

# Обзор САПР для проектирования и моделирования СВЧ-электроники Cadence AWR Design Environment 15

Александр Акулин (akulin@pcbsoftware.com)

Программное обеспечение Cadence® AWR Design Environment®, включающее в себя инструменты AWR® Microwave Office®, AWR Visual System Simulator™ (VSS), AWR AXIEM® и AWR Analyst™, представляет собой полноценную платформу для радиочастотной/микроволновой связи, предназначенную для инженеров, занимающихся разработкой коммуникационной и радиолокационной электроники следующего поколения.

Чтобы удовлетворить потребность в увеличении скорости передачи данных и пропускной способности телекоммуникационных устройств, разработчики передовых коммуникационных, аэрокосмических и автомобильных приложений используют всё более широкую полосу пропускания, спектр миллиметровых волн и пространственную эффективность за счёт применения систем с множественными выходами (ММО) и фазированных антенных решёток (ФАР) с управлением лучом. В связи с растущей потребностью в малых габаритах и снижении стоимости устройств продолжают развиваться интерфейсные ВЧ-компоненты (высококачественные) и компоненты миллиметрового спектра, которые идут в ногу с новыми системными требованиями, а также с требованиями вспомогательных технологий и соображениями габаритов/стоимости.

Инженерные группы, занимающиеся решением задач по обеспечению производительности, интеграции, стоимости и размеру устройств, стремясь удовлетворить всё более сложные требования к продукту, сталкиваются с требованиями сокращения времени выхода на рынок. Компании, пытающиеся вывести новые телекоммуникационные продукты на рынок, нуждаются в лучшей в своём классе технологии моделирования и автоматизации проектирования, чтобы точно прогнозировать нюансы работы более сложных микросхем высокой степени интеграции и подсистем, предназначенных для широкополосного и миллиметрового спектров. Кроме того, поскольку эти продукты разрабатываются внутри компании совместно различными командами инженеров с использованием нескольких инстру-

ментов проектирования, программное обеспечение (ПО) ВЧ-проектирования должно обеспечивать совместимость с более широким классом САПР электроники, используемых при разработке электронных систем со смешанным сигналом.

Чтобы обеспечить успешность и увеличить эффективность разработки продукта, это ПО должно предлагать автоматизацию, которая поддерживает техническую производительность наряду с плавно интегрированными схемным, системным и электромагнитным (ЭМ) моделированием, синтезом и оптимизацией. Эти возможности встроены в ПО Cadence® AWR Design Environment®, включающее в себя инструменты AWR® Microwave Office®, AWR Visual System Simulator™ (VSS), AWR AXIEM® и AWR Analyst™, и обеспечивают надёжную и полную платформу для радиочастотной/микроволновой связи, предназначенную для инженеров, занимающихся разработкой коммуникационной и радиолокационной электроники следующего поколения.

С выходом версии 15 (v15) программного продукта AWR Design Environment компания Cadence занялась разработкой и интеграцией радиочастотных и микроволновых технологий с помощью стратегии Intelligent System Design™, которая предоставляет вычислительные возможности программного обеспечения для всех элементов проекта электронной системы. В основе этой стратегии лежит совершенство проекта, что включает в себя оптимизированный портфель инструментов САПР с лучшими в своём классе радиочастотными, микроволновыми схемами и схемами миллиметрового диапазона, системным и электромагнитным

анализом, IP для проектирования полупроводниковых компонентов, корпусов и печатных плат, а также масштабируемый доступ в облаке.

## Преимущества релиза AWR v15

Новый релиз AWR Design Environment v15 (см. рис. 1) предлагает новые и улучшенные технологии, которые обеспечивают более высокую эффективность проектирования и успешность проекта с первой итерации для инженерных команд, разрабатывающих и интегрирующих микросхемы по технологии III-V и кремниевые (Si) интегральные схемы (ИС), мультитехнологические модули и сборки печатных плат. Производительность инженеров повышается благодаря новым методам анализа, более быстрым и высокопроизводительным технологиям моделирования, экономии времени при автоматизации проектирования и наличию испытательных стендов, совместимых со стандартом 5G New Radio (NR), которые поддерживают проектирование усилителей мощности и антенн/антенных решёток, моделирование ЭМ и интеграцию ВЧ-/микроволновых структур в гетерогенных технологиях.

В таблице представлены основные нововведения AWR Design Environment v15.

## Среда проектирования и возможности автоматизации

Новый функционал среды проектирования помогает отдельным инженерам и командам разработчиков более эффективно вводить данные о конструкции, отображать информацию и управлять проектами (см. рис. 2). Разработчики могут корректировать цели оптимизации непосредственно на графиках, прокладывая в реальном времени интеллектуальные цепи (iNets), совместимые с правилами проектирования, импортировать шаблоны проектов на основе Gerber-файлов в среду проектирования AWR для ЭМ-анализа и в целом получают больше пользовательских возможностей для выполнения задач проектирования.

С учётом увеличивающихся размера и сложности электронных систем РЧ (радиочастотных) и смешанных сигналов, новая, более быстрая прокладка цепей и возможность трёхмерной визуализации в AWR v15 позволяют пользователям мгновенно увеличивать и уменьшать масштаб или вращать большие конструкции, чтобы осматривать физический проект под любым углом без какого-либо запаздывания. Печатные платы большого размера, импортированные в виде файлов IPC-2581 или ODB++ из САПР Cadence Allegro® PCB Designer или других САПР печатных плат, можно легко проверить визуально перед редактированием и подготовкой к ЭМ-анализу с помощью мастера редактирования печатных плат.

Кроме того, версия v15 программного обеспечения AWR расширяет поддержку интеграции РЧ-/СВЧ-компонентов в мультитехнологические системы. Файл определения процесса слоя (LPF) в AWR Microwave Office определяет уровни обработки и параметры для проекти-

рования физического макета. Для анализа неоднородных подложек и многокристалльных модулей, использующих различные полупроводниковые процессы и ламинаты, ПО AWR Design Environment поддерживает несколько определений процессов в рамках одного иерархического проекта. Собственные блоки LPF с описанием параметров каждого техпроцесса позволяют различным процессам самостоятельно определять единицы измерения, наиболее подходящие для данной технологии (например, мил или микрон).

### Моделирование и проектирование усилителей мощности

Чтобы удовлетворить требования к полосе пропускания, системы 5G объединяют непрерывный и прерывистый спектры на частотах ниже 6 ГГц и используют преимущества доступной полосы пропускания на частотах миллиметровых волн. Это усложняет задачу разработчиков ВЧ-усилителей,

#### Основные нововведения AWR Design Environment v15

Интерфейс / автоматизация	Схемный анализ	ЭМ-анализ	Системный анализ	Топология
Построение контуров load-pull на прямоугольных графиках. Измерения при помощи шаблонов цепей. Добавление целей оптимизации прямо на график. Редактирование осей прямо на графике. Цветовая кодировка маркеров. Группировка уравнений.	Ускоренный анализ устойчивости. Низкочастотный load-pull анализ с двухтоновым возбуждением. Интеграция калькулятора линий передачи. Синтез цепей согласования с компонентами библиотек поставщиков.	Ускоренная и более точная адаптивная сетка. AXIEM DC для расчёта на постоянном токе. Измерения пиковых характеристик антенн.	Предустановленные тестовые схемы 5G NR. Поддержка шин MIMO для ФАР. Блок алгоритмов линеаризации усилителей (DPD).	Трассировка iNets в реальном времени с учётом DRC. Поддержка мультимасштабных проектов. Режим ввода «2 клика». Изменение размеров объектов в окне их параметров. Импорт топологии плат на основе Gerber-файлов для ЭМ-анализа.

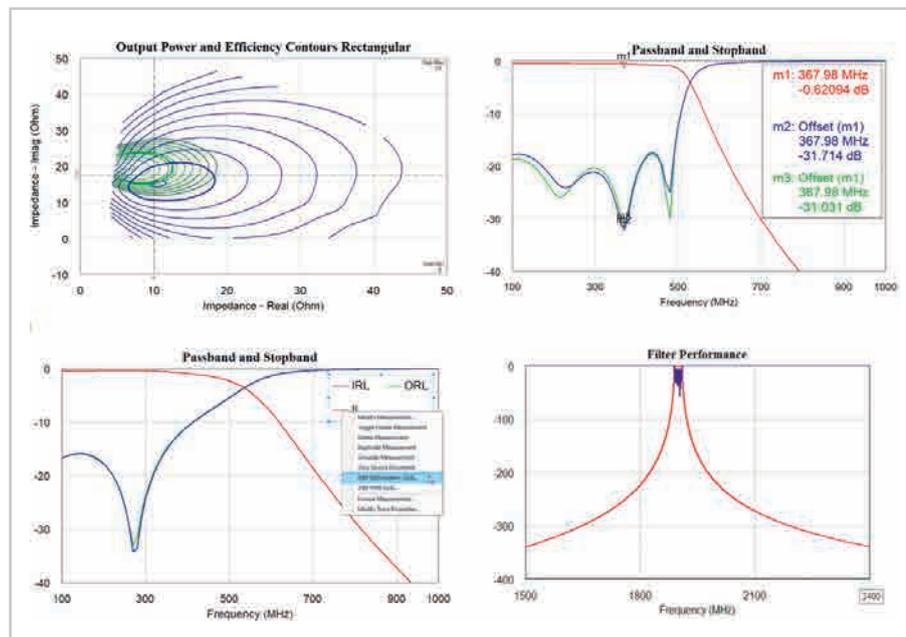


Рис. 2. Улучшенное отображение данных с новыми типами графиков и управлением

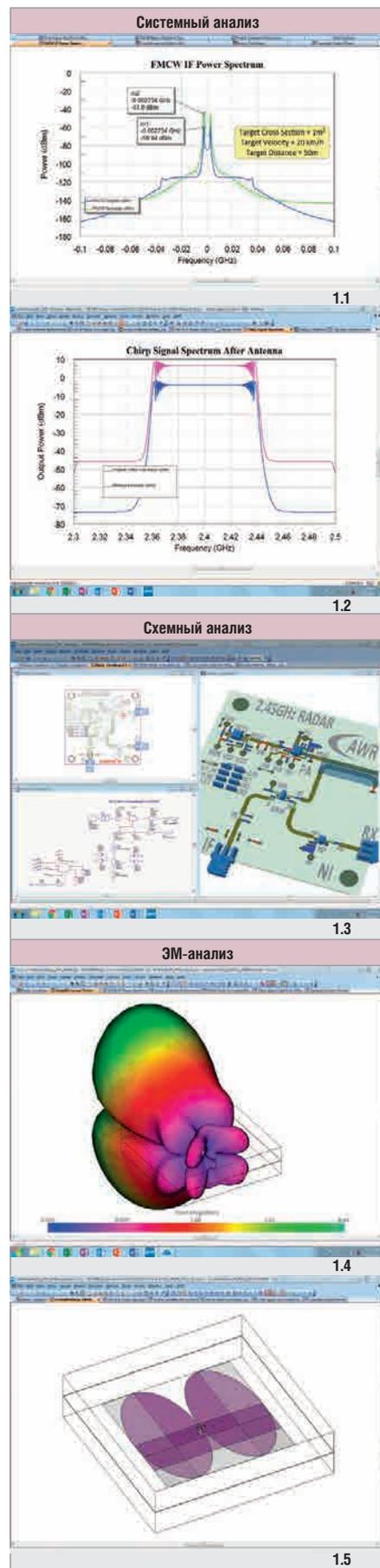


Рис. 1. Платформа AWR Design Environment: 1.1, 1.2) тестовые схемы, поэлементный анализ тракта, анализ спуров, 1.3) линейный/нелинейный анализ и оптимизация, 1.4, 1.5) экстракция S-параметров и визуализация полей

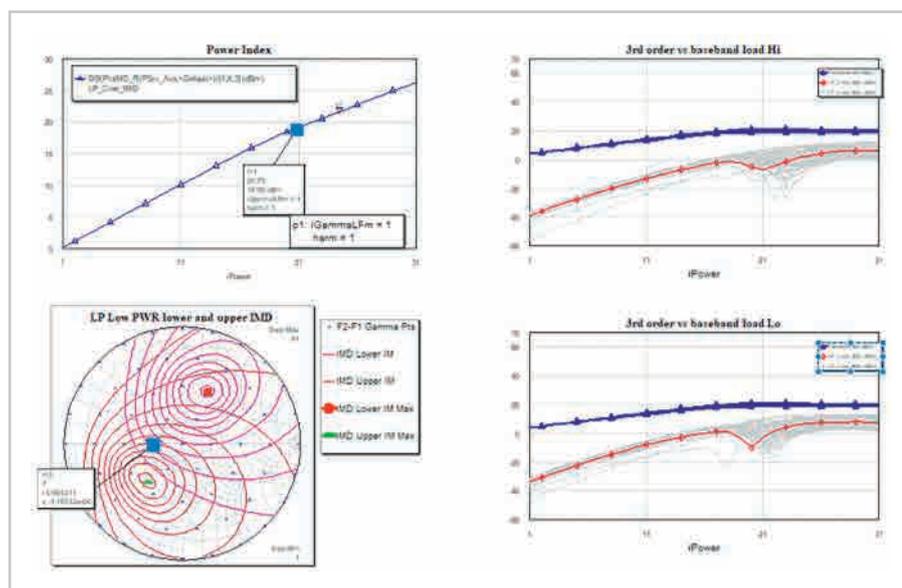


Рис. 3. Алгоритм load-pull поддерживает оптимизацию импеданса в основной полосе для сокращения эффектов интермодуляции

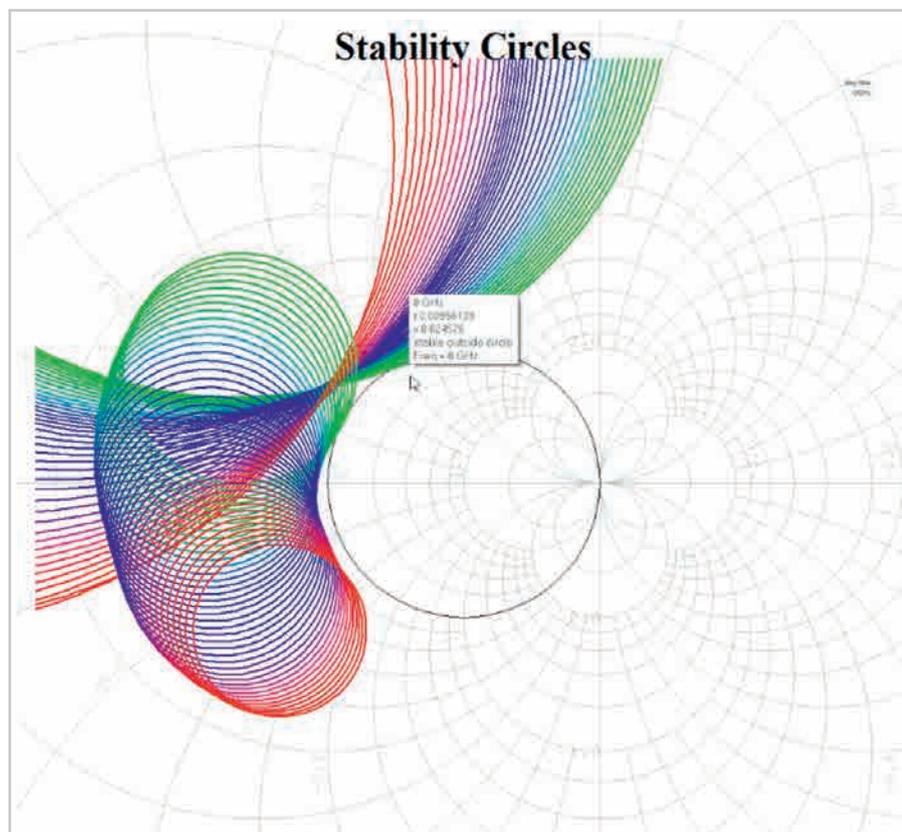


Рис. 4. Нелинейный анализ и оптимизация устойчивости ускоряется благодаря новому методу огибающей усиления контура

которым необходимо решать проблемы линейности и эффективности при высоких соотношениях пиковой мощности к средней мощности (PAPR).

В широкополосных усилителях изменение импеданса нагрузки по ширине полосы сигнала может влиять на линейность устройства, приводя к уровням интермодуляционных искажений (IMD), которые асимметрично изме-

няются внутри полосы сигнала. Эта проблема, связанная с т.н. «эффектами памяти», обычно решается с помощью обходных конденсаторов, чтобы терминировать импеданс в основной полосе коротким замыканием.

Тем не менее качество усилителя может быть улучшено с помощью альтернативных способов обеспечения импеданса в основной полосе. Напри-

мер, некоторые разработчики усилителей показали значительные улучшения линейности в случае, когда используются активные архитектуры работы схемы в основной полосе, такие как отслеживание огибающей (ET).

Версия 15 программного обеспечения AWR позволяет проектировщикам оптимизировать линейные характеристики усилителей с помощью анализа нагрузки в основной полосе сигнала при работе с двухтоновым возбуждением. Разработчики могут построить результаты IMD и точки пересечения третьего порядка (IP3) в зависимости от импеданса на частоте F2-F1, непосредственно исследуя результаты интермодуляции в зависимости от подаваемой входной мощности.

Анализ методом изменяемой нагрузки (load-pull) поддерживает настройку импеданса на 4-й и 5-й гармониках (см. рис. 3), а также предоставляет возможность генерировать контуры на прямоугольных графиках для улучшенной визуализации характеристик в зависимости от импеданса нагрузки.

Транзисторы, разработанные для конструкций усилителей в миллиметровом диапазоне, имеют высокий коэффициент усиления на низких частотах, что делает их более склонными к потенциальным паразитным колебаниям. Анализ стабильности имеет решающее значение для проектирования и оптимизации усилителя, особенно для устройств с высоким коэффициентом усиления.

Обычно используемые коэффициенты  $K$  и  $\mu$ , полученные из моделирования линейных цепей, могут достаточно точно предсказать, является ли двухпортовая схема безусловно устойчивой, но они не могут обнаружить неустойчивость для многоступенчатых усилителей или параллельно подключённых устройств. Преодолеть эти ограничения позволяют другие методы анализа стабильности, такие как NDF (Normalized Determinant Function) и методы усиления контура, однако основным их недостатком является большой объём необходимых вычислений, существенно замедляющий процесс оптимизации.

Было показано, что метод огибающей для анализа усиления контура (см. рис. 4) позволяет сократить время моделирования с нескольких часов до секунд, что делает его идеальным методом для решения задач оптимизации при расчёте устойчивости усилителей.

Версия 15 программного обеспечения AWR поддерживает этот метод с предоставлением модуля кода огибающей усиления контура и блока уравнений, которые могут быть легко применены к новым проектам усилителей.

Поддержка анализа устойчивости методом огибающей контура даёт разработчикам следующие преимущества:

- оценку устойчивости и запас по устойчивости каждого устройства в усилителе;
- входные и выходные согласования применяются аналитически, что увеличивает скорость анализа;
- требуется меньше комбинаций оценки фазы, что увеличивает скорость анализа;
- в связи с повышением скорости становится возможной оптимизация запаса по фазе для каждого устройства в усилителе.

### Синтез ускоряет разработку СВЧ

Характеристический импеданс и электрическая длина (задержка) линий передачи представляют собой два важных конструктивных параметра, используемых для управления частотно-зависимой характеристикой цепи пассивных РЧ-/СВЧ-цепей, таких как четвертьволновые трансформаторы, делители/сумматоры мощности Уилкинсона, гибридные ответвители, фильтры и др.

Используя среду проектирования AWR v15, разработчики могут напрямую синтезировать физические атрибуты (ширину, длину) этих микрополосковых, полосковых или копланарных волноводных структур для данной подложки на основе требуемых электрических характеристик.

Аналогичным образом электрические характеристики могут быть рассчитаны непосредственно из физических свойств одиночной или подсоединённой линии передачи, размещённой на схеме (см. рис. 5). Синтез параметров модели схемы обеспечивает важные данные для формирования точного расположения этих линий передачи без необходимости запуска калькулятора линии передачи и без нужды вручную передавать результаты расчёта в диалоговое окно свойств линии передачи.

Дальнейшее расширение синтеза в качестве мощного средства проектирования – «расширенный мастер синтеза цепей» – ускоряет разработку цепей согласования импеданса для сложных

широкополосных и многоканальных усилителей и межкаскадных схем согласования, позволяя пользователям синтезировать схемы оптимального согласования напрямую, используя компоненты из библиотеки поставщиков компонентов для поверхностного монтажа, встроенной в AWR Microwave Office. Эта функция также поддерживает модели из библиотек техпроцессов (PDK), тем самым расширяя возможности синтеза согласующих цепей на схемы усилителей на основе монолитных микроволновых интегральных схем (ММИС) и на другие конструкции на основе ММИС.

### ЭМ-моделирование и антенны

В целях повышения скорости и объёма ЭМ-анализа интегральных схем (ИС), корпусов и печатных плат, технология построения сетки и решателя AWR AXIEM претерпела несколько ключевых улучшений. Это привело к повышению качества разбиения сетки для обеспечения более быстрого времени моделирования и увеличения доступного объёма расчётов благодаря сокращённой сетке (см. рис. 6).

AWR Design Environment v15 теперь может автоматически обнаруживать и удалять проблемные элементы сетки с помощью алгоритма надёжной корректировки граней с большим соотношением сторон (HARF). Программное обеспечение поддерживает разрешение металлов и диэлектриков в субнанометровом

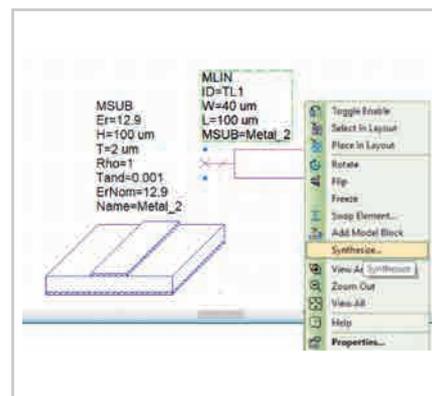


Рис. 5. Синтез электрических/физических параметров линий передачи доступен непосредственно на компоненте схемы

масштабе (нм) по оси Z (предварительно округляя до ближайшего нм), чтобы обеспечить более быстрое моделирование многослойных ИС-структур с субнанометровыми слоями (к примеру, МДМ-конденсаторов).

Как большие печатные платы, так и кремниевые компоненты на кристалле могут содержать производственные элементы, которые не влияют на функциональность ВЧ, но могут замедлить ЭМ-анализ, увеличивая общий объём расчётной задачи. В AWR Design Environment v15 правила предварительной обработки формы объекта были расширены таким образом, чтобы лучше соответствовать особенностям процессов производства кремниевых ИС (т.е. обрабатывать большее количество металлических слоёв) и объём

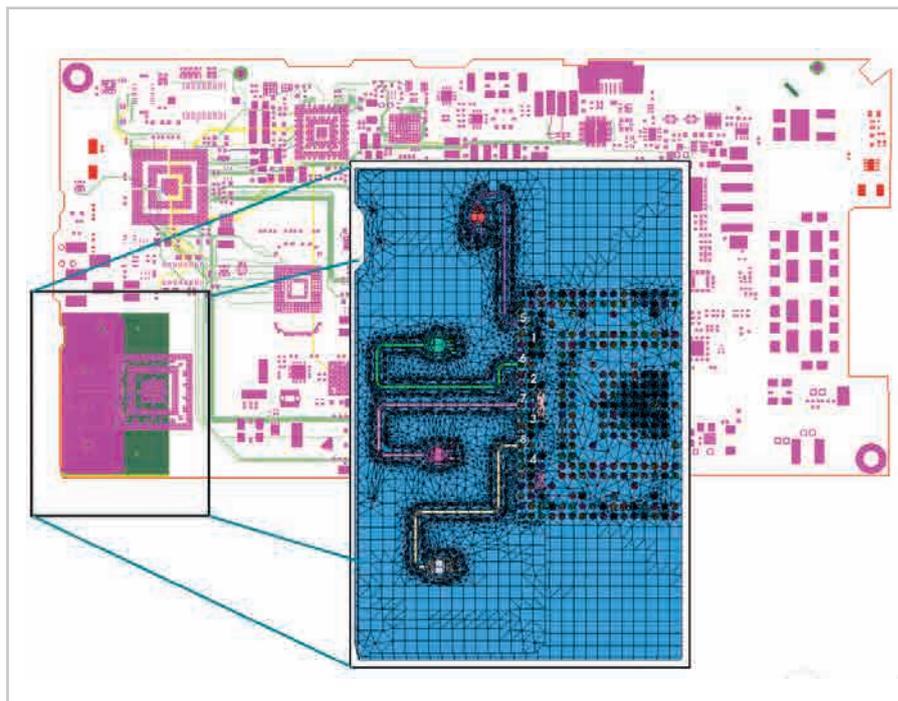


Рис. 6. Усовершенствованные сетка и алгоритмы расчёта позволяют быстрее моделировать большие задачи

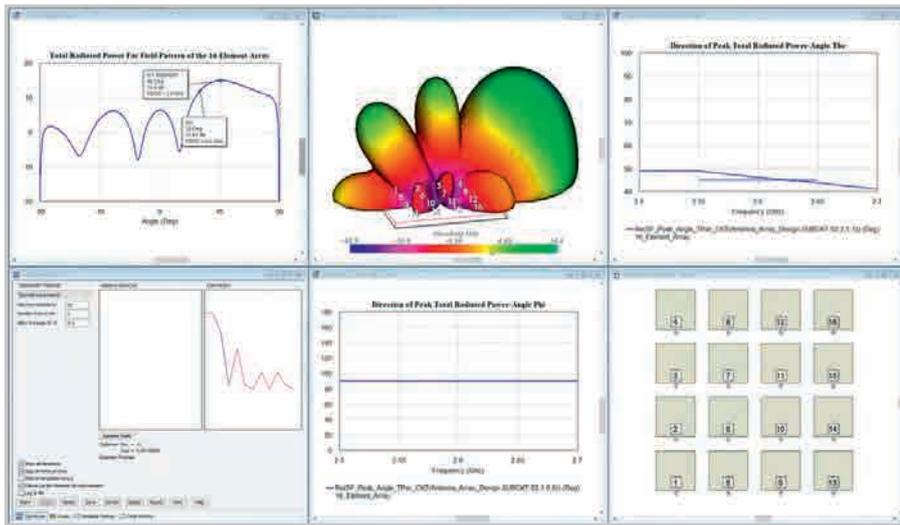


Рис. 7. Измерения пиковых характеристик антенны поддерживают оптимизацию направленности антенны и отображение зависимостей от переменных параметров

динять массивы отверстий на пользовательских слоях, а также внутри и за пределами указанной области.

Кроме того, в усовершенствованиях решателя AWR AXIEM DC (используемого для определения низкочастотных характеристик, например анализа цепей смещения) используется новая технология разреженных симметричных матриц, что приводит к экономии времени и памяти в 10...100 раз.

ПО AWR Design Environment позволяет пользователям анализировать различные показатели эффективности антенны, такие как общая мощность или мощность в определённой поляри-

зации на некотором «срезе». Версия 15 программного обеспечения представляет новый класс измерений пиковых показателей антенны, который позволяет разработчикам легко устанавливать цели оптимизации и переменные для управления характеристиками антенны (см. рис. 7).

Например, разработчик антенны может легко изменить конструкцию фазированной решётки с помощью программного обеспечения AWR AXIEM или Analyst, изменяя ориентацию центрального лепестка диаграммы направленности на некоторый заданный угол. Кроме того, пользователи теперь могут

строить пики диаграммы направленности антенны для параметров E-Phi, E-Theta, E-LHCP, E-RHCP и общей мощности излучения в зависимости от частоты качания непосредственно из диалоговых окон измерения и оптимизации. Доступны как статически управляемые, так и схемно-управляемые вариации этих измерений.

Разработчики антенн теперь могут напрямую моделировать нагрузку антенны, согласовывать схемы и моделировать частотно-зависимые компоненты непосредственно в моделях Analyst. Такие компоненты, как резисторы, катушки индуктивности, конденсаторы (RLC) и согласующие цепи, встроенные в антенну, могут быть промоделированы без необходимости использования дополнительных портов и совместного моделирования цепей. Частотно-зависимые компоненты при моделировании антенны также могут использоваться для проектирования реконфигурируемых или более широкополосных антенн.

### Библиотека 5G NR (New Radio) и модели цифрового предсказания

Библиотека 5G NR предлагает простые в настройке источники и приёмники сигналов, которые можно использовать для оценки РЧ-компонентов или РЧ-линий с использованием измерений на системном уровне (см. рис. 8). Новые

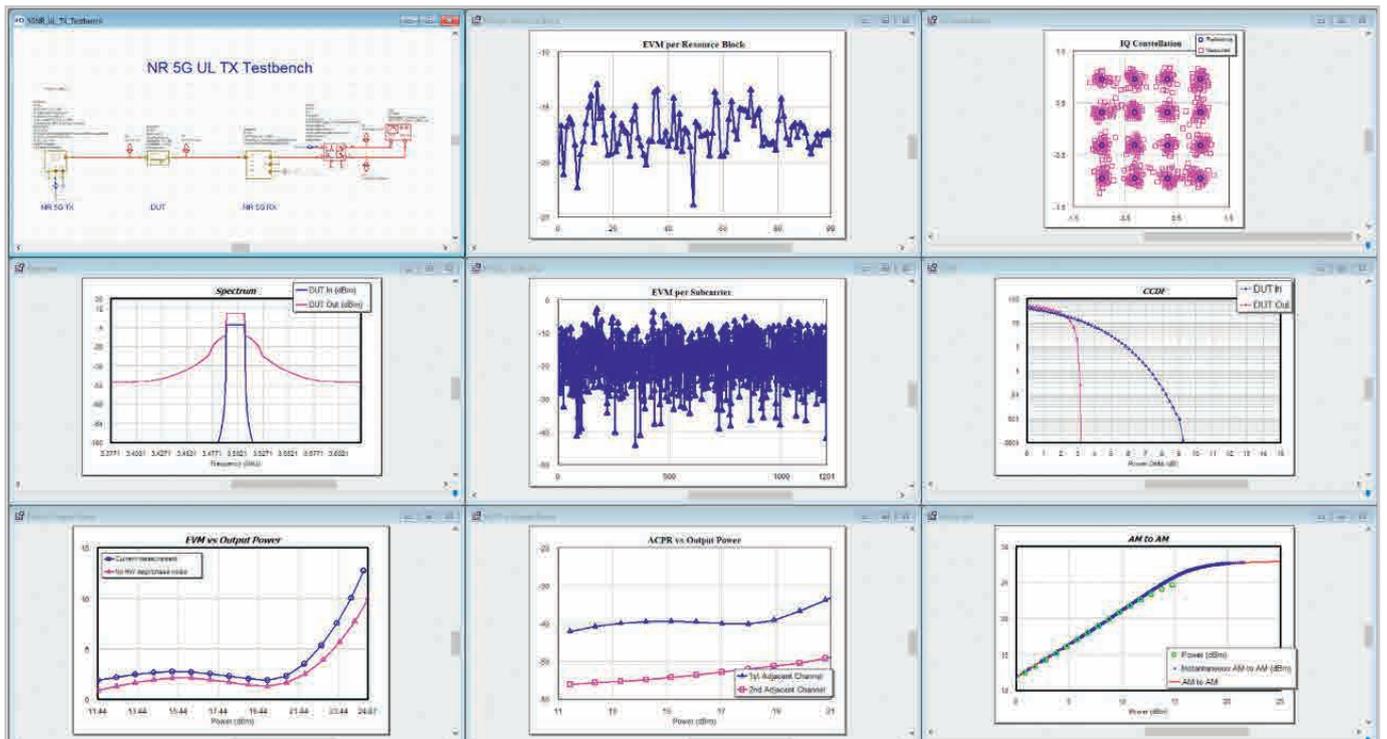


Рис. 8. Библиотеки 5G NR и тестовые модели для устройств приёма/передачи и верификации РЧ-траков

испытательные стенды ускоряют процесс разработки и оценки компонентов благодаря предварительно настроенным блокам 5G NR для передачи и приёма (TX и RX) и измерениям, поддерживающим функциональность TX/RX как для нисходящей линии связи, так и для восходящей.

Гибкие конфигурации сигналов позволяют задать переменную мощность сигнала, несущую частоту, схему модуляции и кодирования (MCS), ширину полосы и расстояние между поднесущими, чтобы удовлетворить требованиям, определённым в спецификациях для полосы частот ниже 6 ГГц (FR1), а также для полосы миллиметрового диапазона (FR2).

Испытательные стенды приёмника 5G NR включают в себя предварительно настроенные измерения чувствительности, такие как частота битовых ошибок (BER), частота ошибок по блокам (BLER) и пропускная способность. Новые испытательные стенды 5G NR TX поддерживают моделирование передатчика и проверку устройства с различными предварительно сконфигурированными измерениями для анализа показателей эффективности, таких как дополнительная функция накопленного распределения (CCDF), AM/AM и AM/PM, спектр, модуль вектора ошибок (EVM), коэффициент мощности по смежному каналу (ACPR), сигнальное созвездие I-Q и многие другие параметры.

Тестовые модели нисходящей линии связи, определённые как для полосы ниже 6 ГГц (FR1), так и для полосы миллиметрового диапазона (FR2), предоставляют сигналы NR 5G для выполнения измерений, таких как, например, мощность базовой станции, нежелательные излучения, побочные излучения, интермодуляция, EVM для различных типов модуляции, включая квадратурную фазовую манипуляцию (QPSK), 16-, 64- и 256-квадратурную амплитудную модуляцию (QAM). Примеры проектов, которые доступны через «Базу знаний» AWR, содержат передатчики и приёмники NR 5G, настроенные в соответствии с «проектом партнёрства третьего поколения» (3GPP) TS 38.141, раздел 4.9.2, включают предварительно сконфигурированные системные диаграммы и соответствующие графики результатов и готовы для моделирования.

AWR Design Environment v15 также включает в себя новый блок цифро-

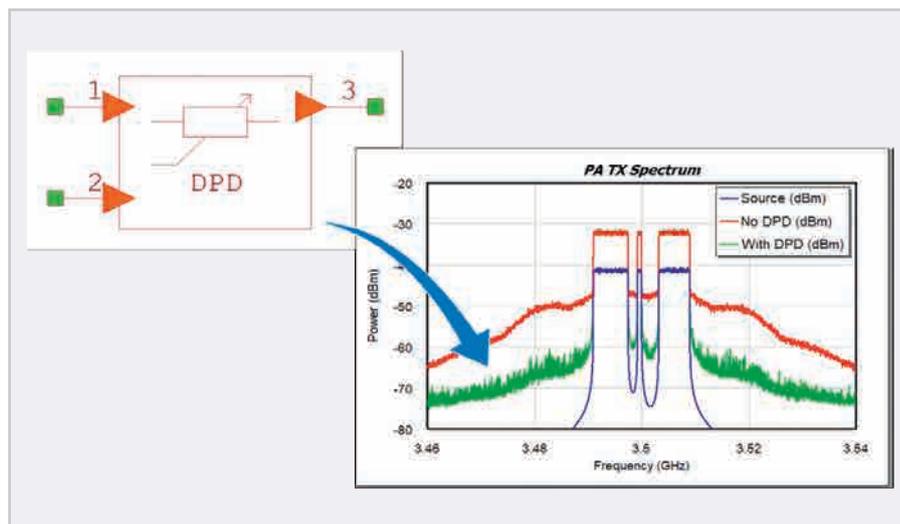


Рис. 9. Блок цифровых предискажений (DPD) поддерживает несколько алгоритмов линейризации усилителей

го предискажения (DPD), представляющий алгоритмы для линейризации нелинейных усилителей (см. рис. 9). Этот блок DPD поддерживает такие модели, как многочлен с памятью о предыстории, обобщённый многочлен с памятью, динамическое уменьшение отклонения второго порядка (DDR-2) и таблицы поиска. Чтобы продемонстрировать новую модель, был создан пример проекта (доступный из базы знаний AWR) с использованием драйвера, питающего усилитель мощности, реализованный в программном обеспечении AWR Microwave Office. Подсхема AWR Microwave Office возбуждается в программном обеспечении системного проектирования AWR VSS сигналом ортогонального мультиплексирования с частотным разделением (OFDM) на частоте 3,5 ГГц, настроенным для имитации многопользовательской работы.

Модель блока DPD использует сигнал обратной связи с выхода устройства, который вместе с исходным сигналом используется для первоначальных вычислений по выбранному алгоритму, а затем для инкрементальных обновлений. Блок предлагает различные решатели, которые можно использовать для начальной настройки DPD. Результаты сравнивают производительность устройства «с» и «без» DPD, показывая улучшения в восстановлении спектра, искажении диаграммы созвездия I-Q и дополнительной функции накопленного распределения CCDF. Также имеются опции коммерчески доступных решений DPD, позволяющие пользователям запускать в симуляциях те же алгоритмы, что и в лаборатории.

### Заключение

ПО AWR Design Environment v15 вносит новые, усовершенствованные инструменты радиочастотного и микроволнового проектирования и моделирования в портфель решений САПР компании Cadence. Усовершенствованная система проектирования оптимизирует производительность и эффективность проектирования за счёт сокращения ручного труда при поддержке взаимодействия нескольких инструментов.

Новые возможности моделирования схем обеспечивают быстрый и строгий анализ нелинейной устойчивости для многоступенчатых и сбалансированных усилителей, а также изменение нагрузки в видео-полосе для оптимизации согласования низкочастотного импеданса, для уменьшения интермодуляционных искажений. Инструмент синтеза схем поддерживает разработку схем импедансов с использованием компонентов от поставщика и комплектов PDK, а также нового интегрированного калькулятора линий передачи и возможностей синтеза, запускаемого непосредственно из схемы.

Надёжные механизмы моделирования быстрее вычисляют большие структуры, используя ЭМ-анализ с улучшенной сеткой и умной обработкой геометрии для характеристики кристалла, корпуса и печатной платы. Предварительно сконфигурированные 5G NR-совместимые испытательные стенды предоставляют пользователю источники сигналов и измерения для проверки усилителя мощности и РЧ-тракта.

