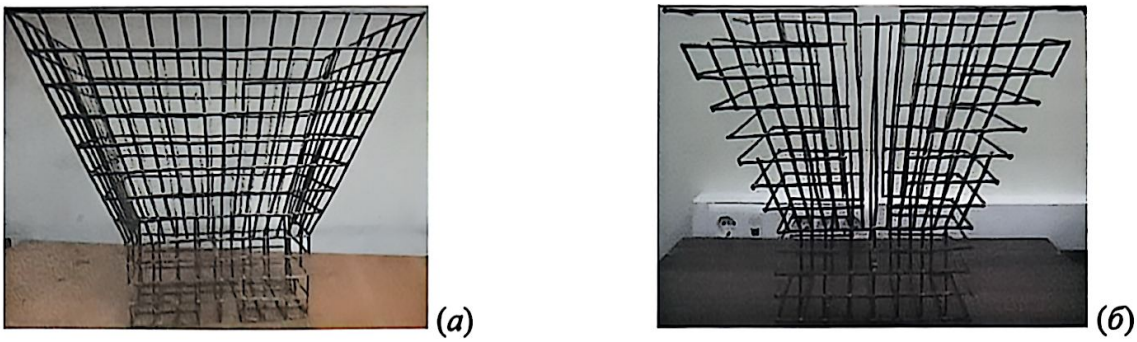
Современные тенденции развития комплексов радиотехнического мониторинга предъявляют к радиоэлектронным устройствам всё более высокие требования в части компактности, мобильности, оптимизации массы и способности к надёжной эксплуатации в жёстких климатических условиях [1]. Для данных средств, в особенности антенн, отражателей и электромагнитных экранов, применение традиционных сплошных металлических поверхностей, как правило, увеличивает механическую и ветровую нагрузки [1, 2]. Переход от сплошных поверхностей к проводным сеткам (ПС) представляет собой эффективное техническое решение для устранения указанных недостатков [3]. Вместе с тем в традиционных ПС есть много избыточных проводных сегментов, вносящих незначительный вклад в характеристики. С целью радикальной оптимизации структуры ПС в работах [4–6] предложена аппроксимация оптимальной токовой сеткой (АОТС), позволяющая исключить провода с малыми модулями тока, слабо влияющие на характеристики излучения, рассеяния или экранирования. В этой работе обобщены результаты численного моделирования и экспериментальных исследований, полученных после применения АОТС к синтезу разреженных ПС следующих типов: рупорная антенна [4], параболическая антенна с круговой поляризацией, трёхгранный угловой отражатель [5] и электромагнитный экран из квадратной ПС [6].

Рупорные антенны из проводной сетки

Экспериментальная верификация АОТС применительно к антенным структурам с линейной поляризацией выполнена на примере рупорной антенны УВЧ-диапазона в качестве альтернативы традиционной сплошной металлической конструкции [4]. Рассмотрена пирамидальная рупорная антенна УВЧ-диапазона с центральной частотой 0,915 ГГц. Исходная структура образована 1062 взаимосвязанными медными проводниками (рис. 1*а*). В исследовании применен метод моментов для определения распределения токов по проводам, после чего удалены сегменты с нормированным модулем тока ниже допуска удаления элементов сетки (ДУЭС=40%), что позволило получить разреженную антенну (рис. 1*б*). Результаты показали, что масса разреженной антенны в 1,41 раза меньше,

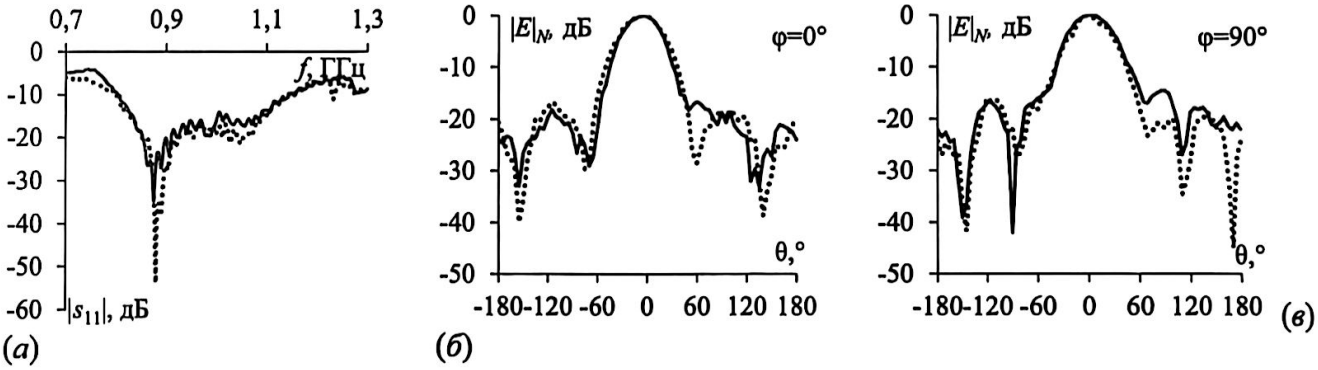
чем исходной и в 9,23 раза – чем сплошной металлической конструкции. Кроме того, благодаря свободному прохождению воздушных потоков сквозь ячейки сетки ветровая нагрузка на антенну существенно ниже: в 1,45 раза, чем у исходной ПС и в 7,45 раза – чем сплошной антенны.

Измеренные в безэховой камере радиотехнические характеристики рупорной антенны из исходной и разреженной ПС представлены на рис. 2. Они показали, что коэффициент отражения $|s_{11}|$ обеих ПС обеспечивает полосу пропускания 0,35 ГГц по уровню –10 дБ. От 0,87 до 1,07 ГГц разреженная структура демонстрирует даже лучшее согласование импеданса, чем исходная. Среднее отклонение $|s_{11}|$ составляет 1,96 дБ. Главные лепестки диаграммы направленности (ДН) обеих антенны практически не различаются. Расхождения нормированной напряжённости электрического поля $|E|_N$ в плоскостях E и H проявляются преимущественно в боковых лепестках из-за незамкнутых участков сетки после удаления ряда проводов.



(*а*) (*б*)

Рисунок 1 - Рупорные антенны из полной (*а*) и разреженной (*б*) ПС



(*а*) (*б*) (*в*)

Рисунок 2 - Измеренные $|s_{11}|$ (*а*) и ДН в плоскостях E (*б*) и H (*в*) на 0,915 ГГц для антенн из исходной (—) и разреженной (···) ПС

Параболическая антенна из ПС с круговой поляризацией

АОТС применена к антенне с круговой поляризацией (КП), использование которых неуклонно расширяется как в гражданской, так и в военной сферах. Объектом исследования служит параболическая антенна из ПС, функционирующая в диапазоне 3,2–5 ГГц и возбуждаемая осевым спиральным излучателем (рис. 3*а*). Для сохранения характеристик круговой поляризации после разрежения сетки (при ДУЭС=30, 35, 40% (рис. 3*б*, *в*, *г*))

применялось восстановление геометрической симметрии (четырёхкратной симметрии вращения вокруг оси Z).

Результаты вычисления основных характеристик антенны представлены на рис. 4. $|s_{11}|$ всех разреженных моделей демонстрируют высокую степень совпадения с исходной ПС, устойчиво сохраняя значения ниже порога −10 дБ (от −25,66 дБ до −28,23 дБ на 3,4 ГГц), что обеспечивает оптимальное согласование импеданса. Несмотря на незначительное снижение максимального коэффициента усиления ($КУ^{макс}$) из-за уменьшения раскрыва при удалении сегментов, осевые отношения (ОО) разреженных антенн точно воспроизводят характеристику исходной во всей полосе частот и удовлетворяют критерию ОО<3 дБ (на резонансной частоте ОО≈0,15 дБ). Примечательно, что данный подход даёт значительное снижение массы в 1,48 раза при ДУЭС=40%. Благодаря выраженным преимуществам разреженная ПС применима в комплексах с жёсткими ограничениями по массе: – авиационных и космических.

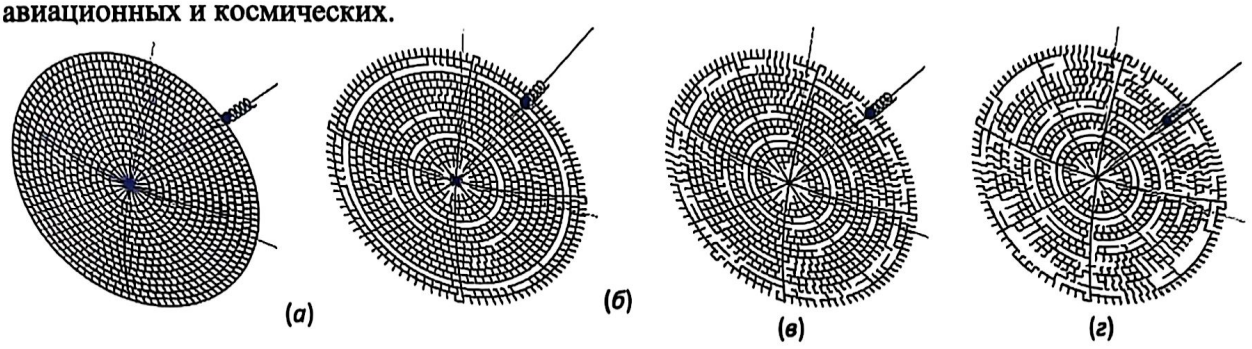


Рисунок 3 - Антенны из исходной (*а*) и разреженных ПС после АОТС с ДУЭС=30 (*б*), 35 (*в*), 40 (*г*) %

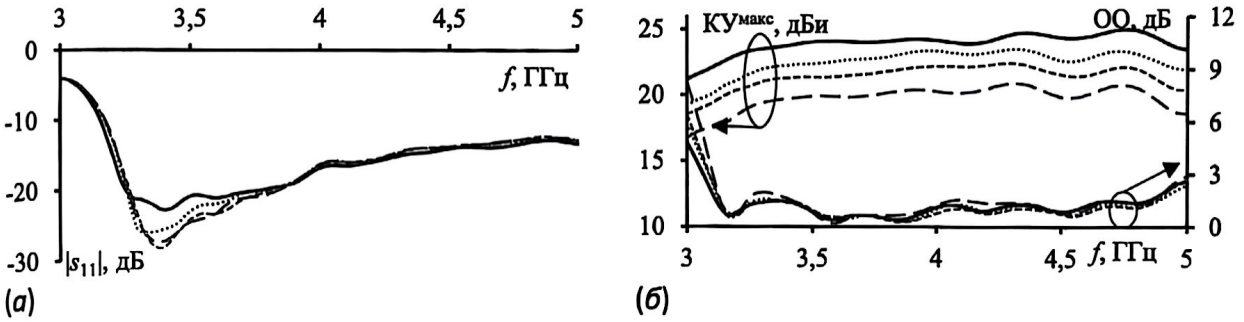


Рисунок 4 - Вычисленные частотные зависимости $|s_{11}|$ (*а*) и ОО с $КУ^{макс}$ (*б*) для исходной и разреженных антенн

Трёхгранные уголковые отражатели из ПС

АОТС применена для синтеза разреженных трёхгранных уголковых отражателей (ТУО) из ПС как квадратного (КТУО), так и треугольного (ТТУО) [5]. Основная задача состоит в минимизации массы и расхода материала при сохранении электромагнитных рассеивающих характеристик. В отличие от антенн, возбуждаемых в фиксированном сегменте, отражатель возбуждается плоской волной, падающей с разных направлений. В связи с этим АОТС реализуется так: для каждого направления падения волны из структуры исключаются сегменты с нормированным модулем тока ниже ДУЭС; затем для каждого сегмента подсчитывается число его появлений во всех промежуточных разреженных

структурах; сегменты, появляющиеся реже заданного порога, удаляются из итоговой разреженной конструкции.

Макеты изготовлены из сварной сетки с размером ячейки 7×7 мм, при этом провода удалялись вручную в соответствии с результатами моделирования (рис. 5). Результаты измерений моностатической эффективной площади рассеяния (МЭПР) в безэховой камере в диапазоне 5 – 8 ГГц демонстрируют высокую степень совпадения характеристик разреженной и исходной сеточных структур (рис. 6, 7), особенно в области главного лепестка рассеянного поля. Применение АОТС снизило массу обоих вариантов ТУО в 1,51 раза по сравнению с исходной ПС. В отдельных направлениях МЭПР разреженной ПС даже больше МЭПР исходной сетки (например, на 6,5 дБм² при θ=10–15° в плоскости φ=45°). Несмотря на расхождения в верхней части диапазона 6,5–8 ГГц и лёгкий изгиб проводников (0,3–0,4 см), обусловленный погрешностями ручного изготовления тонких проводов, отклонения от исходной ПС остаются допустимыми. Исследование подтвердило, что разреженные отражатели могут полноценно заменять традиционные сплошные металлические ТУО в приложениях с жёсткими ограничениями по массе – при радиолокационной калибровке, а также в качестве морских или воздушных радиолокационных имитаторов.

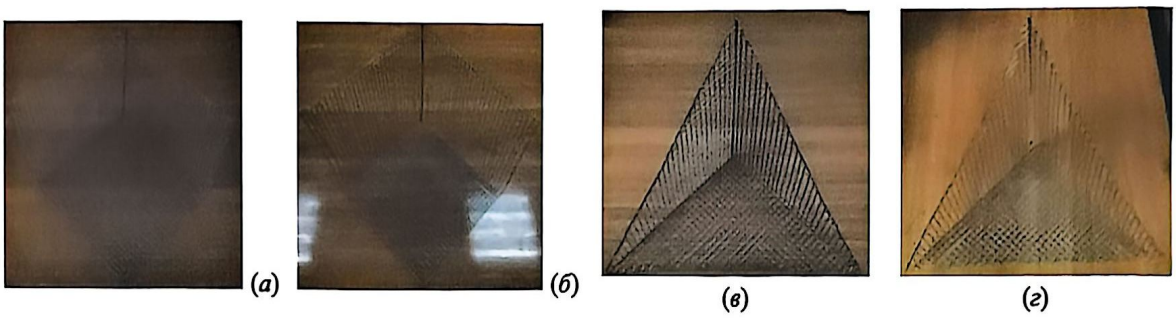


Рисунок 5 - КТУО и ТТУО из полной (*а, в*) и разреженной (*б, г*) ПС

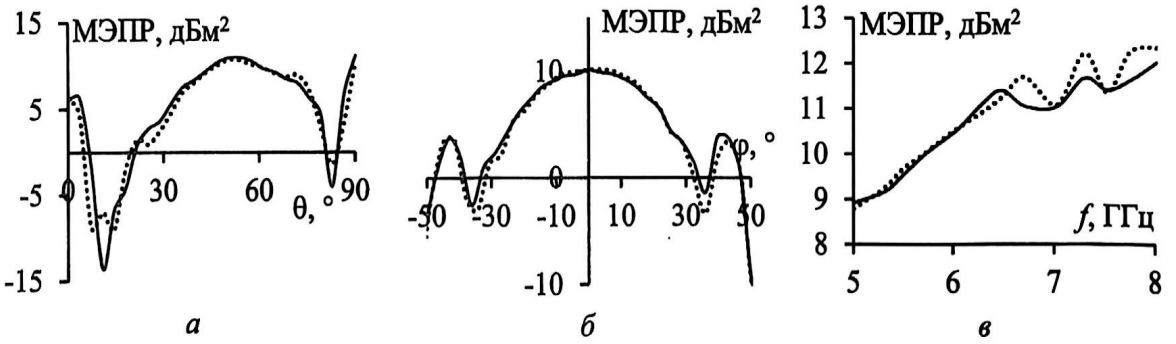


Рисунок 6 - МЭПР для КТУО из исходной (—) и разреженных (···) ПС в плоскостях φ=45° (*а*) и θ=60° (*б*) и частотные зависимости МЭПР при $\varphi^{пад}$=45° и $\theta^{пад}$=60°(*в*)

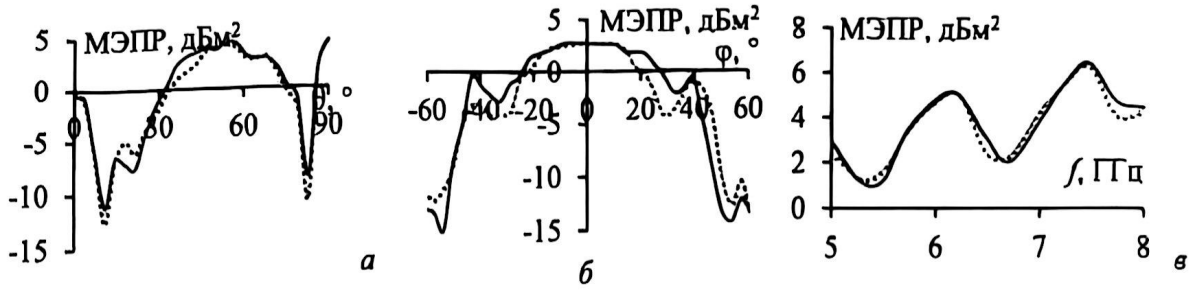


Рисунок 7 - МЭПР для ТТУО из исходной (—) и разреженных (···) ПС в плоскостях φ=45° (*а*) и θ=55° (*б*) и частотные зависимости МЭПР при $\varphi^{пад}$=45° и $\theta^{пад}$=55°(*в*)

Экран из квадратной ПС

В работе [6] АОТС применен для снижения массы и площади поверхности электромагнитного экрана из квадратной ПС размером 60×60 см из 312 проводов в диапазоне 10–1000 МГц при воздействии вертикально поляризованной падающей плоской волны. Детально исследованы и проанализированы варианты разрежения при ДУЭС=2, 5% (рис. 8). Вычисленные частотные зависимости эффективности экранирования (ЭЭ) разреженных и исходной ПС практически полностью совпадают во всём диапазоне частот (рис. 9). При этом значение ДУЭС=5% оптимально и обеспечило двукратное снижение массы экрана. Данное решение открывает реальные перспективы для существенного снижения массы и экономии материала при создании более сложных экранов.

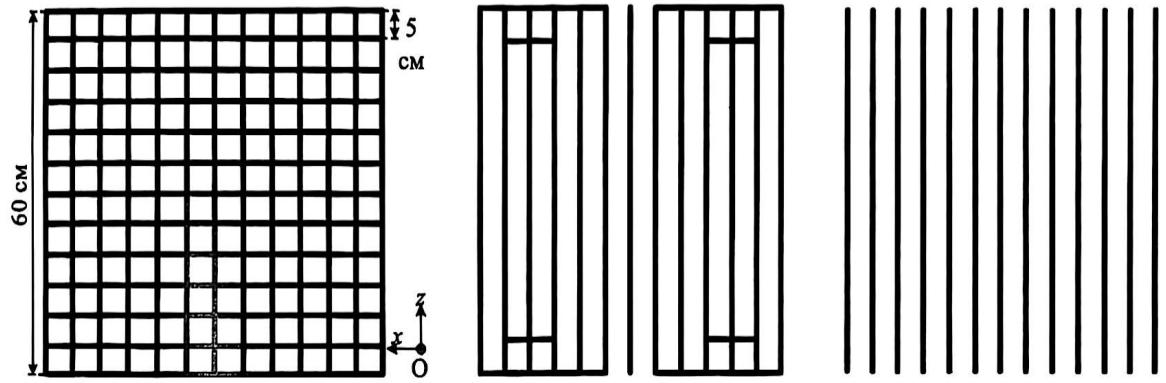


Рисунок 8 - Экран из исходной (*а*) и разреженных ПС при ДУЭС=2 (*б*), 5 (*в*) %

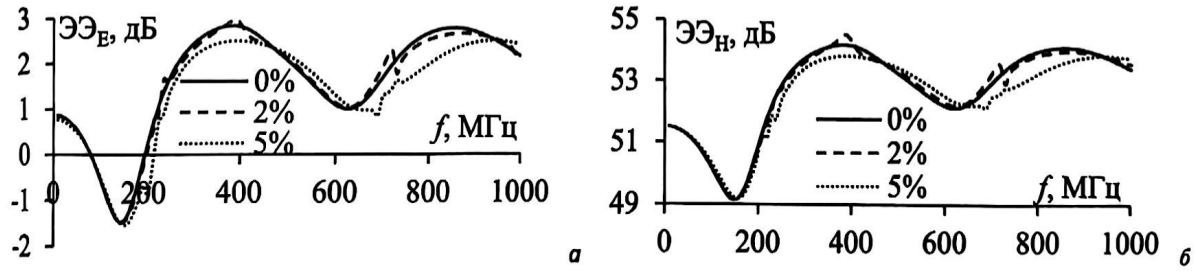


Рисунок 9 - Вычисленные частотные зависимости ЭЭ по |*E*| (*а*) и |*H*| (*б*) в точке (0, –0,5, 0)

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

Литература

1. Литовченко В. А., Бардачевский Н. Н., Коломакин А. В. Современные переносные радиолокационные станции малой дальности // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2021. – Т. 8. – С. 274–279.

2. Ветровая нагрузка на специальные конструкции // ARHPLAN.ru: справочник. – URL: https://www.arhplan.ru/reference/wind/wind-load-on-special-constructions (дата обращения: 19.05.2026).

3. Антенна с сетчатым рефлектором // kopter.vgtkraska24.ru. – URL: https://kopter.vgtkraska24.ru/antenna-s-setchatym-reflektorom/ (дата обращения: 19.05.2026).

4. Nguyen M. T., Alhaj Hasan A. F., Gazizov T. R. Generating Sparse Wire-Grid Antennas Using Maximum Current-Based Optimal Current Grid Approximation // IEEE Open Journal of Antennas and Propagation. – 2026. – Vol. 7, No. 2. – P. 652–665.

5. Данг Т. Ф. Разреженные электромагнитные рассеиватели из проводной сетки и алгоритмы для их моделирования: дис. канд. техн. наук. – Томск, 2025.

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