

Проектирование антенной решётки в программах электродинамического моделирования HFSS и CST MWS

**Александр Курушин (Московская обл.),
Константин Папилов (г. Москва)**

Современные антенные решётки для радиолокаторов чаще всего моделируют с помощью специализированных программ, которые разрабатываются десятки лет. Программы электродинамического моделирования HFSS и CST MWS позволяют решать важные научные проблемы, связанные с проектированием фазированных антенных решёток. В статье сравниваются результаты расчёта характеристик антенной решётки, полученные с помощью HFSS и CST MWS с учётом взаимного влияния соседних элементов.

Анализ многоэлементной антенной решётки можно выполнить в единой конструкции. Этот подход требует больших вычислительных средств на уровне суперкомпьютеров. Преимущество этого подхода заключается в том, что элементы антенной решётки могут иметь произвольные положение и возбуждение.

В зависимости от расположения элементов различают линейные, поверхностные и объёмные решётки, среди которых наиболее распространены прямолинейные и плоские антенные решётки (см. рис. 1).

ДИАГРАММА НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННОЙ РЕШЁТКИ С ЗАДАНЫМ ПЕРИОДОМ

Простейшей является линейная эквидистантная антенная решётка. У такой решётки излучающие элементы расположены на прямой линии через рав-

ные расстояния. Общее излучённое поле антенной решётки равно сумме полей, создаваемых каждым элементом, с учётом фазы, с которой эти поля приходят в точку наблюдения. Диаграмму направленности фазированной антенной решётки можно представить в виде [5, 6]:

$$f_N(\theta, \phi) = F_0(\theta, \phi) f_c(\theta, \phi), \quad (1)$$

где $F_0(\theta, \phi)$ является ненормированной диаграммой направленности (ДН) антенной решётки с изотропными излучателями и называется множителем решётки; $f_c(\theta, \phi)$ – ДН одного элемента антенной решётки. Часто пользуются нормированной ДН антенной решётки:

$$F_c(\theta, \phi) = \frac{\sin \left[\frac{N}{2} (kd \cos \theta - \alpha) \right]}{N \sin \left[\frac{1}{2} (kd \cos \theta - \alpha) \right]}. \quad (2)$$



Рис. 1. Первый в мире истребитель, оснащённый РЛС, с пассивной ФАР, МиГ-31 (система «Заслон», НИИП им. Тихомирова)

В формуле (2) $(kd \cos \theta - \alpha) = U$ – это обобщённая угловая координата, под которой понимается разность фаз между полями двух соседних элементов в точке наблюдения, находящейся под углом к оси антенной решётки; k – постоянная распространения; d – расстояние между элементами антенной решётки; θ – угол наклона излучения антенной решётки относительно оси z (см. рис. 2); α – разность фаз возбуждения соседних элементов антенной решётки. В терминах периодических граничных условий α является разностью фаз между периодическими граничными условиями master и slave [1].

Из выражения (2) следует, что множитель решётки в пространстве представляет собой поверхность вращения. При большом числе излучателей ($N > 10$) этот множитель практически повторяет ДН антенной решётки, поскольку отдельные элементы решётки, как правило, являются слабонаправленными антеннами. С ростом N будут сужаться главный и боковые лепестки антенной решётки.

УСЛОВИЕ СУЩЕСТВОВАНИЯ ОДНОГО ГЛАВНОГО ЛЕПЕСТКА

Предположим, необходимо, чтобы ФАР работала в диапазоне углов от -60° до $+60^\circ$. Определим интервал обобщённой угловой координаты U , соответствующий области реальных углов сканирования антенной решётки. Максимальное значение U будет достигать при $\theta = 0^\circ$ величины $U_{\max} = kd - \alpha$, а минимальное – при $\theta = 180^\circ$ величины $U_{\min} = -kd - \alpha$.

Таким образом, интервал переменной U , соответствующий области реальных углов θ , определяется неравенством:

$$-kd - \alpha \leq U \leq kd - \alpha \quad (3)$$

и величина:

$$\Delta U = U_{\max} - U_{\min} = 2kd \quad (4)$$

не зависит от разности фаз между границами master и slave, а определяется расстоянием между элементами d .

Применяемые на практике ФАР обычно должны иметь только один главный лепесток. Это означает, что на интервале действительных значений U длина интервала ΔU должна быть меньше периода повторения множителя $2kd < 2\pi$, откуда [3]:

$$d < \lambda / 2. \quad (5)$$

Таким образом, антенная решётка, у которой расстояние между излучателями меньше половины длины волны, всегда (при любых значениях фазового сдвига между соседними элементами) будет иметь только один главный лепесток. Однако это условие не всегда является необходимым. Так, для синфазной АР оно имеет вид:

$$d < \lambda. \quad (6)$$

В общем случае прослеживается следующая зависимость допустимого расстояния между соседними элементами d : чем в большем секторе углов θ должно происходить сканирование ФАР лучом, тем меньше должно быть расстояние между элементами в решётке. Чтобы в множителе ФАР существовал только один главный лепесток, расстояние между элементами должно находиться в пределах:

$$\lambda / 2 < d < \lambda. \quad (7)$$

Электродинамические методы расчёта позволяют выполнить моделирование антенной решётки с заданным шагом по обеим координатам. Численные методы расчёта, реализованные в современных комплексах HFSS, CST и др., позволяют рассчитать диаграммы сканирования, боковые лепестки и влияние отдельных элементов друг на друга для различных типов элементов антенн.

Для простых типов излучателей удастся получить либо аналитические, либо легко реализуемые алгоритмы расчёта для ЭВМ [4–6]. Однако в тех случаях, когда в излучающей структуре располагается слоистый диэлектрик, расчёт взаимных сопротивлений между излучателями существенно усложняется, поскольку кроме пространственных волн на взаимную связь между излучателями оказывают влияние поверхностные волны, направляемые диэлектрическими слоями.

Одним из решений проблемы является способ определения взаимных сопротивлений между излучателями, в котором используются резуль-

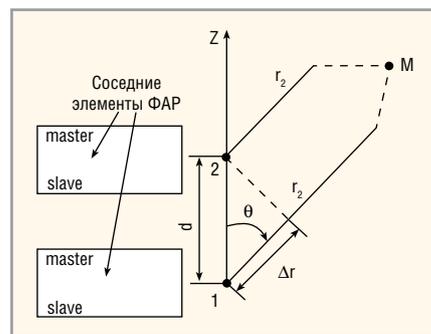


Рис. 2. Связь между геометрией длин соседних лучей АР

таты расчётов входного сопротивления излучателя в составе бесконечной линейной решётки [7].

УЧЁТ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АНТЕННОЙ РЕШЁТКИ

По сравнению с одиночными антеннами, ФАР позволяет получить узкую ДН. Поля излучения отдельных элементов решётки интерферируют в пространстве: в одних направлениях результирующее поле усиливается благодаря синфазному сложению полей от источников, в других – наоборот, ослабляется.

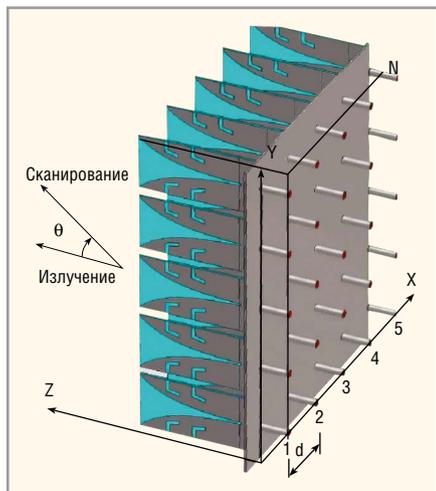


Рис. 3. Фрагмент антенной решётки, составленной из антенн Вивальди

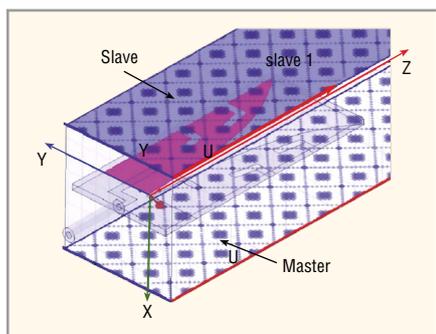


Рис. 4. Постановка граничных условий (угол $\varphi = 0$ соответствует вертикальной плоскости E)

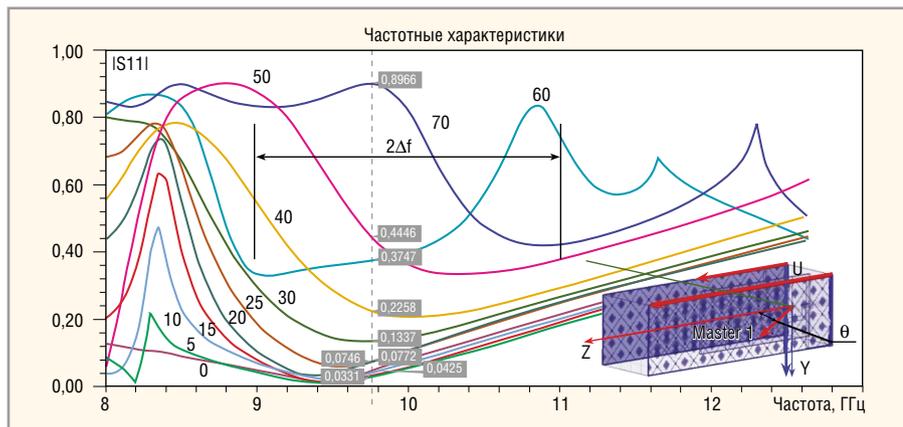


Рис. 5. Частотные характеристики антенной решётки для углов сканирования в диапазоне 0...70° в плоскости YOZ (расчёт в HFSS)

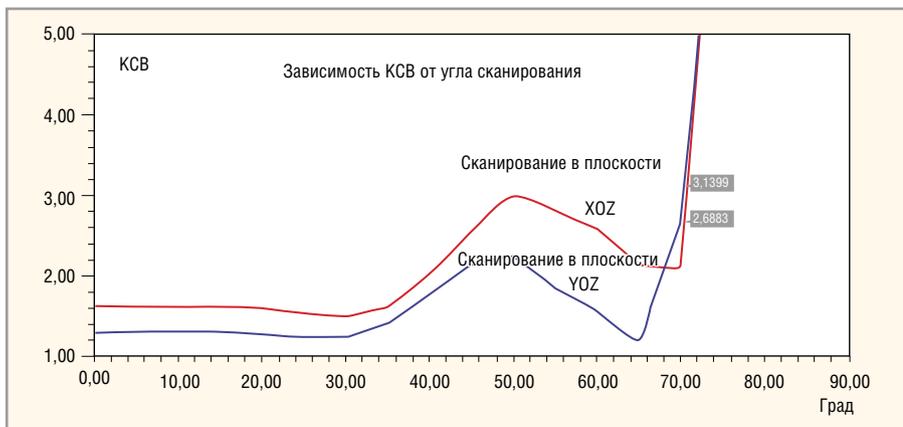


Рис. 6. Зависимость КСВ от угла сканирования (расчёт в HFSS)

ФАР имеют ряд преимуществ перед другими типами антенн:

- удобное управление формой ДН и направлением главного лепестка за счёт изменения амплитуды и фазы поля каждого излучателя АР;
- увеличение мощности излучения АР за счёт пространственного сложения полей отдельных излучателей.

В рамках этих задач необходимо рассчитать и диаграммы сканирования, и частотные характеристики решётки с учётом взаимного влияния каналов. Выбор программного обеспечения – ключевая задача, которая стоит перед разработчиком ФАР. Выполним расчёт с помощью HFSS [1] и CST [2] и сравним результаты расчёта.

На рисунке 3 приведён фрагмент антенной решётки, составленной из 25 антенн Вивальди. Антенна Вивальди отличается широким диапазоном рабочих частот, её параметры для произвольных функций, описывающих раскрыв раstra, анализируются в [7]. Антенная решётка имеет линейную поляризацию, и её характеристики при сканировании в вертикальной и в горизонтальной плоскости отличаются. Они и будут предметом дальнейшего исследования.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТЕННОЙ РЕШЁТКИ В HFSS ANSOFT

Программа электродинамического моделирования HFSS Ansoft [1] решает задачу распространения электромагнитного поля, которое подчиняется уравнениям Максвелла и граничным условиям. Выделим в антенной решётке периодически повторяющийся канал Флоке и поставим на его боковые стороны периодические граничные условия master и slave (см. рис. 4).

Ближние поля, рассчитываемые в канале Флоке, связываются соотношением (3). При изменении угла сканирования θ в режиме параметрической оптимизации меняются соотношения между полями на ведущей и ведомой границе, что смещает поля и приводит к изменению угла излучения антенной решётки.

Рассчитаем частотные характеристики для серии углов сканирования (см. рис. 5), а также диаграмму сканирования антенной решётки на частоте 9,8 ГГц (см. рис. 6).

Из рисунка 5 видно, что диапазон рабочих частот уменьшается при увеличении угла сканирования. Кроме частотных характеристик при различных углах сканирования, полезным графиком является диаграмма сканирования, показанная на рисунке 6, для двух углов φ .

Эти результаты демонстрируют, что при сканировании в диапазоне углов до $\theta = 70^\circ$ влияние соседних элементов не увеличивает коэффициент отражения до предельной величины КСВ = 3. Однако рабочий частотный диапазон антенной решётки, как видно из рисунка 5, при увеличении θ сужается и смещается в сторону более низких частот.

РАСЧЁТ БЕСКОНЕЧНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЁТКИ В CST

Особенность метода конечных разностей во временной области, реализованного в CST, приводит к тому, что во временной области можно рассчитать характеристики решётки только для нормального угла излучения АФАР. Чтобы рассчитать характеристики антенной решётки для произвольных углов сканирования, следует применить решающее устройство в частотной области и выполнить разбиение пространства на тетраэдры [2].

В отличие от HFSS [1], в программе CST понятие ведущей и ведомой границ отсутствует, но существуют два параметра для описания периодически изменяющегося фрагмента ФАР: 1) periodic, 2) Unit Cell. Точность рас-

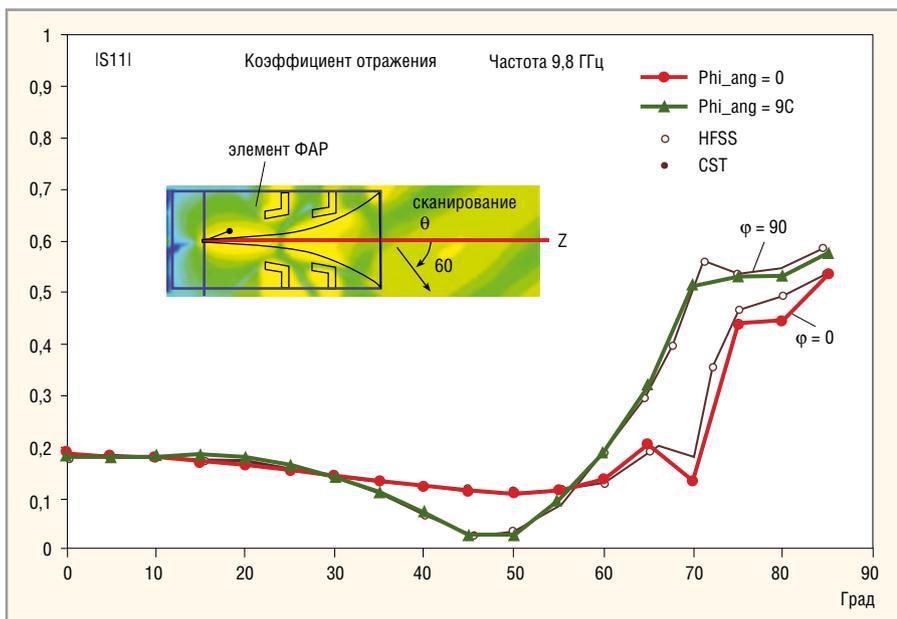


Рис. 10. Диаграммы сканирования бесконечной антенной решётки в двух плоскостях (расчёт в CST и HFSS)

сены результаты расчёта в HFSS и CST. Они показывают, что расчёты в программах HFSS и CST дают одинаковые результаты, если использовать канал Флоке с количеством мод 20. Оптимизация согласующей структуры между входной коаксиальной линией и щелью антенны Вивальди, выполненная при угле θ , позволяет получить более широкий диапазон углов сканирования (см. рис. 10), который достига-

ет 70°. Разница между расчётами в программах HFSS и CST не превышает 5% по коэффициенту отражения.

Выводы

Результаты расчёта антенной решётки с помощью современного программного обеспечения показали полное согласование как в диапазоне частот, так и в диапазоне углов сканирования. Реализованный в последних

версиях HFSS и CST Microwave Studio канал Флоке повышает точность расчёта характеристик дальнего поля, если выбрать количество мод, равное 20.

Анализ поля в отдельных элементах антенной решётки, а также токов, которые протекают в сложной антенне с искривлёнными частями (такой, как антенна Вивальди), позволяют исследовать паразитные колебания, их смещение при изменении углов сканирования и другие тонкие эффекты, появляющиеся из-за взаимодействия соседних элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.ansys.com>.
2. <http://www.cst.com>.
3. Пудовкин А.П., Панасюк Ю.Н., Иванков А.А. Основы теории антенн. Тамбов: Издательство ГОУ ВПО ТГТУ, 2011.
4. Пластиков А.Н. Проектирование планарной антенной решётки диапазона L1 для систем GPS/ГЛОНАСС. Журнал радиоэлектроники. №8. 2012.
5. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. М.: Высшая школа, 1988.
6. Антенны и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решёток: Учеб. пособие для вузов/ред. Д.И. Воскресенского. Радио и связь, 1994.
7. Гринёв А.Ю. Численные методы решения прикладных задач электродинамики. Радиотехника, 2012.



Новости мира News of the World Новости мира

Intel откладывает открытие завода с производством по 14-нм технологии

Завод Fab42 строился для производства самых продвинутых версий процессоров компании Intel по 14-нм технологии, которое планировалось запустить в конце прошлого года. Однако завод останется закрытым на неопределённый срок, в то же время будут модернизированы другие заводы компании. Вероятно, это обусловлено ситуацией снижения спроса на некоторую продукцию, которая сложилась уже после принятия решения о строительстве завода.

Учитывая непростое состояние рынка традиционных ПК и ноутбуков и стремительное развитие производства смартфонов, это решение имеет смысл. Intel не может продолжать производство процессоров, на которые нет спроса. Использование этого завода будет регрессивным шагом.

Fab42 был предназначен для перехода к следующему поколению размера пластин

от 300 до 450 мм, который пока невозможен, хотя Intel и другие компании работают в этом направлении. Компания Intel решила, что не нуждается в дополнительных производственных мощностях для микропроцессоров. По мнению экспертов, 2013 г. стал худшим с точки зрения продажи ПК с 1980-х годов.

Специалисты и аналитики в ожидании, какими будут капиталовложения компании в 2014 г. Обсуждается, удержит ли Intel уровень дохода в \$10 млрд или нет. За последние годы только Samsung инвестировала в производство пластин больше средств, чем компания Intel, которая делала крупнейшие капиталовложения в промышленности с 1990-х годов.

www.electronics-eetimes.com

На развитие инжиниринга будет выделено 8 млрд рублей

Министр промышленности и торговли России Денис Мантуров, выступая на дискуссии «Будущая индустриальная струк-

тура», прошедшей в РАНХиГС в рамках V Гайдаровского форума, подчеркнул: «Чтобы получать квалифицированные рабочие кадры, новые современные производства, нам обязательно нужно развивать инженерные специальности и инжиниринг в целом». Пока в России всего 2% промышленных предприятий активно используют инжиниринговые технологии. Минпромторг совместно с Минобрнауки, Минэкономразвития, Росстандартом, ВЭБ и ОАО «РОСНАНО» активно участвует в разработке промышленной и компьютерной подпрограмм инжиниринга. Государство намерено инвестировать в эту сферу 8 млрд руб. в течение последующих 5 лет.

Осенью 2012 г. Минобрнауки и Минпромторг провели конкурс по созданию инжиниринговых центров на базе технологических вузов, по итогам которого из 96 проектов отобрано 11. На их реализацию выделено около 500 млн руб.

<http://strf.ru>