

# С БОЛЬШИМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ IoT ПРИХОДЯТ БОЛЬШИЕ ПРОБЛЕМЫ

ВЛАДИМИР РЕНТЮК

Для разработчиков и компаний, занятых внедрением устройств IoT, проблемы возрастают по мере перехода с уровня компонентов на уровень схем и далее до уровня систем. Какие инструменты и решения им доступны? Какие соображения по тестированию могут помочь сократить время на разработку и развертывание и сэкономить общие затраты? В статье рассмотрены проблемы, связанные с IoT, и причины их возникновения, а также решения от компании Keysight Technologies.

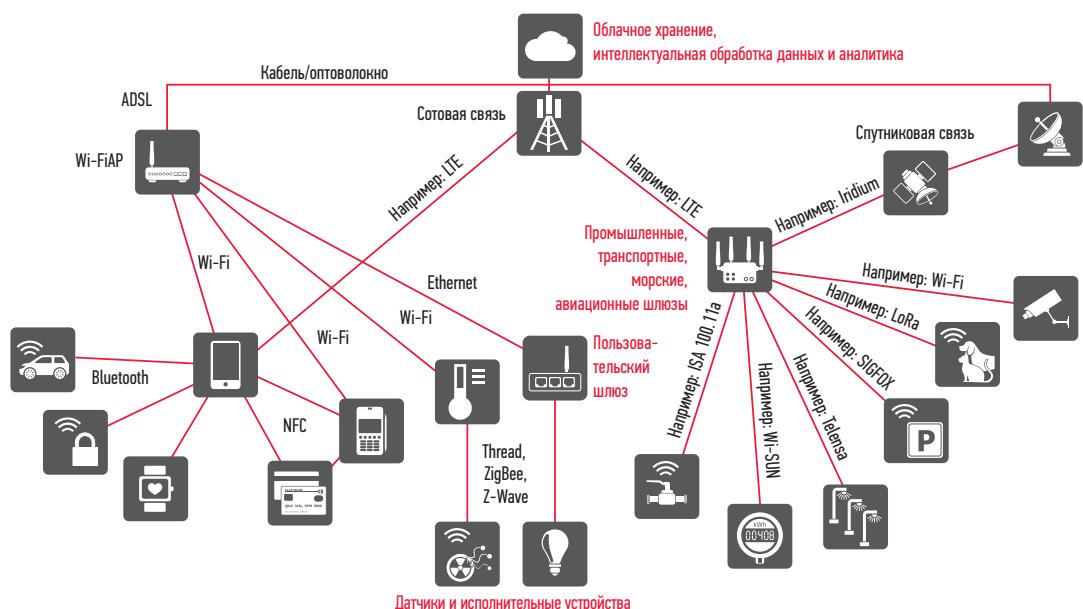
## ВВЕДЕНИЕ

Устройства IoT на конечных узлах (на периферии или границах сети) подключаются к облаку или серверу для их интеллектуальной обработки и последующей аналитики. Одни решения подсоединяются напрямую, другие — через шлюзы, как показано на рис. 1. Шлюзы объединяют трафик из энергоэффективной сети дальнего радиуса действия LPWAN в локальные и глобальные сети с большей пропускной способностью. Как правило, они содержат более мощные источники питания и более значительные вычислитель-

ные ресурсы, чем конечные узлы. Краевые или туманные приложения, действующие через шлюзы, обрабатывают информацию от датчиков и исполнительных механизмов как облачных, так и конечных узлов. Конечные узлы часто рассчитаны на длительное время автономной работы, что требует эффективного использования встраиваемых компьютеров и радиопередающих устройств. Интеллектуальные пороговые триггеры в шлюзах делают трафик более эффективным, передавая полезную информацию центральным облачным серверам.

Шлюзы взаимодействуют с облаком и конечными узлами через разнообразные сочетания беспроводных технологий, как сотовых, так и не сотовых. Для удовлетворения различных потребностей приложений в зависимости от зоны покрытия, времени задержки, пропускной способности, энергоэффективности и стоимости разработчикам доступен целый ряд радиоинтерфейсов [4], различных по характеристикам и возможностям.

Однако широкое масштабирование гетерогенного сочетания технологий беспроводной связи создает



такие проблемы, как функциональная несовместимость и помехи, которые необходимо учитывать при проектировании и разработке устройств IoT. Кроме того, при проектировании системы, помимо выполнения требований по ее соответствуанию сети и стандартам беспроводной связи, необходимо учитывать такие аспекты, как энергопотребление и срок службы батарей. От устройств IoT часто ожидают, что они будут работать без вмешательства персонала в течение многих лет.

## ПРОБЛЕМЫ В САМОМ «ИНТЕРНЕТЕ ВЕЩЕЙ»

Резкое увеличение количества и плотности устройств IoT, развернутых для приложений и связанных с ними сервисами, порождает множество проблем, которые для обеспечения успешной реализации конечного проекта необходимо решать, не дожидаясь последствий. В этой статье обсуждаются конкретные проблемы, которые возникают вследствие природы устройств «Интернета вещей» и с которыми сталкиваются разработчики, изготовители и компании, занятые их внедрением.

## Уровень интеграции цепей и компонентов

Последние достижения в технологии интегральных микросхем со смешанными сигналами стали ключевым фактором поддержки устройств IoT. При этом меньшее количество компонентов позволяет получить и меньшие по размерам печатные платы и, таким образом, перейти к уровню носимой (буквально: нательной) электроники. Кроме того, благодаря большей интеграции достигается снижение общих затрат (себестоимости и цены) и энергопотребления и, что немаловажно, одновременно повышается производительность. Однако интеграция разнородных по своей природе сигналов может привести и к новым трудностям и проблемам при проектировании IoT-устройств.

Современные микросхемы со смешанными сигналами сочетают цифровые, аналоговые и радиочастотные функции на одном кристалле. Системы на кристалле (Systems on chip, SoC) объединяют отдельные компоненты системы на одной подложке. Кроме того, во многих прило-

жениях IoT используются и беспроводные микроконтроллеры с низким энергопотреблением и встроенным интерфейсами беспроводной связи, схемами обработки сигналов датчиков и выработки команд управления.

Еще один важный момент — интегрированные в печатную плату антенны. Они часто применяются для замены не столь эффективных чиповых или эффективных, но габаритных внешних антенн. Как правило, антенны, выполненные на печатных платах, предназначены для носимых и компактных недорогих устройств, таких как, например, «умные» часы [2].

Но здесь мы сталкиваемся с другой проблемой. В связи с тем, что в устройствах все чаще используются печатные антенны, причем обычно требуется несколько антенн и приемопередатчиков, становится все сложнее, но и важнее моделировать и измерять характеристики антенны и собственные помехи в различных реальных условиях эксплуатации. При этом необходимо проверять соответствие каждой такой антенны рабочему частотному диапазону, оценивать ее эффективность (КПД) и диаграмму излучения и разрабатывать высокоеффективные и устойчивые схемы приемника. Часто все это требуется выполнять с учетом влияния стен, монтажных конструкций

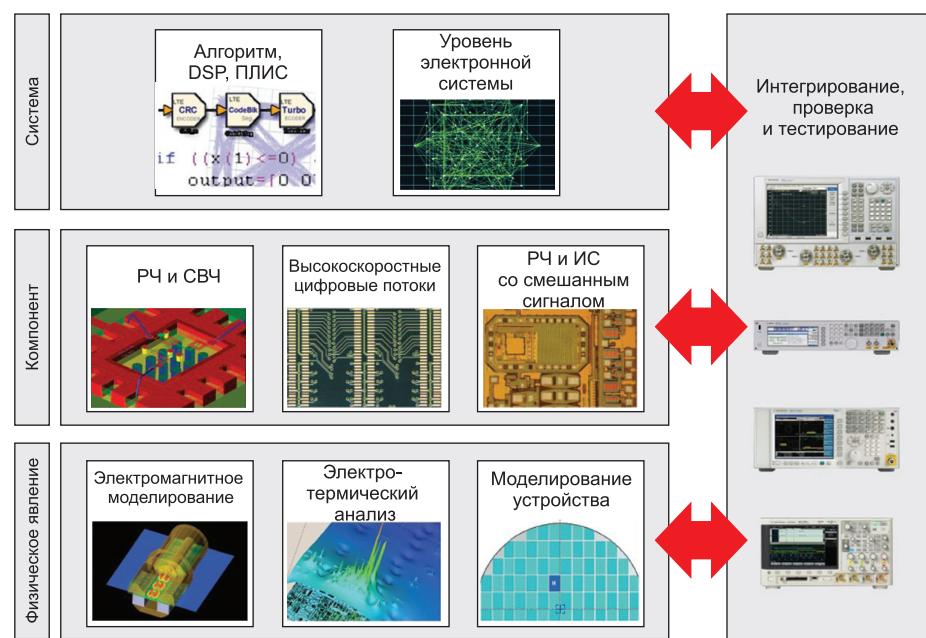
или, в случае носимых устройств, влияния одежды и тела человека.

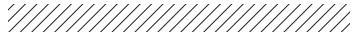
В связи с постоянным увеличением сложности устройств следует более полно оценивать электрические, тепловые и механические характеристики. Они могут повлиять на производительность и надежность других подсистем устройства. Для решения данной проблемы понадобятся инструменты проектирования и моделирования, которые поддерживают точный и бесперебойный анализ совместного моделирования в нескольких сферах и технологиях — от компонентов до системного уровня. Только такой подход поможет добиться успеха и дать глубокое представление о конструкции устройства в реальной среде его эксплуатации.

Программное обеспечение (ПО) Electronic Design Automation (EDA) от Keysight EEsot решает проблемы, возникающие при проектировании систем, схем и устройств физических уровней, предлагая решения для полного процесса проектирования, как это показано на рис. 2. Используя процессы проектирования, построенные на этих системах, компонентах и инструментах для физического уровня, инженеры-разработчики могут не только быстрее создавать продукты, но и находить для них оптимальные решения. Кроме того, ПО EDA от компании Keysight полностью совместимо с ее контрольно-измерительным обо-

РИС. 2. ▼

ПО компании Keysight для проектирования предоставляет инженерам полный цикл разработки проекта, от начала проектирования до тестирования на подтверждение соответствия (валидации)





рудованием, что позволяет разработчикам получить комплексное решение для всего процесса создания конечного продукта — от проектирования до тестирования на подтверждение его соответствия (валидации) требованиям стандартов.

### Энергоэффективность и срок службы батареи

Одиночные устройства, такие как датчики, часто работают от встроенных батарей и, соответственно, имеют ограниченный запас энергии. В сетях с крупномасштабным развертыванием сенсорных узлов или медицинских имплантатов срок службы этих устройств должен составлять месяцы или годы. В некоторых условиях эксплуатации частая замена батарей становится дорогостоящей и нецелесообразной, а подчас и просто невозможной. Поэтому в целях экономии энергии устройства (например, сенсорные узлы) обычно функционируют с очень коротким рабочим циклом и большую часть времени находятся в режиме ожидания или в спящем режиме, активируясь лишь при необходимости или в соответствии с расписанием.

В высокопроизводительных устройствах и шлюзах на процессор,

дисплей и беспроводные модули приходится большая часть общего энергопотребления. Дело в том, что эти устройства оснащены несколькими беспроводными интерфейсами, и чаще всего они, для выполнения более сложных задач обработки, должны находиться в активном режиме. Чтобы правильно оценить энергопотребление этих устройств, необходимо надлежащим образом рассмотреть управление питанием и учесть сложное взаимодействие различных компонентов и модулей, как это показано на рис. 3.

Чтобы оптимизировать срок службы батареи, важно знать текущие условия ее эксплуатации и продолжительность каждого режима работы IoT-устройства. Количество потребляемой электроэнергии определяет срок службы батареи. Для его прогнозирования необходимо знать эффективность и результат каждого типа измерения датчиком или, если это актуатор, действия, говоря в общем — активности. Измерение тока может быть единственным доступным хорошим и приемлемым способом определения продолжительности определенного события обработки или действия. Ключевой проблемой здесь является необхо-

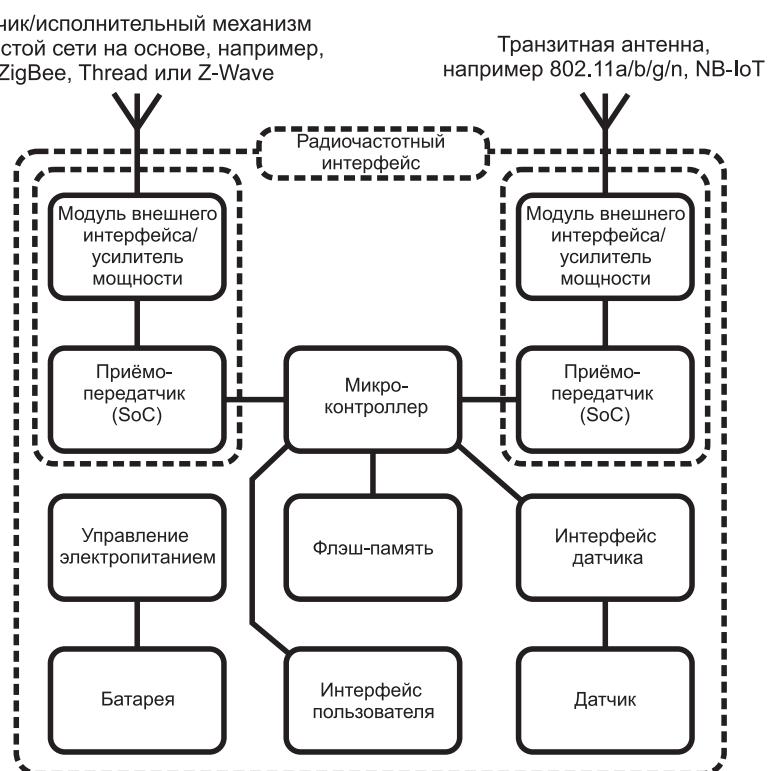
димость измерения тока в широком динамическом диапазоне — менее чем от микроампер в спящем режиме до сотен миллиампер в активном режиме. При этом разработчику системы, и ее интегратору требуется анализ разряда батареи с непрерывным (так называемым бесшовным) диапазоном измерения тока. Это требуется для захвата максимального (пикового) потребления, причем при минимальных рабочих циклах, и оценки низких средних значений.

В итоге все это применяется при моделировании условий функционирования сети. Независимо от того, используется настоящая батарея или источник питания, разработчик должен убедиться, что устройство подключено к питанию должным образом. Это нужно, чтобы результаты разряда батареи были характерны для устройства, когда оно фактически действует в реальных условиях.

Здесь необходимо учитывать еще один момент. Благодаря таким достижениям, как сбор свободной энергии (energy harvesting — процесс, с помощью которого энергия извлекается из внешних источников, например электромагнитного излучения, тепла, вибрации, света и пр.), новые технологии батарей и конструкции с низким энергопотреблением, срок службы батареи продлевается. Применение ячеек меньшего размера, узких полос пропускания и сетей связи с низким энергопотреблением также помогает снизить энергетические ограничения. Для того чтобы достичь заданного срока службы и решить проблемы тепла, необходимо проводить систематический энергетический анализ. Это помогает поддерживать хорошее управление для достижения высокой аппаратной и программной производительности устройства. Сказанное особенно важно в реальной работе, где условия окружающей среды и поведение сети могут значительно сократить срок службы IoT-устройства.

Двухквадрантные измерительные источники питания (Source Measure Unit, SMU — вид измерительных приборов, использующих одновременно прецизионные источники тока и напряжения) N6781A и N6786A специально разработаны компанией Keysight для анализа разряда батареи беспроводных устройств [9–11]. Измерительный источник питания N6781A обеспечивает высокую точность измерений при низком

**РИС. 3. ▼**  
Типичные компоненты шлюза/датчика IoT, например терmostat нагревателя, дымовых сигнализаций, охранной сигнализации или шлюз счетчика учета потребления (электроэнергии, воды, тепла)



токе с напряжением до 20 В и током до 3 А при выходной мощности 20 Вт. А измерительный источник питания N6786A подходит для устройств с более высокой мощностью, таких как новейшие смартфоны/фаблеты (гаджет, сочетающий функции смартфона и планшетного компьютера), планшеты и ноутбуки, с напряжением до 20 В и током до 8 А при выходной мощности 80 Вт.

Наиболее важной особенностью измерительных источников питания является их плавный диапазон измерений, который охватывает более семи декад, что весьма полезно, поскольку это позволяет проводить точные измерения динамического потребления тока (рис. 4). Они также имеют настраиваемые характеристики для эмуляции батареи, что обеспечивает результаты моделирования поведения устройств, сравнимые с их функционированием от реальной батареи. Кроме того, они имеют режим работы амперметра с нулевой нагрузкой и регистрацию данных вольтметра для выполнения проверки при разряде с реальной батареей, когда это необходимо. Быстрый отклик с незначительным переходным процессом сводит к минимуму падение напряжения при импульсном потреблении тока, расходуемого бесприводными устройствами, а частота дискретизации, равная 200 кГц, обеспечивает детальное понимание поведения источника питания при измерениях.

### Целостность сигналов и целостность питания

Проблему целостности передачи сигналов (Signal Integrity, SI — наличие достаточных для безошибочной передачи качественных характеристик электрического сигнала) можно разделить на четыре группы проблем:

- Проблемы, связанные только с сетью передачи данных.
- Проблемы связи между несколькими сетями.
- Проблемы, связанные с путями подачи питания и заземления в распределительной сети электропитания (power distribution network, PDN).
- Электромагнитные помехи (ЭМП), наряду с которыми мы имеем сопутствующую проблему — электромагнитную совместимость (ЭМС) [3, 8].

Методы минимизации проблем целостности передачи сигналов предусматривают поддержание контролируемых импедансов в местах межсоединений, уделяют особое внимание расстоянию между трассами для минимизации взаимной индуктивной или емкостной связи (они приводят к перекрестным помехам), предполагают коррекцию, организацию близких к идеальным путей возврата тока, минимизацию импеданса PDN и, естественно, обеспечение хорошего заземления и экранирования.

По мере развития полупроводниковой технологии и получения транзисторов с меньшей площадью затвора или длиной канала и, соответственно, с более быстрым переключением время нарастания и спада фронтов сигнала уменьшается, а тактовые частоты увеличиваются, что делает проблемы целостности передачи сигналов неизбежными. Утешает лишь то, что в цепях с низким энергопотреблением в совокупности проблем целостности сигналов не столь заметны негативные влияния от перекрестных помех.

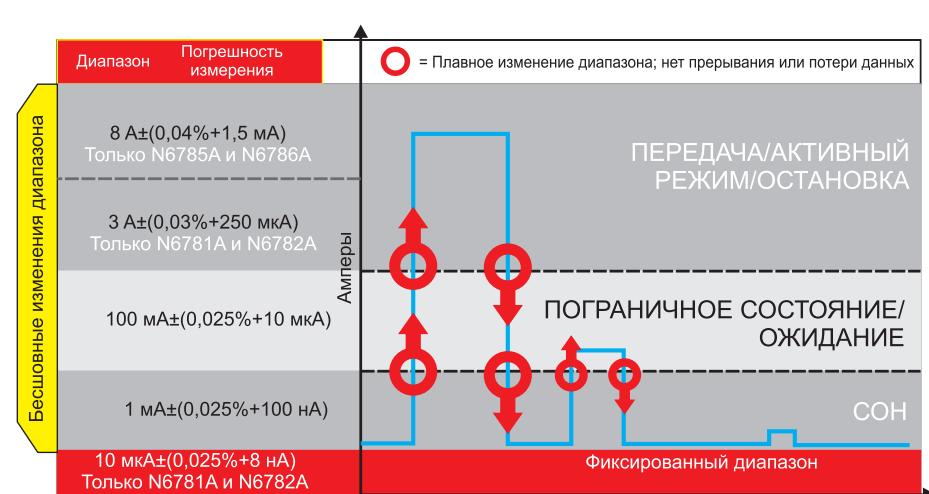
Обеспечение целостности питания (Power Integrity, PI) подразумевает анализ того, насколько эффективно в данной системе энергия преобразуется и подается от источника к нагрузке, а в общем понимании — это анализ, направленный на то, чтобы проверить, соблюдаются ли требуемые напряжение и ток от источника к месту назначения. Питание в рассматриваемой нами сфере техники, как уже было сказано, подается через

распределительную сеть электропитания PDN, которая состоит из пассивных компонентов и соединений, неизбежных на пути передачи энергии от источника питания к нагрузке. С переходом на маломощную электронику уровни напряжения постоянного тока и допуски на уровни напряжения сократились с  $\pm 5$  до  $\pm 1\%$ . Пульсация, шумы, помехи и переходные процессы на этих низковольтных шинах могут отрицательно повлиять на передачу тактовой частоты, поддерживающей синхронизацию сигналов, и передачу данных. Для обеспечения чистоты линий электропередачи необходимо проверить качество и целостность линий питания. Задача состоит в том, чтобы можно было измерять все более и более быстрые сигналы переменного тока, идущие поверх сигналов от источников напряжения постоянного тока.

С расширенными функциональными возможностями, более высокой плотностью размещения, более высокой скоростью и более низкой мощностью электроники проблемы обеспечения целостности сигналов и целостности питания становятся все более распространенными и весомыми. Использование инструментов системного моделирования и симуляции для прогнозирования производительности, дополненных инструментами измерения для оценки реализаций, позволяет командам разработчиков снизить как риски проектирования, так и время выхода конечного продукта на рынок.

Рис. 4. ▼

Плавный переход между диапазонами измерения при использовании измерительных источников питания компании Keysight позволяет отслеживать уровни динамического изменения тока в режиме реального времени и применять наиболее оптимальный диапазон измерения для данного уровня тока и напряжения





Существует широкий спектр измерительных инструментов, доступных для проверки и корреляции при моделировании и предназначенных для оценки целостности сигнала и целостности питания и сравнения полученных результатов с фактическими измерениями. Например, для проверки приемника можно использовать тестовую установку на основе векторного анализатора цепей серии ENA с функцией рефлектометрии кабельных линий (time-domain reflectometry, TDR — измерение коэффициента отражения методом совмещения прямого и отраженного испытательных сигналов), осциллографы Infiniium и измеритель коэффициента битовых ошибок (Bit Error Ratio Test, BERT). Повысить качественные показатели измерений с помощью этих инструментов позволяет вспомогательное ПО.

Для измерений на физическом уровне предназначено ПО Physical Layer Test System (PLTS) [12], специально созданное для оценки целостности сигналов в межсоединениях. Оно работает с векторными анализаторами типов PNA, ENA и PXI, а также с TDR-осциллографами. PLTS помогает пользователям в настройке и калибровке оборудования и контролирует сбор данных, а также обеспечивает создание встроенной модели для автоматического удаления лишних элементов, что позволяет инженерам исследовать только интересующий их компонент. Благодаря тому что тестирование на соответствие осуществляется одним нажа-

тием кнопки, эта система достаточно проста в эксплуатации.

### Гетерогенное сочетание беспроводных технологий и многопротокольных устройств

Для того чтобы удовлетворить разнообразные потребности приложений IoT, появилось множество беспроводных технологий и стандартов [1, 4–7]. Это разнообразие сетевых технологий предоставило возможность поддерживать самые разные приложения, начиная от простых датчиков с питанием от батареи и заканчивая высокопроизводительными критически важными сервисами для автономных автомобилей. На рис. 1 показаны устройства, в частности смартфон, поддерживающие сотовые и не сотовые радиоинтерфейсы, такие как NFC, Wi-Fi, Bluetooth и LTE. Однако тот факт, что существует так много стандартов, доступных для IoT, уже сам по себе представляет проблему измерения. Используемые стандарты содержат много разных физических уровней, каждый из которых имеет свои уникальные требования к радиочастотным испытаниям. Ситуация усугубляется тем, что каждый физический уровень может потенциально поддерживать, кроме основной, еще несколько типов модуляции.

Поскольку все большее число устройств поддерживают одновременно несколько стандартов, их тестирование превращается во все более сложную задачу. Известно,

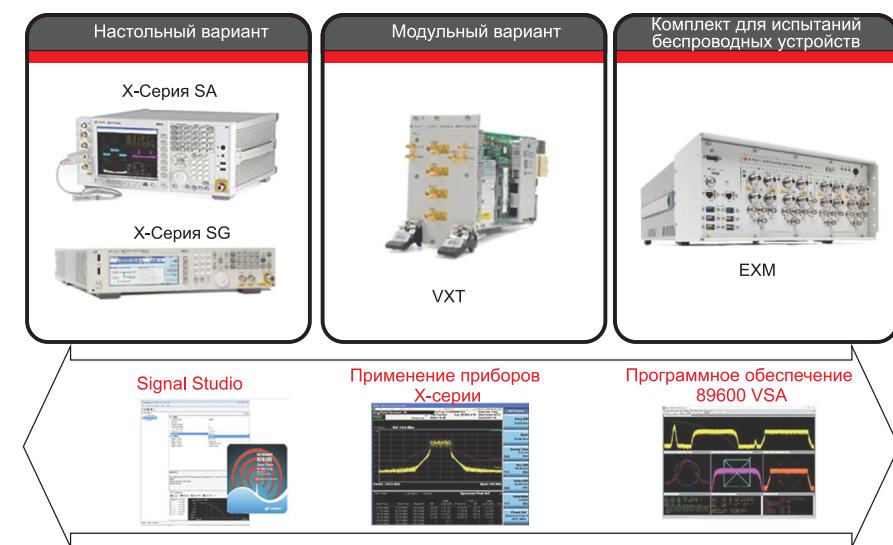
что каждый стандарт (или протокол) имеет свой набор требований и, соответственно, проблем тестиования. Разработчики также должны убедиться, что устройства хорошо взаимодействуют между собой и могут одновременно обрабатывать несколько стандартов. Тем не менее испытательное оборудование может быть весьма дорогостоящим, когда для каждого отдельного стандарта требуется отдельный прибор. Более рентабельный подход состоит в том, чтобы иметь единый инструмент, способный тестировать все необходимые стандарты и поддерживать добавление новых стандартов по мере их появления.

Для тех, кто разрабатывает устройства IoT и ищет решения для поддержки существующих и будущих беспроводных форматов, компания Keysight предлагает целый ряд аппаратных платформ, а именно настольные, модульные и однокамерные тестеры (рис. 5). Эти продукты дополняются программным обеспечением, которое предоставляет более широкие возможности и понимание результатов измерений. Преимущество решений Keysight заключается в том, что используемые компанией общие научные подходы к измерениям обеспечивают согласованные и сопоставимые результаты измерений на протяжении всего жизненного цикла продукта, от этапа исследований и разработки до его серийного производства.

В качестве альтернативы интегрированным тестовым наборам некоторые малые и средние производители для таких реализаций, как ASK/FSK, могут выбрать экономически эффективные решения [13–16] и самые дешевые — для Bluetooth и ZigBee. В качестве экономически эффективного варианта для тестирования недорогих устройств и модулей может использоваться базовый анализатор спектра (Basic Spectrum Analyzer, BSA) N9320B/N9322C. Он оптимально подходит для исследований, разработок и производства бытовой электроники, а также для ремонта, и может применяться как учебное оборудование в лабораториях университетов и колледжей. Кстати, данное оборудование предназначено и для мониторинга спектра общего назначения.

Анализ спектра в реальном времени бывает нужен для решения целого ряда проблем, включая устранение

**РИС. 5. ▼**  
Научный подход компании Keysight в области настольного, модульного и беспроводного тестирования.  
Аппаратные средства (вверху) дополняют ПО (внизу), обеспечивая более широкие возможности и понимание измерений



падения производительности в реальных условиях и захват мешающих сигналов (преднамеренных или непреднамеренных), которые могут присутствовать и влиять на производительность, даже если они очень коротки по продолжительности. Возможности анализа можно улучшить с помощью опции на анализаторах сигналов серий UXA, PXA и MXA. Опция анализатора спектра в реальном времени (Real-Time Spectrum Analyzer, RTSA) [17, 18] позволяет обнаруживать сигналы длительностью лишь 3,33 нс и сканировать полосу пропускания в реальном времени с частотой до 510 МГц с анализом сигналов в реальном времени, а с использованием внешнего микширования диапазон увеличивается и до терагерцевой частоты. Эффективный запуск позволяет инженерам сосредоточиться на интересующем сигнале в сложных сигнальных средах и даже видеть небольшие сигналы на фоне присутствующих сигналов большого уровня.

### **Взаимное влияние, соответствие требованиям и согласованность**

При высокой плотности передачи сигналов подключенных устройств «Интернета вещей», в случае использования беспроводных технологий, работающих на одних и тех же полосах частот, могут появляться взаимные помехи в совмещенном и соседнем каналах. Так, в целях экономии все большее число IoT-устройств использует не требующий лицензирования ISM-диапазон (ISM — Industrial, Scientific and Medical, выделенные частоты устройств малой мощности промышленной, научной и медицинской сферы). В результате диапазон 2,4 ГГц, который, помимо ISM, используется беспроводными телефонами, беспроводными видеокамерами, микроволновыми печами и носимыми устройствами, становится довольно-таки насыщенным. Вот почему крайне важно тщательно протестировать IoT-устройства — это необходимо для того, чтобы убедиться в их соответствии сетевым требованиям и нормативным стандартам, а также в способности работать в данной среде с большим числом сигналов. Такое тестирование предполагает проверку не только на соответствие стандартам, но и на совместимость —

возможность одновременно функционировать в определенной среде с другими устройствами, не создавая им помех и не блокируясь от их воздействия. Кроме того, анализ спектра в реальном времени позволяет обнаруживать и захватывать спектральную среду, что представляется ценным способом выявления изменяющихся во времени источников помех.

Еще одна проблема связана с большим количеством IoT-устройств, работающих одновременно и в непосредственной близости друг от друга, — это электромагнитные помехи (ЭМП), которые приводят нас к проблеме электромагнитной совместимости (ЭМС) [8]. Существует четыре основных типа испытаний на электромагнитную совместимость: испытания на собственное излучение и кондуктивные (наведенные) помехи, а также испытания на устойчивость к внешнему излучению и помехам, наведенным внешним источником. Проще говоря, первое направлено на то, чтобы избежать создания нежелательного излучения, а второе направлено на гарантирование устойчивости к нежелательным внешним помехам. Для проведения сертификационных измерений соответствия требуются решения, отвечающие регламентам конкретного стандарта.

Вопросы электромагнитных помех (ЭМП) и, как следствие, электромагнитной совместимости (ЭМС) чрезвычайно сложны и требуют самого внимательного подхода уже на ранних стадиях проектирования [8]. С этой целью уже в начале цикла разработки для моделирования излучений электронных схем и компонентов можно использовать ПО Keysight EDA EMPro. Расчетные результаты помогают выяснить, находятся ли выбросы в пределах уровней, определенных общими стандартами ЭМС, такими как CISPR, FCC Part 15 и MIL-STD-461G. Моделирование позволит дизайнерам оценить уровни выбросов еще до разработки аппаратного обеспечения.

Решение растущих проблем, с которыми сталкиваются разработчики устройств IoT, требует надежных и точных решений для испытаний и измерений. Используя продукты компании Keysight, инженеры могут не только быстрее выйти на рынок и получить преимущество, но и повысить веро-

ятность того, что их устройства будут успешно внедрены на рынке, что, собственно, и является конечной целью любого проекта. ■

*По материалам компании  
Keysight*

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. The Internet of Things: Enabling Technologies and Solutions for Design and Test (5992-1175EN). [www.literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5992-1175EN.pdf?id=2666018](http://www.literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5992-1175EN.pdf?id=2666018)
2. Sojuigbe S., Daniel K. Wearables/IoT devices: Challenges and solutions to integration of miniature antennas in close proximity to the human body. Electromagnetic Compatibility and Signal Integrity, 2015 IEEE Symposium, March 2015. [www.ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7107662](http://www.ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7107662)
3. Understanding Signal Integrity (5988-5978EN). [www.cpliterature.agilent.com/litweb/pdf/5988-5978EN.pdf](http://www.cpliterature.agilent.com/litweb/pdf/5988-5978EN.pdf)
4. Рентюк В. Краткий путеводитель по беспроводным технологиям «Интернета вещей». Часть 1. Сети, шлюзы, блоки и протоколы // Control Engineering Россия. 2017. №6.
5. Рентюк В. Краткий путеводитель по беспроводным технологиям «Интернета вещей». Часть 2. Ближний радиус действия // Control Engineering Россия. 2018. №1.
6. Рентюк В. Краткий путеводитель по беспроводным технологиям «Интернета вещей». Часть 3. Wi-Fi // Control Engineering Россия. 2018. №2.
7. Рентюк В. Краткий путеводитель по беспроводным технологиям «Интернета вещей». Часть 4. Большой радиус действия // Control Engineering Россия. 2018. №3.
8. Рентюк В. Электромагнитная совместимость: проблема, от решения которой не уйти // Компоненты и технологии. 2017. № 7.
9. Enhance the Battery Life of your Mobile or Wireless Device (5991-0519EN). [www.literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5991-0519EN.pdf](http://www.literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5991-0519EN.pdf)
10. 10 Tips to Optimize a Mobile Device's Battery Life (5991-0160EN). [www.literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5991-0160EN.pdf](http://www.literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5991-0160EN.pdf)
11. Battery Life Challenges in IoT Wireless Sensors and the Implications for Test (5991-2698EN). [www.literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5991-1192EN.pdf?id=2713814](http://www.literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5991-1192EN.pdf?id=2713814)
12. Physical Layer Test System (PLTS) 2018 (5989-6841EN). [www.literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-6841EN.pdf](http://www.literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-6841EN.pdf)
13. A Cost-effective Way to Test Sub 1-GHz Wireless Modules (5992-1142EN). [www.literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5992-1142EN.pdf?id=2671318](http://www.literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5992-1142EN.pdf?id=2671318)
14. A Cost-effective Way to Test Bluetooth Modules on Smart Devices (5992-1118EN). [www.literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5992-1118EN.pdf](http://www.literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5992-1118EN.pdf)
15. A Flexible Test Solution for 2.4 GHz ZigBee Transmitter and Receivers (5992-0464EN). [www.literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5992-0464EN.pdf](http://www.literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5992-0464EN.pdf)
16. A Cost-Effective Solution to Test Zigbee-enabled Smart Home Devices (5992-1298EN). [www.literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5992-1298EN.pdf?id=2705780](http://www.literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5992-1298EN.pdf?id=2705780)
17. Real-Time Spectrum Analyzer, X-Series Signal Analyzers (5991-1748EN). [www.keysight.com/upload/cmc\\_upload/AII/5991-1748ENfinal\\_temp.pdf](http://www.keysight.com/upload/cmc_upload/AII/5991-1748ENfinal_temp.pdf)
18. Real-Time Spectrum Analysis for Troubleshooting 802.11n/ac WLAN Devices (5991-2652EN). [www.literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5991-2652EN.pdf?id=2373039](http://www.literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5991-2652EN.pdf?id=2373039)