

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ АФАР НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ СРЕДСТВАМИ ПЛАТФОРМЫ NI AWR DESIGN ENVIRONMENT

В последнее время основной целью разработки пассивных и активных фазированных антенных решеток (АФАР) становится их применение в радарных системах спутников и беспилотных летательных аппаратов. Соблюдение технических и размерных требований к этим системам напрямую зависит от развивающихся технологий систем автоматизированного проектирования (САПР), предоставляющих инженерам возможность работы с системной архитектурой, спецификациями компонентов, топологией отдельных элементов и верификацией до появления прототипов. В данной статье рассматриваются тенденции развития таких технологий, представлены несколько примеров использования инструментов САПР для разработки ФАР и АФАР нового поколения.

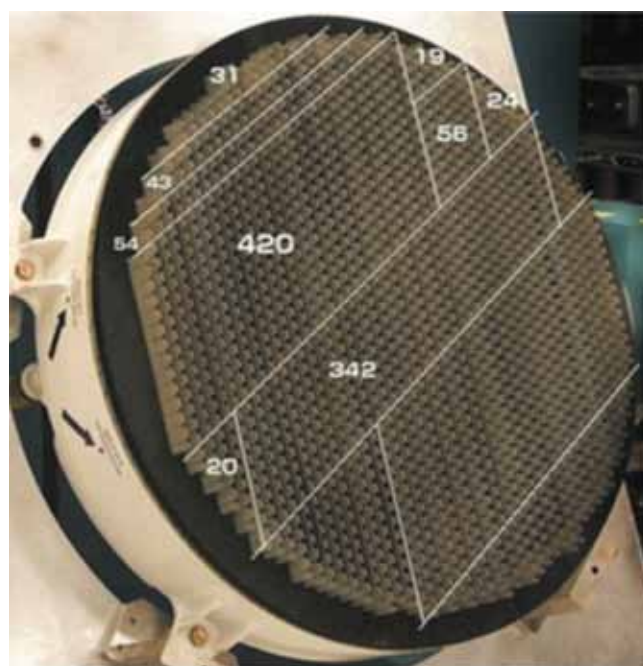
Радар на основе АФАР состоит из отдельных излучающих элементов и приемопередающих полупроводниковых модулей, содержащих малошумящий приемник, усилитель мощности, фазовращатель и аттенуатор. Контроль фазы и амплитуды входного сигнала отдельных элементов обеспечивает управление диаграммой направленности (ДН) антенны по азимуту и углу места, что позволяет ориентировать главный лепесток ДН антенны в требуемом направлении.

Разработка сложных компоновочных схем для высокочастотных сигналов должна обеспечиваться методами схемотехнического моделирования

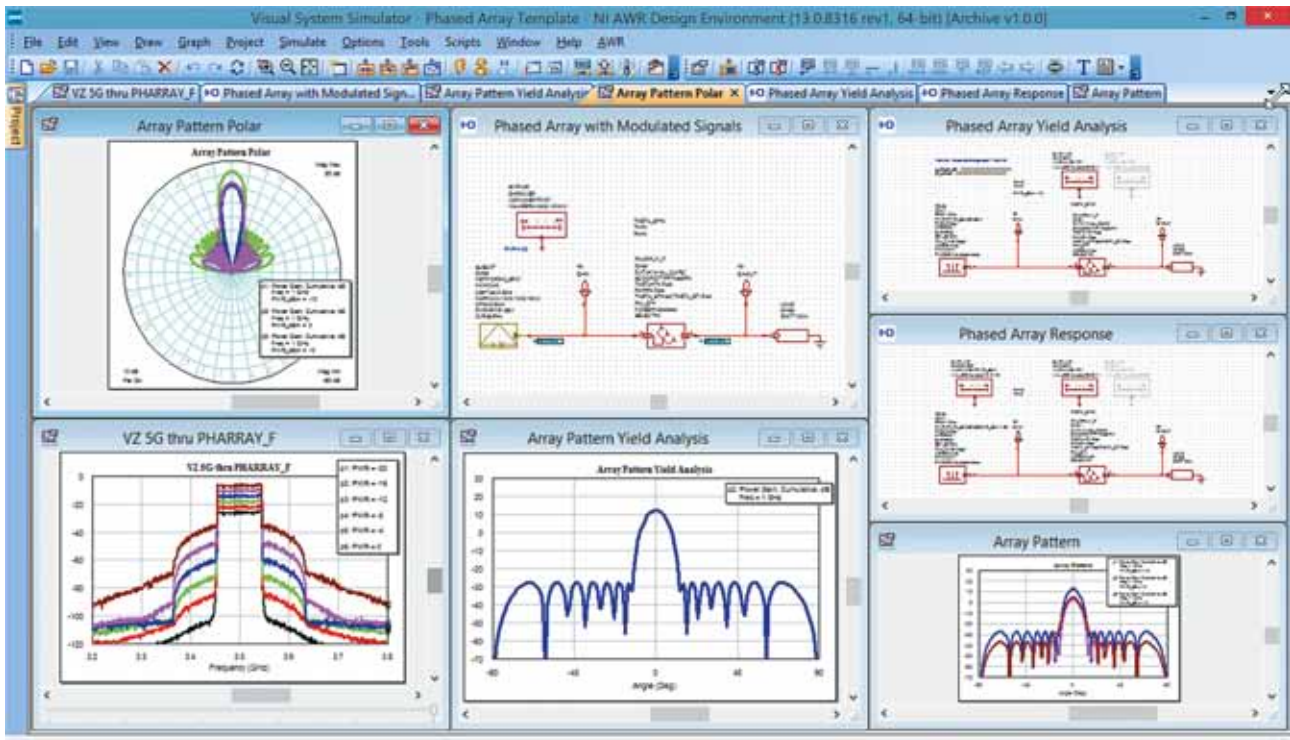
и электромагнитного анализа для РЧ- и СВЧ-электроники.

### РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕГРАЦИИ

АФАР обладают множеством преимуществ, но являются чрезвычайно сложными устройствами, и стоимость их производства, в том числе нерегулярные затраты на разработку, значительно выше, чем стоимость традиционных антен. Высокие затраты на разработку связаны с большим числом активных электронных модулей (от сотен до тысяч) на единицу продукции, зачастую создаваемую из ин-



▲ Рис. 1. АФАР AN/APG-80 F-16с производства Northrop Grumman с частичным подсчетом отдельных элементов



▲ Рис. 2. Всесторонний анализ ФАР с помощью Visual Systems Simulator

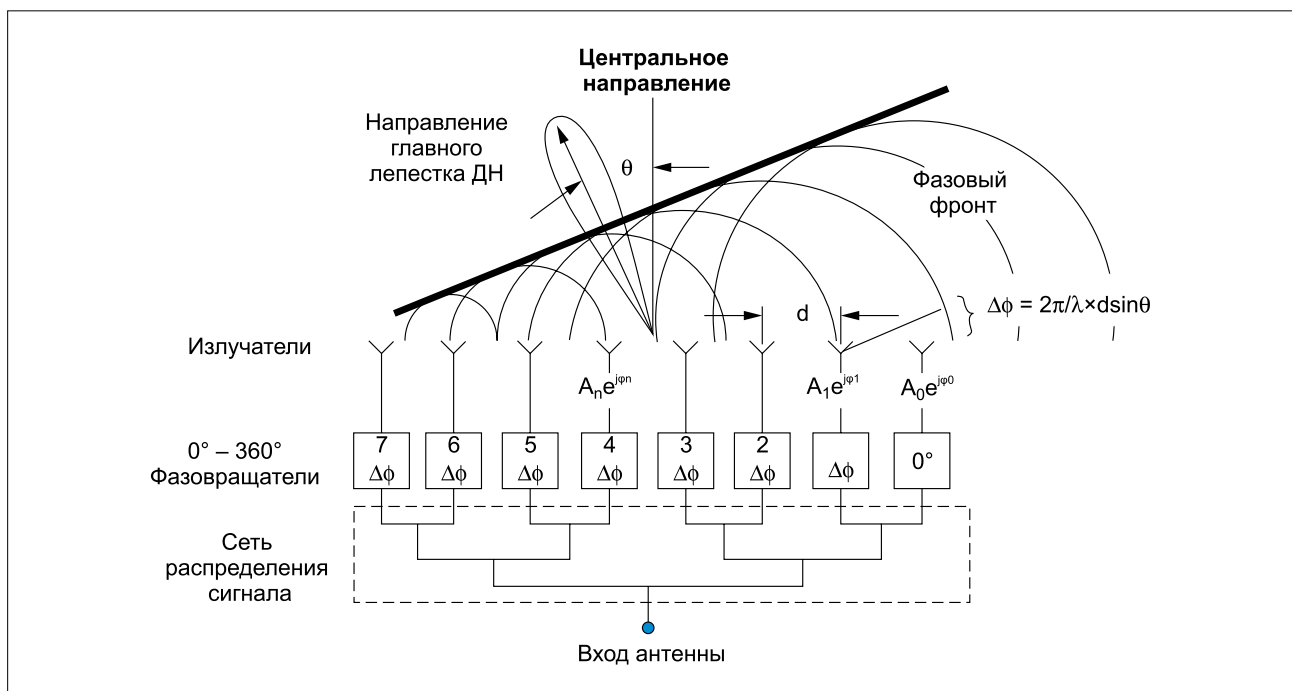
дивидуальных арсенид-галлиевых (GaAs) монокристаллических интегральных схем (МИС), которых в системе от пяти до десяти типов (рис. 1).

### ИНСТРУМЕНТЫ РАЗРАБОТКИ

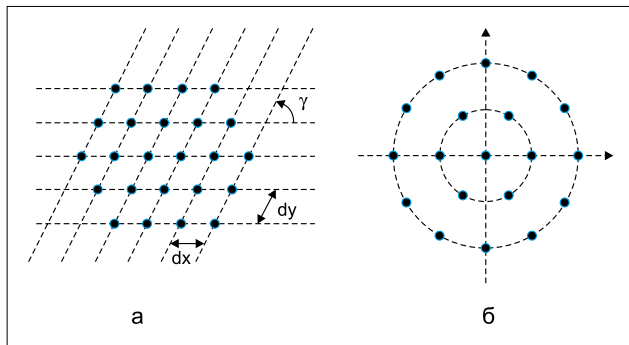
Поскольку промышленность мигрирует в область высокоинтегрированных многофункциональных МИС, все более и более важно, чтобы у разработчиков был собственный опыт работы с системами проектирования, позволяющий достичь баланса между требуемой архитектурой системы и доступными технологиями. Системное моделирование, объединяющее

моделирование схемы с анализом моделей обработки радиосигналов, позволяет разработчику выбрать оптимальную технологию МИС для конкретной области применения и выполнить первоначальное описание архитектуры и компонентов системы.

Ошибки в проектах, приводящие к повышенным затратам при внедрении, отчасти вызваны неспособностью высокоуровневых систем проектирования точно моделировать взаимодействие между множеством управляемых отдельно электрически взаимосвязанных каналов. Поскольку характеристики ФАР не определяются всецело ни параметрами антенны, ни поведением СВЧ-компонентов, модели-



▲ Рис. 3. Распределения амплитуды сигнала по раскрыву антенны для управления формой и направлением луча



▲ **Рис. 4.** Стандартные геометрии структур ФАР в VSS: а) решетчатая, б) круговая

рование должно учитывать их совместное взаимодействие для точной оценки всей системы.

Инструмент моделирования систем Visual System Simulator (VSS), встроенный в платформу NI AWR Design Environment, обладает функционалом полноценного анализа АФАР (рис. 2). Симулятор формирует характеристики всей системы в зависимости от направления луча, а также конструкцию антенны и набор активных и пассивных компонентов, используемых для управления ДН.

Системный анализ позволяет:

- оценить характеристики ФАР в диапазонах мощностей и частот;
- провести анализ таких параметров, как коэффициент усиления, коэффициент шума (NF), точка компрессии выходной мощности (P1dB), отношение коэффициента усиления антенны к эквивалентной шумовой температуре (G/T) и др.;
- оценить чувствительность к отклонениям и неисправностям компонентов при помощи статистического анализа;
- выполнить сквозное моделирование системы на основе полной модели ФАР.

VSS обладает функционалом для моделирования ФАР с тысячами элементов по различным стандартам, а также с различ-

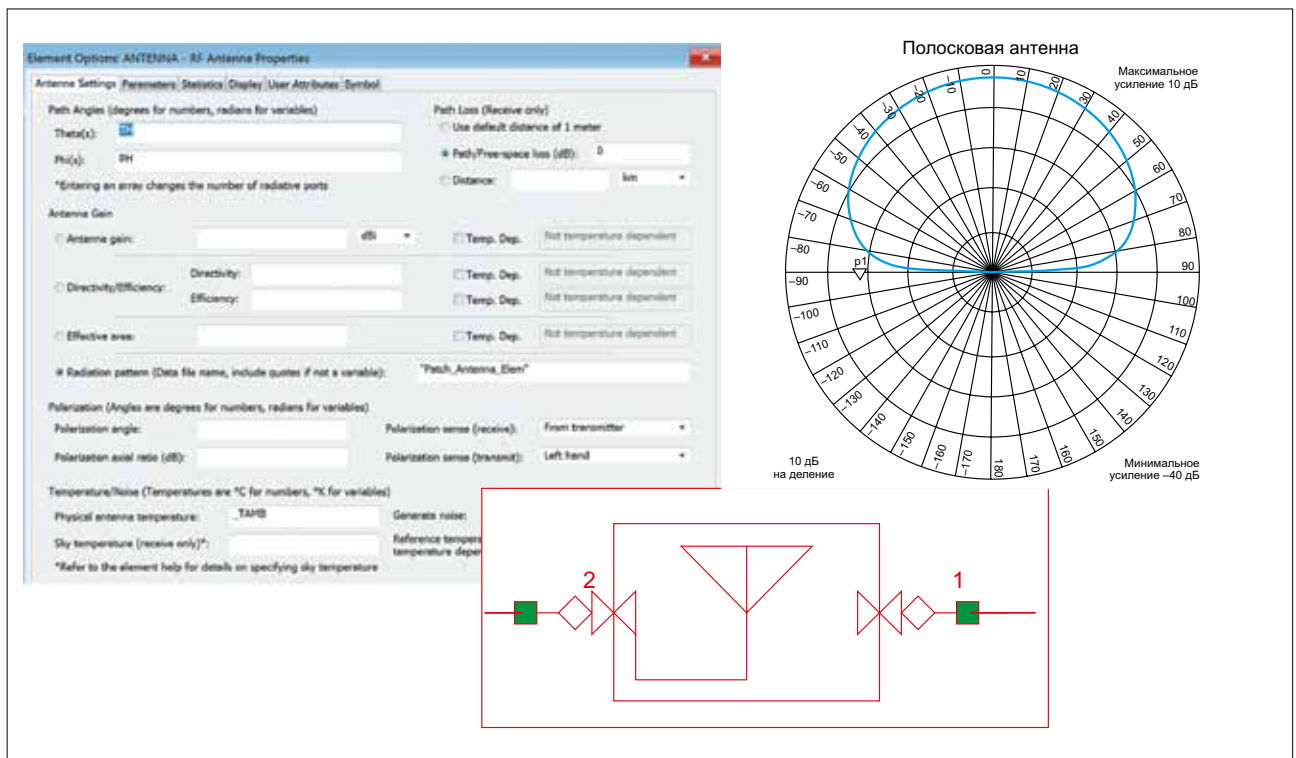
ными геометрическими параметрами. В прошлом ФАР создавались на основе индивидуальных базовых блоков, и их размеры были ограничены сотней элементов, каждый из которых моделировался как блок с одним входом и одним выходом. В VSS параметры ФАР могут быть легко определены при помощи соответствующего диалогового окна или с использованием файла данных, содержащего значения таких параметров, как коэффициент усиления, сдвиг фазы, угол места и азимут, координаты в единицах длины или длины волны и частоты сигнала.

В последнюю версию VSS (релиз V13) были внесены дополнительные усовершенствования работы с ФАР, включающие возможность моделирования радиочастотных связей для каждого элемента антенны, улучшенное моделирование ДН и взаимного влияния отдельных элементов, а также более эффективное построение архитектуры ФАР. Блоки VSS ANTENNA и PHARRAY\_ANT теперь поддерживают установку направления сигнала как в угловых, так и ортогональных координатах.

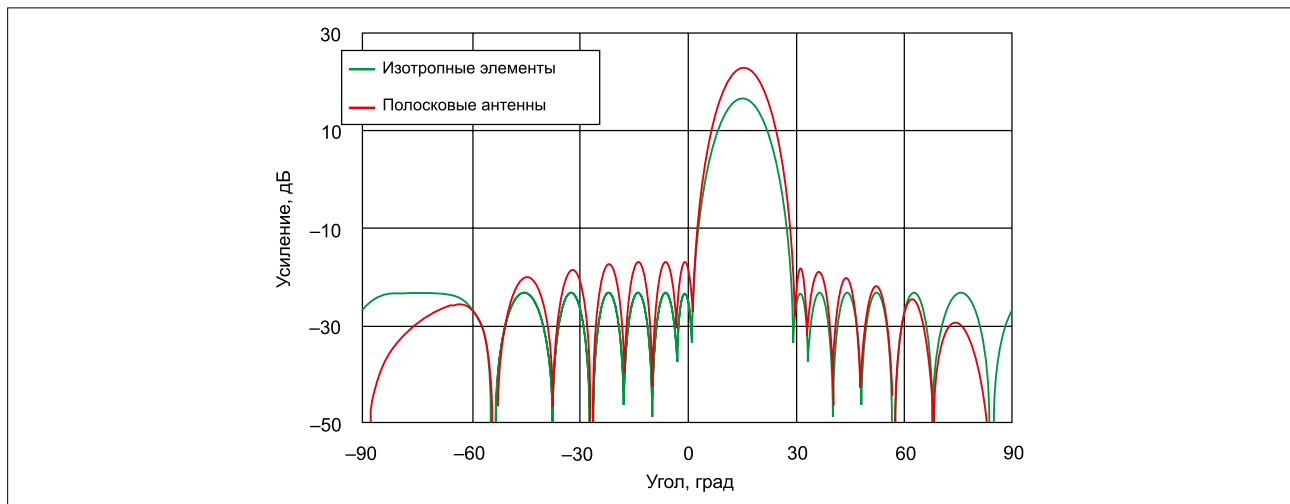
Распределение амплитуды сигнала по раскрытию антенны часто используется для управления формой луча и снижения уровней боковых лепестков. В блоке ФАР уже представлен ряд наиболее распространенных распределений. Параметры блока позволяют выбрать способ обработки коэффициентов распределения. Встроенные типы распределений блока ФАР включают распределения Дольфа-Чебышева, Тейлора и равномерное. Пользователь может самостоятельно задать вид распределения, вводя значения коэффициента усиления и фазового сдвига для каждого элемента, как показано на рис. 3.

Помимо наличия различных схем распределения сигнала и поддержки частотной зависимости, модель ФАР также позволяет моделировать дефекты решетки, вызванные ошибками производства или отказами компонентов. Все амплитудно-фазовые расчеты производятся внутри модели, а статистический анализ может быть применен к блоку для оценки чувствительности к отклонениям любых параметров ФАР.

Диалоговое окно параметров позволяет быстро задать необходимую архитектуру ФАР на основе стандартной или пользовательской геометрии. Структура типа «решетка» задается параметрами NX и NY (числом элементов вдоль осей X и Y),



▲ **Рис. 5.** Моделирование микрополосковой антенны



▲ Рис. 6. ДН ФАР на основе изотропных элементов (зеленая линия) и микрополосковых антенн (красная линия)

$dx$  и  $dy$  (расстоянием между соседними элементами) и углом между осями X и Y. При угле в  $90^\circ$  решетка будет прямоугольной, при  $60^\circ$  — треугольной. Угол может принимать любое положительное значение. Структура кругового типа представляет собой ФАР в виде одной или нескольких концентрических окружностей. Радиусы окружностей и число элементов в каждой из них могут быть заданы в виде массивов при помощи переменных  $NC$  и  $R$ . Примеры круговой и решетчатой структур приведены на рис. 4. Можно создать и собственную структуру, задавая число элементов  $N$  и их координаты  $X/Y$ .

Разработчик может ввести коэффициенты усиления или полностью задать ДН каждого антенного элемента ФАР, в том числе с учетом их положения в решетке. Таким образом, можно задать разные ДН для внутренних, краевых и угловых элементов. ДН каждой антенны будет зависеть от ее положения в массиве. Эти ДН могут быть измерены в лаборатории или рассчитаны в интегрированном в платформу NI AWR Design Environment электромагнитном (ЭМ) симуляторе типа AXIEM для планарного анализа или Analyst для 3D-анализа на основе метода конечных элементов. Самый простой подход — использовать ФАР размером  $3 \times 3$  элемента и возбуждать один элемент (внутренний, краевой или угловой), согласованно нагрузив все остальные. В результате получатся ДН этих элементов, которые могут быть автоматически сохранены в файлах данных при помощи специального типа измерений выходных данных NI AWR. Такой подход обеспечит учет взаимного влияния ближайших соседних элементов. Аналогичный подход с использованием решетки  $5 \times 5$  позволит расширить область учета до смежных элементов второго порядка.

Еще одна новая функция VSS — моделирование РЧ-связей отдельных элементов фазированной решетки. Наличие такой возможности является важным, поскольку РЧ-связи неидеальны и могут вызвать значительные отклонения в характеристиках ФАР. В качестве примера, в ФАР часто используются амплитудные распределения; если у всех антенных элементов идентичные РЧ-связи, отдельные элементы (с более высокими коэффициентами усиления) окажутся в режиме компрессии, в то время как остальные продолжают работать на чисто линейном участке. В этом случае производительность ФАР будет напрямую зависеть от того, насколько близко к компрессии работают ее элементы. С другой стороны, основываясь на используемом типе распределения, разработчик может применить различные конструкции РЧ-связей для различных элементов. Несмотря на то, что эта задача является более сложной, в результате получается более эффективная конструкция ФАР, и моделирование в VSS позволяет достичь такого результата. Способность помочь предсказать характеристики устройства и осуществить подстройку

его конструкции для выполнения предъявляемых ему требований — одна из уникальных возможностей VSS, предлагаемых разработчикам ФАР.

#### ПРИМЕР

Стандартный пример проекта показывает, как использовать VSS для моделирования и анализа газированных антенных решеток. В этом проекте отдельные элементы ФАР рассматриваются как микрополосковые антенны, ДН которых задаются файлом данных, созданным на основе результатов ЭМ-симуляции.

На системной диаграмме блок антенны используется для отображения ДН отдельных элементов (рис. 5). Этот блок возбуждается тональным сигналом, а угол места (THETA) и азимут (PHI) меняются. Коэффициент усиления элемента антенны рассчитывается как функция этих углов.

Для иллюстрации моделирования прямоугольной фазированной антенной решетки используются два блока ФАР. Первый блок построен на основе изотропных антенных элементов, а второй — на основе ДН, заданной файлом данных микрополосковой антенны (рис. 5). ФАР создана в конфигурации  $15 \times 5$  с расстоянием между элементами в половину длины волны. Опция создания стандартных конфигураций ФАР позволяет создать прямоугольную или треугольную решетку на основе параметров  $dx$ ,  $dy$  и  $\gamma$  (рис. 4а).

В этом примере используется распределение Чебышева с относительным уровнем боковых лепестков  $-40$  дБ для построения зависимости ДН ФАР от угла отклонения. Результаты для двух ФАР приведены на рис. 6 для иллюстрации влияния отдельных элементов на ДН ФАР.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возможность проектирования и контроля характеристик отдельных компонентов и всего сигнального канала радара с АФАР — это необходимость в условиях, когда число элементов стремительно растет, а интеграция антенных и электронных компонентов непрерывно увеличивается. Благодаря моделированию схем, поведенческому моделированию на системном уровне и электромагнитному анализу, проводимых в рамках единой платформы, разработчики могут оценивать производительность и межкомпонентное взаимодействие систем без необходимости в дорогостоящем прототипировании.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Xiaoxiong Gu et al. *W-Band Scalable Phased Arrays for Imaging and Communications*//IEEE Communications. April, 2011.