

В.В. Торопов

Вычисление параметров рассеяния антенных решеток методом моментов

Исследован подход к моделированию параметров рассеяния (S -параметров) антенных решеток на основе метода моментов с использованием RWG-функций. Выполнено сравнение S -параметров, полученных для решетки из двух антенных элементов с помощью самостоятельно реализованного метода моментов и метода конечных разностей во временной области в САПР EMPro. Показано, что результаты согласуются.

Ключевые слова: антенная решетка, метод моментов, матрица рассеяния, S -параметры.

Антенные решетки (АР) играют значительную роль в современных системах связи, радиолокации и радионавигации. Предварительное моделирование АР в САПР позволяет исследовать и оптимизировать их параметры и характеристики. Одним из самых популярных численных методов, использующихся в САПР, является метод моментов (МоМ). Его суть заключается в замене проводников токами \mathbf{J} , которые находятся путем решения СЛАУ вида [1]

$$\mathbf{Z}\mathbf{J} = \mathbf{V}, \quad (1)$$

где \mathbf{Z} – матрица импедансов, \mathbf{V} – вектор воздействия.

Для формирования СЛАУ (1) АР дискретизируется треугольниками. Каждая пара треугольников образует RWG-функцию, суперпозиция которых описывает плотность тока на поверхности моделируемой АР.

Одним из важных параметров, который необходимо учитывать при проектировании АР, является матрица рассеяния (S -параметры), содержащая информацию о взаимовлиянии между антенными элементами (АЭ). Целью данной работы является исследование подхода к моделированию параметров рассеяния АР на основе решения МоМ с использованием RWG-функций.

Вычисление S -параметров

Для расчета S -параметров АР к каждому входящему в её состав АЭ подключается источник возбуждения (порт). В МоМ наиболее широко используемым источником возбуждения является бесконечно-тонкий возбуждающий зазор. При расчете S -параметров воздействие подается только на один активный порт, при этом остальные порты остаются пассивными, т.е. имеющими нулевую амплитуду воздействия, но нагруженными на опорный импеданс Z_g [2]. Для получения полной матрицы S -параметров производится многократное решение СЛАУ (1) при поочередном изменении номера активного порта.

Включение импеданса Z_g в бесконечно-тонкий возбуждающий зазор осуществляется, как показано на рис. 1. При этом напряжение, приложенное к зазору, выражается как [3]

$$V = V_{in} - I_m l_m Z_g, \quad (2)$$

где V_{in} – амплитуда источника напряжения, $I_m l_m$ – полный ток, протекающий через общее ребро двух треугольников, имеющее длину l_m .

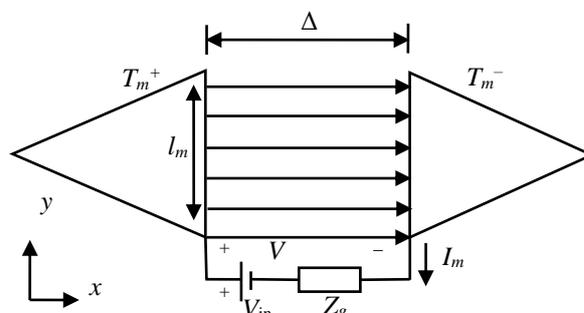


Рис. 1. Модель бесконечно-тонкого возбуждающего зазора между двумя треугольниками, включающая опорный импеданс

Тогда соответствующий зазору m элемент вектора возбуждения \mathbf{V} вычисляется как

$$v_m = l_m (V_{in} - I_m l_m Z_g). \quad (3)$$

При этом m -я строка СЛАУ записывается как

$$\sum_{n=1}^N z_{mn} I_n = l_m (V_{in} - Z_g I_m l_m), \quad (4)$$

где N – число столбцов \mathbf{Z} , а её элемент z_{mn} с учетом опорных импедансов в портах определяется как

$$z_{mn} = \begin{cases} z_{mn} + Z_g l_m^2, & m = n, \\ z_{mn}, & m \neq n. \end{cases} \quad (5)$$

В результате при использовании модели бесконечно-тонкого возбуждающего зазора, включающей опорный импеданс, требуется изменение процедуры расчета диагональных элементов матрицы \mathbf{Z} .

Пусть портам i и j АР соответствуют общие ребра между треугольниками, имеющие номера m и k . При этом порт j является активным, а оба порта нагружены одинаковым опорным импедансом Z_g . Тогда с учетом (2)–(5) формула для расчета S -параметров принимает вид

$$S_{ij} = \frac{v_m}{v_k} = \frac{l_m (V_m - I_m l_m Z_g)}{l_k (V_k - I_k l_k Z_g)} = \frac{-I_m l_m^2 Z_g}{l_k (V_k - I_k l_k Z_g)}. \quad (6)$$

Тестовое моделирование

Описанный подход к моделированию S -параметров реализован в среде математических вычислений GNU Octave [4]. Для тестирования реализованного подхода была выбрана упрощенная модель АР, в качестве элемента которой использован плос-

кий симметричный вибратор шириной $w = 20$ мм и длиной $l = 2$ м. Число АЭ принято равным 2, а расстояние между их центрами – $d = 1$ м. В возбуждающие зазоры обоих АЭ подключались одинаковые опорные импедансы $Z_g = 50$ Ом. Схематичное изображение АР представлено на рис. 2.

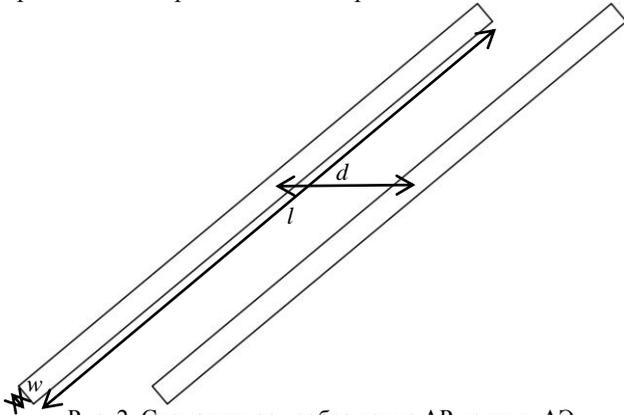


Рис. 2. Схематичное изображение АР из двух АЭ

Для получения расчетной сетки АР использовалась программа Gmesh [5]. Максимальная длина ребер расчетной сетки l_{\max} составляла 20 мм. Для корректного моделирования симметричного вибратора длина бесконечно-тонкого возбуждающего зазора задавалась равной ширине вибратора w , как показано на рис. 3.

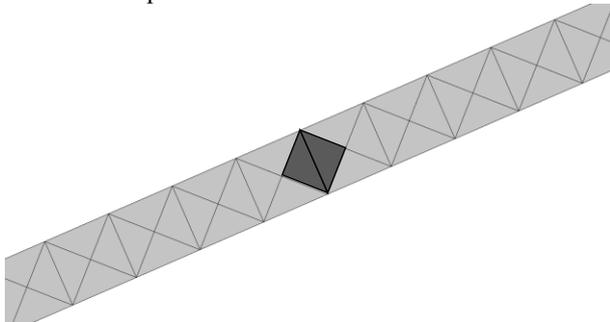


Рис. 3. Фрагмент треугольной поверхностной сетки АЭ вблизи бесконечно-тонкого возбуждающего зазора при $l_{\max} = 20$ мм

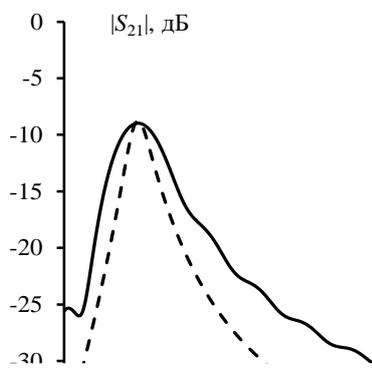


Рис. 4. Частотные зависимости $|S_{21}|$ между двумя симметричными полуволновыми вибраторами: FDTD (—) и МоМ (----)

При тестировании сравнивались результаты, полученные в GNU Octave и в САПР EMPro, основанной на методе конечных разностей во временной

области (FDTD). Вычисленные модули и аргументы коэффициентов передачи S_{21} и отражения S_{11} в диапазоне частот от 50 до 250 МГц приведены на рис. 4–7. Видно, что $|S_{21}|$ и $|S_{11}|$ согласуются. Максимальное расхождение между FDTD (EMPro) и самостоятельно реализованным МоМ не превышает 5 дБ. При этом наблюдаются различия по аргументам.

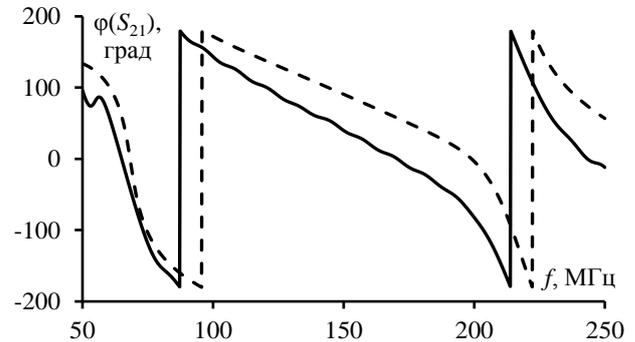


Рис. 5. Частотные зависимости аргумента S_{21} между двумя симметричными полуволновыми вибраторами: FDTD (—) и МоМ (----)

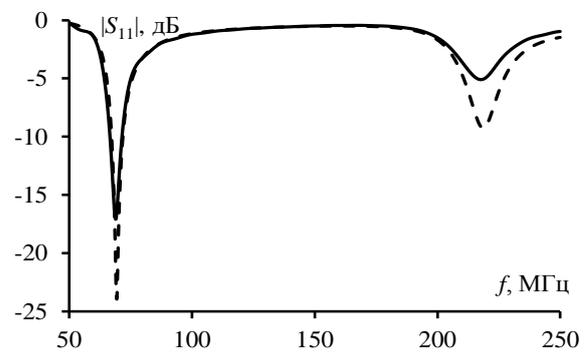


Рис. 6. Частотные зависимости $|S_{11}|$ симметричного полуволнового вибратора: FDTD (—) и МоМ (----)

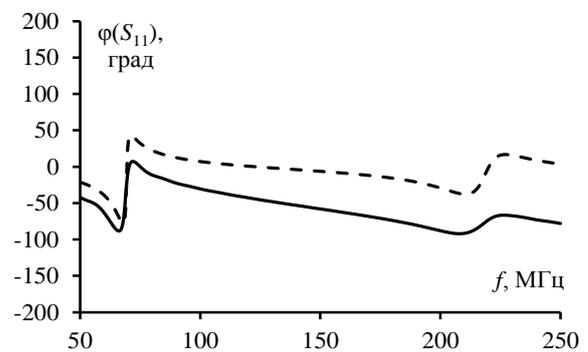


Рис. 7. Частотные зависимости аргумента S_{11} симметричного полуволнового вибратора: FDTD (—) и МоМ (----)

Заключение

Описан подход к моделированию S -параметров АР на основе МоМ с использованием RWG-функций. Выполнена программная реализация этого подхода в среде GNU Octave. Используя реализованный подход и САПР EMPro, выполнены тестовые вычисления S -параметров для АР из двух симмет-

ричных вибраторов. Модули полученных S -параметров согласуются, при этом наблюдаются различия по аргументам.

В результате описанная в работе методика может быть адаптирована и использована для вычисления S -параметров многопортовой АР, состоящей из АЭ произвольной формы. В дальнейшем планируется её применение к более сложным АР.

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

Литература

1. Rao S. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape / S. Rao, D. Wilton, A. Glisson // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 1982. – Vol. 30, No. 3. – PP. 409–418.

2. Антенны и устройства СВЧ / Под ред. Д.И. Воскресенского. – М.: Радиотехника, 2006. – 376 с.

3. Gibson W.C. The method of moments in electromagnetics. – Boca Raton: Chapman & Hall / CRC, 2008. – 272 p.

4. GNU Octave [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://octave.org>, свободный (дата обращения: 10.09.2023).

5. Gmsh – Официальный сайт Gmsh [Электронный ресурс]: GMSH. – URL: <https://gmsh.info/>, свободный (дата обращения: 10.09.2023).

Торопов Владимир Валериевич

Студент каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧКР) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: vladimirtoropov516@gmail.com