

ОПТИМАЛЬНЫЕ РАЗРЕЖЕННЫЕ АНТЕННЫ С МИНИМАЛЬНОЙ МАССОЙ

М.Т. Нгуен, аспирант каф. ТУ;

А. Алхадж Хасан, м.н.с. НИЛ «БЭМС РЭС»

*Научный руководитель Т.Р. Газизов, д.т.н., доцент каф. ТУ
г. Томск, ТУСУР, nguuyen.t.2213-2022@e.tusur.ru*

Предложен новый модифицированный подход к созданию разреженных антенн, аппроксимированных проводной сеткой, на примере зеркальной антенны, которая моделировалась и была изготовлена ранее. Основная идея заключается в создании оптимальной проводной структуры, которая максимально повторяет пути тока в антенне, сохраняя её целостность при минимальной массе. Результаты этого подхода сравнивались с результатами, полученными ранее другими подходами, а также с результатами измерений. Сравнения показали, что, несмотря на то, что новый подход даёт уровень боковых лепестков антенны немного выше, чем при других подходах, он способен давать приемлемые результаты с меньшими вычислительными затратами и создавать структуры с меньшей массой, сохраняя при этом целостность структуры антенны, что снижает сложность ее изготовления.

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

В настоящее время существуют различные методы для моделирования антенн, например, метод конечных разностей во временной области (МКРВО) [1], метод конечных элементов (МКЭ) [2] и метод моментов (МоМ) [3]. Последний способен решать электромагнитные задачи с меньшими вычислительными затратами, чем у других методов, при сохранении приемлемой точности результатов [4]. На основе МоМ разработан подход к моделированию антенн, который основан на аппроксимации поверхности проводящей структуры антенны проводной сеткой [5]. Он использован при разработке другого подхода к моделированию и созданию разреженных антенн, названного аппроксимацией оптимальной токовой сеткой (АОТС) [6].

В результате применения АОТС можно получить эквивалентную структуру антенны в виде разреженной сетки, в которой исключены те провода, модуль тока которых меньше заданного уровня относительно максимального. Данный уровень называется допуском удаления элемента сетки (ДУЭС). Одним из недостатков применения АОТС к непечатаемым структурам антенн являются технические трудности,

возникающие при изготовлении полученных структур из-за наличия свободных (не соединенных между собой) проводов. Для устранения этого недостатка предложено несколько модификаций исходной аппроксимации, например, «соединяющая» АОТС (САОТС), описанная в работе [6]. Однако она оптимальна, если важно получить разреженную структуру, которая близка по своим характеристикам к исходной, но не для уменьшения массы, поскольку она восстанавливает много радиальных проводов для сохранения путей тока в структуре. Это влияет не только на вычислительные затраты при использовании полученной структуры при последующем моделировании, но и на массу изготовленной антенны в ее разреженной форме. Поэтому целью данной работы является рассмотрение новой АОТС, которая даёт соединённую проводную разреженную структуру с меньшей массой, чем при САОТС.

Предлагается модифицировать АОТС, исключая из проводной структуры антенны провода с модулем тока меньше максимального, умноженного на значение ДУЭС при максимально близком повторении пути тока в ней с меньшим количеством проводов. Этого можно достичь путем восстановления только тех проводов, которые необходимы для установления связи между свободным проводом и ближайшими к нему проводами в структуре. Исходя из этого, такую АОТС можно назвать использующей только ближайшие провода для соединения свободных проводов (СБАОТС).

СБАОТС будет проиллюстрирована на примере моделирования зеркальной антенны из работы [7] (рис. 1, *а*), проводной структурой (далее в тексте называемой исходной), представленной на рис. 1, *б*.

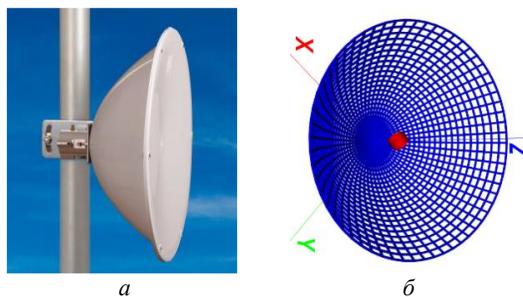


Рис. 1. Исследуемая зеркальная антенна [7] (*а*) и её эквивалентная проводная структура (*б*)

Проводная структура рефлектора зеркальной антенны построена из S участков сетки и T уровней, начиная от центра рефлектора. При построении участка сетки строятся два провода на каждом уровне.

При этом каждому радиальному проводу присваивается чётный номер, а концентрическому – нечётный. В результате количество проводов в каждом участке будет $2T$, а общее количество проводов для построения рефлектора равно $N_S = 2T * S$ (рис. 2, а). Далее после удаления проводов по АОТС СБАОТС ищет свободные провода и восстанавливает ближайшие к ним, чтобы сохранить целостность проводной структуры.

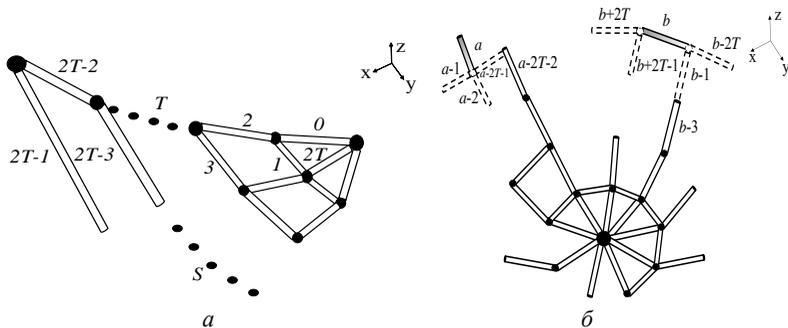


Рис. 2. Описание схемы построения структуры зеркальной антенны (а) и процесса восстановления проводов по СБАОТС (б)

Для проверки эффективности подхода СБАОТС сравнивались результаты её применения с результатами применения АОТС и САОТС к той же антенне, полученными в работе [6], при ДУЭС = 10% на частоте 5,9 ГГц (рис. 3).

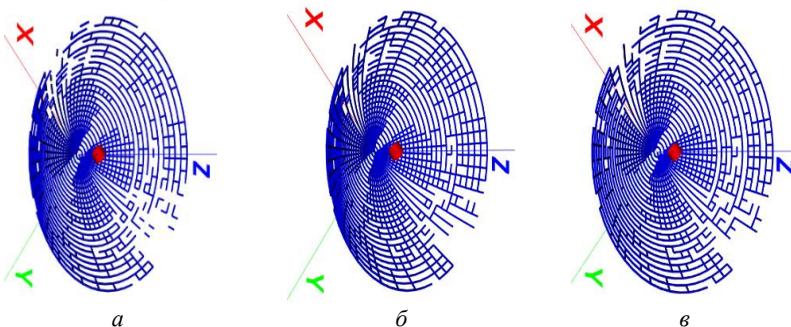


Рис. 3. Антенны, полученные после АОТС (а), САОТС (б) и СБАОТС (в)

Диаграммы направленности (ДН) антенны после СБАОТС сравнивались с ДН для исходной структуры и измеренными из [7] в плоскостях E и H (рис. 4). Они также сравнивались с полученными после АОТС и САОТС [6] (рис. 5). Из рис. 4 видно, что уровни боковых лобовых

пестков после СБАОТС выше, чем для исходной структуры, максимум на 10 дБ. Однако они остаются приемлемыми, поскольку главной задачей антенн такого типа является повышение излучения в основном направлении. Уровень боковых лепестков при СБАОТС также немного выше, чем при САОТС (см. рис. 5), но расхождения наблюдаются лишь при некоторых углах.

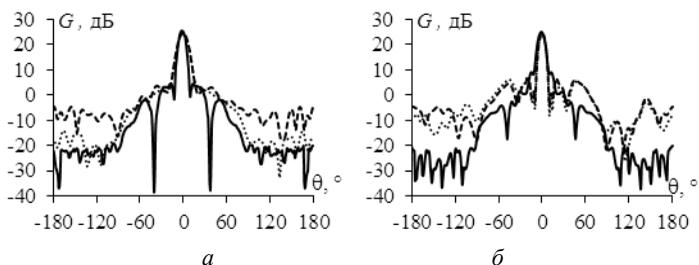


Рис. 4. ДН антенны, измеренные в [7] (—) и вычисленные для оригинальной [6] (···) и разреженной после СБАОТС (---) антенн, при ДУЭС=10% на частоте 5,9 ГГц в плоскостях E (а) и H (б)

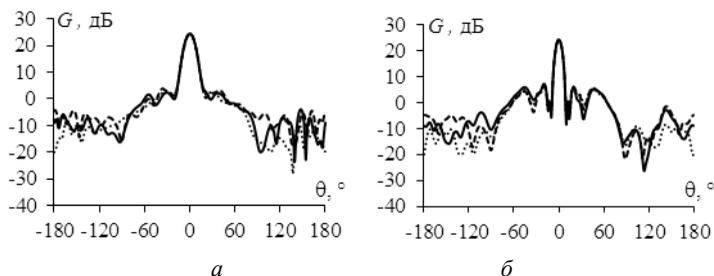


Рис. 5. ДН разреженных антенн после АОТС [6] (—), САОТС [7] (···) и СБАОТС (---) при ДУЭС=10% в E (а) и H (б) плоскостях

Первоначальное количество проводов для исходной структуры $N_S=3000$, после АОТС $N_A=2112$, САОТС – $N_C=2335$, а СБАОТС – $N_N=2166$. Основные затраты времени на решение СЛАУ (здесь методом Гаусса) пропорциональны третьей степени её порядка $O(N)^3$, а памяти – $O(N)^2$. Тогда уменьшение массы антенны в разгах будет N_S/N_X (где N_X – количество проводов для рассмотренной аппроксимации), памяти – $(N_S/N_X)^2$, а времени – $(N_S/N_X)^3$. Рассчитанные улучшения характеристик после предложенных аппроксимаций относительно исходной структуры представлены в таблице.

**Улучшение характеристик
после предложенных аппроксимаций относительно исходной структуры**

	Масса, раз	Память, раз	Время, раз
АОТС	1,42	2,02	2,87
САОТС	1,28	1,65	2,12
СБАОТС	1,39	1,92	2,66

В результате применения СБАОТС, предложенной здесь для создания разреженных антенн, даёт уровень боковых лепестков немного больше, чем САОТС. Но его результаты остаются приемлемыми, получаются с меньшими вычислительными затратами и дают меньшую массу антенн на 8,59%, чем САОТС, сохраняя при этом целостность структуры, что снижает сложность её изготовления. Таким образом, результаты показывают, что применение СБАОТС даёт более совершенные антенны по сравнению с АОТС и САОТС.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Yee K.S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1966. – Vol. 14, No. 3. – PP. 302–307.
2. Jin J.M. The Finite Element Method in Electromagnetics. – Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2014. – 876 p.
3. Харрингтон Р.Ф. Применение матричных методов к задачам теории поля // Труды Института инженеров по электронике и радиотехнике. – 1967. – № 2. – С. 5–19.
4. Газизов Т.Р. Система компьютерного моделирования сложных структур проводников и диэлектриков // Матер. Всерос. науч.-практ. конф., посвященной 40-летию ТУСУРа. – Томск: ТУСУР, 2002. – Т. 1. – С. 126–128.
5. On wire-grid representation for modeling symmetrical antenna elements / A. Alhaj Hasan, D.V. Klyukin, A.A. Kvasnikov, M.E. Komnatnov, S.P. Kuksenko // Symmetry. – 2022. – Vol. 14, No. 7. – P. 1354.
6. Wire-grid and sparse MoM antennas: past evolution, present implementation and future possibilities / A. Alhaj Hasan, T.M. Nguyen, S.P. Kuk-senko, T.R. Gazizov // Symmetry. – 2023. – Vol. 15, No. 2. – P. 378.
7. Jirous antennas direction for your waves [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://en.jirous.com/antenna-5ghz-parabolic/jrc-24DD_MIMO, свободный (дата обращения: 15.02.2023).