

# Проектирование автомобильных радаров и антенных систем в NI AWR Design Environment

Милтон Лиен, Дэвид Вай, NI AWR

Последние достижения в области разработки систем помощи водителю (ADAS, Advanced Driver Assistance Systems) позволяют значительно улучшить функциональность и доступность автомобилей, способных предупреждать водителя об опасностях и оказывать ему содействие в сложных дорожных ситуациях. В основе таких систем, как правило, лежат технологии радиолокации в диапазоне 76–81 ГГц. Данная статья посвящена рассмотрению задач и проблем, решаемых при разработке радиолокационных систем и антенных устройств миллиметрового (КВЧ) диапазона для умных транспортных средств следующего поколения.

## ОБЗОР СИСТЕМ ПОМОЩИ ВОДИТЕЛЮ (ADAS)

Для получения высших рейтингов безопасности производители автомобилей оборудуют новые модели системами помощи водителю, которые при посредстве набора различных датчиков решают задачи по обеспечению безопасности движения. В настоящее время подобные системы строятся на основе видеосистем и радаров, работающих на частотах 24 или 77 ГГц. Видеосистемы отвечают за такие функции, как предупреждение о выходе за пределы полосы движения, распознавание дорожных знаков, однако стабильность их работы подвержена влиянию атмосферных условий, особенно осадков в виде снега или тумана, а также сильно ограничена расстоянием до объекта наблюдения.

С другой стороны, радары дальнего действия (РДД) достаточно многофункциональны и надёжно рабо-

тают в диапазоне дальности от 30 до 200 метров. Радары ближнего действия (РБД) покрывают область пространства на расстоянии до 30 метров от автомобиля. В настоящее время в гибридных конструкциях довольно часто используется частота 24 ГГц, на которой работают радары ближнего действия, однако к 2022 году ожидается полный отказ от этой технологии в пользу частоты 77 ГГц. В системах следующего поколения частота 77 ГГц должна обеспечить работу радаров как дальнего, так и ближнего действия. На рисунке 1 приведена схема применения РБД и РДД в современных системах помощи водителю. В схему включены следующие системы (в скобках указаны дальность действия и поле обзора):

- ACC – адаптивный круиз-контроль (150–200 м,  $\pm 8^\circ$ );
- BSD – обнаружение слепых зон (10 м,  $\pm 75^\circ$ );

- LCA – помощь при смене полосы движения (70 м,  $\pm 75^\circ$ );
- CTA – оповещение о поперечном движении (30 м,  $\pm 75^\circ$ );
- FCW – предупреждение о столкновении спереди (70 м,  $\pm 65^\circ$ );
- FCM – предотвращение столкновения спереди (70 м,  $\pm 65^\circ$ );
- RCW – предупреждение о столкновении сзади (70 м,  $\pm 65^\circ$ );
- S&G – система «стоп-старт» (70 м,  $\pm 65^\circ$ ).

Технические преимущества частоты 77 ГГц заключаются в меньших размерах антенн (примерно в три раза меньше по сравнению с 24 ГГц), большей допустимой мощности излучения и, что самое главное, более широкой полосе пропускания, позволяющей повысить разрешение обрабатываемых объектов. Усовершенствование способов модуляции сигнала и технологий управления лучом диаграммы направленности (ДН), а также появление новых архитектур систем и развитие полупроводниковых технологий ведут к активному внедрению радаров миллиметрового диапазона в интеллектуальные системы помощи водителю следующего поколения.

Для того чтобы подстроиться под новые реалии, разработчикам радаров необходимы средства радиочастотного (РЧ) проектирования, способные обеспечить моделирование радиолокационных систем с подробным анализом компонентов РЧ-трактов, нелинейных цепей и антенных устройств. Совмещение системного моделирования со схемотехническим и электромагнитным (ЭМ) анализом позволяет точно воспроизводить параметры системы при проектировании и экономить средства на дорогостоящих этапах создания и тестирования прототипа разрабатываемого радара. Программное обеспечение NI AWR в рамках единой платформы обладает всеми необходимыми функциональными возможностями и позволяет осуществлять полный цикл проектирования – от эскиза архитектуры и подбора типа модуляции до разработки реальных образцов антенн и интегральных схем РЧ-трактов на основе

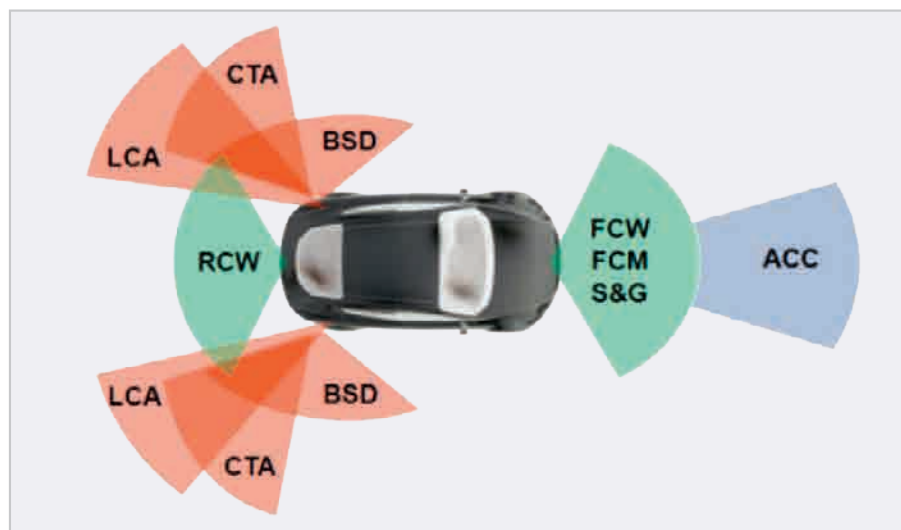


Рис. 1. Составные части системы помощи водителю и поля обзора

кремния или полупроводников группы АIII-BV.

Платформа NI AWR Design Environment объединяет в себе важнейшие технологии моделирования радиолокационных систем и позволяет автоматизировать выполнение самых сложных задач, решаемых разработчиками систем помощи водителю. В число таких задач входят:

- выбор формы сигнала, обработка модулирующих сигналов, оценка параметров системы со специализированным набором измерений, поведенческих моделей РЧ-компонентов и методов обработки сигнала;
- проектирование, схемотехнический анализ и моделирование приёмо-передающих РЧ/КВЧ-трактов для создания печатных плат и монолитных или радиочастотных интегральных схем (МИС или РЧИС соответственно);
- планарный и трёхмерный ЭМ-анализ пассивных структур, сложных соединений, корпусов, а также антенн и антенных решёток;
- возможность работы с измерительным оборудованием.

### АРХИТЕКТУРЫ РАДАРОВ И ТИПЫ МОДУЛЯЦИИ

В системах адаптивного круиз-контроля (АКК) измерения скорости и расстояния до впереди идущего автомобиля должны выполняться с высокой точностью и разрешающей способностью, необходимой для обработки нескольких движущихся целей, например при движении по автомагистрали. Для работы более сложных систем безопасности, например систем предотвращения столкновений (СПС) или автономного вождения (САВ), требуется ещё более высокая надёжность и значительно меньшее время реакции по сравнению с обычными АКК, которые работают с достаточно длинными измерительными сигналами (50–100 мс).

Важными требованиями к автомобильным радарам являются максимальная дальность для АКК – 200 м, разрешение по дальности – около 1 метра, разрешение по скорости – 2,5 км/ч. При проектировании систем, удовлетворяющих этим требованиям, используются различные архитектуры и типы модуляции, включая незатухающий и классический импульсный сигналы.

Основным преимуществом систем с незатухающим сигналом перед классическими импульсными системами явля-

### Сравнение архитектур радаров и их параметров: обнаружение цели, дальность, устойчивость и разрешение

Типы радаров	Импульсно-доплеровский радар	Радар с ЛЧМ	Радар с ЧМн	Сверхширокополосный радар
Информация	Передача короткого импульса на одной несущей	Незатухающий сигнал с линейной частотной модуляцией. Обычно – пилообразный сигнал с полосой 100–150 МГц	Частотная манипуляция с шагом 1 МГц. Интервал для каждой частоты – 5 мс. Дальность определяется по сдвигу фазы	Импульс Дирака. Измерение времени пролёта – автокорреляция
Преимущества	Простой алгоритм измерения расстояния	Высокая точность по дальности. Простой расчёт относительной скорости и дальности	Модуляция может осуществляться ГУН (генератором, управляемым напряжением). Быстрый цикл измерения	Простой принцип действия. Благодаря широкой полосе возможны измерения в ближней зоне
Недостатки	Сложно определить скорость сближения. Невозможность одновременной передачи и приёма сигнала	Необходимость расчёта для определения ложных целей. Длительное время измерения для нескольких целей	Для точности необходим когерентный сигнал. Низкая точность определения направления	Малая и средняя дальность. Невозможность прямого измерения скорости сближения. Чувствителен к помехам

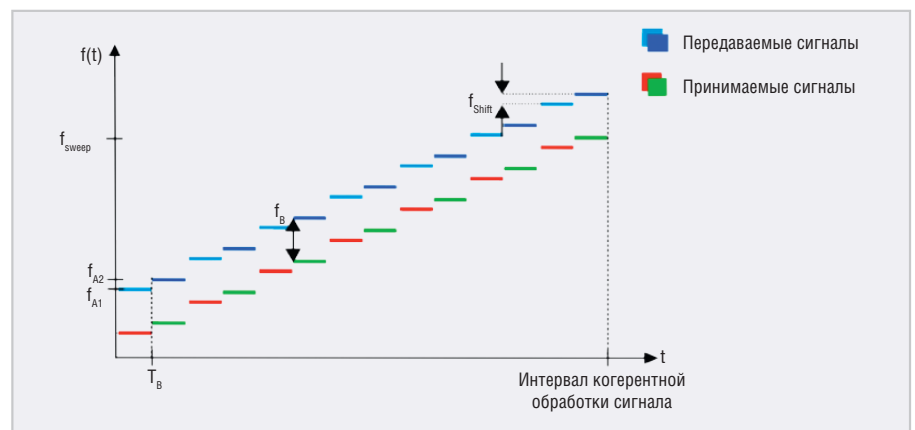


Рис. 2. Многочастотная манипуляция

ется относительно малое время измерения и простота их обработки при одинаковом разрешении на большой дистанции. Два самых распространённых типа модуляции незатухающих сигналов – линейная частотная модуляция (ЛЧМ) и частотное манипулирование (ЧМн), использующие как минимум две различные дискретные передающие частоты. В таблице сравниваются различные архитектуры радаров, приводятся их преимущества и недостатки.

Одновременные измерения дальности и относительной скорости крайне важны в системах АКК. Радары с ЛЧМ и ЧМн вполне удовлетворяют этим требованиям, однако первым требуются несколько циклов измерений и математические алгоритмы для получения лучшей точности, а вторым не хватает разрешения по дальности. В этом

случае представляет интерес технология, объединяющая ЛЧМ и ЧМн, – многочастотная манипуляция (МЧМн). МЧМн была разработана специально для применения в автомобильных радаров и основана на использовании двух или более передающих частот  $f_A$  и  $f_B$  с определённым смещением  $f_{Shift}$ , полосой пропускания  $f_{sweep}$  и длительностью импульса, как это показано на рисунке 2 [1].

При использовании импульсных радаров относительная скорость может быть определена посредством излучения последовательных импульсов с помощью когерентного приёмопередатчика и измерения межимпульсных фазовых вариаций, содержащих доплеровскую частоту. В случае импульсно-доплеровского радара дальность по-прежнему измеряется по времени

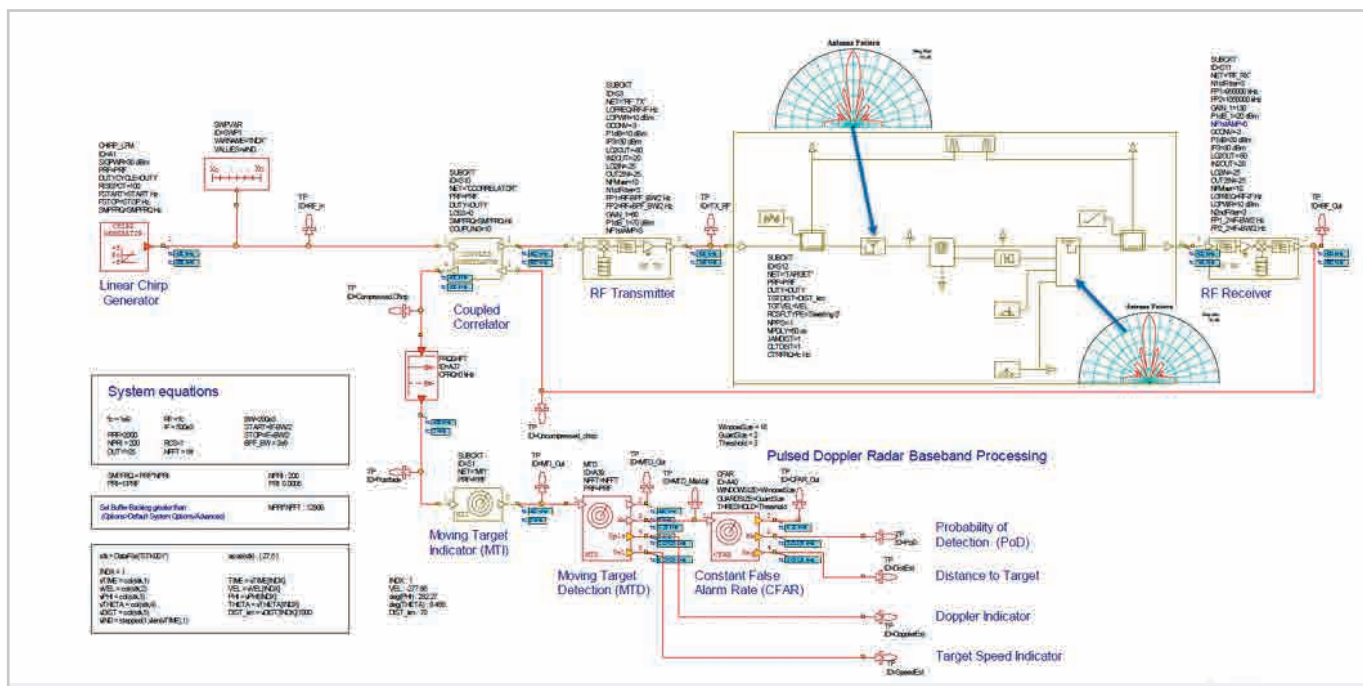


Рис. 3. Разработка импульсно-доплеровского радара в VSS

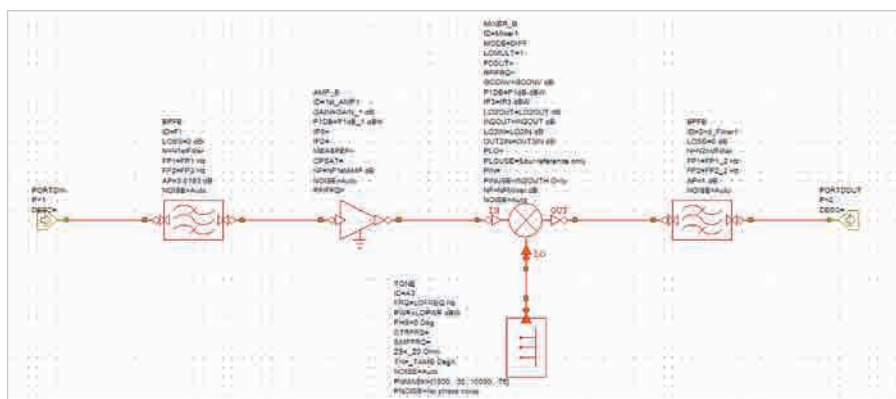


Рис. 4. Схема блока передатчика с фильтрами, усилителем и преобразователем частоты

распространения сигнала. Для совместного измерения дальности и относительной скорости критически важным параметром является частота повторения импульсов.

При выборе архитектуры и метода модуляции важным является не только соответствие заданным характеристикам, но и минимизация издержек на разработку и производство системы. Это становится возможным при помощи специального модуля NI AWR Design Environment – Visual System Simulator™ (VSS), который, будучи мощным инструментом системного уровня, предлагает полный перечень самых необходимых разработчикам технологий моделирования, блоков элементов радиосистем и методов обработки сигналов, а также поддерживает написание пользовательских скриптов и алгоритмов. VSS прекрасно справляется с моделированием работы сложных систем,

включая генерацию сигнала, его передачу, коммутацию, работу антенн, учёт радиолокационных помех, шума и подавления, а также приём и обработку сигнала.

Рабочее пространство VSS показано на рисунке 3. В данном примере построена система АКК со схемой модуляции, моделью радиоканала и измерительными блоками. Система создана на основе импульсно-доплеровского радара с генератором сигнала (Linear Chirp Generator), передатчиком (RF Transmitter), антенной, источником помех, приёмником (RF Receiver), системой обнаружения движущихся целей (Moving Target Detection), обработчиком постоянной вероятности ложных тревог (Constant False Alarm Rate) и детектором сигналов.

Уровень ЛЧМ-сигнала установлен на 0 дБм, частота повторения – 2 кГц, коэффициент заполнения (DUTY) –

25%. Модель цели определяется доплеровским сдвигом частоты и расстоянием до цели, а углы прихода (THETA/PHI) задаются в конфигурационном файле данных и изменяются во времени. Для описания отражённого сигнала для различной скорости и дальности до цели генерируются доплеровская частота и задержка распространения. В проект также может быть включена модель помех и указана форма спектра мощности. В данном примере для уровня помех было выбрано распределение Рэлея, а спектр мощности определялся распределением Вейбулла.

Приведённый на рисунке 4 передатчик состоит из генератора, смесителя, усилителя и фильтров. Параметры передатчика, такие как коэффициент усиления, рабочая полоса и частота несущей, определяются требованиями к системе и характеристиками используемых компонентов. Аналогичным образом определяются и параметры приёмника. Для работы с реальными электронными компонентами приёмопередатчика у разработчика имеется возможность ко-симуляции на системном и схмотехническом уровнях при помощи Microwave Office. Как будет показано далее, взаимодействие между электронной составляющей приёмопередатчика и антенной может быть воспроизведено благодаря совместному системному, схмотехническому и электромагнитному моделированию.

Для более эффективной работы с перемещающимися в пространстве



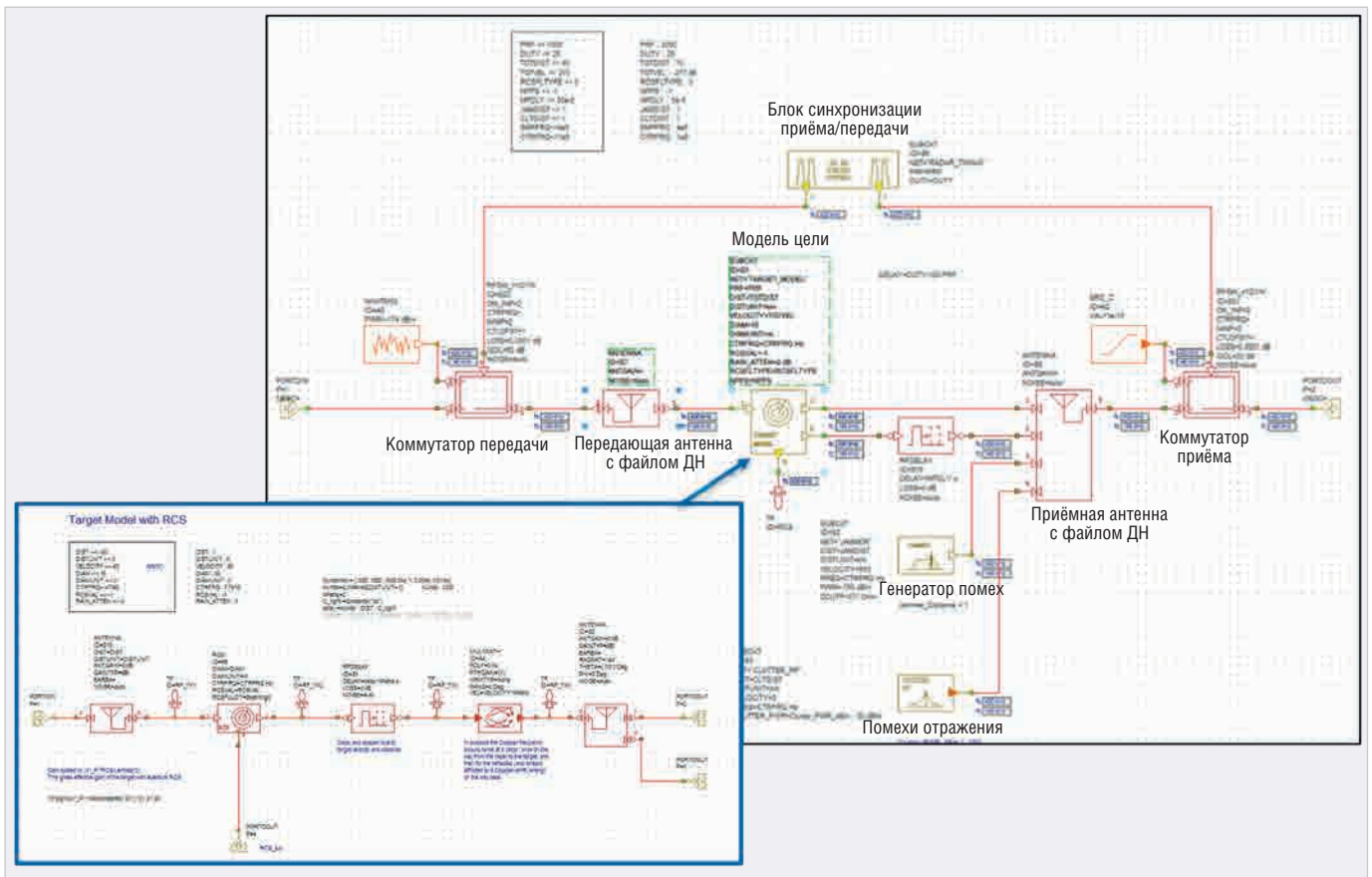


Рис. 5. Схема СОДЦ с приёмной и передающей антеннами и каналом распространения сигнала

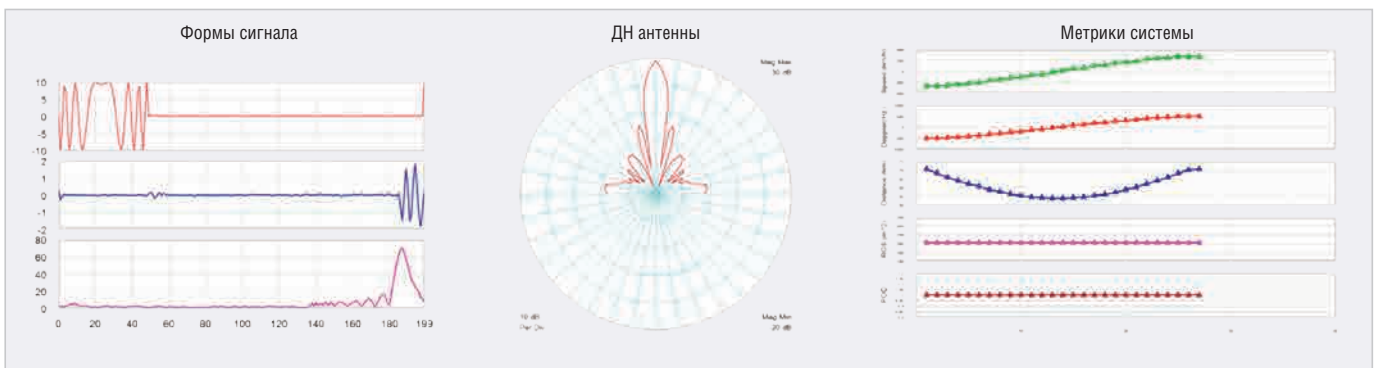


Рис. 6. Результаты моделирования параметров системы

объектами используется система обнаружения движущейся цели (СОДЦ). В основе работы СОДЦ лежат высокопроизводительные алгоритмы обработки сигналов импульсно-доплеровского радара. Набор доплеровских фильтров или операторов быстрого преобразования Фурье (БПФ) покрывает все возможные доплеровские сдвиги цели, а данные, получаемые на выходе СОДЦ, используются для обработки постоянной вероятности ложных тревог. Сигнал радара измеряется во временной области на входе приёмника. Поскольку отражённый от цели сигнал часто загрязнён помехами и шумом, обнаружение цели при помощи СОДЦ производится в частотной области. Данные в

модели СОДЦ группируются по дальности и доплеровскому сдвигу цели. Для установки порога принятия решения в соответствии с требованиями к системе используется обработчик постоянной вероятности ложных тревог. На рисунке 5 представлена схема СОДЦ с обработчиком ложных тревог.

Этот относительно простой пример можно использовать как шаблон для различных применений импульсно-доплеровских радаров. Сигнал радара определяется частотой повторения импульсов (PRF, pulse repetition frequency), уровнем мощности, длительностью импульса и коэффициентом заполнения. Эти параметры можно изменять в зависимости от сценария

использования. При моделировании сигнал радара может быть заменён на любой заранее подготовленный сигнал. Система VSS обладает мощными возможностями для дальнейшего совершенствования конструкции радара, учёта сложных особенностей распространения сигнала (например, отражение от земли и многолучевое замирание), а также для разработки требований к параметрам трактов приёмопередатчика и ДН антенны.

Результаты моделирования в VSS приведены в виде графиков на рисунке 6. Среди них – формы переданного и принятого сигнала, ДН антенны, а также относительная скорость и дальность цели. При моделировании расстоя-

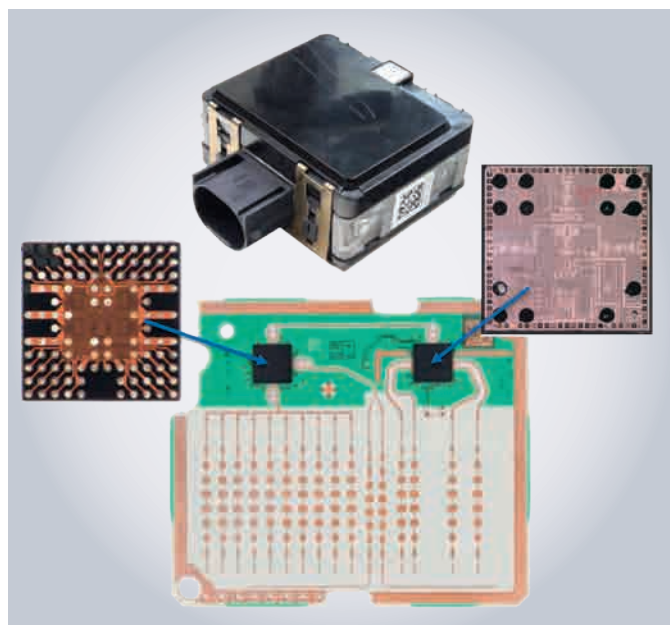


Рис. 7. Двухпозиционный мультимодовый радар средней дальности Bosch с тремя передатчиками и четырьмя приёмниками

ние до цели изменяется, имитируя приближение и последующее удаление цели относительно стационарного радара. Движение цели приводит к изменению знака доплеровской частоты с отрицательного на положительный (красная линия на правом графике) и обращению в ноль расстояния до цели в момент прохождения цели мимо радара. В случае применения радара в системе АКК данные о скорости и расстоянии будут являться основными критериями для принятия решения об изменении скорости движения и/или предупреждении водителя об опасности.

### Многодиапазонные модули

Как правило, система «стоп-старт» в АКК строится на основе нескольких радаров ближнего и дальнего действия для обнаружения находящихся поблизости автомобилей. Радар ближнего действия обычно работает на дальности до 60 м с полем обзора  $\pm 45^\circ$ , что позволяет обнаруживать автомобили, движущиеся по смежным полосам и способные в любой момент перестроиться на текущую полосу движения. Радар дальнего действия охватывает область пространства на расстоянии до 250 м и в более узком поле от  $\pm 5^\circ$  до  $\pm 10^\circ$ , тем самым контролируя текущую полосу движения на большем удалении от автомобиля. Для работы в различных диапазонах дальности и при различных углах обзора разработчики модульных решений (такие как Bosch, DENSO и Delphi) предлагают многодиапазон-

ные сенсоры на основе многоканальных приёмопередатчиков (см. рис. 7). Такие конструкции могут создаваться благодаря использованию, например, архитектуры ЛЧМ-радаров и цифрового формирования ДН антенной решётки.

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ АНТЕННЫ

Мультимодовый радар для системы АКК [2] построен на основе ЛЧМ-радаров с несколькими антенными решётками с цифровым формированием луча (см. рис. 8). Основными компонентами представленной схемы являются передающая антенна (TX Antenna), приёмная антенна (RX Antenna), коммутатор передачи (TX Switch), коммутатор приёма (RX Switch), МШУ (LNA), ФНЧ (LPF), смеситель (Mixer), АЦП (ADC), разветвитель (Coupler), генератор (Oscillator), ГУН (VCO), ФАПЧ (PLL), плата ЦОС (Digital Signal Processing Board). Многодиапазонный радар с цифровым формированием ДН работает на частотах 24 и 77 ГГц, переключаясь между двумя антенными решётками для выбора контроля узкой области пространства на большой дальности ( $150 \text{ м}, \pm 10^\circ$ ) или широкой области на малой дальности ( $60 \text{ м}, \pm 30^\circ$ ). В данном примере используется многоантенная система: одна патч-антенна с последовательным возбуждением (SPPA, series-fed patch antenna) из 12 элементов на 24 ГГц для работы на большой дальности, пять 12-элементных антенн на 77 ГГц для работы на малой дальности и четыре 12-элементных SPPA для приёмной части системы.

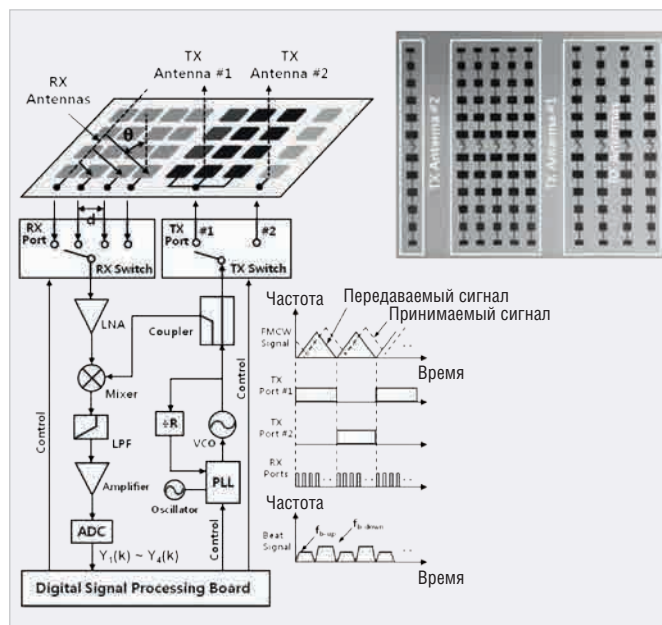


Рис. 8. Многодиапазонный радар для АКК с ЛЧМ-сигналом на основе 6 передающих патч-антенн с последовательным возбуждением

Эффективность радара в конкретном применении сильно зависит от электрических характеристик антенны (усиление, ширина главного лепестка ДН и т.п.) и её конструктивного исполнения. Приёмные и передающие антенны в данном примере были оптимизированы по параметрам дальности, угла обзора и подавления боковых лепестков ДН. Патч-антенны достаточно просты в проектировании и производстве и хорошо работают при объединении в решётки, что благоприятно сказывается на коэффициенте усиления и направленности.

Характеристики прямоугольной патч-антенны зависят от её длины, ширины, толщины диэлектрика и диэлектрической проницаемости. Длина отдельного патча определяет резонансную частоту, в то время как изменение его ширины будет влиять на ДН и значение входного импеданса. Последний можно уменьшить, увеличив ширину полоски, однако для получения входного импеданса 50 Ом может потребоваться слишком широкий полосок, что не всегда оптимально с точки зрения эффективности использования поверхности платы. Большая ширина полоски также означает увеличение рабочей полосы. К этому же результату приведёт и увеличение толщины подложки. Малое значение диэлектрической проницаемости приводит к уширению краевых полей и более эффективному излучению. Уменьшение диэлектрической проницаемости также увеличи-

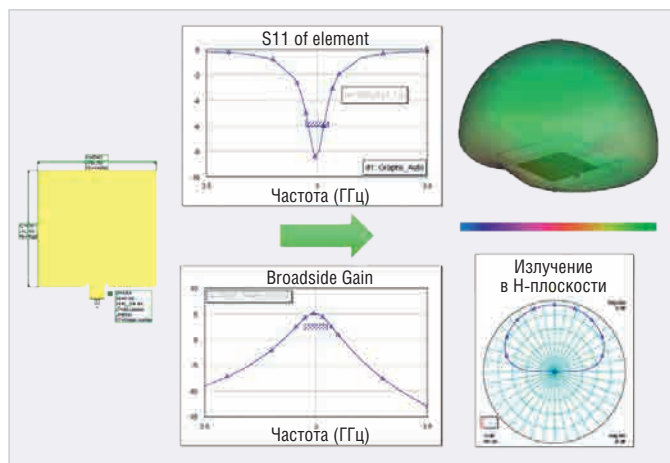


Рис. 9. Оптимизация патч-антенны с боковым возбуждением в AXIEM по коэффициентам отражения (S11 of element) и усиления (Broadside Gain)

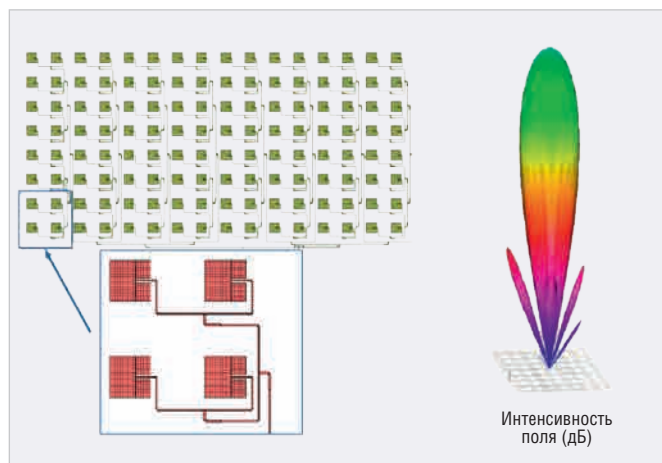


Рис. 10. Моделирование решётки 8x16 с параллельным возбуждением от одного порта в AXIEM

вает рабочую полосу антенны и КПД антенны.

Проектирование отдельной полосковой антенны или массива патч-антенн возможно при помощи среды проектирования, в которой для моделирования и оптимизации используется электромагнитный анализ. В NI AWR Design Environment для этих целей встроены планарный ЭМ-симулятор AXIEM и трёхмерный ЭМ-симулятор на основе метода конечных элементов Analyst™. Эти мощные инструменты способны не только рассчитать характеристики антенны (ДН в ближней и дальней зоне, входной импеданс и поверхностные токи), но и автоматически использовать результаты ЭМ-анализа антенны в составе всей системы радара, не прибегая к ручному экспорту/импорту данных между ЭМ-симулятором и средой системного проектирования.

Симуляторы AXIEM и Analyst™ позволяют провести анализ электрических характеристик антенны на основе задаваемых пользователем физических параметров: длины и ширины полоска, толщины подложки и диэлектрической проницаемости. AXIEM идеально подходит для моделирования полосковых антенн (см. рис. 9), в то время как Analyst™ скорее предназначен для трёхмерных структур – например, коаксиального фидера или ограниченного диэлектрика (когда близость края печатной платы будет влиять на параметры антенны). На рисунке 10 представлен результат моделирования в AXIEM антенной решётки с параллельным возбуждением. На 4-ядерном процессоре AXIEM выполнил решение этой задачи, содер-

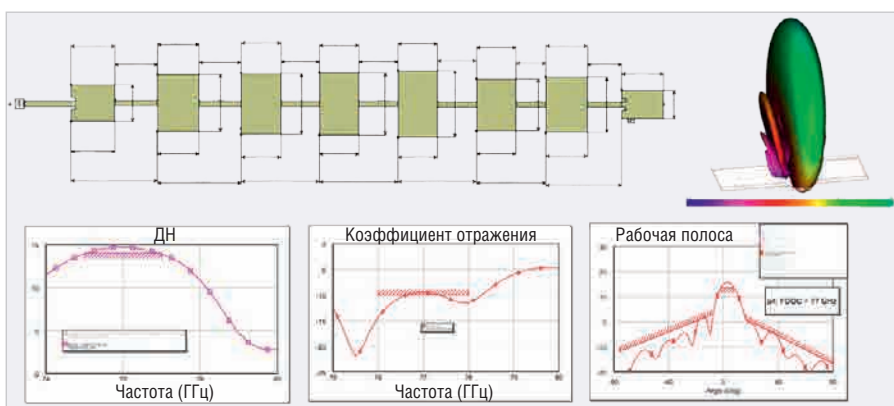


Рис. 11. Оптимизация линейного массива из 8 патч-антенн по размерам элементов

жащей 167 тыс. переменных, менее чем за 6,5 минут.

Для определения физических параметров антенны, которые обеспечат требуемые электрические характеристики, удобно использовать инструмент синтеза и оптимизации антенн AntSyn™. AntSyn™ представляет собой интерфейс, позволяющий инженеру ввести необходимые параметры и ограничения по размерам антенны, после чего программное обеспечение самостоятельно исследует наиболее подходящие конструкции антенн и определит их оптимальные параметры с помощью специальных алгоритмов и полноценного ЭМ-анализа. Получившаяся в результате конструкция антенны может быть импортирована в наиболее подходящий планарный или 3D ЭМ-симулятор (AXIEM или Analyst™) для верификации или дальнейшего анализа и оптимизации.

Планарные конструкции легко объединять в массивы, комбинируя достаточно простые элементы, такие как микрополосковые излучатели. Их можно соединить последовательно, как на показано рисунке 11, где каждый из 8

элементов подключён к другому отрезком подстраиваемой линии передачи. В приведённом примере длина и ширина каждого элемента и соединяющих отрезков линии передачи были определены как переменные для оптимизации характеристик всей решётки. Для создания антенны с неподвижным лучом и высоким коэффициентом усиления массив 1x8 может быть расширен до решётки 8x8, как это показано на рисунке 12 [3].

В NI AWR Design Environment антенные решётки можно моделировать с помощью VSS благодаря наличию встроенной поведенческой модели ФАР, которая позволяет задать параметры конфигурации решётки (число элементов, разнесение, ДН антенны, неисправные элементы, амплитудное распределение и т.д.). Такой подход лучше всего применим к большим массивам антенн (более тысячи элементов) и рекомендуется инженерам-разработчикам систем, определяющим базовые требования к антенному устройству.

Антенные решётки можно детально моделировать и в AXIEM/Analyst™, зада-



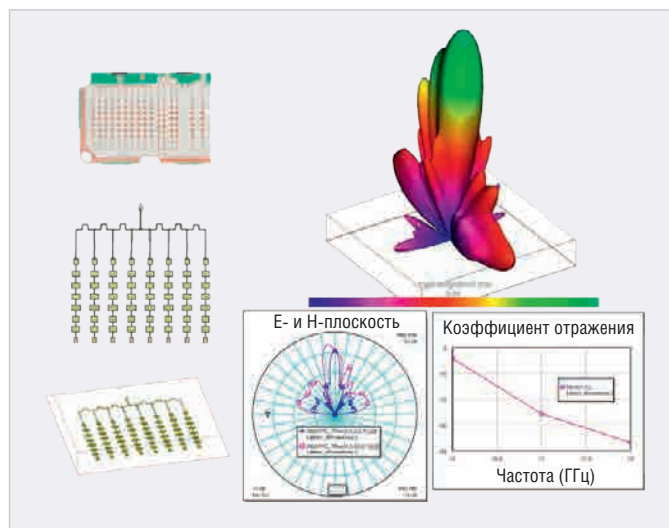


Рис. 12. Антенная решётка 8×8 на 77 ГГц

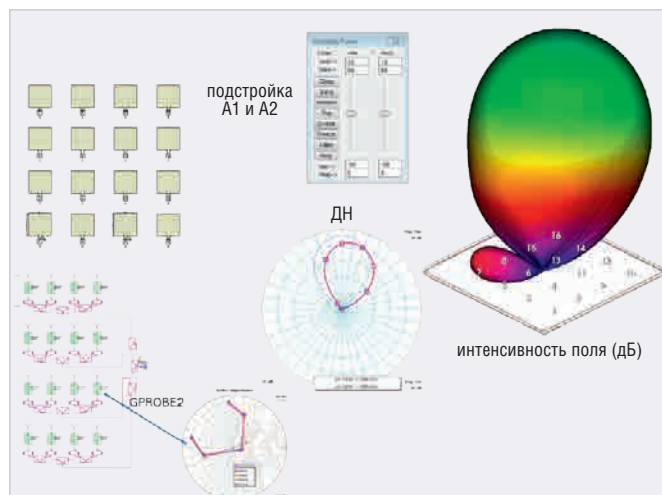


Рис. 13. Моделирование решётки патч-антенн из 16 элементов с индивидуальным возбуждением каждого полоска

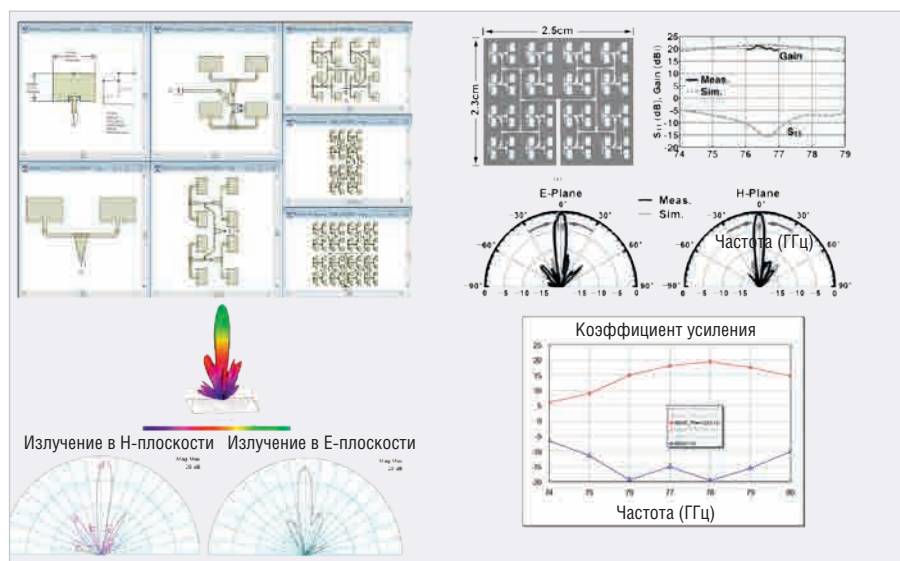


Рис. 14. Моделирование решётки 8×8 элементов на плате RO4003C размером 2,3×2,5 см

вая индивидуальное возбуждение каждого элемента. На рисунке 13 показан процесс моделирования решётки патч-антенн из 16 элементов с индивидуальным возбуждением каждого полоска. Совместное моделирование на электромагнитном и схемном уровне позволяет оценить изменение входного импеданса антенны для каждого элемента, а также управлять формой ДН посредством задания сигналов возбуждения патчей. На рисунке 14 представлен процесс моделирования системы 8×8 элементов на плате RO4003C размером 2,3×2,5 см [2]. Параллельное возбуждение обеспечивает формирование ДН излучения с коэффициентом усиления более 20 дБи и рабочей полосой более 1 ГГц. Цепь питания также выполнена в AXIEM/Analyst™. Такой подход позволяет подробно изучить взаимосвязь между шириной главного лепестка ДН и входным импедансом каждого элемента, что, в свою очередь, даёт

возможность разработчику РЧ-трактов подобрать компоненты с учётом влияния нагрузочного импеданса на параметры приёмопередатчика. Это подчёркивает важность совместного моделирования на схемотехническом, системном и электромагнитном уровнях для точного исследования взаимодействия электроники и антенн перед изготовлением прототипов сложных систем.

### МИМО И СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЕМ ДН

Радары, установленные на транспортных средствах, обязательно будут подвержены влиянию нежелательных отражений от земли и крупных стационарных объектов вокруг автомобиля – например, от зданий или дорожных ограждений. Помимо прямых отражений, будет иметь место и многолучевое отражение между самими объектами. Для ослабления помех от подобных

явлений могут применяться антенны МИМО (multiple-input-multiple-output, многоканальный вход – многоканальный выход). Принцип работы радара МИМО основан на использовании нескольких антенн, каждая из которых излучает сигнал произвольной формы независимо от других передающих антенн. Каждая из приёмных антенн независимо принимает отражённые сигналы. Поскольку сигналы от каждой передающей антенны различны, принятые сигналы можно соотнести с соответствующим передатчиком. Если взять N передатчиков и K приёмников, то получим группу из K×N элементов, то есть виртуально апертура будет увеличена, а это означает, что требуемое число элементов реальной решётки можно сократить. Системы МИМО позволяют улучшить пространственное разрешение и обеспечивают высокую помехозащищённость. Благодаря увеличенному отношению сигнал/шум повышается и вероятность обнаружения цели.

Модуль VSS позволяет реализовать пользовательские алгоритмы МИМО и оценить общую производительность системы (см. рис. 15). Для решения подобных задач применяется гибко настраиваемая модель многолучевого замирания, учитывающая потери на распространение, относительную скорость между передатчиком и приёмником, а также максимальное доплеровское уширение. Канал распространения сигнала может описываться различными функциями распределения (распределения Рэля, Райса и др.), которые независимо или последовательно могут быть индивидуально настроены по типу замирания, задержкам, относительному усилению и другим пара-

метрам. Данный модуль также можно использовать для моделирования приёмной антенной решётки с заданной пользователем геометрией, например для систем с одноканальным входом и многоканальным выходом (SIMO).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Системы помощи водителю становятся всё более сложными и надёжными. Такими системами в самом ближайшем будущем будут оснащены многие, если не все автомобили. Повышенная безопасность транспортных средств – это результат активных исследований в области антенных систем и технологий волн миллиметрового диапазона, в том числе и в смежной отрасли сетей связи 5-го поколения. Продвинутое схемотехническое РЧ-анализа, моделирование массивов антенн и системной ко-симуляции позволяют разработчикам антенн и системным интеграторам оптимизировать проектируемые устройства в условиях уже-

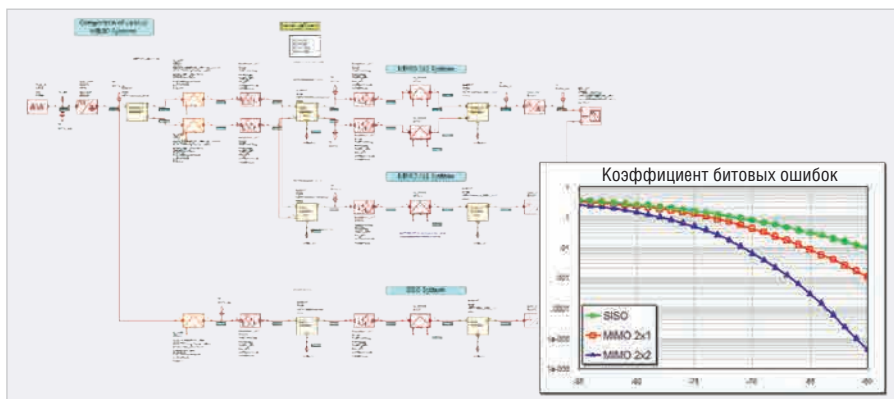


Рис. 15. Моделирование алгоритмов MIMO/SIMO в VSS

сточающихся требований к размерам, стоимости и надёжности систем.

### ЛИТЕРАТУРА

1. H. Robling, M. Meinecke. Waveform Design Principles for Automotive Radar Systems. Technical University of Hamburg – Harburg/Germany, Conference: 2001 CIE International Conference on Radar, Proceedings.
2. S.-H. Jeong et al. A Multi-beam and Multi-range Radar with FMCW and Digital Beamforming for Automotive Applications. Progress in Electromagnetics Research, Vol. 124, 285–299, 2012.
3. Jri Lee, Yi-An Li, Meng-Hsiung Hung and Shib-Jou Huang. A Fully-Integrated 77-GHz FMCW Radar Transceiver in 65-nm CMOS Technology, IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 45, № 12, December 2010. ©

### НОВОСТИ МИРА