

УДК 621.396

М.Т. Нгуен, А.Ф. Алхадж Хасан

## Разреженные антенны с помощью аппроксимации оптимальной токовой сеткой в различных САПР

Верифицирована эффективность аппроксимации поверхности антенны оптимальной токовой сеткой (АОТС) на примере рупорной антенны, работающей в широком диапазоне частот. Верификация выполнена с использованием различных систем автоматизированного проектирования (САПР). Полученные результаты проанализированы и сравнены между собой, а также с результатами измерений. Результаты согласуются в пределах приемлемой погрешности. Разреженная структура антенны, полученная с применением АОТС, продемонстрировала ряд значительных преимуществ. В частности, она обладает меньшей массой, что может быть важно во многих приложениях, где требуется сократить массу антенны. Кроме того, для моделирования такой антенны требуется меньше памяти и меньше времени, что увеличивает эффективность процесса разработки. Также в работе показано преимущество использования системы TALGAT при решении таких задач, что может быть полезно для будущих исследователей и инженеров, работающих в области антенной техники.

**Ключевые слова:** метод моментов, проводная сетка, разреженные антенны, аппроксимация оптимальной токовой сеткой, рупорная антенна, САПР.

В настоящее время развитие систем автоматизированного проектирования (САПР) стало важным переломным моментом в области проектирования антенн. Ранее данный процесс требовал значительных затрат сил и средств, а также создания физических моделей антенн для испытаний и оптимизации. Однако использование САПР позволило уменьшить эти затраты [1, 2]. Одним из главных преимуществ САПР является возможность быстрого и удобного создания и редактирования моделей антенн. Кроме того, САПР позволяет проводить моделирование и оптимизировать структуры перед изготовлением. Благодаря этому можно провести анализ характеристик антенны в различных условиях эксплуатации и оптимизировать ее для достижения оптимальных характеристик.

Данный процесс позволяет избежать производства неэффективных антенн и снизить производственные потери и ошибки. Еще одним достоинством САПР является возможность интеграции численных методов для создания точных и надежных моделей антенн [3–5]. Метод моментов (МоМ) является одним из наиболее популярных численных методов, интегрированных в САПР, для моделирования антенн [6, 7]. Одним из существенных преимуществ МоМ является его возможность достоверно представлять характеристики и свойства различных типов антенн. За счет простоты его алгоритма он требует меньше вычислительных затрат по сравнению с другими численными методами, что позволяет уменьшить затраты процесса проектирования антенн. Кроме того, МоМ позволяет разработать новые подходы на его основе.

Одним из этих подходов, разработанных с целью снижения вычислительных затрат, является подход, основанный на использовании проводной сетки (ПС) [8–10]. Он основан на принципе аппроксимации поверхности антенны, по которой протекает ток, сеткой их взаимосвязанных проводников. На основе ПС недавно предложен новый подход, названный аппроксимацией оптимальной токовой

сеткой (АОТС), для моделирования и разработки разреженных антенн [11]. АОТС позволяет создавать эквивалентную разреженную структуру антенны путем исключения проводов с модулем тока ниже заданного уровня. Данный уровень называется допуском удаления элементов сетки (ДУЭС). Однако АОТС ранее не рассматривался, кроме как в системе TALGAT [12]. Целью данной работы является верификация результатов применения АОТС на примере перфорированной рупорной антенны в системах TALGAT, MMANA-GAL [13] и 4NEC2 [14].

### Аппроксимация поверхности антенны проводной сеткой

Для достижения этой цели выбрана широкополосная перфорированная рупорная антенна, описанная в работе [15]. Эта антенна разработана для работы в X-диапазоне (8–12 ГГц). Геометрические параметры данной антенны представлены в табл. 1, включая размеры регулярной части ( $a_1$  и  $b_1$ ), нерегулярной части ( $a_2$  и  $b_2$ ) и высоту обеих частей ( $l_1$  и  $l_2$ ). Изометрическое изображение антенны показано на рис. 1, а.

Таблица 1

Геометрические параметры рупорной антенны

$a_1$ , мм	$b_1$ , мм	$a_2$ , мм	$b_2$ , мм	$l_1$ , мм	$l_2$ , мм
22,86	10,16	32	32	30	50

Сначала рупорная антенна моделировалась с использованием ПС. Для этой цели сетка, используемая для аппроксимации регулярной части антенны, делилась на 5 частей вдоль оси  $OX$ , 2 части вдоль оси  $OY$  и 6 частей вдоль оси  $OZ$ . Сетка для аппроксимации нерегулярной части антенны делилась на 5 частей вдоль оси  $OX$ , 4 части вдоль оси  $OY$  и 8 частей вдоль оси  $OZ$ . Всего использовалось  $N = 489$  проводников для аппроксимации всей поверхности антенны. Все проводники имели радиус 0,25 мм. Для возбуждения антенны провод с разностью потенциалов 1 В подключался к сетке на нижней стороне регулярной части и внутри нее вдоль оси  $OY$ . Этот провод размещался на расстоянии 25 мм от плоскости,

разделяющей регулярную и нерегулярную части рупора. Провод возбуждения, имеющий длину  $l_s = 5,5$  мм и радиус  $r_s = 0,3$  мм, делился на 4 сегмента, в то время как остальные провода сетки были представлены одним сегментом. Полная структура антенны с источником возбуждения аппроксимировалась с использованием ПС в системах TALGAT, MMANA-GAL и 4NEC2, как показано на рис. 1. Эта модель рассматривалась как исходная структура в данном исследовании.

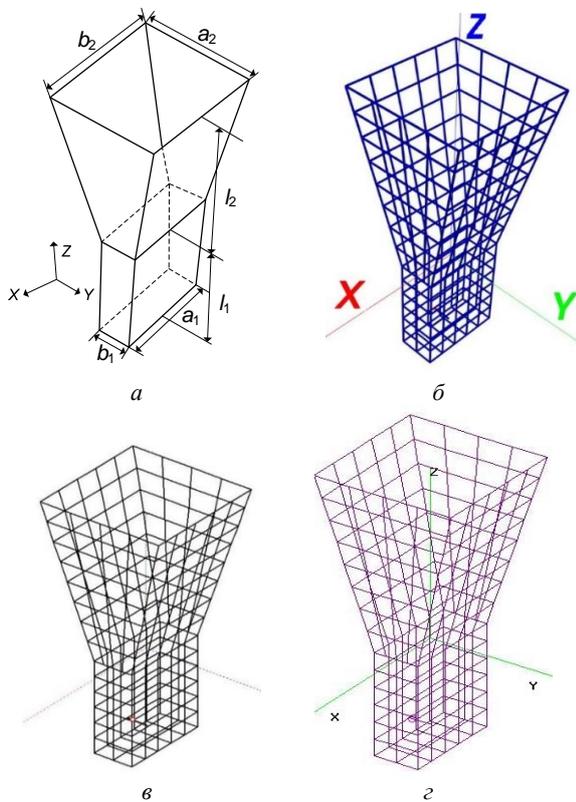


Рис. 1. Изометрический вид перфорированной рупорной антенны (а) [15] и её ПС структуры в системах TALGAT (б), MMANA-GAL (в) и 4NEC2 (г)

Проведено сравнение результатов, полученных для ПС антенны в TALGAT, MMANA-GAL и 4NEC2, с полученными с помощью HFSS для перфорированной антенны, описанной в [15]. Кроме того, результаты моделирования сопоставлялись с данными, полученными в результате измерений 3D-печатных металлических структур, включая структуры с покрытием из меди и металла, как описано в [15]. Основными интересующими характеристиками для различных конструкций антенн являются максимальный коэффициент усиления ( $KU_{\max}$ ) и коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) в рабочем диапазоне частот. Поэтому проведен сравнительный анализ частотной зависимости этих характеристик для всех представленных моделей антенн (рис. 2).

На рис. 2, а наблюдается довольно хорошая согласованность полученных результатов. В основном диапазоне рабочих частот полученные  $KU_{\max}$  при

моделировании с использованием ПС в TALGAT и MMANA-GAL в целом выше, чем результаты, полученные в HFSS и измеренные, а в 4NEC2 немного меньше. В частности, максимальное расхождение по КУ при сравнении MMANA-GAL с HFSS составляет 1,39 дБ, а с измерениями – 1,92 дБ; TALGAT с HFSS – 1,18 дБ, а с измерениями – 1,51 дБ; 4NEC2 с HFSS – 0,19 дБ, а с измерениями – 0,75 дБ. В результате КУ, полученные при моделировании с использованием ПС в программах TALGAT, MMANA-GAL и 4NEC2, в рабочем диапазоне частот согласованы между собой. Максимальное расхождение КУ при их сравнении между собой оказалось между MMANA-GAL и 4NEC2 и составило 1,42 дБ.

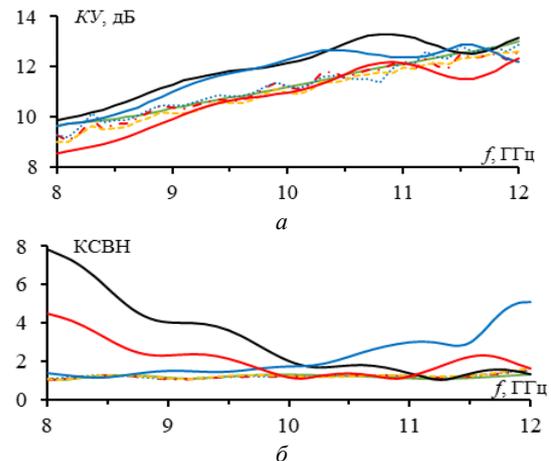


Рис. 2. Частотные зависимости  $KU_{\max}$  (а) и КСВН (б) антенны, рассчитанные для ПС в TALGAT (—), MMANA-GAL (—), 4NEC2 (—) и для перфорированной в HFSS (—); измеренные для металлической печати (---), медного покрытия (---) и металлического покрытия (---) модели антенны [15]

На рис. 2, б наблюдается большое расхождение результатов КСВН, полученных с помощью ПС, по сравнению с полученными в HFSS и измеренными в основном диапазоне рабочих частот. Результаты КСВН, полученные в TALGAT, показывают хорошее согласование в диапазоне от 8 до 10,5 ГГц, но далее по частоте результаты начинают расходиться. Результаты КСВН, полученные в MMANA-GAL и 4NEC2, хорошо согласуются в диапазоне 10,5–12,0 и 9,6–12 ГГц соответственно, но до этого диапазона результаты менее согласованы. Это может быть объяснено ограничением числа проводов, используемых в бесплатной версии MMANA-GAL, на основе которой построена сетка в TALGAT и 4NEC2, что привело к большим размерам перфорированной полости.

В работе [15] показано, что размер перфорированной полости должен быть около  $\lambda/15$  для достижения оптимального баланса между уменьшением массы и минимизацией потерь в волноводах. Поэтому результаты КСВН, полученные с использованием ПС и демонстрирующие некоторое расхождение, предсказуемы. В частности, максимальное расхождение КСВН при сравнении MMANA-GAL с HFSS составило 6,72, а с измерениями – 6,79, при сравне-

нии TALGAT с HFSS – 3,73, а с измерениями – 3,59, при сравнении 4NEC2 с HFSS – 3,41, а с измерениями – 3,48, при сравнении TALGAT с MMANA-GAL – 6,44, а с 4NEC2 – 3,44. При сравнении оказалось, что результаты моделирования в TALGAT более близки к результатам 4NEC2, HFSS и результатам измерений, чем в MMANA-GAL.

**Результаты применения АОТС**

Вид и характеристики разреженных структур, полученные с применением АОТС, зависят от ДУЭС. В случае моделирования рупорной антенны с использованием ПС максимальные модули тока в сегментах, связанных с источником возбуждения, значительно превышают модули тока в других проводах сетки. Поэтому модули тока были нормализованы относительно их среднего значения в ПС. Изменяя ДУЭС, можно исключать разное число проводов из сетки. В качестве примера, в данной работе выбрано значение ДУЭС = 50%. Полученные разреженные антенны в различных системах представлены на рис. 3.

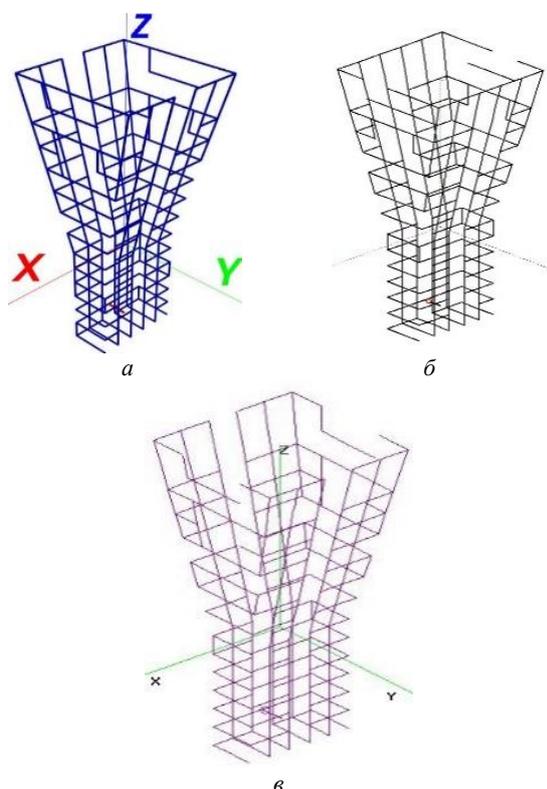


Рис. 3. Полученные разреженные структуры после применения АОТС при ДУЭС=50% в TALGAT (а), MMANA-GAL (б) и 4NEC2 (в)

В TALGAT количество проводов, оставшихся в разреженной антенне  $N_s = 355$ , в MMANA-GAL  $N_s = 341$  и в 4NEC2  $N_s = 343$ . Применение АОТС в TALGAT, MMANA-GAL и 4NEC2 привело к уменьшению массы антенны в  $N/N_s = 1,38, 1,43$  и  $1,43$  раза соответственно, объема памяти – в  $(N/N_s)^2 = 1,90, 2,06$  и  $2,03$  раза, а время решения системы линейных уравнений методом Гаусса в  $(N/N_s)^3 = 2,61, 2,95$  и  $2,90$  раза соответственно.

На рис. 4 показаны диаграммы направленности (ДН) для исходной антенны в TALGAT, MMANA-GAL и 4NEC2, а также разреженной антенны после АОТС с ДУЭС = 50%. Для оценки работы разреженных антенн рассмотрены их основные характеристики: КУ, КСВН, ширина луча (ШЛ) по уровню – 3 дБ и уровень боковых лепестков (УБЛ) на частоте 10 ГГц (табл. 2).

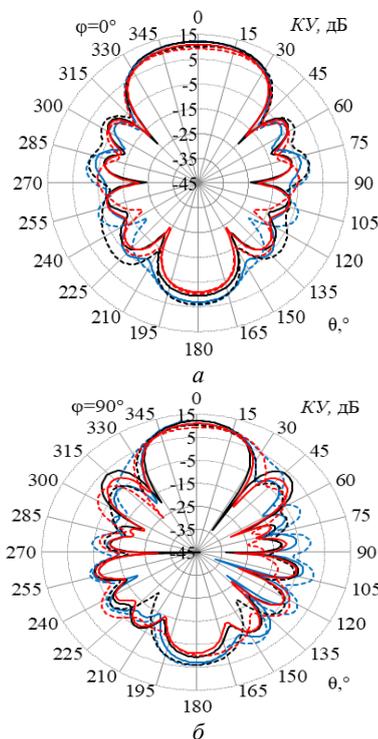


Рис. 4. ДН исходных структур в TALGAT (—), MMANA-GAL (—) и 4NEC2 (—) и разреженных в TALGAT (---), MMANA-GAL (---) и 4NEC2 (---) на частоте 10 ГГц в E (а) и H (б) плоскостях

Таблица 2  
Характеристики исходных и разреженных структур рупорной антенны на частоте 10 ГГц

Модели антенны		КУ <sub>макс</sub> , дБ	КСВН	ШЛ (E/H), град	УБЛ (E/H), дБ
Исходные	TALGAT	12,28	1,74	53/33	-15,43/-14,18
	MMANA-GAL	12,13	2,03	55/34	-14,20/-8,48
	4NEC2	10,97	1,16	55/37	-13,52/-10,28
Разреженные после АОТС	TALGAT	10,71	1,66	60/45	-10,80/-11,16
	MMANA-GAL	10,54	4,49	64/40	-10,29/-12,29
	4NEC2	9,25	1,47	64/55	-12,31/-8,85

На рис. 5 представлены зависимости КУ<sub>макс</sub> и КСВН для исходных и разреженных структур в TALGAT, MMANA-GAL и 4NEC2.

Результаты сравнения, представленные на рис. 4 и в табл. 2, демонстрируют хорошую согласованность полученных результатов для разреженных структур по сравнению с исходными. В частности, максимальное расхождение в MMANA-GAL при сравнении разреженной и исходной структур для КУ составило 2,46 дБ, а для КСВН – 8,26, в TALGAT

для КУ – 2,85 дБ, а для КСВН – 0,95, в 4NEC2 для КУ – 3,59 дБ, а для КСВН – 1,96. Наблюдается некоторое увеличение УБЛ для разреженных антенн, однако оно несущественно, и в основном направлении излучения остается хорошим.

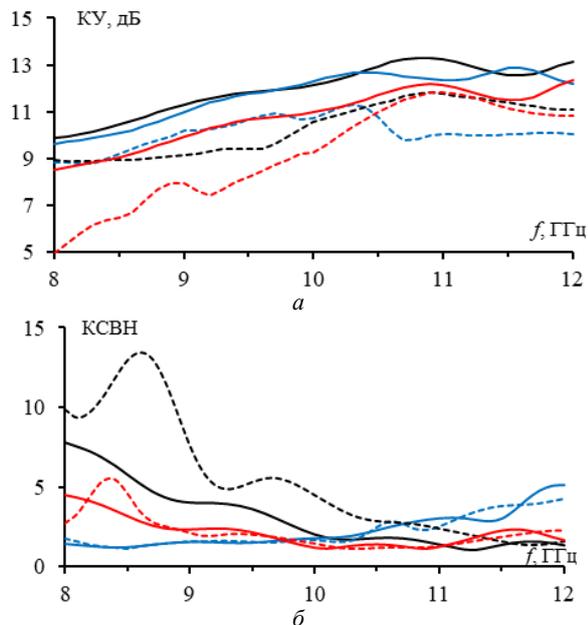


Рис. 5. Частотные зависимости  $KU_{\max}$  (а) и КСВН (б) для исходных структур в TALGAT (—), MMANA-GAL (---) и 4NEC2 (· · ·) и разреженных в TALGAT (---), MMANA-GAL (---) и 4NEC2 (· · ·)

Эти результаты приемлемы, поскольку основной задачей таких антенн является излучение в основном направлении. Кроме того, при сравнении результатов между системами можно заметить, что результаты моделирования в TALGAT имеют небольшое преимущество над результатами в MMANA-GAL и 4NEC2. Например, в TALGAT достигнуты более высокие значения  $KU_{\max}$ , а также более узкая ШЛ и более низкий УБЛ. Однако различия между результатами, полученными в различных системах, невелики, и в целом их можно считать хорошо согласующимися.

#### Заключение

В работе проведено сравнение и верификация результатов моделирования разреженных проводных антенн в различных системах на примере рупорной антенны. Сравнены результаты, полученные в TALGAT, других программах моделирования (MMANA-GAL, 4NEC2 и HFSS) и экспериментально. В рабочем диапазоне частот удалось достичь относительно хорошего согласования результатов моделирования с реальными данными. Также подтверждено, что разреженные антенны позволяют существенно уменьшить массу и затраты на моделирование, сохраняя при этом основные характеристики антенн. Более того, показано, что результаты, полученные с использованием системы TALGAT, ближе к данным измерений и имеют небольшое преимущество над результатами в MMANA-GAL и

4NEC2. Данная работа представляется важной для моделирования разреженных антенн и их оптимизации с использованием АОТС. Полученные результаты подтверждают перспективность и эффективность данного подхода, что может быть полезно при проектировании беспроводных коммуникационных систем и других приложений, требующих компактных и легких антенн. Дальнейшие исследования будут направлены на верификацию эффективности различных типов разреженных антенн в различных системах моделирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2022-0001 в ТУСУРе.

#### Литература

1. Семенихина Д.В. Проектирование широкополосной спиральной антенны в пакете САПР СВЧ HFSS v. 10 / Д.В. Семенихина, Ю.И. Маркина // Изв. Южного фед. ун-та. Технические науки. – 2010. – Т. 103, № 2. – С. 46–50.
2. Питерсен М. Проектирование высокоэффективных СВЧ-антенн в САПР EMPro // Автоматизация в промышленности. – 2013. – № 9. – С. 17–19.
3. Щербатых С.С. Метод интегральных уравнений как основной способ анализа в САПР антенн // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2016. – № 1. – С. 10.
4. Кочетков В.А. Численные методы и инструменты моделирования антенных решеток РЭС СВЧ-диапазона / В.А. Кочетков, И.В. Солдатиков // Изв. Тульского гос. ун-та. Технические науки. – 2021. – № 9. – С. 91–101.
5. An analytical antenna modeling of electromagnetic wave propagation in inhomogeneous media using FDTD: A comprehensive study / D.S.K. David, Y. Jeong, Y.C. Wu, S. Ham // Sensors. – 2023. – Vol. 23, No. 8. – P. 3896.
6. Alternative method for obtaining antenna current Green's function based on infinitesimal dipole modeling / S.J. Yang, Y.D. Kim, H.W. Jo, N.H. Myung // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 2019. – Vol. 67, No. 4. – PP. 2583–2590.
7. Method of moments simulation of modulated metasurface antennas with a set of orthogonal entire-domain basis functions / M. Bodehou, D. Gonzalez-Ovejero, C. Craeye, I. Huynen // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2018. – Vol. 67, No. 2. – PP. 1119–1130.
8. Rashid A.K. An Efficient Method of Moments for Thick-Wire Antennas / A.K. Rashid, Q. Zhang // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 2022. – Vol. 70, No. 12. – PP. 12399–12404.
9. Štumpf M. Time-domain analysis of thin-wire structures based on the Cagniard-DeHoop method of moments / M. Štumpf, I.E. Lager, G. Antonini // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 2022. – Vol. 70, No. 6. – PP. 4655–4662.
10. On wire-grid representation for modeling symmetrical antenna elements / A. Alhaj Hasan, D.V. Klyukin, A.A. Kvasnikov, M.E. Komnatov, S.P. Kuksenko // Symmetry. – 2022. – Vol. 14, No. 7. – P. 1354.
11. Wire-grid and sparse MoM antennas: past evolution, present implementation and future possibilities / A. Alhaj Hasan, T.M. Nguyen, S.P. Kuksenko, T.R. Gazizov // Symmetry. – 2023. – Vol. 15, No. 2. – P. 378.
12. Система TALGAT [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://talgat.org/talgat-software/>, свободный (дата обращения: 02.09.2023).

13. MMANA-GAL software [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gal-ana.de/basicmm/en/>, свободный (дата обращения: 02.09.2023).

14. 4NEC2 software [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.qsl.net/4nec2/>, свободный (дата обращения: 02.09.2023).

15. Lightweight perforated waveguide structure realized by 3-D printing for RF applications / G.L. Huang, S.G. Zhou, C.Y.D. Sim, T.H. Chio, T. Yuan // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2017. – Vol. 65, No. 8. – PP. 3897–3904.

**Нгуен Мань Туан**

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ)  
Томского государственного университета  
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)  
Эл. почта: [nguyen.t.2213-2022@e.tusur.ru](mailto:nguyen.t.2213-2022@e.tusur.ru)

**Алхадж Хасан Аднан Фаезович**

Аспирант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: [alhaj.hasan.adnan@tu.tusur.ru](mailto:alhaj.hasan.adnan@tu.tusur.ru)