

ПРОЕКТ ТРЕХМЕРНОЙ РЕШЕТЧАТОЙ АНТЕННЫ: ОТ ЭСКИЗА К РЕАЛИЗАЦИИ

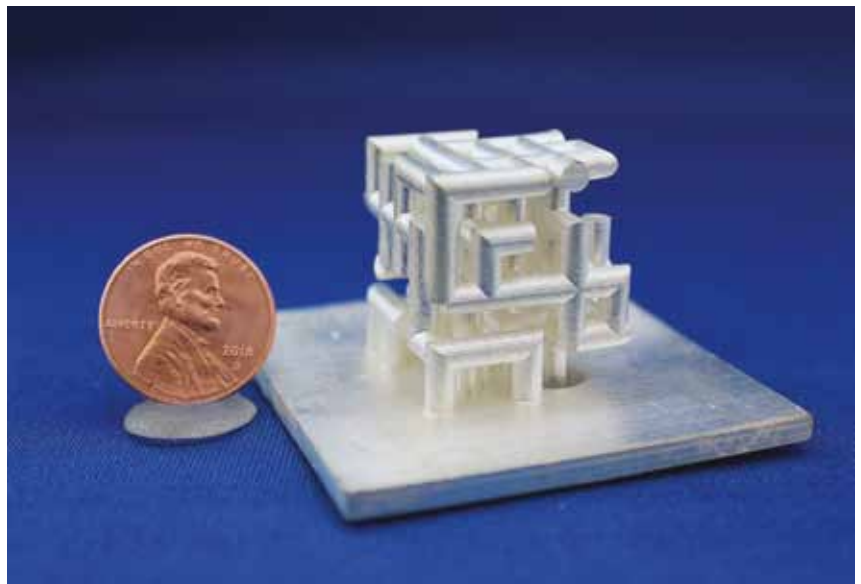
Развитие технологий связи нового поколения, включая сети 5G, «Интернет вещей» и «умные» системы автомобилей, требует появления более продвинутых антенн и компонентов, что, в свою очередь, заставляет инженеров создавать новые проекты с учетом появляющихся технологий, материалов. Кроме того, существует необходимость в высокой интеграции устройств, как следствие, это означает поиск нестандартных решений для поставленных задач. В данной статье мы расскажем об уникальном проекте антенны, созданном благодаря инструментам синтеза и оптимизации, встроенным в программное обеспечение NI AWR.

СИНТЕЗ АНТЕННЫ

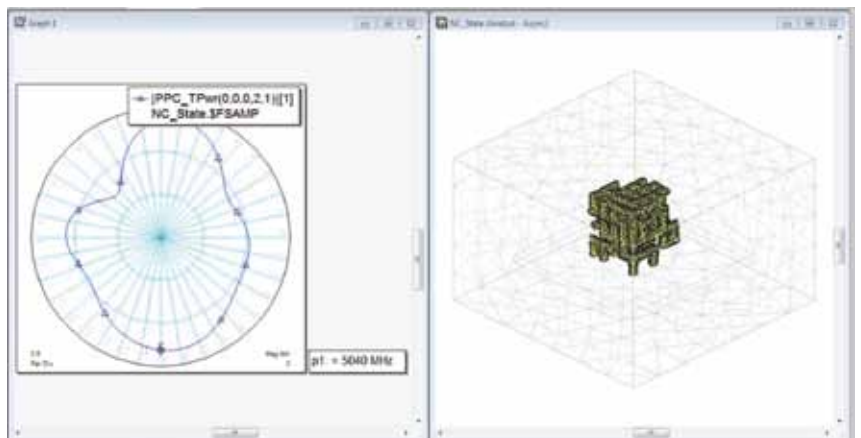
Для демонстрации возможностей программных инструментов был разработан проект трехмерной решетчатой антенны (рис. 1) для синтеза и оптимизации при помощи AntSyn — уникального продукта, позволяющего на основе заданных спецификаций синтезировать конструкцию антенны и провести полноценное трехмерное электромагнитное (ЭМ) моделирование на удаленных серверах Amazon (доступны и локальные версии). Трехмерная решетчатая антенна — это переплетение цилиндрических проводников, состоящих из прямых отрезков и 90-градусных перегибов, конструкция которых синтезируется при помощи программного обеспечения. Полученный результат можно импортировать в любой доступный 3D-ЭМ-симулятор наподобие Analyst для верификации и подстройки.

AntSyn создавался для того, чтобы использовать его могли инженеры с любым опытом работы с антеннами — от экспертов до абсолютных новичков. Ввод спецификаций производится через дружелюбный и интуитивно понятный интерфейс, в котором можно задать все необходимые параметры антенны, такие как частотный диапазон или несколько диапазонов, диаграмма направленности, целевой импеданс и физические размеры. Помимо того, можно указать желаемые типы и конструкции антенн из обширной библиотеки, включающей как распространенные типы антенн (патч-антенны, антенны Вивальди и т. д.), так и нестандартные конструкции.

Для генерации конструкции, соответствующей заданным спецификациям, AntSyn предлагает пользователю указать физические ограничения, включающие ось антенны, максимальный объем, за-



▲ Рис. 1. Прототип трехмерной решетчатой антенны, покрытый серебром



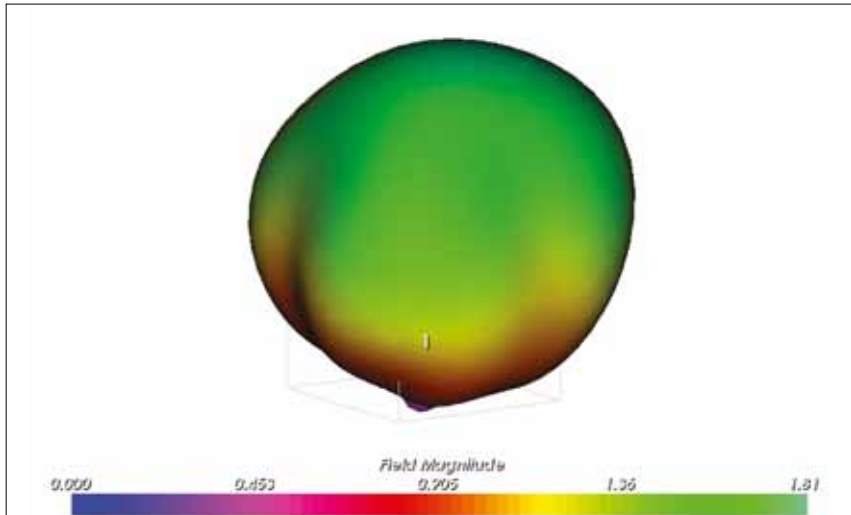
▲ Рис. 2. Синтезированная антенна импортируется в Analyst для дальнейшего анализа

нимаемый конструкцией, ограничения на размеры самой антенны, минимальные и максимальные размеры заземления и параметры диэлектриков.

Синтез производится на основе эволюционных алгоритмов для всех выбранных потенциальных конструкций, после чего разработчик может наглядно

сравнить полученные результаты и оценить, какие из них наилучшим образом отвечают заданным требованиям. Все результаты отображаются в AntSnp, затем конструкция антенны может быть экспортирована в ЭМ-симуляторы для дальнейшего анализа. К примеру, на рис. 2 показана синтезированная конструкция антенны и диаграмма направленности (ДН) на графике.

3D-ЭМ-симулятор на основе метода конечных элементов Analyst, встроенный в NI AWR Design Environment, позволяет выполнять трехмерное ЭМ-моделирование с адаптивным построением тетраэдрической сетки, прямым и итеративным солверами, а также с дискретной и быстрой разверткой по частоте. Симулятор способен точно и быстро промоделировать сложные структуры, включая антенны любых типов, в том числе патч-антенны и антенные решетки на диэлектриках конечной толщины, построить ДН в ближней и дальней зоне (рис. 3) и рассчитать такие параметры антенны, как коэффициент усиления, направленность, КПД, уровень боковых лепестков ДН, возвратные потери, поверхностные токи и т. п.

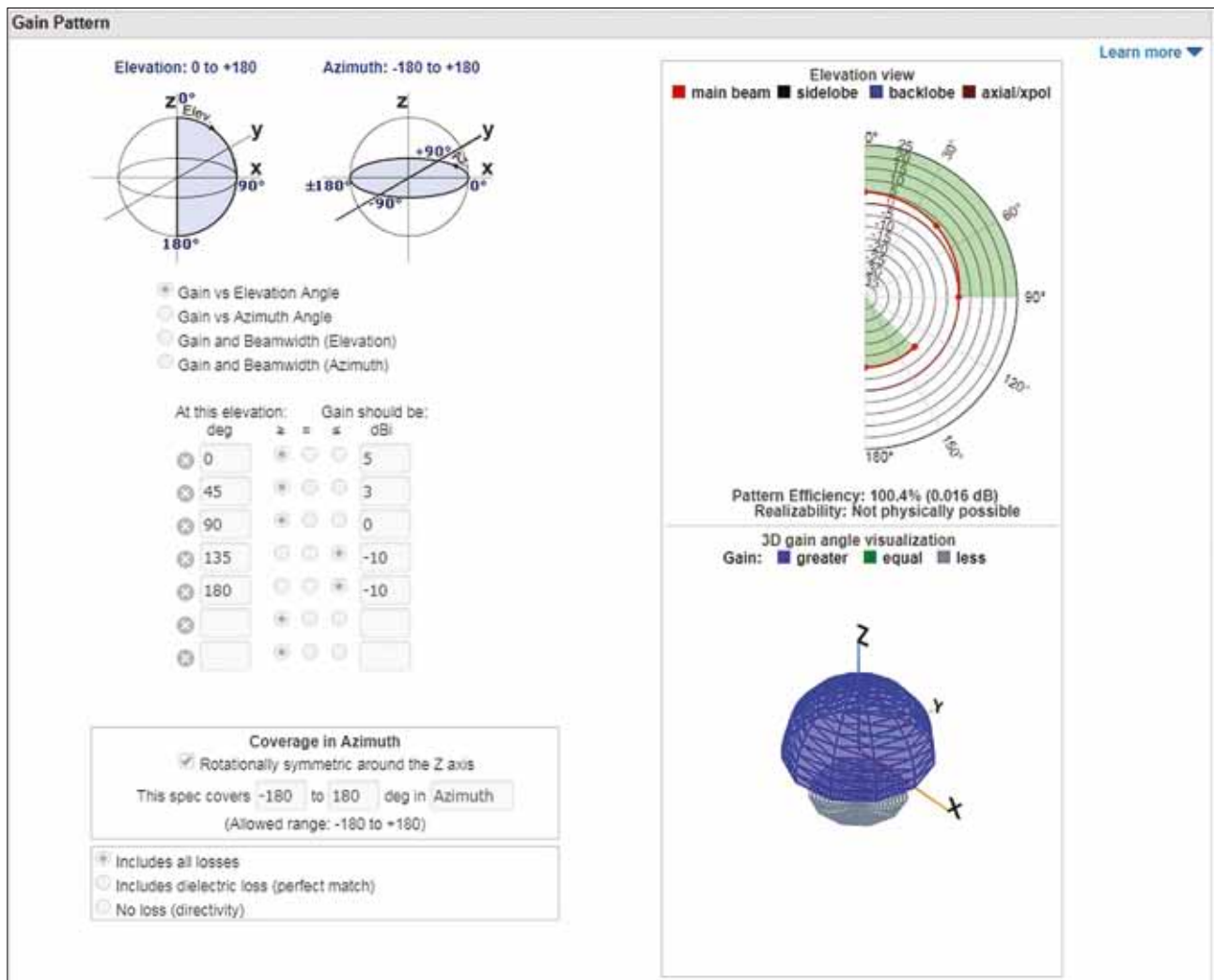


▲ Рис. 3. ДН антенны в дальней зоне, полученная в Analyst

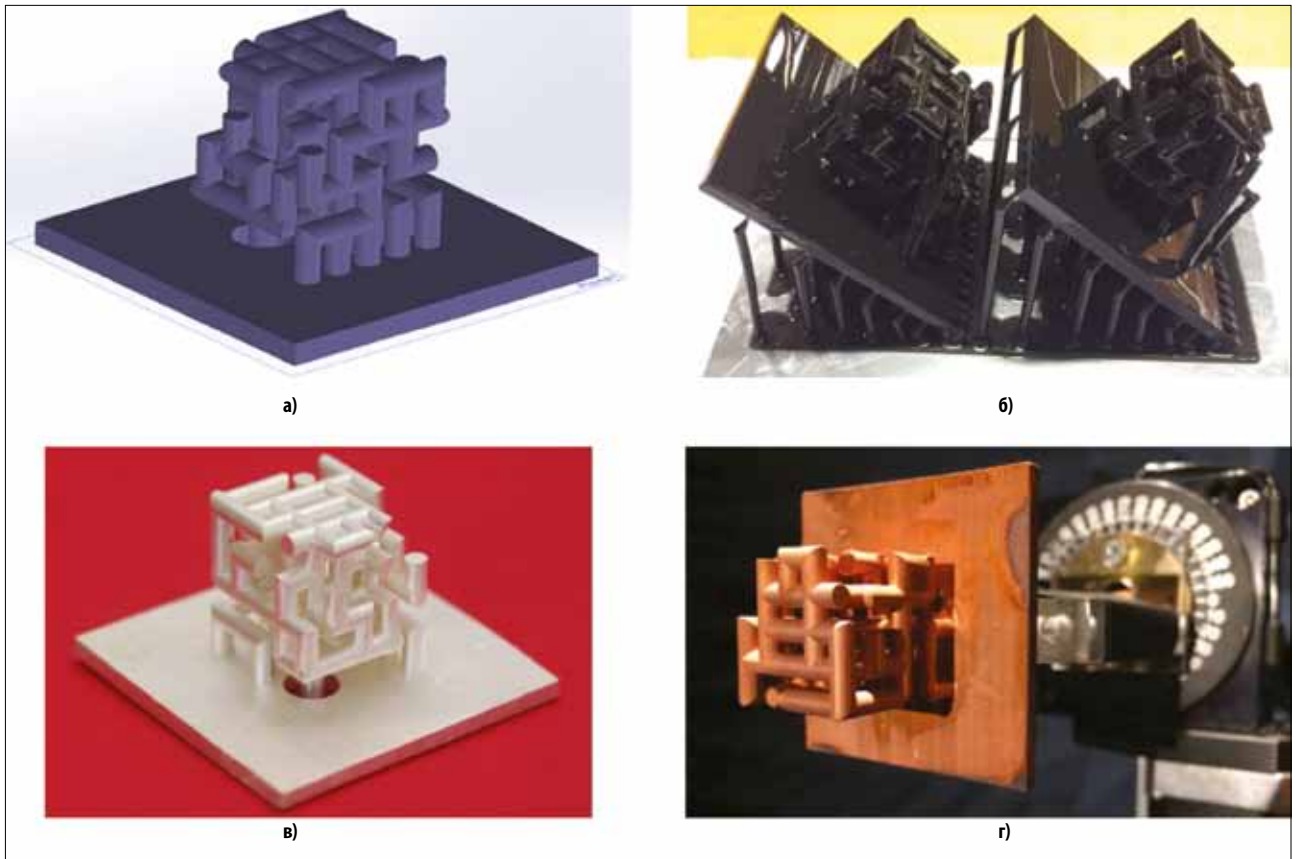
ИЗГОТОВЛЕНИЕ

Ввиду своей сложной структуры трехмерная решетчатая антенна может быть достаточно дорогой и непростой в изготовлении традиционными методами, однако дело значительно упрощается при использовании технологии 3D-печати. Данный проект был рассчитан на изготовление на принтере, доступном автору

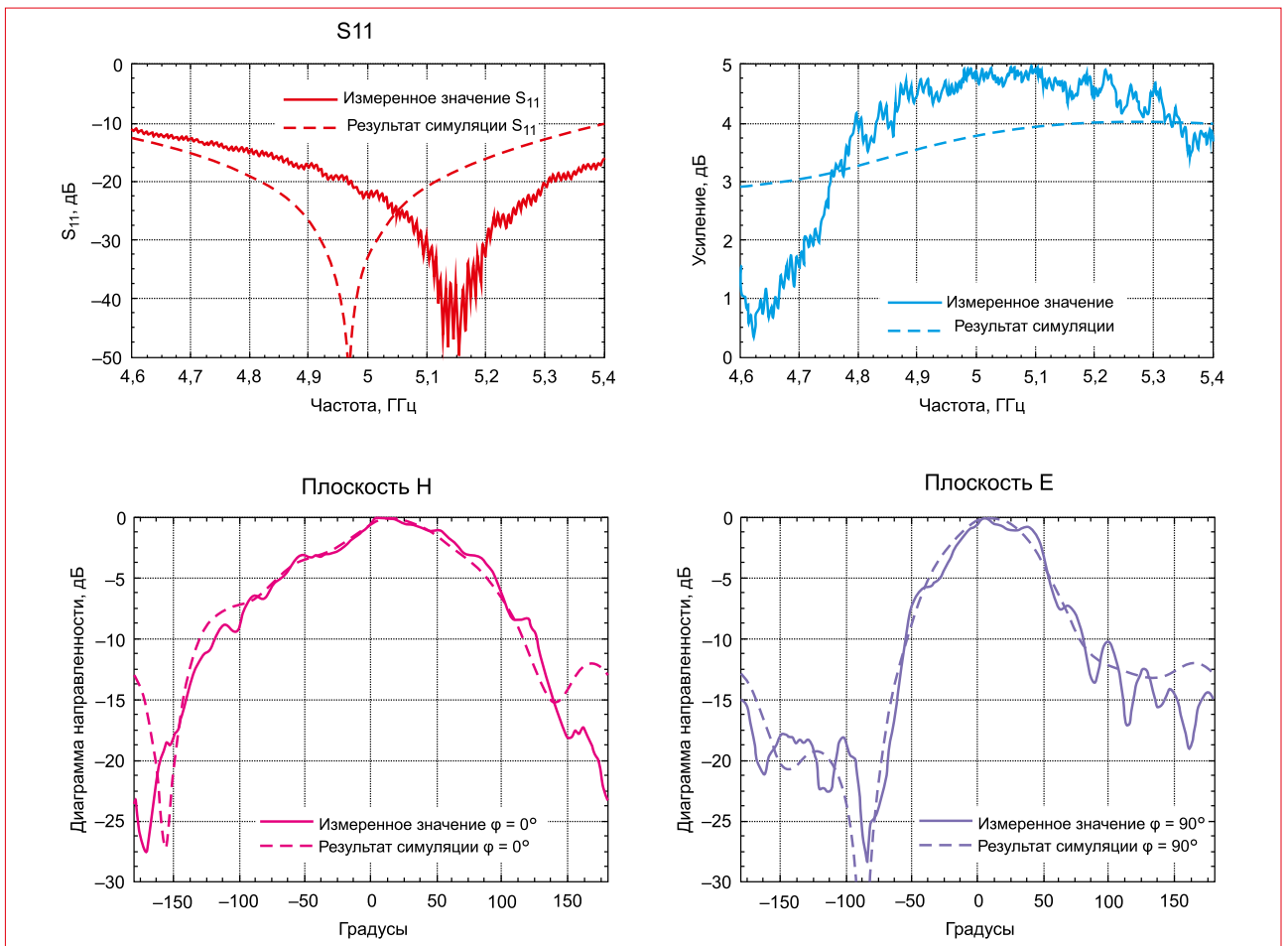
статьи, однако при наличии более технологически совершенных принтеров возможно создание антенн меньшего размера и большей сложности конструкции. В данном случае спецификации антенны были заданы следующим образом: частотный диапазон 5,0–5,1 ГГц; усиление более 5 дБн вдоль электрической оси антенны и более 3 дБн при



▲ Рис. 4. Интерфейс ввода диаграммы направленности



▲ **Рис. 5.** Этапы создания антенны: а) модель в САПР; б) распечатанная антенна; в) антенна после покрытия серебром; г) тестируемый прототип (авторы изображения Д. Шен и Д. С. Рикеттс)



▲ **Рис. 6.** Сравнение результатов моделирования и измерений (авторы изображения Д. Шен и Д. С. Рикеттс)

$\theta = 45^\circ$. Для $\theta = 135^\circ$ усиление задано менее -10 дБн (рис. 4); уровень возвратных потерь в заданном диапазоне не менее 10 дБ, совокупные размеры антенн — не более $6 \times 6 \times 6$ см. Следует отметить, что размеры самой антенны были ограничены до $3 \times 3 \times 6$ см, заземление — до $6 \times 6 \times 0,3$ см, а радиус проводника антенны ограничен между $0,02$ и $0,04$ длин волн (на 5 ГГц) для упрощения изготовления конструкции.

Одна из настроек AntSyn позволяет выбирать глубину поиска возможных конструкций антенны. Выбор опции быстрого поиска Fast results помогает получить удовлетворительные результаты всего за 15 минут, тем самым подтвердив возможность создания выбранной конструкции при заданных параметрах. Для финального синтеза была выбрана опция максимальной точности Best Performance. Во время синтеза было выполнено более $50\,000$ симуляций, проводившихся параллельно на четырех процессорах. Каждая итерация занимала $1-11$ с, при этом общее время синтеза и оптимизации составило $10,5$ ч.

В результате синтеза получена конструкция антенны высотой $2,31 \times 2,24 \times 2,31$ см. Процесс изготов-

ления прототипа изображен на рис. 5. Синтезированная в AntSyn модель с незначительными модификациями порта питания может быть использована напрямую для 3D-печати. Входной порт антенны на симуляционной модели (рис. 5а) был отсоединен от заземления для ручного добавления коаксиального коннектора, разработанного на основе стандартного SMA-коннектора. Модель была распечатана на 3D-принтере с цифровой оптической обработкой из акрилатного пластика. Разрешение печати составило $50 \times 50 \times 50$ мкм. Как видно на рис. 4б, была выбрана ориентация заготовки под 45° для сокращения числа поддерживаемых конструкций. Распечатанная антенна металлизирована (рис. 5в) методом химического восстановления, в результате чего получена пленка серебра толщиной 100 нм. Толщина металлизации была увеличена до 30 мкм за счет электролитического покрытия медью.

ИЗМЕРЕНИЯ

Изготовленная антенна была установлена поворотную площадку в безэховой камере для измерений ДН (рис. 5г). На рис. 6 показаны измеренные данные в сравнении с результатами ЭМ-

моделирования. Уровень возвратных потерь указывает на полученное широкополосное согласование $4,6-5,4$ ГГц; коэффициент усиления максимален в области 5 ГГц. Полученные ДН в Е- и Н-плоскостях соответствуют результатам моделирования. Отклонения от данных симуляции объясняются либо погрешностями процесса печати, либо влиянием коаксиального коннектора, который не учитывался при моделировании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уникальный проект антенны, основанный на использовании инструмента синтеза и оптимизации AntSyn, доказывает, что функционал программных решений NI AWR позволяет создавать высокопроизводительные антенны нестандартных конструкций, что было бы невозможно при использовании стандартных методов проектирования антенных устройств. Применение методов 3D-печати помогло получить технологический процесс, начинающийся с ввода спецификаций в пользовательском интерфейсе и заканчивающийся созданием работоспособного и отвечающего заданным требованиям прототипа с первой попытки. ■