

# Разработка антенн малых электрических размеров с проволочными элементами конструкции

**Сегодня антенны малых электрических размеров вызывают большой интерес в научном мире, а при их исследовании используют самые современные вычислительные мощности. В статье описаны достижения в области разработки одного из видов таких антенн — с проволочными элементами конструкции.**

Владимир ЛИТУН

## Антенны малого и предельного электрического размера

Антенны предельно малых электрических размеров, с конца 1990-х оказавшиеся предметом изучения для многих специалистов, и сегодня привлекают внимание новых энтузиастов. Однако этому предшествовал долгий период затишья, наступивший после первых работ 1940-х годов и интенсивных исследований в 1960-х [1]. Активное возобновление интереса к данной тематике связано со многими факторами. Среди них можно выделить сугубо научный интерес к уточнению минимально достижимого размера антенн, развитие новых технологических возможностей, существенный прогресс в области прикладной вычислительной электродинамики и методов оптимизации, а также значительное возрастание доступных исследователям вычислительных мощностей.

В последнее десятилетие достигнуты заметные успехи в области исследования и разработки антенн предельно малого размера. Это в первую очередь уточнение минимального объема, который может занимать антенна, обладая при этом приемлемым уровнем согласования и малыми потерями [2, 3, 4]. Во-вторых, появилось множество конструкций антенн, реализующих принцип использования минимального объема [5, 6, 7]. В-третьих, ряд новых конструкций основан на использовании искусственных сред, включая структуры с запрещенной зоной. Таким образом, из достаточно узкой и специфичной задачи выросла многообразная и разноплановая ветвь развития антенной техники. Более подробно с данной тематикой можно ознакомиться в обзоре [8, 9] и монографиях [1, 10] по электрически малым антеннам.

Предлагаемые в публикациях конструкции малых антенн можно разделить по технологии изготовления основных элемен-

тов на полосковые, включая многослойные и трехмерные, и на проволочные. Первые, безусловно, хороши при крупносерийной реализации физически малых антенн, но одновременно достаточно сильно ограничивают выбор форм и пространственного расположения составных частей конструкции. Вторые менее технологичны в сантиметровом и миллиметровом диапазонах волн, но обладают большими возможностями по заполнению объема, занимаемого антенной, и могут создаваться без использования диэлектриков, что особенно важно для космической отрасли. Возможны варианты первоначальной отработки структуры антенны в проволочном виде с последующим преобразованием в полосковую конструкцию.

При проектировании антенн наиболее популярной сегодня является концепция разработки и оптимизации конструкции на основе результатов электродинамического моделирования. Алгоритмы анализа, включая коммерческие реализации строгих методов, заслуженно признанные специалистами отрасли в качестве надежных и достоверных инструментов, имеют естественные ограничения в использовании. Это обусловлено следующими факторами: применимость реализованного метода прикладной электродинамики, наличие в модели упрощений и приближений, принципиальные возможности качественной дискретизации исходной геометрии, а также допустимые затраты времени и доступная мощность вычислительных ресурсов. Результаты качественного сравнения методов прикладной вычислительной электродинамики для антенн различных типов зависят в первую очередь от сложности структуры, ее электрического размера и полосы анализируемых частот, поэтому разработчик при наличии в его распоряжении нескольких инструментов может выбирать из них наиболее подходящий и эффективный в каждом конкретном случае.

Как ни странно, но при проектировании сложных объемных проволочных конструкций антенн электрически малых размеров выбор оптимального средства моделирования представляет значительную сложность по сравнению с полосковыми аналогами. Алгоритмы и соответствующие прикладные программы для анализа структур, состоящих из отрезков прямолинейных проводников, диаметр которых много меньше длины волны и значительно меньше длины единичного сегмента, исторически появились одними из первых. Каждый сегмент проводника в таком случае характеризуется только продольной составляющей вектора тока, что и является основной причиной простоты реализации подобных вычислительных методов. Естественное ограничение — необходимость дискретизации модели при заданном сечении проводника сегментами не менее 3 диаметров, но и не более 0,125 длины волны на частоте моделирования. Для малых антенн, чаще всего содержащих и короткие, и криволинейные элементы конструкции, это становится существенным ограничением. Применение же в данном случае методов с полной дискретизацией поверхностей или всего анализируемого объема сопряжено со значительным повышением вычислительной сложности задачи. В статье предлагается обзор возможностей современных прикладных программ для моделирования проволочных антенн малых электрических размеров на примере практических конструкций различного типа.

## Проволочные структуры с малыми радиусами изгиба проводников

Одним из наиболее распространенных путей реализации конструкции антенны минимального объема, принятых научным сообществом, является использование по-

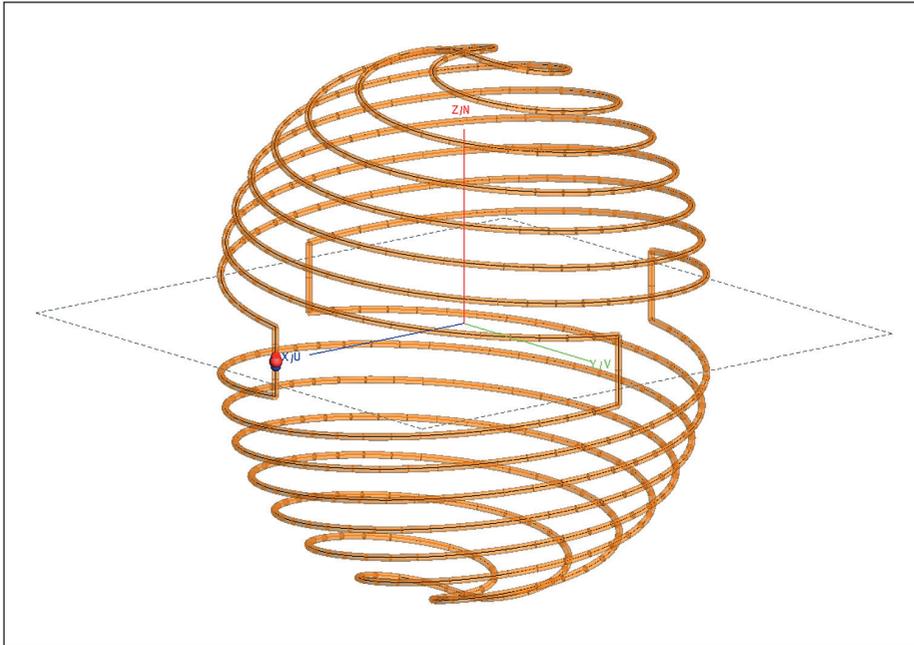


Рис. 1. Модель сферического диполя в Altair FEKO 14

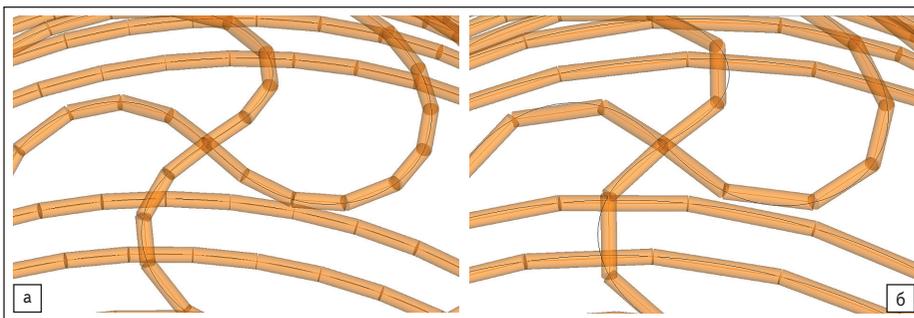


Рис. 2. Аппроксимация геометрии модели сферического диполя прямолинейными сегментами: а) длина 42,8 мм (8 радиусов сечения); б) длина 85,6 мм (16 радиусов сечения)

Таблица 1. Основные результаты для классической линейной сегментации

в единицах радиуса сечения	Заданная длина классических проволочных сегментов разбиения		Центральная рабочая частота $f_p$ , МГц / относительное смещение $f_p$ от минимума $\Delta_f$ , %	Количество элементов разбиения в модели / доля сегментов с длиной более 0,9 от заданной, %
	абсолютное значение, мм			
7	37,5		30,005/-	681/>95
8	42,8		30,025/0,067	593/>95
10	53,7		30,07/0,217	479/>95
10*	53,7		30,052/0,157	511/>65
12	64,2		30,126/0,403	399/>95
12*	64,2		30,11/0,35	415/>85
16	85,6		30,251/0,82	303/>90
16*	85,6		30,175/0,567	343/>40

\*При разбиении включена функция автоматического уплотнения сетки.

Таблица 2. Результаты анализа с использованием криволинейных элементов

в единицах радиуса сечения	Заданная длина криволинейных проволочных сегментов разбиения		Центральная рабочая частота $f_p$ , МГц / относительное смещение $f_p$ от минимума $\Delta_f$ , %	Количество элементов разбиения в модели / доля сегментов с длиной более 0,9 от заданной, %
	абсолютное значение, мм			
7	37,5		29,946/-	681/>95
8	42,8		29,948/0,007	593/>95
10	53,7		29,955/0,03	479/>95
12	64,2		29,956/0,033	399/>90
16	85,6		29,961/0,05	303/>90
20	107		29,966/0,067	247/>90
25	133,8		29,971/0,083	199/>85
30	160,5		29,980/0,114	167/>80
30*	160,5		29,978/0,107	183/>65
40	214		30,001/0,184	131/>75
40*	214		29,987/0,137	143/>40
50	267,5		30,015/0,23	111/>65
50*	267,5		30,004/0,194	119/>50
60	321		30,073/0,424	95/>60
60*	321		30,048/0,341	103/>30
70	374,5		30,245/0,998	79/>60
70*	374,5		30,085/0,464	95/>20

\*При разбиении включена функция автоматического уплотнения сетки.

верхности сферы заданного радиуса для расположения на ней токопроводящих элементов [1, 10, 11]. В качестве первой антенны для рассмотрения выберем сферический диполь [10, 11], плечи которого представляют собой соединенные прямолинейными участками проводника встречно направленные четырехзаходные спирали на поверхности сферы, причем запитка осуществляется в центре соединения одной из пар ветвей. Более известен близкий вариант исполнения монополя [12], но он в большей степени является инженерным решением, а сферический диполь удобен для теоретических изысканий по определению предельного размера антенн.

В соответствии с [11], для обеспечения наилучшего согласования на частоте около 30 МГц требуется сферический диполь с максимальным габаритом 791,6 мм и диаметром сечения проводника 10,7 мм. Количество витков на прилагаемой к описанию иллюстрации составляет 1,75. На основании этих данных была построена модель в программном пакете Altair FEKO 14 [13] (рис. 1), одной из особенностей которого является возмож-

ность применения криволинейных элементов разбиения для проводящих поверхностей и проволочных структур [14].

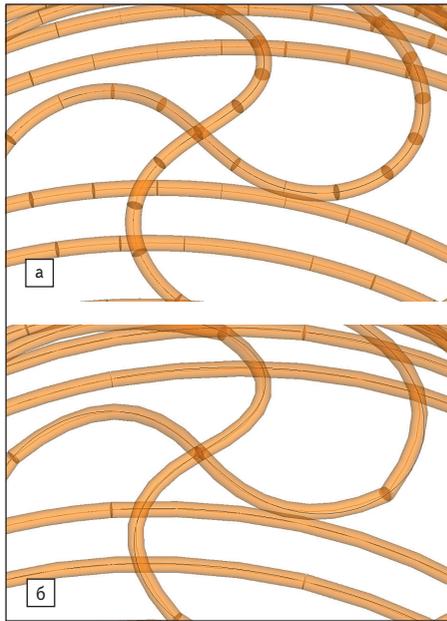
При анализе модели использовались варианты прямолинейных и криволинейных сегментов разбиения длиной от 7 радиусов проводника с увеличением до тех пор, пока геометрия не начинает претерпевать значительные искажения при дискретизации или смещении точки наилучшего согласования становиться больше ширины рабочей полосы частот, которая в данном случае составляет 0,56% по уровню модуля коэффициента отражений  $-10$  дБ. Также была предусмотрена возможность автоматического уплотнения сетки для отдельно отмеченных случаев. При оценке одним из наиболее важных параметров являлась частота, на которой достигается минимум коэффициента отражений по входному сосредоточенному порту с сопротивлением 50 Ом. В таблице 1 приведены основные результаты для классической линейной сегментации.

К основным выводам из полученных данных следует отнести возрастание частоты наилучшего согласования с удлинением сегмен-

тов. Это обусловлено укорочением эффективной длины ветвей спирали, поскольку более длинные элементы разбиения хуже аппроксимируют их форму. На рис. 2 можно сравнить качество аппроксимации геометрии самого сложного участка модели (у точки стыковки ветвей спирали) при разбиении прямыми сегментами с длинами 42,8 и 85,6 мм.

При достижении длины элемента разбиения 85,6 мм даже в случае включения функции уплотнения сетки с минимальным воздействием (хотя при таком варианте доля участков с длиной не короче 0,9 от заданной уже составляет менее 50%) геометрия заметно искажается, а рабочая полоса частот уже не пересекается с полосой при минимальном разбиении.

В процессе анализа с использованием криволинейных элементов применены аналогичные параметры и критерии, полученные результаты представлены в таблице 2.



**Рис. 3.** Аппроксимация геометрии модели сферического диполя криволинейными сегментами: а) длина 42,8 мм (8 радиусов сечения); б) длина 321 мм (60 радиусов сечения)

Приведенные результаты наглядно демонстрируют преимущества нового варианта аппроксимации криволинейных проволочных структур, который теперь доступен в Altair FEKO 14.0:

- 1) аналогичное относительное возрастание частоты наилучшего согласования при криволинейном разбиении наблюдается при длине сегмента 321 мм (60 радиусов сечения) против 64,2 мм (12 радиусов сечения) при прямолинейном — количество сегментов модели отличается в 4 раза;
- 2) значительное искажение заданной геометрии модели во время аппроксимации происходит при длине криволинейных сегментов 374,5 мм (70 радиусов сечения) против 85,6 мм (16 радиусов сечения) для прямолинейных;
- 3) криволинейное разбиение позволило обеспечить аппроксимацию (учет их эффективной длины и, как следствие, определение частоты наилучшего согласования) с недоступной для аппроксимации прямолинейными сегментами точностью — наименьшие значения для обоих случаев разнесены примерно на половину рабочей полосы частот.

Изменение качества геометрии модели при дискретизации с различной длиной криволинейных сегментов можно проиллюстрировать, визуально сопоставив крайние из рассматриваемых вариантов длин (рис. 3).

Таким образом, наглядно по результатам сопоставления качественных характеристик показано, что, во-первых, криволинейное разбиение обладает большей предсказуемостью отклонения результатов анализа при варьировании длины сегментов,

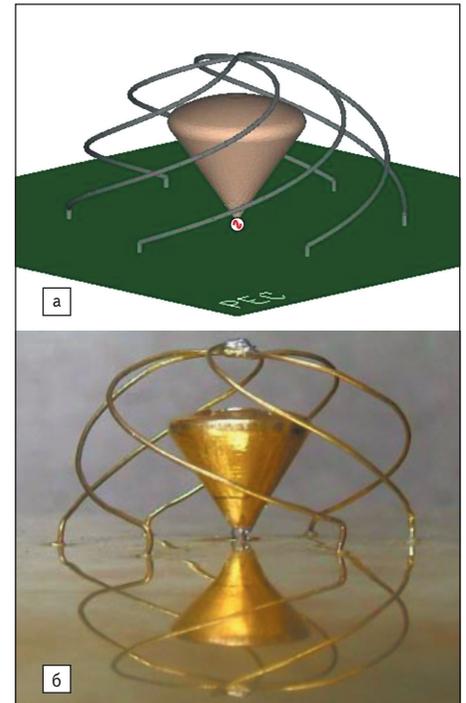
во-вторых, позволяет работать со сложными проволочными структурами, обеспечивая более высокую точность результатов и возможность снижать вычислительную сложность укрупнением сетки относительно применения классических прямолинейных элементов.

### Сочетание сложной формы и предельного диаметра проволочных элементов

Иной спецификой обладают конструкции физически малых широкополосных и сверхширокополосных антенн. При их построении чаще всего используются проволочные структуры, диаметр сечения которых составляет более 1% длины волны [1, 11]. Сложности связаны уже с выбором метода моделирования как такового. Метод моментов с проволочными сегментами разбиения структуры в данном случае уже не будет предоставлять столь широкие возможности выбора сочетания параметров, как в предыдущей задаче, может даже потребоваться наложение поверхностной сетки на проволочные элементы. Методы на основе конечно-разностной схемы предусматривают сквозное разбиение объема очень мелкой сеткой и плохо применимы для анализа резонансных структур [15]. Метод конечных элементов хорошо применим для анализа и резонансных, и нерезонансных структур, а в некоторых реализациях, включая Ansys HFSS, поддерживает возможность применения криволинейной тетраэдральной сетки.

Интересным вариантом конструкции для сравнительного применения Altair FEKO (метода моментов) и Ansys HFSS (метода конечных элементов) для анализа ее электрических характеристик в широкой полосе частот выглядит антенна [1, 6, 15], состоящая из 6-заходной спирали на полусфере с точкой соединения ветвей на оси и подключенного к коаксиальному тракту конического зонда, располагающегося во внутреннем объеме спирали (рис. 4).

В 2008 году данная конструкция была отмечена как самая малогабаритная сверхширокополосная антенна. Ее высота составляет 0,125 длины волны на нижней частоте при реализуемой полосе частот 10:1 [1, 16]. Высота структуры — 15,9 мм, диаметр сечения проволочных элементов 0,5 мм, высота конуса с закругленным основанием 12 мм. Предполагаемый диапазон рабочих частот 2–20 ГГц. С точки зрения моделирования данная антенна содержит указанные выше усложняющие анализ факторы, поскольку для проволоки диаметром 0,5 мм минимальная длина сегмента разбиения составляет 1,5 мм, а на верхней частоте анализируемого диапазона 0,125 длины волны — 1,9 мм. Таким образом, поскольку мы имеем дело с предельным случаем, резонно провести



**Рис. 4.** Малогабаритная сверхширокополосная антенна на основе спирали на полусфере и конического зонда: а) модель; б) экспериментальный макет

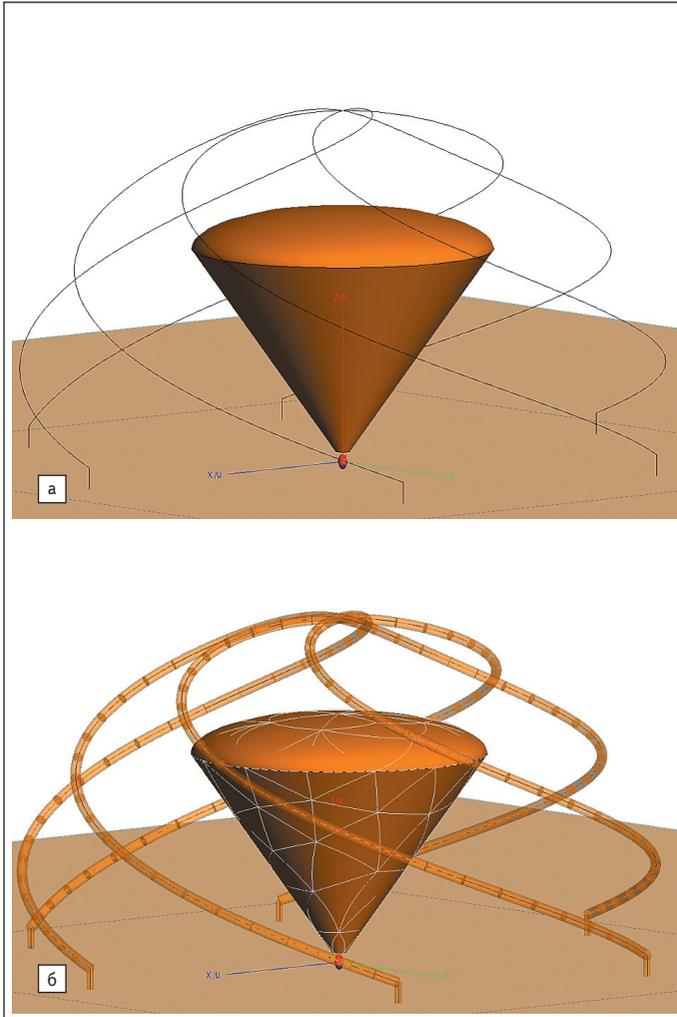
сравнение результатов моделирования методом моментов и методом конечных элементов.

Основываясь на геометрических характеристиках, приведенных в [16], были построены модели в Altair FEKO 14 (рис. 5) и Ansys HFSS 17 (рис. 6). В FEKO дискретизация поверхности конического зонда выполнена с использованием криволинейных поверхностных элементов, а проволочных — с помощью криволинейных сегментов заданного диаметра. В HFSS при построении модели конструкция антенны окружена воздушным цилиндром радиусом 100 мм и высотой 100 мм для обеспечения качества анализа на нижней границе требуемого диапазона частот. Критерий сходимости — стабильность S-параметров не хуже 0,01 на двух последовательных итерациях анализа.

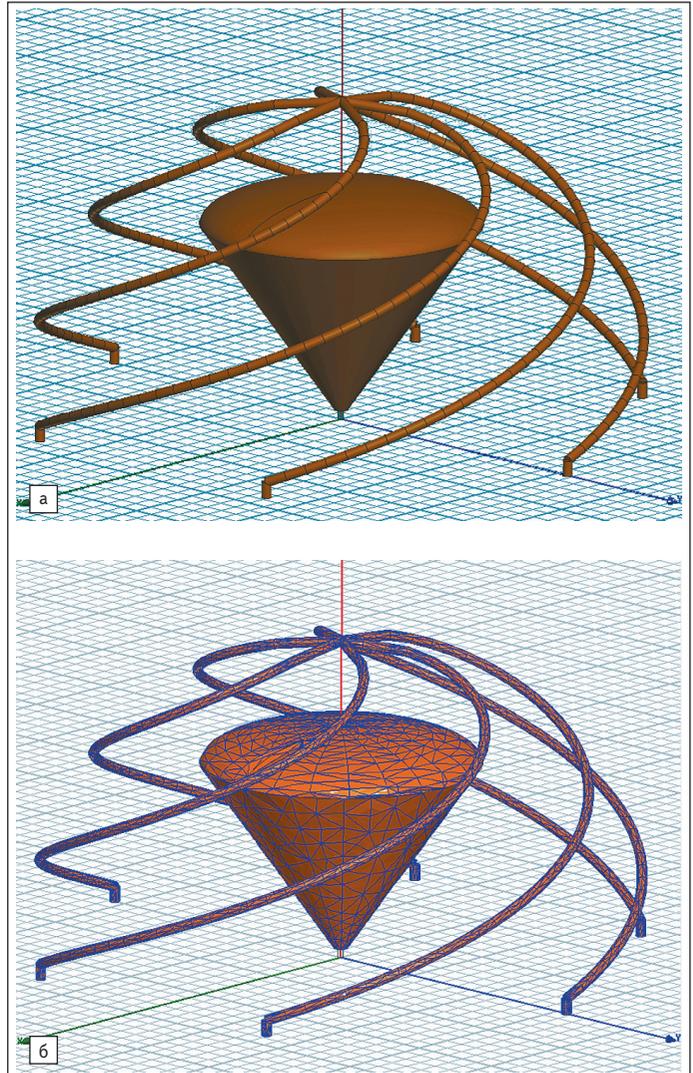
Итоговое сопоставление результатов моделирования обоими методами с экспериментальными данными приведено на рис. 7, но интерес представляют и прочие характеристики моделирования (табл. 3).

**Таблица 3.** Характеристики моделирования

Программа	Altair FEKO 14	Ansys HFSS 17
Метод анализа	метод моментов	метод конечных элементов
Разбиение	108 выпуклых треугольных элементов и 163 криволинейных проволочных сегмента	83,5 тыс. тетраэдров, включая криволинейные
Задействованный объем оперативной памяти	10 Мбайт	14,7 Гбайт
Время анализа	9 мин	140 мин
Количество частотных точек анализа	24	16



**Рис. 5.** Модель компактной полусферической спиральной антенны в Altair FEKO 14:  
а) исходная геометрия;  
б) модель с расчетной дискретизацией



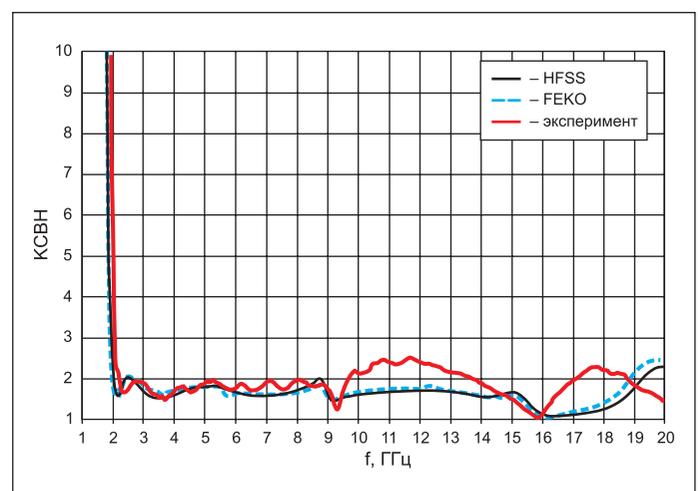
**Рис. 6.** Модель компактной полусферической спиральной антенны в Ansys HFSS 17:  
а) исходная геометрия;  
б) модель с расчетной дискретизацией (только функциональные элементы)

Как видно из приведенных выше данных и графиков, итоговые частотные зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению по входному 50-Ом порту антенны, полученные моделированием различными методами, дали достаточно близкие результаты и хорошо соотносятся с экспериментальными данными, отражая как поведение на нижней границе диапазона частот, так и два выраженных резонансных участка в районе 9 и 16 ГГц.

Значительная разница во времени анализа и задействованных вычислительных ресурсах во многом обусловлена применением стандартного определения сходимости решения для метода конечных элементов на верхней частоте анализируемого диапазона, но окружающий воздушный объем определяется значением нижней граничной частоты. Свое влияние оказало и наличие проволочных резонансных элементов малого диаметра, которые в итоге были автоматически аппроксимированы сеткой с высокой плотностью. Наверняка возможна оптимизация затрат времени и ресурсов для проведения анализа, но эта задача выходит за рамки настоящей работы. Основная цель — сравнить качество результирующих характеристик.

Отличие результатов моделирования друг от друга на высоких частотах можно объяснить предельно большим размером сегментов разбиения проволочных элементов в методе моментов, в то время как для метода конечных элементов качество разбиения определялось именно на верхней границе диапазона частот. Отличия экспериментальных данных от теоретических, скорее всего, связаны

с качеством реализации резонансной конструкции, наличием нахлестов ветвей спирали друг на друга в точке стыковки и сложностью реальной формы конического зонда.



**Рис. 7.** Результаты моделирования и экспериментального исследования [16]

## Заключение

Подводя итоги представленным в статье материалам, можно сформулировать следующие тезисы:

- 1) применение криволинейных сегментов разбиения при анализе сложных проволочных конструкций существенно улучшает качество получаемого результата;
- 2) криволинейное разбиение проволочных элементов сложной формы с изгибами и поворотами позволяет уменьшить количество элементов разбиения по сравнению с линейным;
- 3) метод моментов с возможностью криволинейного разбиения проволочных элементов и проводящих поверхностей, реализованный в Altair FEKO 14, при анализе антенн малых электрических размеров даже в случае предельно допустимого размера сетки позволяет получать качественные результаты, не требуя значительных вычислительных ресурсов. ■

## Литература

1. Volakis J. L., Chen C.-C., Fujimoto K. Small Antennas: Miniaturization Techniques & Applications. McGraw-Hill, 2010.
2. Yangjian A. D., Best S. R. Impedance, bandwidth, and Q of antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2005, Vol. AP-53.
3. Stutzman W. L. Davis W. A., Yang T., Caswell E. D. Fundamental limits on antenna size: a new limit // IET Microwaves, Antennas & Propagation. 2011. Vol. 5. № 11.
4. Gustafsson M., Sohl C., Kristensson G. Physical limitations on antennas of arbitrary shape // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science. 2007. Vol. 463. № 2068.
5. Altshuler E. E., Linden D. S. Design of a vehicular antenna for GPS/Iridium using a genetic algorithm/Antennas and Propagation Society International Symposium, 1997.
6. Yang T., Davis W. A., Stutzman W. L. The design of ultra-wideband antennas with performance close to the fundamental limit. Virginia Tech Antenna Group, Blacksburg, VA. USA, 2008.
7. Митрохин В. Н., Полищук А. Е. Электрический диполь в диэлектрическом шаре // Антенны. 2001. № 8.
8. Климов К. Н., Годин А. С., Гежа Д. С. Электрически малые антенны. Часть 1 // Успехи современной радиоэлектроники. 2016. № 6.
9. Климов К. Н., Годин А. С., Гежа Д. С. Электрически малые антенны. Часть 2 // Успехи современной радиоэлектроники. 2016. № 7.
10. Fujimoto K., Morishita H. Modern small antennas. Cambridge University Press, 2013.
11. Best S. R. Small Antennas. Antenna Engineering Handbook, 4<sup>th</sup> ed. McGraw-Hill, 2007.
12. Best S. R. The radiation properties of electrically small folded spherical helix antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004, Vol. AP-52. № 4.
13. Altair FEKO 14 (2016). [www.altairhyperworks.com/product/FEKO](http://www.altairhyperworks.com/product/FEKO)
14. Литун В. Новые возможности электродинамического анализа геометрически сложных структур в Altair FEKO // Современная электроника. 2016. № 8.
15. Банков С. Е., Курушин А. А. Электродинамика и техника СВЧ для пользователей САПР. М., 2010.
16. Yang T.-Y. Fundamental Limits on Antenna Size for Frequency and Time Domain Applications / Doctor on philosophy diss. Virginia Tech. University, 2012.