

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММ HFSS И CST MWS

А.Курушин kurushin@mail.ru, К.Папилов

Современные антенные решетки в составе радиолокационного комплекса чаще всего моделируются в специализированных программах, которые совершенствуются на протяжении десятков лет. Широко используемые коммерческие программы электродинамического моделирования, самыми популярными из которых являются HFSS (ANSYS HFSS) и CST MWS (CST MICROWAVE STUDIO), позволяют решить важные научные задачи, связанные с проектированием фазированных антенных решеток (ФАР). В данной статье сравниваются результаты расчета характеристик антенной решетки, полученные в программах HFSS и CST с учетом взаимного влияния соседних элементов.

Современные коммерческие программы электродинамического моделирования СВЧ-устройств [1,2] имеют мощное средство – периодические граничные условия, которые позволяют выполнить моделирование бесконечной фазированной антенной решетки, каждый элемент которой может быть достаточно сложной антенной, например антенной Вивальди. Если в структуре можно выделить периодически повторяющуюся часть, то удобным станет применение канала Флоке [3].

Анализ многоэлементной антенной решетки можно выполнить и в виде единой конструкции. Этот подход требует значительных вычислительных ресурсов, на уровне суперкомпьютеров с большой оперативной памятью. Преимуществом этого подхода можно считать то, что элементы антенной решетки могут иметь произвольное положение и произвольное возбуждение. В зависимости от расположения элементов различают линейные, поверхностные и объемные решетки, среди которых наиболее распространены прямолинейные и плоские антенные решетки (рис.1).

ДИАГРАММА НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ С ЗАДАНЫМ ПЕРИОДОМ

Простейшей является линейная эквидистантная антенная решетка. У такой решетки излучающие элементы расположены на прямой линии с одинаковыми расстояниями между соседними



Рис.1. Первый в мире истребитель, оснащенный РЛС с пассивной ФАР – МиГ-31 (система "Заслон", НИИП им. Тихомирова)

излучающими элементами. Общее излученное поле, создаваемое антенной решеткой, равно сумме полей, создаваемых каждым элементом с учетом фазы, с которой эти поля приходят в точку наблюдения.

Диаграмму направленности (ДН) фазированной антенной решетки можно представить формулой:

$$\hat{f}_n(\theta, \varphi) = F_0(\theta, \varphi) \hat{f}_c(\theta, \varphi), \quad (1)$$

где $F_0(\theta, \varphi)$ является ненормированной диаграммой направленности антенной решетки с изотропными излучателями и называется множителем решетки; $\hat{f}_c(\theta, \varphi)$ – диаграмма направленности одного элемента антенной решетки. Часто пользуются нормированной ДН антенной решетки по формуле:

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

В формуле (2) параметр U (равный $kd \cos \theta - \alpha$) – это обобщенная угловая координата, под которой понимается разность фаз между полями двух соседних элементов в точке наблюдения, находящейся под углом θ к оси антенной решетки, k – постоянная распространения, d – расстояние между элементами антенной решетки, θ – угол наклона излучения антенной решетки относительно оси z (рис.2), α – разность фаз возбуждения соседних элементов антенной решетки.

В терминах периодических граничных условий, величина α равна разности фаз между периодическими граничными условиями Master (ведущее) и Slave (ведомое) [1]. Из формулы (2) видно, что множитель решетки в пространстве представляет собой поверхность вращения. При большом числе излучателей ($N > 10$) этот множитель практически повторяет ДН антенной решетки (АР), так как отдельные элементы АР, как правило, являются слабонаправленными антеннами. Угол сканирования, как видно из формулы (3), не зависит от количества элементов решетки N . С ростом N будут сужаться главный и боковые лепестки антенной решетки.

УСЛОВИЕ СУЩЕСТВОВАНИЯ ОДНОГО ГЛАВНОГО ЛЕПЕСТКА

Пусть, например, необходима работа ФАР в диапазоне углов от -60° до 60° . Определим интервал обобщенной угловой координаты U , соответствующий области реальных углов сканирования антенной

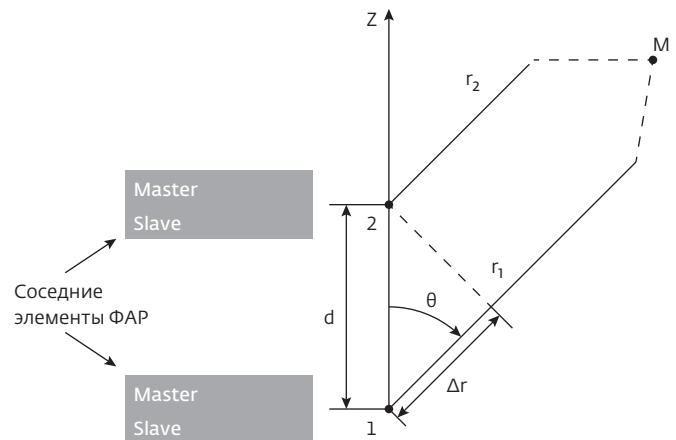


Рис.2. Связь между геометрией длин соседних лучей АР

решетки. Максимальное значение U будет достигаться при $\theta = 0^\circ$ и величине $U_{\max} = kd - \alpha$, а минимальное значение получается при $\theta = 180^\circ$ и величине $U_{\min} = -kd - \alpha$.

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

$$-kd - \alpha \leq U \leq kd - \alpha,$$

и величина его будет равна:

$$\Delta U = U_{\max} - U_{\min} = 2kd.$$

Причем величина ΔU не зависит от разности фаз между границами Master и Slave, а зависит от расстояния между элементами d .

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

$$d < \lambda/2.$$

Таким образом, антенная решетка, 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 ФАР оно имеет вид:

$$d < \lambda.$$

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

$$\lambda/2 < d < \lambda.$$

Электродинамические методы расчета позволяют выполнить моделирование антенной решетки с заданным шагом по обеим координатам. Численные методы расчета, реализованные в современных системах HFSS, CST и др., позволяют рассчитать для различных типов элементов антенн диаграммы сканирования, боковые лепестки и влияние отдельных элементов друг на друга. Для простых типов излучателей удастся получить либо аналитические, либо легко реализуемые алгоритмы расчета для ЭВМ [4–6]. Однако в тех случаях, когда в излучающей структуре располагается слоистый диэлектрик, расчет взаимных сопротивлений между излучателями существенно

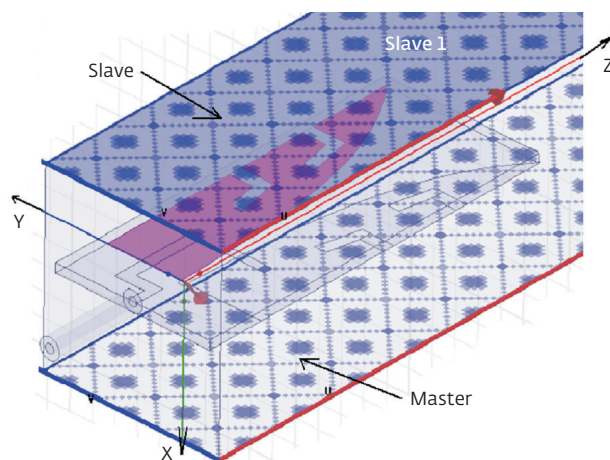


Рис.4. Постановка граничных условий (угол $\varphi=0$ соответствует вертикальной плоскости YOZ)

усложняется, так как кроме пространственных волн на взаимную связь между излучателями оказывают влияние поверхностные волны, направляемые диэлектрическими слоями.

Одним из решений задачи является способ определения взаимных сопротивлений между излучателями, в котором используются результаты численных расчетов входного сопротивления излучателя в составе бесконечной линейной решетки [7].

УЧЕТ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

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

ФАР имеют ряд преимуществ перед другими типами антенн:

- удобное управление формой ДН и направлением главного лепестка за счет изменения амплитуды и фазы поля, генерируемого каждым излучателем АР;
- увеличение мощности излучения АР за счет пространственного сложения полей отдельных излучателей.

Поэтому ставится задача расчета диаграммы сканирования и частотных характеристик решетки с учетом взаимного влияния каналов.

Выбор программного обеспечения – ключевая задача для разработчиков ФАР. Выполним расчет с помощью HFSS [1] и с помощью CST [2], затем сравним результаты. Начнем с фрагмента антенной решетки, составленной из 25 антенн Вивальди

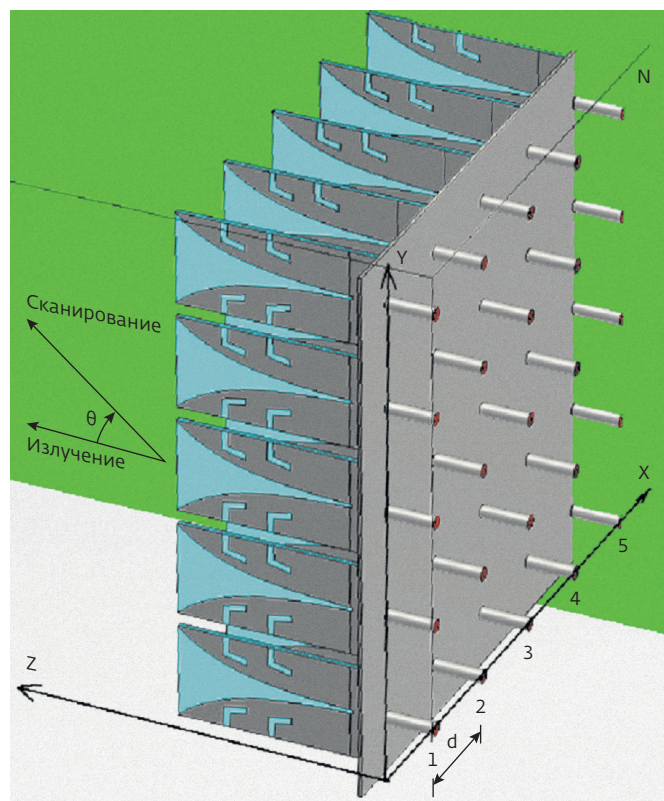


Рис.3. Фрагмент антенной решетки, составленной из антенн Вивальди

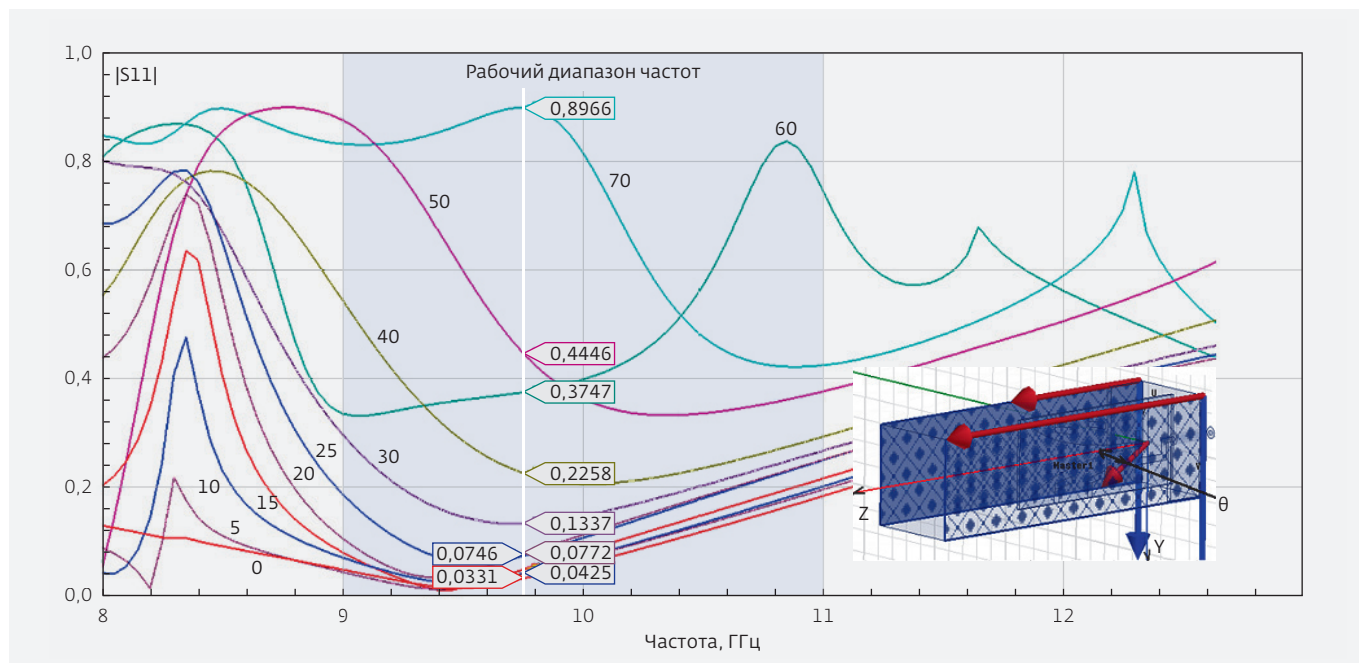


Рис.5. Частотные характеристики антенной решетки для углов сканирования в диапазоне 0–70° в плоскости YOZ (расчет в программе HFSS)

(рис.3). Антенна Вивальди отличается широким диапазоном рабочих частот. Характеристики антенн Вивальди для произвольных функций, описывающих раскрыв растра, рассматриваются в [7]. Антенная решетка имеет линейную поляризацию, причем ее характеристики при сканировании в вертикальной и в горизонтальной плоскости отличаются. Они станут предметом исследования.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ В HFSS ANSOFT

Программа электродинамического моделирования HFSS Ansoft [1] решает задачу распространения электромагнитного поля, которое подчиняется уравнениям Максвелла и граничным условиям. Выделим в антенной решетке периодически повторяющийся канал Флоке и установим для его боковых сторон периодические граничные условия Master и Slave (рис.4).

Ближние поля, рассчитываемые в канале Флоке, связаны согласно формуле (3). При изменении угла сканирования в режиме параметрической оптимизации, меняются соотношения между полями на ведущей и ведомой границе, что смещает поля и приводит к изменению угла излучения антенной решетки. Рассчитаем частотные характеристики для серии углов сканирования (рис.5), а также построим диаграмму сканирования антенной решетки на частоте 9,8 ГГц (рис.6).

На частотной характеристике антенной решетки (рис.5) видно, что диапазон рабочих частот уменьшается при увеличении угла сканирования. Кроме частотных характеристик при различных углах сканирования, полезным для анализа графиком является диаграмма сканирования (рис.6) для двух углов ϕ .

Эти результаты показывают, что при сканировании в диапазоне углов до $\theta = 70^\circ$ влияние соседних элементов не увеличивает коэффициента отражения до предельной величины КСВ (коэффициент стоячей волны) = 3. Однако рабочий частотный

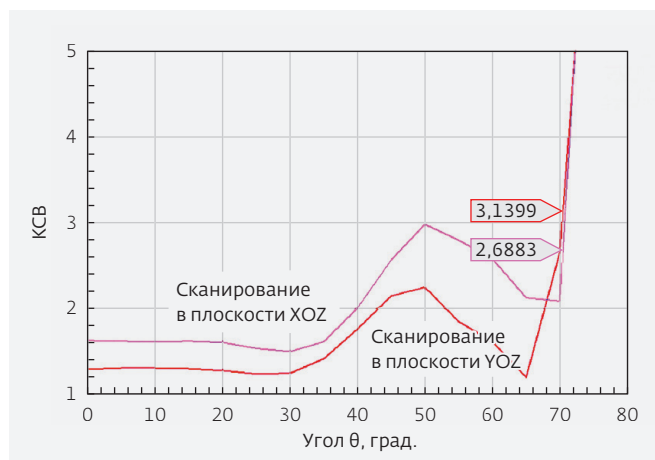


Рис.6. Зависимость КСВ от углов сканирования (расчет в программе HFSS)

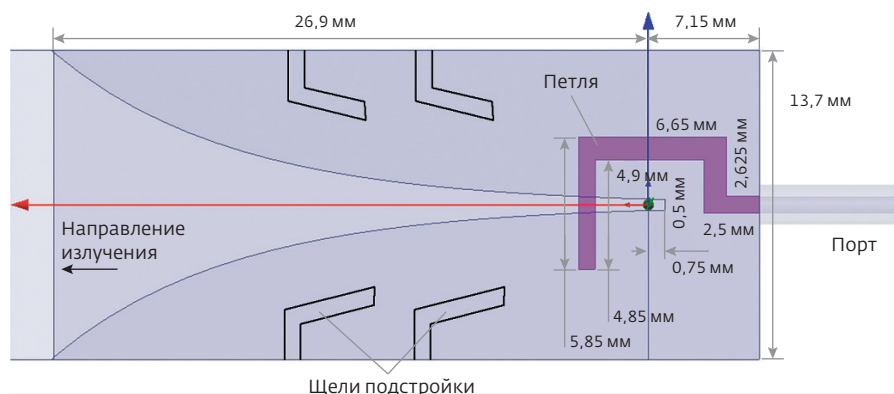


Рис.7. Антенна Вивальди

диапазон антенной решетки (рис.5) при увеличении θ сужается и смещается в сторону низких частот.

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

В отличие от HFSS [1], в программе CST понятие ведущей и ведомой границы отсутствует. Зато имеются две опции для описания периодически меняющегося фрагмента ФАР: 1) periodic (периодически) 2) Unit Cell (единичная ячейка).

Теперь рассмотрим расчет в CST с периодическими граничными условиями (рис.8). В этом режиме будем менять длину границы излучения, которая находится в той стороне, куда излучает антенна Вивальди. Сканирование в плоскости подложки антенны Вивальди выполняется изменением угла θ .

Очевидно, что полученные частотные характеристики (рис. 8) несут больше информации, чем диаграммы сканирования (рис.6), рассчитанные на одной частоте. В частности, они показывают, что при больших углах наклона луча в частотных характеристиках появляются паразитные каналы пропускания, которые объясняются эффектом взаимодействия между соседними элементами и изменением величины и/или фазы этого взаимодействия.

Как показывает моделирование с применением периодических граничных условий, на результаты расчета влияет размер "блока", который задает

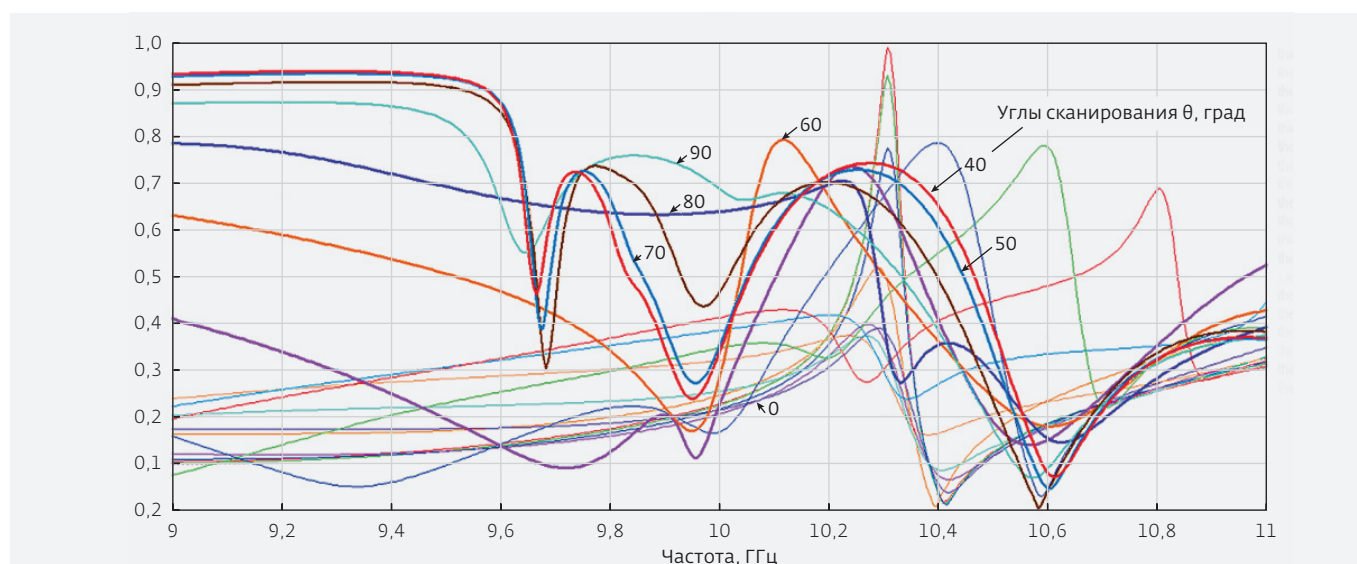


Рис.8. Частотные характеристики для углов сканирования бесконечной антенной решетки на антеннах Вивальди (расчет в программе CST)

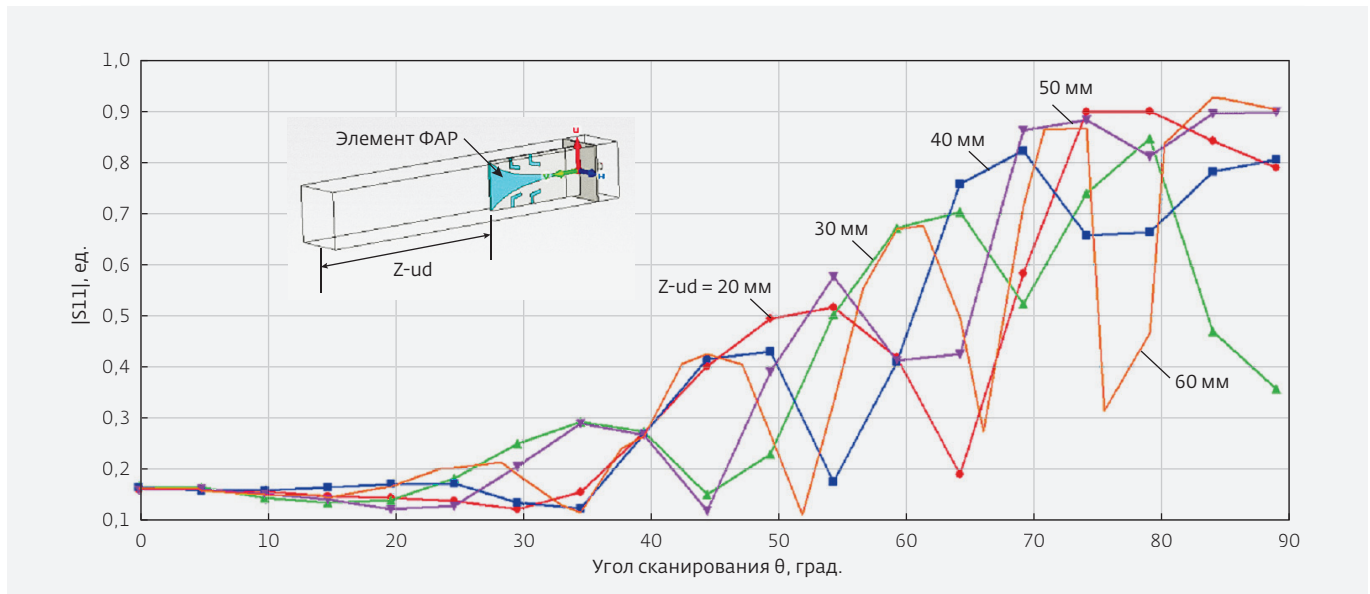


Рис.9. Диаграмма сканирования при изменении размера Z_{ud}

границы связи соседних элементов, а также размер удаления границы поглощения. Диаграммы сканирования (рис.9) построены при различных размерах "бокса" излучения или, другими словами, для разных величин Z_{ud} . На этих графиках (рис.8,9) также

можно видеть появление паразитных резонансов вне рабочей полосы частот и их перемещение при изменении угла сканирования антенной решетки. Графики показывают: расстояние Z_{ud} влияет на характеристики сканирования, что объясняется и увеличением

пространства для заполнения тетраэдрами, и неравномерностью поля при изменении угла сканирования антенной решетки.

Из расчетов (рис.9) видно, что при малых углах сканирования (до 10°) величина $Z_{\text{ид}}$ не влияет на коэффициент отражения, а при больших углах сканирования коэффициент отражения имеет значительную погрешность. Это показывает недостатки применения периодических граничных условий в CST.

Многомодовые порты Флоке, реализованные в последних версиях программ [1,2], обеспечивают поглощение полей с учетом сильного искажения поля в соседних каналах. Чтобы выполнить в CST расчет характеристик АФАР, используя канал Флоке, поставим граничное условие Unit Cell. Такое граничное условие периодически повторяет смоделированную структуру в двух направлениях x и y до бесконечности и рассчитывает характеристики ФАР с учетом фазы, устанавливаемой в виде разности углов сигналов соседних элементов ФАР. Этот метод требует выбора количества мод в канале Флоке. С помощью калькулятора Floquet Boundaries (границы Флоке) нужно найти количество мод Флоке, которые адекватно описывают поле над антенной решеткой во всем диапазоне углов сканирования. Отметим, что граничные условия Unit Cell применяются при расчете в частотной области. Результаты расчета диаграммы сканирования бесконечной антенной решетки, структура элемента которой показана на рис.7, приведены на рис.10. На график нанесены результаты расчета в HFSS и CST.

Результаты (рис.10) свидетельствуют, что расчеты в HFSS и CST дают одинаковые результаты, если выбрать количество мод равное 20. Оптимизация согласующей структуры между входной коаксиальной линией и щелью антенны Вивальди, выполненная при угле $\theta=50^\circ$, позволяет получить более широкий диапазон углов сканирования (рис.10), который достигает 70° . Разница между расчетами в программах HFSS и CST не превышает 5% по коэффициенту отражения.

В заключение отметим, что результаты расчета антенной решетки в современном программном обеспечении показали полную согласованность как в диапазоне частот, так и в диапазоне

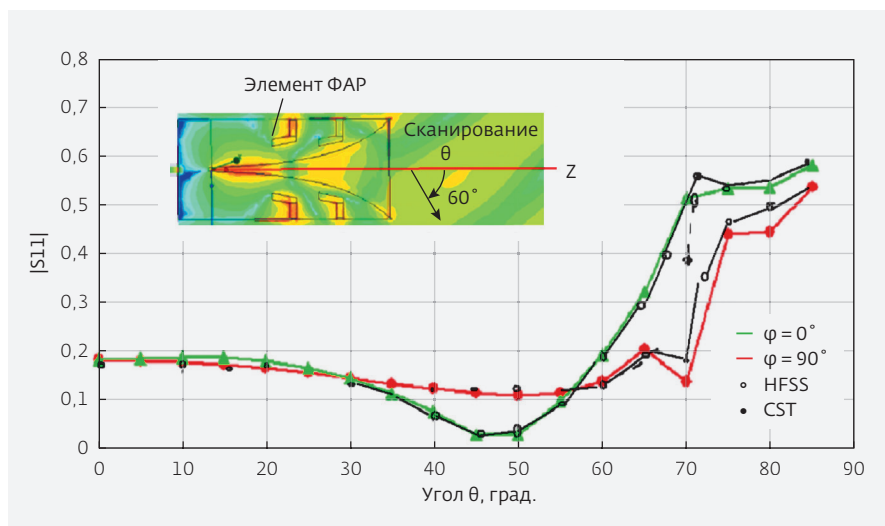


Рис.10. Диаграммы сканирования бесконечной антенной решетки в двух плоскостях (расчет в CST и HFSS)

углов сканирования. Реализованный в последних версиях HFSS и CST канал Флоке улучшает точность расчета характеристик дальнего поля, хотя требуется выбрать количество мод вплоть до 20. Анализ поля в отдельных элементах антенной решетки, а также токов, которые протекают в сложной антенне с искривленными частями, такой как антенна Вивальди, позволяет 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> (сайт разработчика программы HFSS).
2. <http://www.cst.com> (сайт разработчика комплекса CST).
3. Пудовкин А.П., Панасюк Ю.Н., Иванков А.А. Основы теории антенн. Тамбов: ГОУ ВПО ТГТУ, 2011.
4. Пластиков А.Н. Проектирование планарной антенной решетки диапазона L1 для систем GPS/ГЛО-НАСС. Журнал радиоэлектроники, 2012, №86.
5. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ: Учеб. для радиотехнич. спец. вузов. М.: Высшая школа, 1988.
6. Филиппов В.С., Пономарев Л.И., Гринев А.Ю. и др. Антенны и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решеток: Учеб. пособие для вузов, 2-е изд. Под ред. Воскресенского Д.И. М.: Радио и связь, 1994.
7. Гринев А.Ю. Численные методы решения прикладных задач электродинамики. М. Радиотехника, 2012.