

## О точности расчета характеристик антенны типа «бабочка» методом моментов

Д.В. Клюкин, А. Алхадж Хасан, А.А. Квасников

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

**Аннотация:** в работе выполнено сравнение точности расчета характеристик антенны типа «бабочка» с использованием метода моментов и двух подходов к аппроксимации её поверхности совокупностью проводов и треугольников. Для валидации результатов использован метод конечных разностей во временной области. На примере антенны типа «бабочка» (bow-tie), показано, что аппроксимация её поверхности проводами позволяет получить более точные результаты.

**Ключевые слова:** метод моментов, проводная сетка, антенна типа «бабочка», триангуляция проводящей поверхности

### 1. Введение

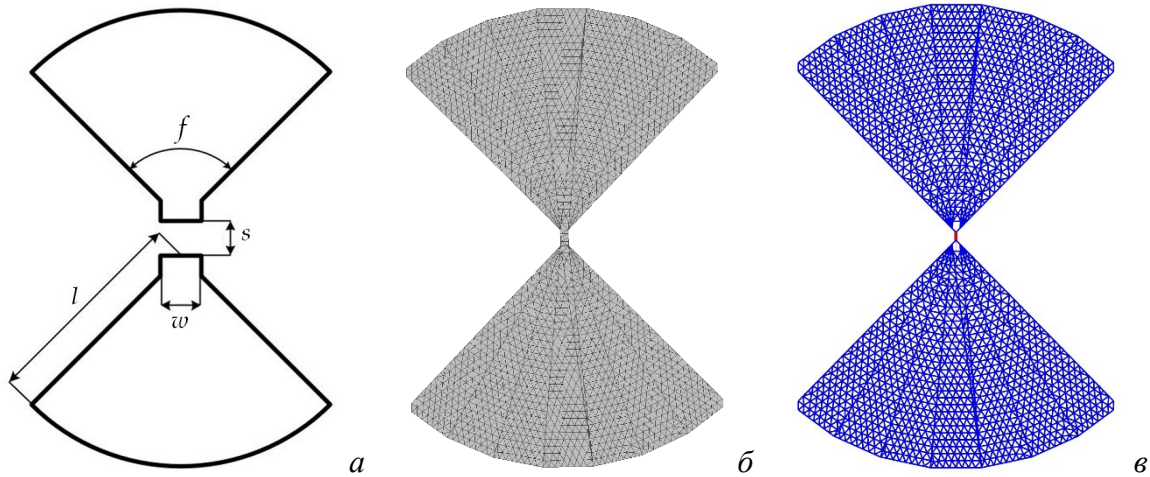
При моделировании антенн с помощью метода моментов (МоМ) [1], аппроксимация их проводящих поверхностей выполняется совокупностью проводов [2] или плоских геометрических фигур, как правило, треугольников [3]. Много работ посвящено исследованию эффективности этих подходов [4, 5]. При этом их развитие не прекращается [6]. На основе этих подходов разработаны два программных модуля: Wire-Grid [7] и Triangle-Grid [8]. Первый отличается меньшими вычислительными затратами, а второй – точностью при моделировании антенн со сложной геометрией. Использование совокупности проводов для описания антенн со сложной геометрией возможно только за счёт автоматизированного генератора сетки, что, помимо прочего, также экономит время на моделирование. Предпринималось много попыток создать такой генератор сетки. Например, в программе NEC реализована возможность аппроксимации поверхностей структур со сложной геометрией [9]. Однако этот инструментариум оказался сложным в использовании и не нашел широкого применения.

В работе [10] предложен генератор сетки, позволяющий представить совокупность ребер треугольников совокупностью проводов. Этот генератор, интегрированный в виде субмодуля в Wire-Grid, позволяет автоматически построить модель из проводов для любой структуры на основе треугольной сетки, сгенерированной Triangle-Grid. Этот субмодуль действует как интерфейс между двумя модулями и позволяет передавать конфигурации сеток между ними. Такая интеграция устраняет ручную работу по построению проводной сетки и уменьшает вероятность ошибок при создании геометрических моделей антенн. Однако эффективность использования этого генератора на данный момент не была оценена. Поэтому цель данной работы – сравнение результатов, полученных в Wire-Grid с использованием генератора сетки, Triangle-Grid и метода конечных разностей во временной области (МКРВО), на примере моделирования антенны типа «бабочка» (bow-tie).

### 2. Подготовка модели и вычислительные результаты

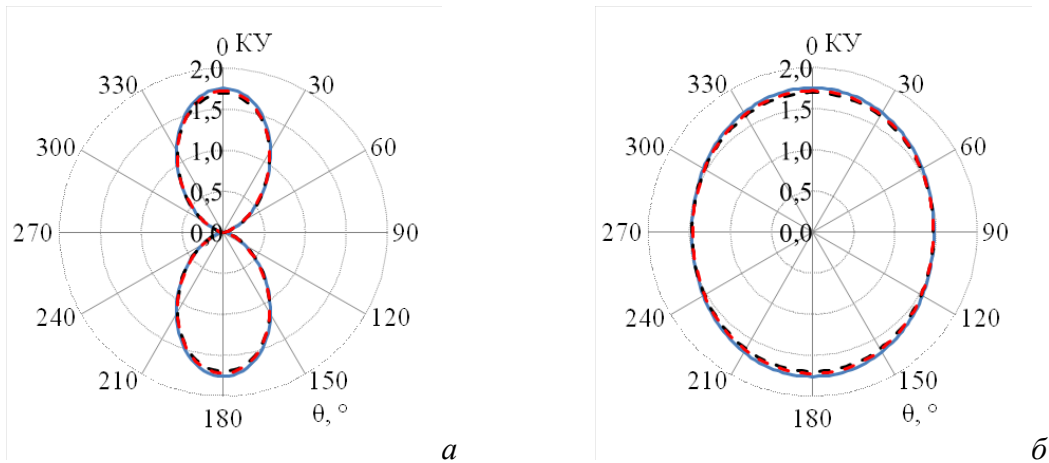
Использована модель антенны типа «бабочка» со следующими параметрами:  $w = 4,997$  мм,  $l = 146,2$  мм,  $s = 4,997$  мм,  $f = 87^\circ$  (рисунок 1а). Моделирование выполнялось на частотах 0,5, 1 и 1,5 ГГц в Triangle-Grid и Wire-Grid с помощью сетки,

импортированной из Triangle-Grid. Результаты сравнивались с полученными МКРВО в САПР EMPro. Для дискретизации модели антенны во всех программных средствах использовались ячейки размером  $\lambda/40$  (рисунок 1б, в). Каждое ребро треугольника в модели проводной сетки, полученной на максимальной частоте, было представлено одним проводом радиусом 1 мм и одним сегментом (рисунок 1в). Использованы разные типы портов возбуждения, расположенных в зазоре антенны с разностью потенциалов 1 В. В Triangle-Grid использован порт из работы [8], в EMPro – дискретный порт, а в Wire-Grid – провод радиусом 0,5 мм. Все результаты получены на одной вычислительной машине.

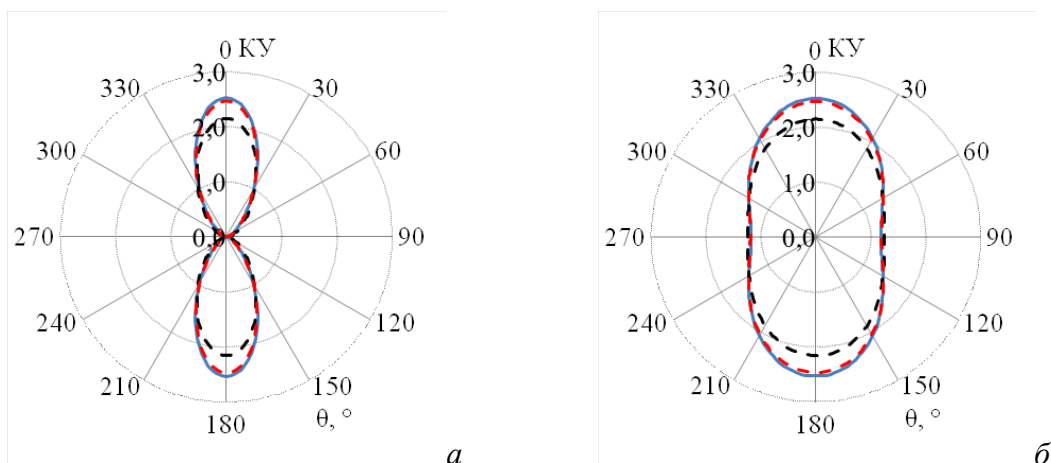


**Рисунок 1.** Модель антенны типа «бабочка»: вид сверху (а) и расчетная сетка в Triangle-Grid (б) и Wire-Grid (в).

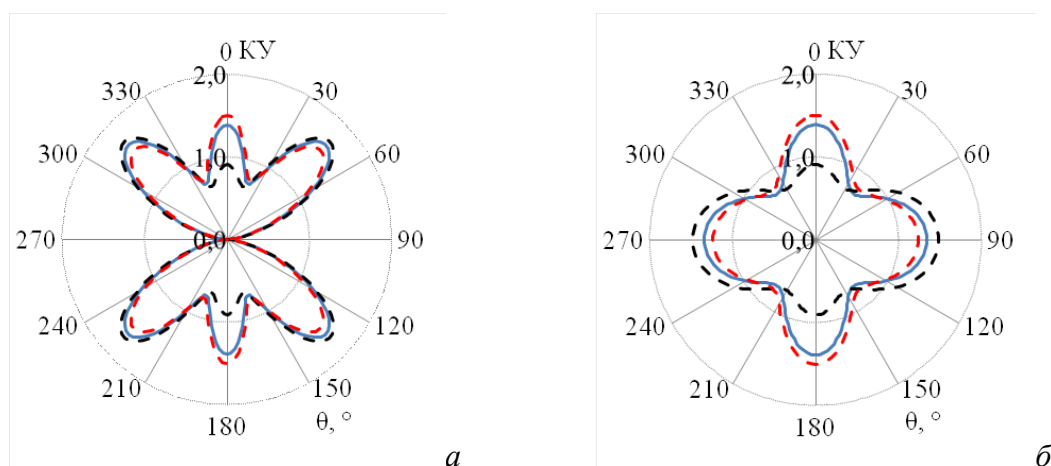
На рисунках 2–4 приведены значения коэффициента усиления (КУ), рассчитанные в плоскостях  $E$  и  $H$  на частотах 0,5, 1 и 1,5 ГГц соответственно. Видно, что оба модуля дали близкие к EMPro результаты.



**Рисунок 2.** КУ антенны типа «бабочка» на частоте 0,5 ГГц в плоскостях  $E$  (а) и  $H$  (б): Triangle-Grid (---), Wire-Grid (-.-) и EMPro (—)



**Рисунок 3.** КУ антенны типа «бабочка» на частоте 1 ГГц в плоскостях  $E$  (а) и  $H$  (б): Triangle-Grid (---), Wire-Grid (-.-.-) и EMPro (—)



**Рисунок 4.** КУ антенны типа «бабочка» на частоте 1,5 ГГц в плоскостях  $E$  (а) и  $H$  (б): Triangle-Grid (---), Wire-Grid (-.-.-) и EMPro (—)

В таблицу 1 сведены полученные максимальные значения КУ ( $KU_{\text{макс}}$ ) и их относительные отклонения (ОО) от результатов EMPro. Как видно, максимальное отклонение не превышает 8% при использовании Wire-Grid и 15% – Triangle-Grid. В таблицу 2 сведены рассчитанные значения входного импеданса антенны, их ОО от результатов EMPro и общее число используемых базисных функций  $N$ . Как видно, Wire-Grid дает результаты, отличающийся на 4% от EMPro, а Triangle-Grid – 7%.

В таблицу 3 сведены вычислительные затраты, требуемые для расчёта характеристик антенны, и их ОО от затрат EMPro. Видно, что оба модуля позволили за меньшее время получить требуемые результаты, но с большими затратами машинной памяти, особенно Wire-Grid.

Полученные результаты подтверждают, что использование генератора сетки в Wire-Grid экономит время моделирования антенн со сложной геометрией, но за счет избыточного увеличения числа проводов. Кроме того, проводная модель при относительно небольшом числе базисных функций может эффективно заменить исходную модель.

**Таблица 1.** Максимальные значения КУ антенны и их ОО от EMPro

Программное средство	Значение	0,5 ГГц		1 ГГц		1,5 ГГц	
		<i>E</i>	<i>H</i>	<i>E</i>	<i>H</i>	<i>E</i>	<i>H</i>
Wire-Grid	KY <sub>макс</sub>	1,72	1,72	2,47	2,47	1,56	1,5
Triangle-Grid	KY <sub>макс</sub>	1,7	1,7	2,15	2,15	1,71	1,49
EMPro	KY <sub>макс</sub>	1,76	1,76	2,53	2,53	1,65	1,39
Wire-Grid	ОО, %	2	2	2	2	5	8
Triangle-Grid	ОО, %	3	3	15	15	4	7

**Таблица 2.** Значения входного импеданса антенны и их ОО от EMPro

Программное средство	Частота, ГГц	Импеданс, Ом	ОО, %	<i>N</i>
EMPro	0,5	127,5+j122,1	–	94068
	1	214,7-j71,9	–	224640
	1,5	160,4+j43,6	–	366336
Wire-Grid	0,5	127,4+j120,1	0,82	5427
	1	228,5-j52,5	3,55	5427
	1,5	158,1+j54,8	0,67	5427
Triangle-Grid	0,5	131,3+j120,8	1,07	671
	1	229,0-j71,4	5,94	2489
	1,5	173,5+j38,8	6,96	5197

**Таблица 3.** Затраты для расчёта характеристик антенны и их ОО от EMPro

Программное средство	Частота, ГГц	Память, Гб	ОО (память), %	Время, мс	ОО (время), %
EMPro	0,5	≈0,08	–	12000	–
	1	≈0,21	–	34000	–
	1,5	≈0,30	–	53000	–
Wire-Grid	0,5	≈1,47	1738	10723	10,64
	1	≈1,47	600	10824	68,20
	1,5	≈1,47	390	10970	79,30
Triangle-Grid	0,5	≈0,12	50	473	96,06
	1	≈0,21	0	5699	83,23
	1,5	≈0,54	80	24039	54,64

### 3. Заключение

В работе оценена точность расчёта характеристик антенны типа «бабочка» (bow-tie) с использованием модулей Triangle-Grid и Wire-Grid, основанных на методе моментов. Модули отличаются способом аппроксимации поверхности антенны. Первый использует совокупность треугольников, а второй – проводов. При моделировании в Wire-Grid использован генератор проводной сетки на основе импортированной из Triangle-Grid. Для валидации результатов модулей использован МКРВО, реализованный в САПР EMPro. Показано, что оба модуля дают приемлемые результаты, согласующиеся с полученными в EMPro. При этом Wire-Grid позволил получить более близкие к EMPro значения входного импеданса антенны, по всей видимости, из-за использования генератора сетки. Поэтому его использование открывает новые возможности моделирования антенн со сложной геометрий при использовании методом моментов и проводной сетки для аппроксимации их

поверхностей, что было ранее затруднительно.

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

#### Список литературы

1. Balanis C. A. Advanced engineering electromagnetics. – John Wiley & Sons, 2012.
2. Harrington R. F. Matrix methods for field problems //Proceedings of the IEEE. – 1967. – Т. 55. – №. 2. – С. 136-149.
3. Rao S., Wilton D., Glisson A. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape //IEEE Transactions on antennas and propagation. – 1982. – Т. 30. – №. 3. – С. 409-418.
4. Newman E., Pozar D. Considerations for efficient wire/surface modeling //IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1980. – Т. 28. – №. 1. – С. 121-125.
5. Peng J., Balanis C. A., Barber G. C. NEC and ESP codes: guidelines, limitations, and EMC applications //IEEE transactions on electromagnetic compatibility. – 1993. – Т. 35. – №. 2. – С. 124-133.
6. Ferguson T. R. Efficient solution of large moments problems: wire grid modeling criteria and conversion to surface currents //The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES). – 1988. – С. 55-81.
7. Alhaj Hasan A. et al. On Wire-Grid Representation for Modeling Symmetrical Antenna Elements //Symmetry. – 2022. – Т. 14. – №. 7. – С. 1354.
8. Квасников А. А. и др. Система компьютерного моделирования антенн методом моментов //Системы управления, связи и безопасности. – 2022. – №. 1. – С. 49-66.
9. Fourie A. P. C., Nitch D. C., Givati O. A complex-body structure interpolation and gridding program (SIG) for NEC //IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 1994. – Т. 36. – №. 3. – С. 85-89.
10. Зиновьев К. Е., Квасников А. А., Алхадж Хасан А. Разработка функционала импорта произвольных геометрических структур в системе TALGAT // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2022. – № 1-1. – С. 259-262