

Научная статья
УДК 621.396
DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202312-13>

Верификация модифицированного подхода к аппроксимации антенн проводной сеткой

М.Т. Нгуен¹, А.Ф. Алхадж Хасан², Т.Р. Газизов³

¹⁻³ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (г. Томск, Россия)

¹ nguyen.t.2213-2022@e.tusur.ru; ² alhaj.hasan.adnan@tu.tusur.ru; ³ talgat@tu.tusur.ru

Аннотация

Постановка проблемы. Для дальнейшего развития антенных технологий требуется достижение компромисса между размерами, массой и требуемыми характеристиками антенн, поскольку разработка антенны с малыми размерами и массой может привести к снижению ее характеристик. В этой связи необходимы подходы и технологии, позволяющие достичь баланса между размерами, массой и характеристиками антенн с минимальными затратами на моделирование при проектировании антенн. Оптимизация процесса моделирования антенн – неотъемлемая часть сокращения временных и стоимостных ресурсов, затрачиваемых на моделирование. Разработка более эффективных и точных подходов к моделированию может существенно уменьшить затраты и повысить эффективность проектирования антенн. Для решения данной проблемы можно использовать аппроксимацию антенн проводной сеткой с применением оптимальной токовой сетки.

Цель. Провести верификацию модифицированного подхода к аппроксимации антенн проводной сеткой на примере рупорной антенны.

Результаты. Проведено сравнение результатов применения модифицированного подхода с данными, полученными измерением и вычисленными с помощью других подходов. Показано, что, используя модифицированный подход, можно моделировать разреженные структуры антенн с меньшими вычислительными затратами (в 2,69 раза меньше памяти и 4,41 раза меньше времени) при массе, меньше в 1,64 раза, чем у исходной структуры. Обнаружено, что структура, полученная с помощью модифицированного подхода, имеет более низкий уровень боковых лепестков (на 1,92 дБ в плоскости H и 0,93 дБ в плоскости E).

Практическая значимость. Применение модифицированного подхода к аппроксимации антенн проводной сеткой в различных областях, включая телекоммуникации, радиотехнику и беспроводные сети, упрощает процесс моделирования и проектирования антенн. Разреженная структура антенны, полученная с помощью данного подхода, обладает существенно меньшей массой и может быть внедрена в производство без технических сложностей.

Ключевые слова

Проводная сетка, рупорная антенна, разреженные антенны, метод моментов, аппроксимация оптимальной токовой сеткой

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2023-0014.

Для цитирования

Нгуен М.Т., Алхадж Хасан А.Ф., Газизов Т.Р. Верификация модифицированного подхода к аппроксимации антенн проводной сеткой // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 12. С. 118–128. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202312-13>

A brief version in English is given at the end of the article

Введение

В связи с развитием беспроводных коммуникаций и технологий в настоящее время основное внимание в радиоэлектронике направлено на улучшение и оптимизацию процесса производства антенн [1–3]. Необходимы компактные и легкие антенны с сохранением высокой производительности и надежности [4–6]. При этом важно обеспечить эффективность передачи/приема сигналов, устойчивость к помехам и минимальные потери сигнала. Для достижения этого нужны новые методы и технологии изготовления антенн [7, 8]. Кроме того, важны и затраты на производство антенн. Моделирование антенн значительно снижает производственные затраты, позволяющее предварительно оценить и оптимизировать характеристики антенн перед производством, помогает избежать технических ошибок [9, 10]. В связи с этим моделирование становится неотъемлемой частью процесса проектирования. Однако точное моделирование может потребовать значительных вычислительных ресурсов, особенно при анализе сложных антенных моделей. Следовательно, выбор численных методов и подходов к моделированию антенн может существенно влиять на затраты и эффективность процесса проектирования.

Метод моментов (МоМ) – один из наиболее широко применяемых численных методов в области моделирования антенн [11–13]. Он основан на приближенном сведении интегральных уравнений к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) для распределения тока по поверхности антенны. МоМ, обладающий простым алгоритмом и небольшими затратами на дискретизацию по сравнению с другими методами моделирования, позволяет достичь приемлемых результатов моделирования антенн, используя меньше ресурсов, что способствует снижению затрат на моделирование при проектировании антенн.

На основе простого алгоритма МоМ разработаны новые подходы к моделированию антенн, наиболее известный среди которых – аппроксимация поверхности антенны проводной сеткой (ПС) из соединенных проводов. Этот подход позволяет сократить вычислительные затраты [14, 15], поэтому с его помощью выполнены многочисленные исследования по моделированию антенн. Значительное развитие получили исследования разреженных антенных решеток с уменьшенной массой при сохранении необходимых характеристик [16–18]. Поэтому целесообразно использовать ПС на основе МоМ для проектирования разреженных антенн, чтобы воспользоваться их преимуществами.

Подход к моделированию поверхности антенны с использованием ядра МоМ–ПС применен в [19] для моделирования рупорной антенны. Сравнение полученных результатов с измеренными показало хорошее соответствие. В [20] этот подход использовался для моделирования рефлекторной антенны и также дал результаты, совпадающие с измеренными. Кроме того, в [20] предложен подход к моделированию разреженных антенн – аппроксимация оптимальной токовой сеткой (АОТС) и его модификация – так называемая «соединенная» АОТС (САОТС), упрощающая процесс изготовления разреженных антенн, поскольку она сохраняет физические соединения проводов сетки, не разрывая основных путей тока в антенне. Однако для развития данного подхода необходима проверка его работоспособности на типовых структурах антенн.

Ц е л ь р а б о т ы – провести верификацию модифицированного подхода к аппроксимации антенн проводной сеткой на примере рупорной антенны.

Подходы к разработке разреженных антенн

Рассмотрим подробно подход АОТС и его модификацию САОТС для генерации разреженной модели антенны [20].

В отличие от других известных решений АОТС позволяет получить разреженную антенну путем упрощения ее структуры за счет удаления проводов с незначительными токами, поскольку их влияние на излучение мало. Это можно реализовать, исключив из проводной сетки те элементы, модуль тока которых меньше заданного уровня. Его отношение к максимальному модулю тока в сетке, выраженное в процентах, задается допуском удаления элемента сетки (ДУЭС). Применение АОТС позволяет с контролируемой точностью снизить массу и размеры антенны при сохранении необходимых характеристик. Для достижения этого можно варьировать значение ДУЭС.

Реализовать АОТС можно добавлением нескольких шагов к процессу аппроксимации проводящей поверхности антенны ПС. Алгоритм работы АОТС представлен на рис. 1. Согласно этому алгоритму после аппроксимации проводящей поверхности антенны ПС рассчитываются модули тока в каждом проводе и среди них определяется максимальный. Затем проводится нормировка модулей тока в сетке относительно их максимального модуля. Задается значение ДУЭС в процентах. Далее выполняется проверка для каждого провода, в ходе которой анализируется модуль тока каждого провода, выраженный в процентах от максимального модуля. Провода с модулем тока меньше соответствующего заданному ДУЭС исключаются, а их индексы сохраняются в списке удаленных проводов. Индексы остальных проводов сохраняются в списке оставшихся проводов для построения разреженной антенны, которая может быть использована для последующего моделирования с меньшими вычислительными затратами и изготовления в разреженном виде с меньшей массой.

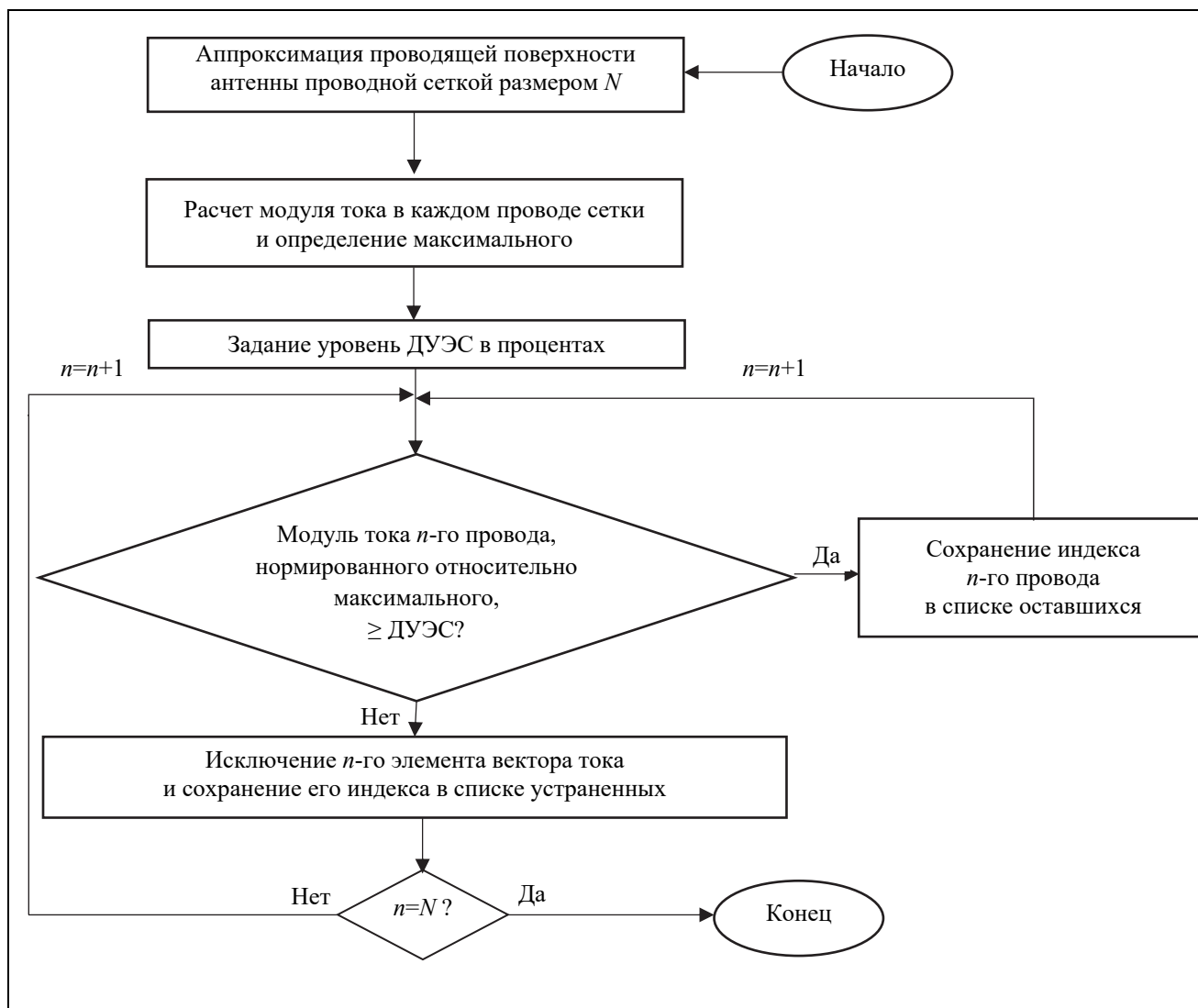


Рис. 1. Алгоритм работы АОТС
 Fig. 1. The algorithm of the OCGA

Преимущества АОТС для получения разреженных антенн показаны в [20]. Основным недостатком применения АОТС к непечатным антеннам является техническая сложность изготовления получаемых структур из-за наличия свободных (несоединенных) проводов. Для устранения этого недостатка предложена САОТС – модификация исходной АОТС, в которой все свободные провода соединены с основной структурой.

Алгоритм работы САОТС показан на рис. 2. После применения АОТС каждый провод в списке оставшихся проводов по очереди проверяется. Если проверяемый провод подключен к основной структуре, то переходят к проверке следующего, а если нет, то он считается свободным и выполняется дальнейшая процедура. В данной ситуации соответствующие радиальные провода из списка устранимых восстанавливаются до тех пор, пока не будут подключены к основной структуре.

Применение данного процесса ко всем проводам в списке оставшихся приводит к новому списку для создания разреженной антенны без наличия свободных проводов. Такая антенна может быть изготовлена без технических сложностей.

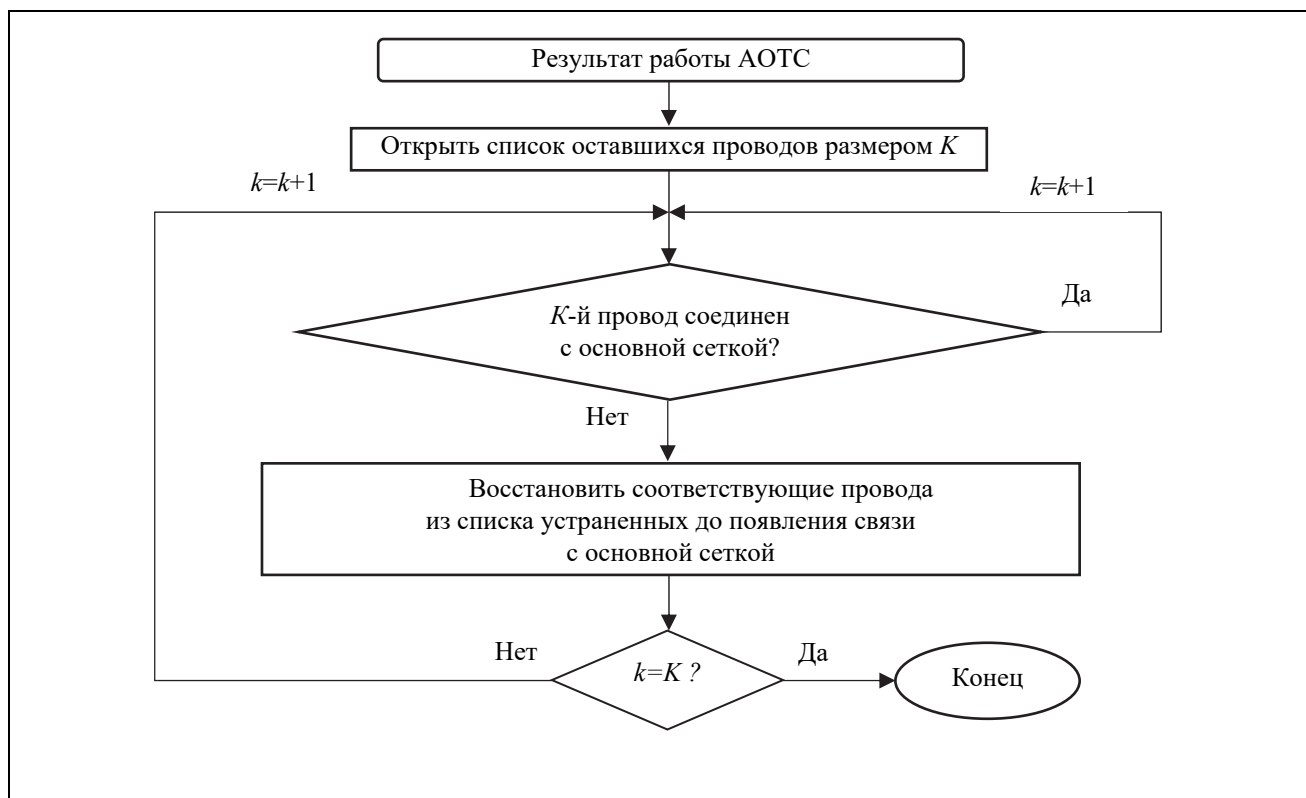


Рис. 2. Алгоритм работы САОТС
 Fig. 2. The algorithm of the COCGA

Верификация модифицированного подхода

Для проверки работоспособности предложенных в [20] АОТС и САОТС было проведено моделирование рупорной антенны. В соответствии с подходом, описанным в [19], при моделировании сетка регулярной части рупорной антенны разделилась на 8, 4 и 8 частей по осям OX , OY и OZ соответственно, а сетка нерегулярной части – на 16, 8 и 32 части. Общее число использованных проводов N для аппроксимации поверхности антенны составляло 3556. Антенна возбуждалась отрезком провода с разностью потенциалов 1 В, расположенным на стыке регулярной и нерегулярной частей рупора между его широкими стенками.

На рис. 3,а показана исходная структура рупорной антенны, аппроксимированная ПС, а ее диаграммы направленности (ДН) на частоте 8 ГГц, полученные в результате моделирования и измеренные, представлены на рис. 4 [19]. Нормированные модули напряженности поля вычислялись в плоскостях E и H .

Согласно рассмотренной в [20] АОТС, модули элементов вектора тока, полученные после первого моделирования с использованием подхода из [19], нормировались относительно максимального модуля тока в проводах сетки. В данном примере ДУЭС равно 10%, но на практике оно задается пользователем в соответствии с его требованиями к улучшению одних характеристик (например, уменьшению массы) и сохранению других (например, коэффициента усиления). Индексы проводов, в которых модуль тока после нормирования меньше значения ДУЭС, сохранялись в отдельном списке. Затем на основе этого списка соответствующие этим индексам столбцы и строки матрицы СЛАУ удалялись. В результате получается разреженная структура антенны, содержащая $N_s = 2080$ проводов.

Разреженная структура антенны представлена на рис. 3,б. Ее ДН (рис. 4) сравнивалась с полученными для исходной и измеренными ДН. Основные затраты времени на решение СЛАУ (в данном случае методом Гаусса) пропорциональны 3-й степени порядка СЛАУ $O(N)^3$, а требуемый объем памяти про-

порционален квадрату порядка СЛАУ $O(N)^2$. В результате масса антенны уменьшилась в $\frac{N}{N_s} = 1,71$ раза, объем памяти – в $\left(\frac{N}{N_s}\right)^2 = 2,92$ раза, а время на решение СЛАУ – в $\left(\frac{N}{N_s}\right)^3 = 5$ раз.

Как видно из рис. 4, уровень боковых лепестков (УБЛ) для разреженной структуры выше, чем для исходной.

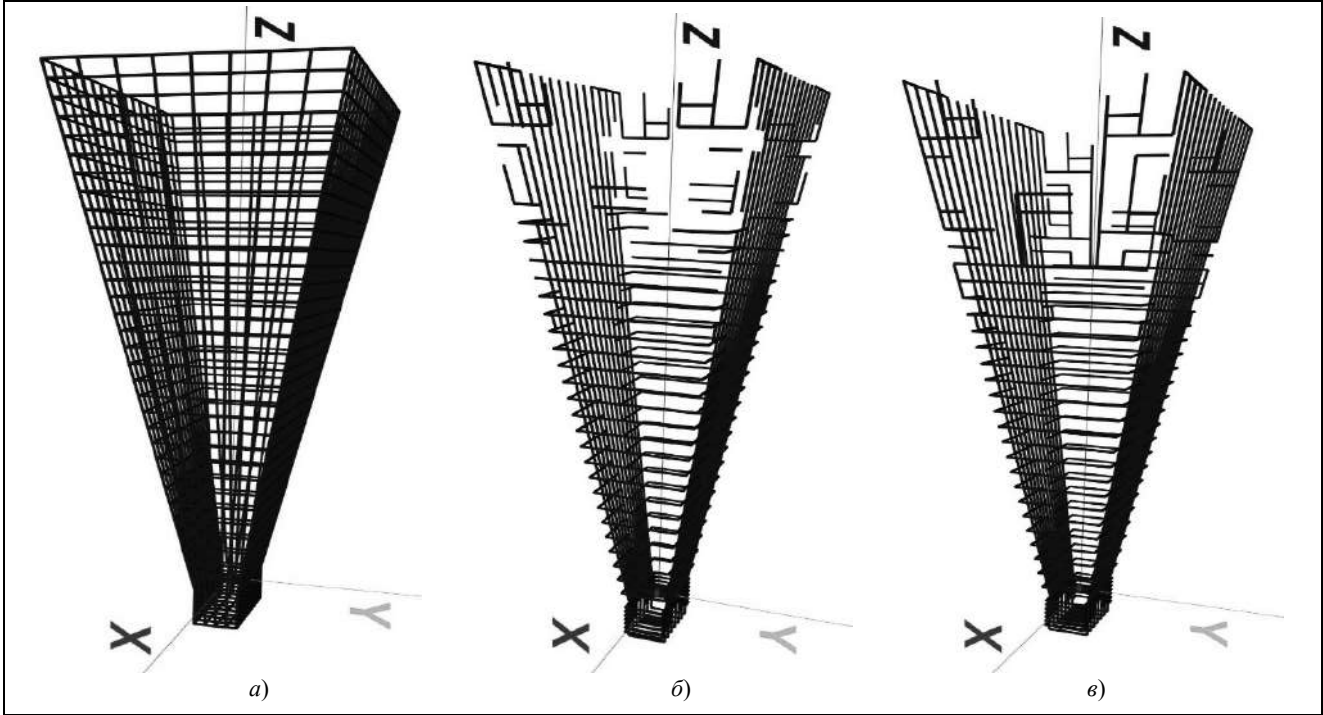


Рис. 3. Исходная [19] (а) и разреженные после обычной (б) и «соединенной» (в) АОТС структуры рупорной антенны
Fig. 3. The original [19] (a) and sparse after the conventional (b) and "connected" (c) AOTS horn antenna structures

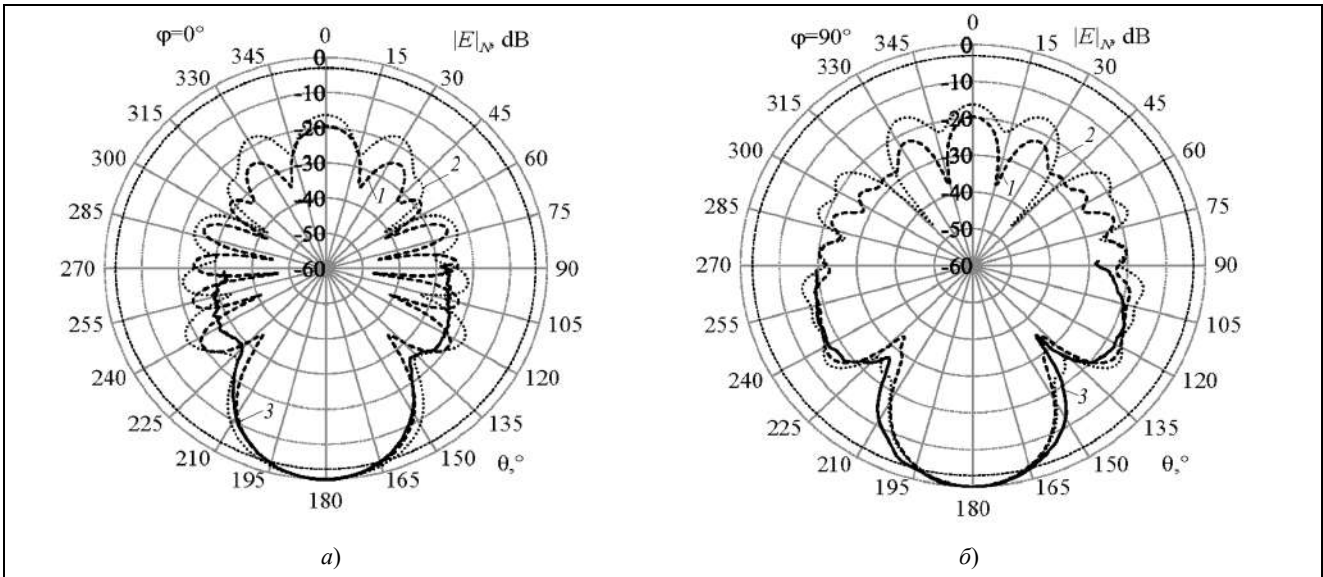


Рис. 4. ДН рупорной антенны, вычисленные для исходной (1) [19] и разреженной после АОТС при ДУЭС=10% (2) структур и полученные измерением (3) [19] в плоскостях E (а) и H (б)

Fig. 4. RPs of the horn antenna, calculated for the original (1) [19] and sparse structures after OCGA with GEET = 10% (2) and measured (3) [19], in the E (a) and H (b) planes

Разреженная структура после САОТС представлена на рис. 3,б, а ее ДН в плоскостях E и H показаны на рис. 5. Число проводов в полученной структуре после САОТС составило 2168. Масса антенны уменьшилась в 1,64 раза, объем памяти – в 2,69 раза, а время на решение СЛАУ – в 4,41 раза. Несмотря на то, что уменьшение вычислительных затрат и массы антенны при использовании САОТС несколько меньше, чем при применении АОТС, полученная разреженная структура не усложняет процесс изготовления исследуемой антенны, поскольку в ней отсутствуют свободные провода.

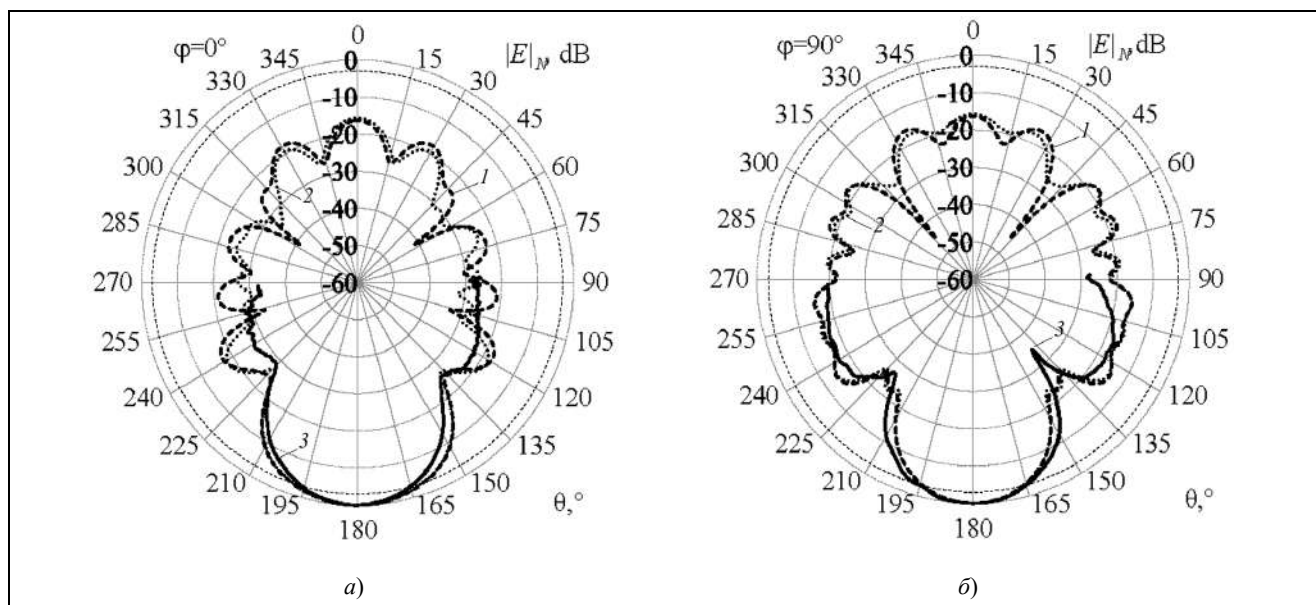


Рис. 5. ДН рупорной антенны, вычисленные для разреженной после обычной (1) и «соединённой» (2) АОТС структур при ДУЭС=10% и полученная измерением (3), в плоскостях E (а) и H (б)

Fig. 5. RPs of the horn antenna, calculated for the sparse after conventional (1) and "connected" (2) OCGA structures at GEET=10% and measured (3), in E (a) and H (b) planes

Представленная разреженная структура антенны существенно зависит от значения ДУЭС. При его увеличении будет отключено значительное число проводов, что приведет к изменению характеристик антенны. Показательно сравнить характеристики антенны после применения АОТС и САОТС при различных значениях ДУЭС.

На рис. 6 приведены графики зависимостей общего числа оставшихся проводов, максимального коэффициента усиления (KU_{max}), входного импеданса, уменьшения массы, памяти и времени, необходимых для последующего моделирования разреженной антенны вместо исходной структуры от изменения ДУЭС в диапазоне 0...50% после применения АОТС и САОТС. Сравнение полученных характеристик позволит выбрать оптимальное значение ДУЭС, наилучшим образом соответствующее заданным требованиям.

Из рис. 6,а видно, что общее число оставшихся проводов в разреженной антенне после САОТС всегда больше, чем после АОТС, так как при САОТС некоторые провода восстанавливаются для сохранения целостности структуры антенны. Общее число оставшихся проводов в разреженной антенне может значительно влиять на ее характеристики и массу. Как следует из рис. 6,а, при значениях ДУЭС менее 10% после применения обоих подходов (АОТС и САОТС) разница в общем числе оставшихся проводов незначительна. Согласно представленным результатам, характеристики исходной и разреженной антенн практически идентичны при ДУЭС < 10%, что подтверждает эффективность разреженной антенны по сравнению с исходной.

Однако при ДУЭС > 10% KU_{max} разреженной антенны после АОТС резко уменьшается (рис. 6,б), но меньше, чем при САОТС, дающей характеристики разреженной антенны более близкие к характеристикам исходной. Кроме того, из зависимости импеданса от ДУЭС (рис. 6,в) следует, что после САОТС он ближе к 50 Ом с ростом ДУЭС.

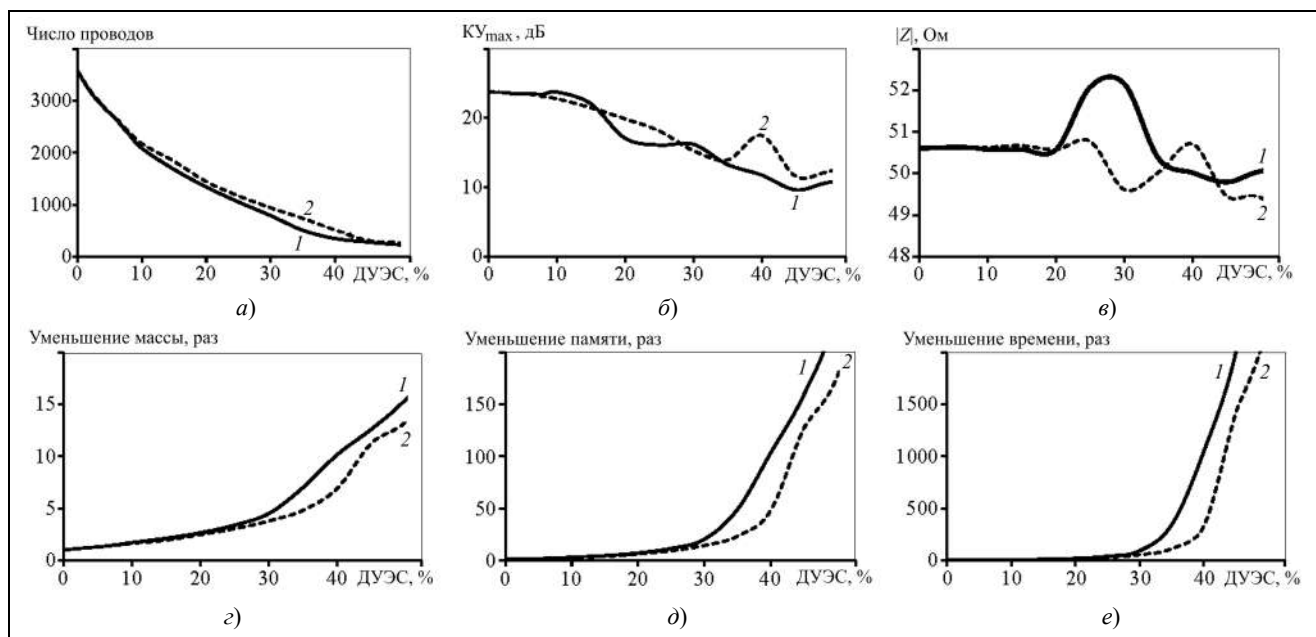


Рис. 6. Графики зависимостей общего числа оставшихся проводов (а), G_{\max} (б), импеданса (в), уменьшения массы (г), уменьшения памяти (д) и времени (е) для последующего моделирования разреженной антенны от изменения значения ДУЭС после применения АОТС (1) и САОТС (2)

Fig. 6. Dependences of the total number of remaining wires (a), G_{\max} (b), impedance (c), mass reduction (d), memory (e) and time (f) reduction on further simulation for the sparse antenna on the change in the GEET value after applying OCGA (1) and COCGA (2)

Кроме характеристик антенны, следует учитывать и оценивать уменьшение ее массы, а также времени и памяти, необходимых для ее моделирования. Из рис. 6,г-е видно, что перечисленные параметры возрастают с увеличением ДУЭС. Представленные результаты показывают, что для рупорной антенны при ДУЭС < 10% разница между результатами, полученными после применения АОТС и САОТС, незначительна. Однако при ДУЭС > 10% АОТС превосходит САОТС по уменьшению массы антенны, объема памяти и времени для вычислений.

Значения других исследуемых характеристик рупорной антенны для наглядности сведены в таблицу, где также указаны и данные измерений.

Таблица. Измеренные и рассчитанные характеристики антенны до и после аппроксимаций

	Частота, ГГц	G_{\max} , дБ	УБЛ, дБ	Ширина луча (E/H), град
Измерение	8	–	–22,35/–17,43	32/32
ПС	8	23,73	–19,96/–15,54	32/28
После применения АОТС	8	23,77	–17,26/–13,96	38/28
После использования САОТС	8	22,79	–19,18/–14,89	36/28

Из данных таблицы видно, что наиболее высоким УБЛ остается после применения АОТС, а наиболее близким к исходной структуре – после использования САОТС. Ширина луча (ШЛ) в плоскости E после АОТС и САОТС немного превышает значения для исходной и измеренной структур, однако в плоскости H ШЛ после АОТС и САОТС остается стабильной и ниже, чем по результатам измерений.

По результатам проведенного сравнительного анализа следует, что АОТС превосходит САОТС по уменьшению массы и снижению вычислительных затрат, особенно при значениях ДУЭС > 10%, но обеспечивает меньшую точность по сравнению с результатами, полученными после САОТС. Это объясняется тем, что САОТС создает неразрывную структуру и не прерывает пути тока в проводах.

Таким образом, использование АОТС целесообразно при необходимости снизить вычислительные затраты на моделирование, особенно в случаях, где требуется быстрая оценка без строгих требований к точности оценки. Если требуются высокоточные результаты, то предпочтительнее применение САОТС, так как оно позволяет значительно уменьшить массу антенны, обеспечивая при этом наиболее близкие результаты к исходной структуре и сохраняя целостность полученной разреженной структуры.

Заключение

Проведенная верификация модифицированного подхода к аппроксимации антенн разреженной ПС на примере рупорной антенны показала хорошая согласованность результатов моделирования и измерений. Рассмотренный подход подтвердил свою способность синтезировать разреженные структуры антенн, которые могут быть использованы как для моделирования с меньшими вычислительными затратами, так и для изготовления таких структур без технических затруднений.

Отмечено, что полученная структура с использованием модифицированного подхода обладает меньшим УБЛ по сравнению со структурой, построенной с помощью обычного подхода.

На основе результатов сравнительного анализа АОТС и САОТС выработаны рекомендации по использованию каждого из этих подходов в зависимости от конкретных требований к антеннам, которые помогут выбрать подход к моделированию и значение ДУЭС, наилучшим образом соответствующие предъявляемым требованиям.

Рассмотренные подходы требуют дальнейшего исследования и применения на различных типах антенн для оценки и проверки их эффективности. Поэтому направлениями дальнейших исследований являются изучение применения этих подходов на различных типах антенн и разработка новых модификаций, отвечающих требованиям современного рынка разреженных антенн.

Список источников

1. Бердникова Н.А., Белов О.А., Лопатин А.В. Исследование и оптимизация режима изготовления высокоточного композитного рефлектора антенны космического аппарата // *Космические аппараты и технологии*. 2019. Т. 3. № 2(28). С. 59–72. DOI: 10.26732/2618-7957-2019-2-59-72.
2. Olivová J., Popela M., Richteroá M., Štefl E. Use of 3D printing for horn antenna manufacturing // *Electronics*. MDPI AG. 2022. V. 11. № 10. P. 1539. DOI: 10.3390/electronics11101539.
3. Lukacs P., Pietrikova A., Vehec I., Provazek P. Influence of various technologies on the quality of ultra-wideband antenna on a polymeric substrate // *Polymers*. MDPI AG. 2022. V. 14. № 3. P. 507. DOI: 10.3390/polym14030507.
4. Masuk A., Balajti I. Mechatronics engineering aspects of VHF band antenna design of industry 4.0 applications // *2022 23rd International Radar Symposium (IRS)*, Gdansk, Poland. 2022. P. 77–82. DOI: 10.23919/IRS54158.2022.9905051.
5. Газизов Т.П. Система компьютерного моделирования сложных структур проводников и диэлектриков // *Материалы Всероссий. науч.-практич. конф., посвященной 40-летию ТУСУР*. 2–4 октября 2002 г. В 2-х томах. Т. 1. Томск. С. 126–128.
6. Mahfuz M.H., Islam M.R., Park C.W., Elsheikh E.A., Suliman F.M., Habaebi M.H. Wearable textile patch antenna: challenges and future directions // *IEEE Access*. 2022. V. 10. P. 38406–38427. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3161564.
7. Boudjerda M., Reddafi A., Kacha A., Hamdi-Cherif K., Alharbi T.E.A., Alzaidi M.S., Alsharif M., Ghoneim S.S.M. Design and optimization of miniaturized microstrip patch antennas using a genetic algorithm // *Electronics*. MDPI AG. 2022. V. 11. № 14. P. 2123. DOI: 10.3390/electronics11142123.
8. Дремухин М.А., Наговицин В.Н. Разработка и моделирование неметаллической формообразующей оснастки для изготовления полимерных композиционных рефлекторов спутниковых антенн // *Космические аппараты и технологии*. 2021. № 4(38). С. 183–190. DOI: 10.26732/j.st.2021.4.01.
9. Al-Alem Y., Sifat S. M., Antar Y.M.M., Kishk A.A., Freundorfer A.P., Xiao G. Low-cost circularly polarized millimeter-wave antenna using 3D additive manufacturing // *IEEE Access*. 2022. V. 10. P. 20539–20546. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3152532.
10. Song L., Zhang B., Zhang D., Rahmat-Samii Y. Embroidery electro-textile patch antenna modeling and optimization strategies with improved accuracy and efficiency // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2022. V. 70. № 8. P. 6388–6400. DOI: 10.1109/TAP.2022.3145443.
11. Харрингтон Р.Ф. Применение матричных методов к задачам теории поля // *Труды института инженеров по электронике и радиотехнике*. 1967. № 2. С. 5–19.
12. Zheng S., Zhang P., Okhmatovski V.I. Analysis of benchmark biconical antenna with RWG method of moments for IEEE P2816 project // *2022 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/URSI)*. Denver, CO. USA. 2022. P. 649–650. DOI: 10.1109/AP-S/USNC-URSI47032.2022.9886141.
13. Jafari S.F., Shirazi R.S., Moradi G., Sibille A., Wiart J. Non-invasive absorbed power density assessment from 5G millimeter-wave mobile phones using method of moments // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2023. DOI: 10.1109/TAP.2023.3278834.

14. *Hawkins J.D., Lok L.B., Brennan P.V., Nicholls K.W.* HF Wire-mesh dipole antennas for broadband ice-penetrating radar // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2020. V. 19. № 12. P. 2172–2176. DOI: 10.1109/LAWP.2020.3026723.
15. *Topa T.* Porting wire-grid MoM framework to reconfigurable computing technology // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2020. V. 19. № 9. P. 1630–1633. DOI: 10.1109/LAWP.2020.3012587.
16. *Карасев А.С., Степанов М.А.* Синтез разреженной линейной антенной решетки с сохранением ширины главного лепестка и минимальным пиковым уровнем боковых лепестков при помощи генетического алгоритма // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2022. № 5. DOI: 10.30898/1684-1719.2022.5.5.
17. *Черняк В.С.* О свойствах ММО РЛС с разреженными антенными решетками // Успехи современной радиоэлектроники. 2017. № 3. С. 61–70.
18. *Kerzhner Y., Epstein A.* Metagrating-assisted high-directivity sparse regular antenna arrays for scanning applications // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2023. V. 71, № 1. P. 650–659. DOI: 10.1109/TAP.2022.3222645.
19. *Alhaj Hasan A., Klyukin D.V., Kvasnikov A.A., Komnatov M.E., Kuksenko S.P.* On wire-grid representation for modeling symmetrical antenna elements // Symmetry. 2022. V. 14. № 7. P. 1354. DOI: 10.3390/sym14071354.
20. *Alhaj Hasan A., Nguyen T.M., Kuksenko S.P., Gazizov T.R.* Wire-grid and sparse MoM antennas: past evolution, present implementation and future possibilities // Symmetry. 2023. V. 15. № 2. P. 378. DOI: 10.3390/sym15020378.

Информация об авторах

Нгуен Мань Туан – аспирант

SPIN-код: не представлен; Orcid: 0000-0002-5050-3752

Алхадж Хасан Аднан Фаезович – мл. науч. сотрудник

SPIN-код: не представлен; Orcid: 0000-0001-7403-7023

Газизов Тальгат Рашитович – д.т.н., профессор

SPIN-код: 2722-6243; Orcid: 0000-0002-1192-4853

Статья поступила в редакцию 06.11.2023

Одобрена после рецензирования 14.11.2023

Принята к публикации 30.11.2023