

## Секция 2

# ЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

### *ПОДСЕКЦИЯ 2.6*

#### ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

*Председатель – Заболоцкий А.М., зав. каф. СВЧиКР, д.т.н.;*  
*зам. председателя – Белоусов А.О., доцент каф. ТУ, к.т.н.*

УДК 621.396

#### **КОНИЧЕСКАЯ РУПОРНАЯ АНТЕННА, РАЗРЕЖЕННАЯ С ПОМОЩЬЮ СОЕДИНЁННОЙ АППРОКСИМАЦИИ ОПТИМАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ СЕТКОЙ**

*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, [nguyen.t.2213-2022@e.tusur.ru](mailto:nguyen.t.2213-2022@e.tusur.ru)*

Рассмотрено применение соединённой аппроксимации оптимальной токовой сеткой (САОТС) при моделировании и проектировании разреженных антенн на примере конической рупорной антенны по сравнению с обычной АОТС. Сравнение результатов, полученных этими и другими подходами, показало хорошую согласованность. Выявлено, что относительно метода конечных разностей во временной области, применение АОТС и САОТС способно дать приемлемые результаты с меньшими вычислительными затратами и меньшей массой антенн. Показано, что затраты при САОТС немного больше, чем при АОТС, но трудность изготовления и уровень боковых лепестков меньше.

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

Моделирование является одним из основных этапов проектирования антенн, способствующим получению оптимального конечного продукта с меньшими затратами. В ходе моделирования важно уменьшать затраты памяти и времени. Это зависит от используемого численного метода для решения электромагнитных задач [1]. Например, метод моментов (МоМ) часто превосходит остальные методы в требуемых затратах при сохранении точности результатов [2].

МоМ не прекращая развивается из-за простоты его алгоритма. Это позволяет предлагать на его основе новые подходы к моделированию антенн, один из которых представлен в [3]. Этот подход можно использовать для уменьшения вычислительных затрат за счёт аппроксимации поверхности проводящей структуры антенн проводной сеткой. Между тем он лежит в основе подхода, предложенного в [4] для моделирования разреженных антенн, под названием аппроксимации оптимальной токовой сеткой (АОТС). Кроме того, АОТС модифицировался также в [4], а полученный подход, названный соединённой АОТС (САОТС), сохраняет физические соединения проводов сетки, не разрывая пути тока в антенне, что уменьшает технические трудности при изготовлении разреженных антенн по сравнению с АОТС. САОТС использовалась только при моделировании простых структур антенн. Поэтому для её проверки и дальнейшего развития необходимо применять её к антеннам со сложными конструктивными поверхностями. Цель данной работы – верифицировать подход САОТС и оценить эффективность его работы на примере конической рупорной антенны.

Для достижения цели работы, сначала моделировалась с помощью АОТС коническая рупорная антенна из [5], изометрический вид которой представлен на рис. 1, а. Параметры антенны: диаметр регулярной части  $d = 30$  мм, максимальный диаметр нерегулярной части  $D = 61,76$  мм, высота регулярной части  $l_1 = 31,25$  мм, высота нерегулярной части  $l_2 = 12$  мм. Для возбуждения антенны использовался отрезок провода длиной  $l_d = 0,36\lambda$ , размещенный в центре пересечения регулярной и нерегулярной частей антенны. Радиус всех проводов сетки принят равным  $0,1$  мм. Общее количество проводов, используемых для аппроксимации поверхности антенны,  $N = 3600$ . На рис. 1, б представлена структура антенны, аппроксимированной проводной сеткой с помощью подхода из работы [3] (далее – исходная структура).

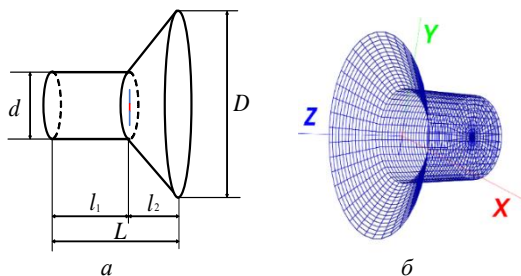


Рис. 1. Изометрический вид конической рупорной антенны (а) [5] и проводная сетка антенны по подходу [3] (б)

Диаграмма направленности (ДН) антенны, рассчитанная на частоте 8 ГГц, для исходной структуры сравнивалась с полученной методом конечных разностей во временной области (МКРВО) в работе [5]. Коэффициенты усиления (КУ) антенны вычислялись в плоскостях  $E$  и  $H$  (рис. 2). Затрачиваемое время на моделирование по подходу [3] составило 34,9 с, что в 1,15 раза быстрее, чем по МКРВО [5].

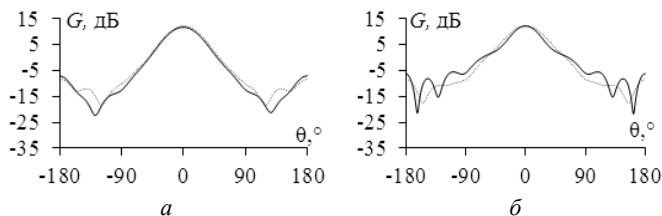


Рис. 2. ДН антенны для исходной (...) при [3] и при МКРВО [5] (—) в  $E$  ( $a$ ) и  $H$  ( $b$ ) плоскостях

Далее с помощью АОТС получена ДН направленности разреженной антенны. Здесь элементы матрицы тока нормировались относительно максимального модуля тока в проводах сетки [4]. Значения коэффициента, используемого при нормировке и называемого допуском удаления элемента сетки (ДУЭС), выбраны здесь в качестве примера 6 и 10%. Полученные разреженные антенны представлены на рис. 3,  $a$ ,  $b$ , а количество их проводов  $N_S = 2846$  при 6% и 2362 при 10%. ДН для разреженной антенны, используя АОТС при ДУЭС = 6 и 10% и при МКРВО из [5], сравнивались в плоскостях  $E$  и  $H$  (рис. 4).

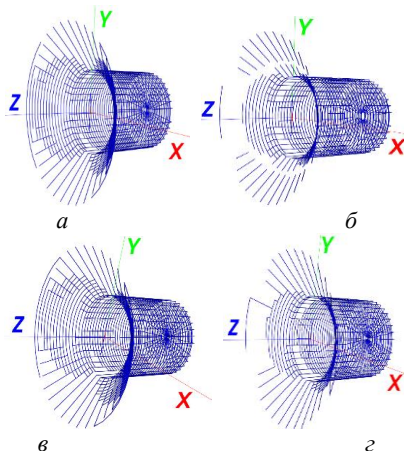


Рис. 3. Разреженные антенны при АОТС 6% ( $a$ ) и 10% ( $b$ ) и при САОТС 6% ( $e$ ) и 10% ( $z$ )

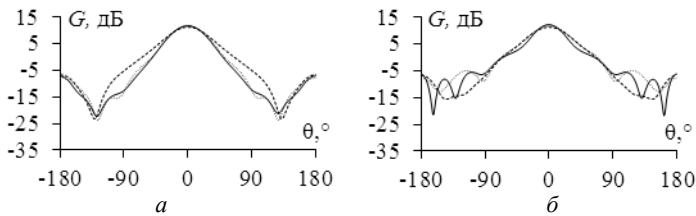


Рис. 4. ДН для разреженной антенны при АОТС 6% (...) и 10% (---) и при МКРВО в [5] (—) в  $E$  (а) и  $H$  (б) плоскостях

Видно, что с увеличением ДУЭС увеличивается расхождение результатов, но излучение в основном направлении остаётся приемлемым. Заметно, что уровень боковых лепестков для разреженной структуры при ДУЭС = 6% меньше, чем при МКРВО из [5]. В результате применения АОТС при ДУЭС 6 и 10% масса антенны уменьшилась в  $(N/N_S) = 1,26$  и  $1,52$  раза, память в  $(N/N_S)^2 = 1,60$  и  $2,32$  раза, а время на решения СЛАУ (здесь методом Гаусса) в  $(N/N_S)^3 = 2,02$  и  $3,54$  раза, соответственно. Затрачиваемое время на моделирование по АОТС при ДУЭС 6 и 10% составило  $22,04$  и  $13,93$  с, что в  $1,81$  и  $2,87$  раза быстрее, чем по МКРВО [5], соответственно.

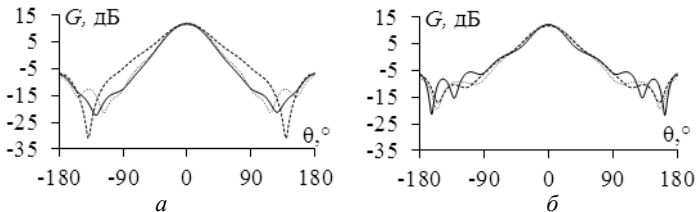


Рис. 5. ДН для разреженной антенны при САОТС 6% (...) и 10% (---) и при МКРВО [5] (—) в  $E$  (а) и  $H$  (б) плоскостях

Затем, используя САОТС, получены разреженные антенны при ДУЭС 6 и 10% (см. рис. 3,  $\varepsilon$  и  $\zeta$ ) с количеством их проводов  $N_S = 2916$  при 6% и  $2502$  при 10%. Их ДН в плоскостях  $E$  и  $H$  сравнивались с полученной при МКРВО из [5] (рис. 5). Для наглядности сравнены результаты, полученные при АОТС и САОТС (рис. 6). Видно, что расхождение результатов от МКРВО с увеличением ДУЭС при САОТС меньше, чем при АОТС. В результате применения САОТС при ДУЭС 6 и 10% масса антенны уменьшилась в  $(N/N_S) = 1,26$  и  $1,44$  раза, память в  $(N/N_S)^2 = 1,52$  и  $2,07$  раза, а время в  $(N/N_S)^3 = 1,88$  и  $2,98$  раза соответственно. Затрачиваемое время на моделирование по САОТС при ДУЭС 6 и 10% составило  $22,44$  и  $15,85$  с, что в  $1,78$  и  $2,52$  раза быстрее, чем по МКРВО [5], соответственно. Заметно, что уровень боковых лепестков, а также уровень нулей ДН для разреженных

антенн при САОТС меньше (до 10 дБ), чем при АОТС, с сохранением приемлемости результатов с увеличением ДУЭС, что даёт САОТС преимущество над АОТС по точности результатов моделирования и по лёгкости изготовления.

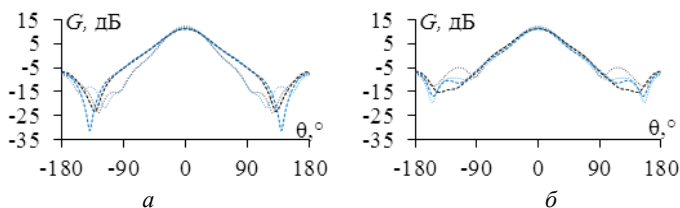


Рис. 6. ДН для разреженной антенны при АОТС 6% (---) и 10% (---) и при САОТС 6% (---) и 10% (---) в  $E$  (а) и  $H$  (б) плоскостях

Таким образом, в данной работе показана эффективность САОТС при моделировании разреженных антенн, по сравнению с АОТС, на примере конической рупорной антенны. Результаты, полученные этими подходами, сравнивались с полученными, используя МКРВО, и аппроксимацией поверхности проводящей структуры антенн проводной сеткой. Получена хорошая согласованность. Выявлено, что применения АОТС и САОТС способны дать приемлемые результаты с меньшими вычислительными затратами и меньшей массой антенн. Показано, что затраты при САОТС немного больше, чем при АОТС. Но при этом трудность изготовления и уровень боковых лепестков и нулей ДН меньше, чем при АОТС.

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

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Газизов Т.Р. Система компьютерного моделирования сложных структур проводников и диэлектриков // Матер. Всерос. науч.-практ. конф., посвященной 40-летию ТУСУРа, 2–4 октября 2002 г. – Томск: ТУСУР. – Т. 1. – С. 126–128.
2. Харрингтон Р.Ф. Применение матричных методов к задачам теории поля // Труды Института инженеров по электронике и радиотехнике. – 1967. – № 2. – С. 5–19.
3. Alhaj Hasan A. 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(7). – P. 1354.
4. Alhaj Hasan A. Wire-grid and sparse MoM antennas: past evolution, present implementation and future possibilities / A. Alhaj Hasan, D.V. Klyukin, A.A. Kvasnikov, M.E. Komnatov, S.P. Kuksenko // *Symmetry*. – 2023. – Vol. 15(2). – P. 378.
5. Shamshad F. Simulation comparison between HFSS and CST for design of conical horn antenna / F. Shamshad, M. Amin // *Journal of Expert Systems (JES)*. – 2012. – Vol. 1(4). – PP. 84–90.