

# Современный подход к тестированию оборудования и сети 5G.

## Часть 1

**Инфраструктура 5G New Radio (далее — 5G) растет не по дням, а по часам. Кроме того, по мере освоения технологии в систему добавляются все новые возможности. Помимо традиционных вопросов, касающихся особенностей радиочастотного спектра, выделенного под пятое поколение сотовой связи (5G), имеется целый ряд проблем систем, которые требуют должного мониторинга, оценки и управления. Однако эффективность этой технологии сотовой связи в большой степени зависит от того, насколько хорошо решение выполнено в целом — то есть каким образом пользовательское оборудование, базовая станция и сама сеть оценены, откалиброваны и проверены.**

**Аликс Паултре (Alix Paultre)**

**Перевод и дополнения:  
Владимир Рентюк**

**Б**еспроводная технология 5G сегодня у всех на слуху, и все должны буквально держать руку на пульсе, поскольку для обслуживания пространства приложений 5G постоянно создаются и внедряются различные инфраструктуры и новые устройства. Инфраструктура 5G растет не по дням, а по часам, и в систему добавляется все больше возможностей. Однако эффективность этой технологии в целом в большой степени зависит от того, насколько хорошо решение оценено, откалибровано и проверено. Далее вниманию читателей представлена обновленная информация о некоторых достижениях в области тестирования, оценки и калибровки инфраструктуры 5G.

### **Сначала о малом: о пассивных элементах**

Среди основных тенденций рынка электроники следует отметить такой аспект, как сосредоточенность на ведущих компонентах технологии 5G, в том числе микроконтроллерах, программируемых вентильных матрицах типа FPGA, специализированных интегральных схемах (ASIC), системах-на-кристалле (SoC) и, конечно же, на печатных платах, разводка которых требует самого пристального внимания. Однако на плате имеются не только микроконтроллеры и другие базовые компоненты, но и множество пассивных компонентов, также ответственных за успех или неудачу любого конечного решения. Одним из таких весьма важных компонентов являются, как ни странно, резисторы.

С этой целью, например, компания VPG Foil Resistors [1], часть группы компаний Vishay Precision Group, в настоящее время предлагает специализированные мощные резисторы под тремя брендами: Vishay Foil Resistors, Powertron и Alpha Electronics [2].

Требования к прецизионности в системах 5G, как известно, распространяются на каждый компонент, и возможности, которые предоставляют мощные резисторы, выполненные из металлической фольги, оптимальны для использования как в самих устройствах, так и в испытательном и оценочном оборудовании 5G (рис. 1).

Так, фольговый SMD-резистор FRFS [3] типоразмера 0402 в исполнении flip-chip (монтаж методом перевернутого чипа) с ТКС  $\pm 2,5$  ppm/°C и отклонением 0,01% после 2000 ч работы под нагрузкой представляет собой дискретное устройство для поверхностного монтажа, занимающее на 40% меньше площади по сравнению с резисторами, имеющими терминацию по технологии Wraparound. Термин Wraparound, или Wrap Around Thin Film (WATF), можно перевести как «обернутая» тонкая пленка, и речь здесь идет о боковых контактах (а именно — о терминации). Под этим понимается форма контакта, которая как бы зажимает, обертывает боковую сторону подложки резистора, придавая контакту прочность и надежность. Как и остальная часть линейки резисторов из металлической фольги, они устойчивы к электростатическим разрядам до 25 кВ, обладают низким уровнем собственных шумов, практически не имеют собственной индуктивности и характеризуются минимальной собственной емкостью.

Серия RW [4] резисторов в исполнении для монтажа на поверхность от компании Alpha Electronics в типоразмерах 0603, 0805 и 1206 обеспечивает ТКС 2 ppm/°C и демонстрирует отклонение не более 0,005% после 2000 ч работы под нагрузкой. Еще одна серия — CSMxxxxY [5] — предлагает разработчикам удобный для применения экономичный резистор для изме-

рения тока. Резисторы этой серии выпускаются без покрытия и в настоящее время доступны в типоразмерах 2726 и 4026. Они имеют ТКС  $\pm 40 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  и рассчитаны на номинальный рабочий ток 100 А, а потому предназначаются для тестирования производительности систем электропитания в пределах практически любого сетевого массива.

Проблема для компонентов от компании VPG Foil Resistors заключается в том, что они не предназначены для работы с сигналами данных (серия RW резисторов была выведена на рынок в 2014 году, когда о внедрении 5G только лишь начинали думать). Однако, хотя их компоненты не подходят для включения непосредственно в сами сигнальные цепи 5G, они оптимальны для периферийных систем, обеспечивая стабильную работу независимо от температуры, времени непрерывной работы и планируемого срока службы продукта. Оборудование 5G состоит не только из антенн, передающих сигнал, но и из измерительного и калибровочного оборудования, а кроме того, из системы управления мощностью для создания сигнала и системы управления для регулирования этой мощности. Кроме того, не следует забывать и об управлении питанием.

Обеспечивая точный и надежный переход в места эксплуатации, производители оборудования должны быть уверены, что их системы останутся откалиброванными, точными и выдержат испытание временем. Первоначальная стоимость этих новых тестовых систем требует, чтобы любой производитель продемонстрировал свою надежность так, чтобы рентабельность инвестиций их клиентов была максимальной. Компоненты от компании VPG Foil Resistors позволяют реже калибровать эти подсистемы, поддерживать их калибровку в различных средах предполагаемого использования (вспомним Аляску в январе и Феникс в июле) и обеспечивают более низкую стоимость владения для конечного потребителя.

### Проблемы покрытия и распространения радиоволн с частотами 5G

Когда автор статьи спросил Джо Дусси (Joe Dussi), директора по маркетинговым коммуникациям компании Qorvo [6], о проблемах, с которыми сталкивается компания, тот объяснил, что одной из проблем, стоящих перед отраслью, является поддержание адекватной передискретизации сигналов для обработки более высокочастотных и широких сигналов 5G New Radio. Здесь чрезвычайно важно разработать и вывести на рынок такое полевое оборудование, которое фиксирует желаемые данные и не допускает ошибок.

Кроме того, возможность настройки структуры кадра 5G [12] требует генерации большого числа нестандартных сигналов. 5G поддерживает два частотных диапазона с применением гибкого разнесения поднесущих, полученного из того, что используется в LTE. Для этого разработчикам радиочастотных систем необходимо больше мощности и пропускной способности, но при этом нужны оптимизированные габаритные размеры и эффективность решения испытательной системы в целом, особенно в том случае, когда крайне важны ее высокая надежность и производительность.

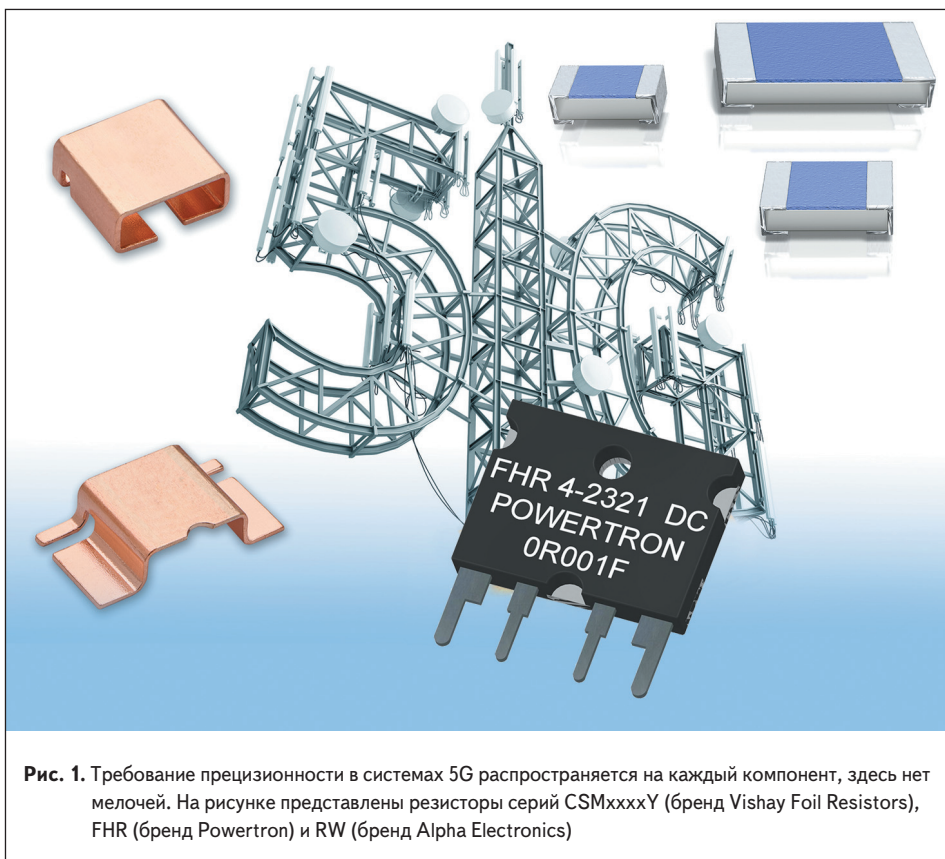


Рис. 1. Требование прецизионности в системах 5G распространяется на каждый компонент, здесь нет мелочей. На рисунке представлены резисторы серий CSMxxxxY (бренд Vishay Foil Resistors), FHR (бренд Powertron) и RW (бренд Alpha Electronics)

Например, портфель RF Fusion20™ [7] компании обслуживает основных производителей смартфонов 5G, объединяя в одно целое их усилители мощности на основе арсенида галлия (GaAs), усовершенствованное мультиплексирование объемных акустических волн (ПАВ) и интегрированное радиочастотное экранирование, обеспечивая повышенную производительность и возможности подключения. Поддерживая все основные наборы микросхем основной полосы частот, модули Fusion20 объединяют приемный тракт и малошумящий усилитель (МШУ), повышая производительность приема и возможности подключения, сохраняя ценное пространство на печатной плате.

Кроме того, модули Fusion20 оснащены инновационным радиочастотным экраном MicroShield от компании Qorvo, который сводит к минимуму возможность нежелательного взаимодействия между RFFE-компонентами. Таким образом Fusion20 помогает поддерживать самые строгие требования к полосе пропускания 5G до 200 МГц, используя модули QM77048 среднего/высокого частотного диапазона или QM77043 низкого диапазона и QM78207/208/209 сверхширокополосных модулей в региональных конфигурациях для соответствия требованиям определенного рынка. Кроме того, компания Qorvo оптимизировала Fusion20 как полноценное интерфейсное решение 5G, дополнив его модулями Qorvo Wi-Fi 6/6E.

### Проблемы пропускной способности 5G и возможность тестирования многодоменных сигналов

Рааджит Лалл (Raajit Lall), генеральный менеджер компании Tektronix [8] по рыночным

решениям и программному обеспечению, поднял две основные проблемы, с которыми сталкиваются поставщики приборов и заказчики. Это требования к пропускной способности 5G и возможность тестирования многодоменных сигналов [12]. Так, осциллограф 6 Series B MSO [9] имеет цифровой понижающий преобразователь (DDC), встроенный в ASIC, который позволяет одновременно коррелировать тесты во временной и частотной областях (рис. 2).

Эти тесты становятся критически важными, потому что архитектуры формирования диаграммы направленности требуют тесной корреляции между цифровыми сигналами

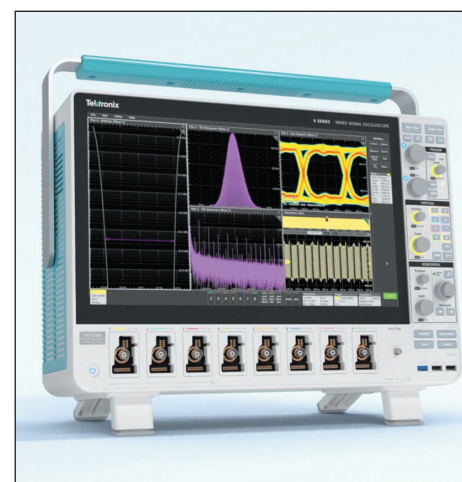


Рис. 2. Осциллограф 6 Series B MSO может выполнять одновременную корреляцию тестов во временной и частотной областях

и фазовыми антенными решетками, размещенными в устройствах. Осциллограф 6 Series B MSO имеет полосу пропускания во временной области до 10 ГГц и полосу пропускания в режиме понижения частоты DDC (digital down converter) до 2 ГГц, что позволяет инженерам-испытателям более надежно защищать свои инвестиции в будущем и идти в ногу с растущими требованиями к полосе пропускания 5G и далее к 6G, а это уже работа в терагерцевой области.

Кроме того, компания Tektronix предлагает широкий спектр продуктов, предназначенных для тестирования 5G, — от USB-анализаторов спектра для узкополосных измерений, которые применяются к массовым коммуникациям машинного типа (mMTC), до генераторов сигналов произвольной формы серии AWG, удовлетворяющих потребности в генерации сигналов с высокой точностью воспроизведения, и осциллографов смешанных сигналов, которые имеют широкую полосу пропускания, необходимую для расширенной мобильной широкополосной связи (eMBB). Осциллограф MSO6B — отличный инструмент для анализа сигналов 5G в широком диапазоне частот, а генератор сигналов произвольной формы AWG70000B выдает сигналы 5G с полосой приема 10 ГГц и шириной полосы передачи 20 ГГц каждый.

Также доступно SignalVu-PC [11] — интуитивно понятное программное обеспечение (VSA) для осциллографов, которое поддерживает интуитивно понятный пользовательский интерфейс для измерений в соответствии со стандартами 3GPP<sup>1</sup> и одновременно программируемый интерфейс для автоматизации измерений. Недавно выпущенный стробоскопический осциллограф Tektronix восьмой серии обеспечивает полосу пропускания до 30 ГГц для приложений тестирования транспортных сетей и центров обработки данных, включая TDECQ, 400G и PAM4. Этот осциллограф обеспечивает параллельные измерения до четырех каналов и имеет модульную конструкцию в небольшом форм-факторе.

## Почему MIMO и OTA и связанные проблемы

Две тенденции, внимание к которым усилилось в связи с появлением 5G и ожидаемым продолжением этой технологии уже как 6G, — тестирование MIMO (MIMO от Multiple Input Multiple Output, многоканальный вход — многоканальный выход) и беспроводное тестирование непосредственно по радиоканалу (over-the-air, OTA). Это связано с особенностями технологии 5G и распространения радиоволн используемого для этого диапазона [12].

Если говорить кратко, то применение технологий MIMO решает две задачи:

- увеличение качества связи за счет пространственного временного/частотного кодирования и (или) формирования лучей (beamforming);
- повышение скорости передачи и емкости сети при применении пространственного мультиплексирования.

MIMO оказывается особенно интересной задачей для инженеров-испытателей, поскольку они не только должны тестировать несколько каналов, выровненных по фазе, но и тестировать большие наборы каналов с широкой полосой пропускания. OTA, в свою очередь, ставит перед собой совершенно новый набор задач, поскольку инженеры-испытатели должны интегрировать камеры и настраиваемые узконаправленные антенны, ориентируемые в пространстве, в свои лаборатории. Кроме того, требуется калибровка термокамер со всеми перестановками положений (которые необходимо проверить для конкретного устройства), что может занять много времени и при неправильном подходе привести к ошибкам.

Инструментарий компании Tektronix предоставляет множество решений для тестирования mMTC и eMBB на физическом уровне. Используя единый пакет программного обеспечения SignalVu-PC для тестирования узкополосных каналов, которые могут быть выполнены с помощью USB-анализаторов спектра, инженеры по тестированию высокопроизводительных анализаторов спектра и осциллографов с широкой полосой пропускания могут использовать знакомый интерфейс для выполнения всех своих требований к тестированию на физическом уровне. Компания Tektronix также предлагает надежные решения для тестирования транзитных сетей. Пакеты соответствия и проверки для 400G и PAM4 тестируют как беспроводную, так и проводную связь.

## 5G New Radio и проблема миллиметровых волн

Говоря о проблемах отрасли 5G, Андреас Ресслер (Andreas Roessler), менеджер по технологиям компании Rohde & Schwarz USA [13], отметил, что 5G является первым стандартом, который для максимальной скорости передачи данных может использовать диапазон частот миллиметрового диапазона FR2 (выше 24 ГГц) для оптимальной скорости передачи данных. Однако для оценки состояния текущей и будущей мобильной связи ее высокоинтегрированные внешние интерфейсы и антенные решетки требуют передовых методов тестирования по технологии OTA и новых подходов при тестировании радиочастотной части. Показатели тестирования включают калибровку виртуального кабеля (virtual cable calibration, VCC), которая является обязательной для воспроизводимого и надежного тестирования пропускной способности OTA. Для тестов производительности, в которых имитируется замирание, метод VCC имеет решающее значение для оценки определенных корреляций антенн с минимальными перекрестными помехами от канала OTA.

Одной из самых больших проблем для производителей средств измерений и испытаний представляется внедрение стандартизированных методов оценки и проверки для пользовательского оборудования в повторяемых и реалистичных условиях, поскольку они также должны быть надежны при процессах массового производства. Для тестов LTE и 5G в диапазоне FR1 методы тестирования на проводимость считаются нормой для устройств MIMO. Во время тестирования антенны испытываемого устройства отключаются от его антенных

портов, и устройство напрямую подключается к тестовой системе с помощью коаксиального кабеля. Однако для тестирования пользовательского оборудования в диапазонах FR2 этот подход непрактичен, поскольку для пространственного мультиплексирования и формирования диаграммы направленности необходимо тестирование OTA без кабельных соединений на пользовательском оборудовании, где имеется большое количество интегрированных антенн.

Кроме того есть и еще одна проблема — передаваемый сигнал, распространяющийся по радиоканалу OTA, искажается собственными помехами из-за перекрестных помех и шумом приемника. Чтобы иметь определенные и воспроизводимые условия, аналогичные тестированию на проводимость, необходимо исключить влияние канала OTA. Один из подходов к решению этой проблемы состоит в том, чтобы вычислить неизвестную матрицу передачи OTA с учетом всей среды распространения контрольного радиосигнала, включая характеристики антенны передатчика и приемника. Этот подход сложен и в большинстве случаев невозможен, поскольку производители пользовательского оборудования не предоставляют подробную информацию о характеристиках своих антенн, поэтому здесь приходится использовать подход, известный как оценка методом «черного ящика».

И здесь на помощь приходит метод, разработанный специалистами компании Rohde & Schwarz и выравнивающий антенную решетку канала OTA, используя для этого параметры обратной связи по мощности опорного сигнала, выведенного на ответвление (Reference Signal Received Power per Branch — RSRP-B). Таким образом, необходимые в соответствии со стандартами 3GPP данные могут быть получены из пользовательского оборудования 5G. Такое выравнивание канала OTA позволит использовать в тестовой среде OTA квазипроводящий, или виртуальный, кабель.

Этот подход закладывает основу для практического тестирования производительности пользовательского оборудования 5G — например, для достижения его максимальной пропускной способности. Выравниваемый канал OTA является обязательным для всех тестов на соответствие в условиях замирания и рекомендуется для всех тестов, основанных на «идеальных» условиях радиосвязи, таких как тесты протокола или приложений. Для этой цели компания Rohde & Schwarz представила высокоскоростную виртуальную калибровку, решающую проблему обратной связи RSRP-B с ограниченным шумом и разрешающей способностью, что обеспечивает оптимальные предпосылки для сложных испытаний OTA.

## Экономия площадей при тестировании продукта

Как уже было сказано, в 5G диапазона FR2 все измерения должны выполняться по эфиру, то есть по технологии OTA. Но это не так просто, как кажется, поскольку, кроме всего прочего, требует использования безэховых экранированных камер большого объема. Как выход — использовать технологию CATR, позволяющую проводить измерение характеристик антенн

<sup>1</sup> 3GPP — партнерский проект развития связи третьего поколения, созданный при сотрудничестве группы телекоммуникационных компаний Organization Partners для стандартизации спецификаций систем связи 3G на основе развивающихся сетей GSM.

5G миллиметрового диапазона в небольшом объеме. Эта популярная технология, позволяющая уменьшить необходимое пространство в камере, была реализована компанией Rohde & Schwarz в виде компактных и портативных камер, таких как R&S ATSI800C [14]. Однако теперь возникает следующая проблема — тестирование в диапазоне FR2 управления радиоресурсами (radio resource management, RRM). Для этого пользовательское оборудование необходимо подвергнуть воздействию двух независимых сигналов базовых станций, поступающих с разных направлений.

Для решения этой проблемы компания Rohde & Schwarz разработала расширение к R&S ATSI800C в компактной OTA-установке для создания мультирефлекторной системы. В R&S ATSI800M четыре отражателя могут создавать шесть разных пар углов падения луча [15] на испытуемое устройство. Это соответствует требованиям спецификации 3GPP RRM, но при необходимости позволяет реализовать даже более гибкие настройки измерения. Поскольку каждый отражатель может создавать независимую 30-см так называемую тихую зону (quiet zone, QZ), эти тесты RRM по-прежнему можно проводить с использованием подхода «черного ящика», сохраняя при этом низкую результирующую погрешность измерения.

Помимо RRM с одним или двумя углами прихода, R&S ATSI800M может применяться для испытаний на соответствие по радиочастотному диапазону, протоколу и демодуляции, что превращает данное решение в систему «одна камера для всех требований», которая занимает лишь около 5 кв. м площади в испытательной лаборатории. Расширение в виде мультирефлектора спроектировано таким образом, что его можно в любое удобное время добавить в качестве обновления к имеющемуся в испытательной лаборатории R&S ATSI800C. R&S ATSI800M.

### Передача голоса через каналы 5G (Voice-over-NR)

Услуги мобильной голосовой связи продолжают играть важную роль, в том числе и в технологии сотовой связи 5G, а потому все больше сетевых

операторов начинают развертывать сети 5G SA (SA — standalone, автономный режим). Это открывает возможности для высококачественных голосовых вызовов и вызовов данных в системе 5G VoNR (Voice-over-NR, голос через New Radio), причем не только для традиционных операторов, но и для множества новых вертикалей. Voice-over-NR — голосовые услуги, предоставляемые 5G RAN (RAN — radio access network, беспроводная сеть с радиодоступом), 5GC (технология компании Huawei с разделением опорной сети 5GC на сетевые слои) и с архитектурой каналов данных IMS (IMS — IP Multimedia Subsystem, спецификация передачи мультимедийного содержимого в электросвязи на основе протокола IP). Передача голоса через 5G работает так же, как передача голоса через LTE, но с использованием технологии IMS в качестве средства предоставления услуг.

Преимущество здесь состоит в том, что для оптимизации качества голоса IMS управляет (как в VoLTE) установлением сеанса PDU с соответствующим потоком QoS. Предпосылкой для VoNR является поддержка пользовательским оборудованием передачи голоса IMS через PS. Что касается тестирования голосовых сервисов в 5G, то тестируются первые реализации и функциональное поведение. Хотя общая тестовая установка для VoNR не слишком отличается от той, что используется для VoLTE, однако здесь следует рассмотреть различные области тестирования.

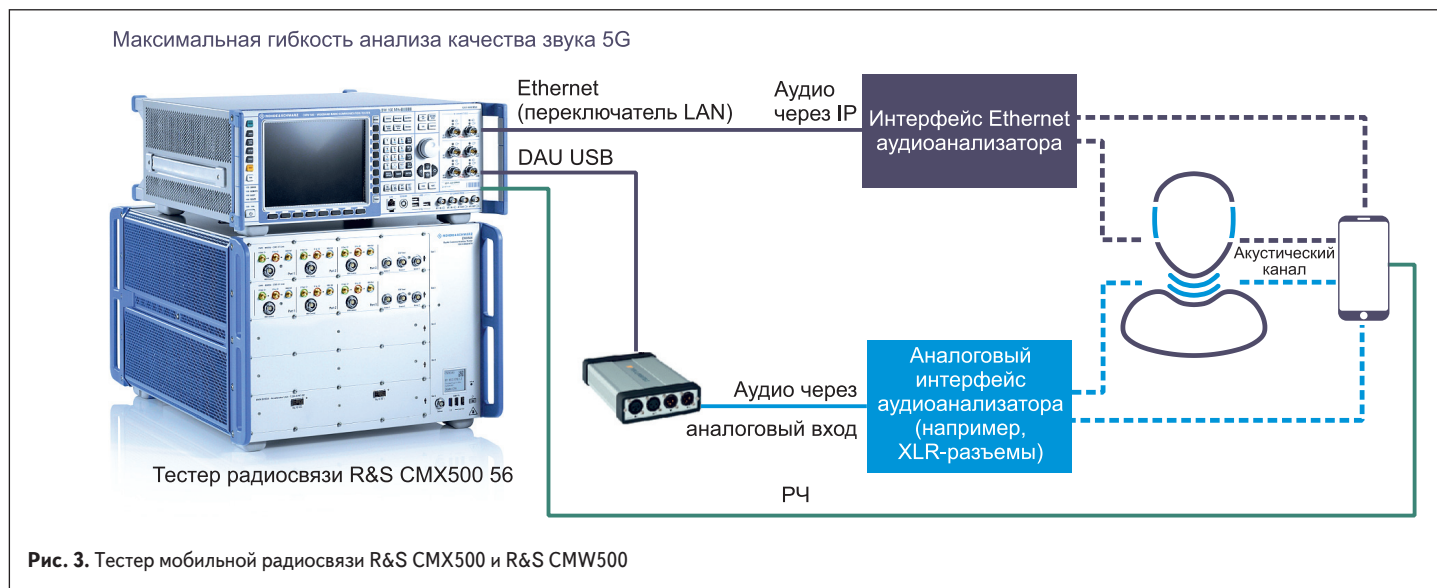
Аспекты тестирования голосовой связи через 5G предусматривают сценарии для VoLTE для неавтономного режима NSA (non-standalone), а также откат к EPS, обеспечивающий передачу обслуживания во время установки соединения с 5G на LTE или откат к RAT, если LTE NG-eNB подключен к 5GC. И наконец, что не менее важно, необходимо провести функциональные тесты VoNR и тесты качества звука. С точки зрения речевых кодеков тестовая система для передачи голоса по 5G в дополнение к кодеку EVS должна поддерживать унаследованные речевые коды AMR-NB и AMR-WB.

Схема тестирования для голосовых и видеоприложений в 5G изображена на рис. 3. Здесь показан тестер мобильной радиосвязи

R&S CMX500 вместе с R&S CMW500, поддерживающим LTE и 5G для тестирования автономного или неавтономного подключения. R&S CMX500 поддерживает внутренний сервер IMS, обеспечивая виртуальную эмуляцию пользовательского устройства и режим обратной связи канала звука для быстрого и простого функционального тестирования VoNR. Настройка может быть расширена с помощью аудиоанализатора, подключенного к конечной точке внешнего носителя R&S CMX-ZG180A либо через IP forward, либо через маршрутизацию аудио через DAU USB.

Для того чтобы выполнить аудиотестирование в соответствии со стандартами IEC 62820-1 или ITU-T P.51, показанная на рис. 3 испытательная установка может использоваться либо с искусственной головой, либо с искусственным ухом и ртом. Для электрических измерений тестируемое устройство можно подключить через выход для динамика непосредственно к входу аудиоанализатора, а выход микрофона — к выходу аудиоанализатора. Платформа R&S CMW500, которая была очень успешной на рынке анализа качества голоса для сетей сотовой связи 2G–4G, теперь с помощью R&S CMX500 расширяется для приложений 5G VoNR.

В 16-м релизе стандарта сотовой связи 3GPP особое внимание, помимо прочего, уделяется двум рыночным вертикалям: индустриальному «Интернету вещей» (Industrial Internet of Things, IIoT) и автомобилестроению. Причина в том, что оба рынка ставят перед отраслью мобильной связи новые требования, такие как повышенная надежность, безопасность и очень низкая временная задержка. Обычно это называется сверхнадежной связью с малой задержкой, или URLLC (ultra-reliable low-latency communication). Вторая тенденция заключается в том, что усилия по достижению более высоких скоростей передачи данных продолжатся. В предстоящем, 17-м релизе 3GPP для диапазона частот FR1 уже обсуждается поддержка в нисходящем направлении модуляции 1024 QAM, чтобы увеличить пропускную способность. По сути, 1024 QAM представляет собой 1024 варианта сигнала на каждый герц





**Рис. 4.** Трансивер векторных сигналов VST позволяет проверять и тестировать новейшие интерфейсы сотовой связи 5G и ранние версии Wi-Fi 7, трансиверы и различное пользовательское оборудование

передачи. А сам QAM — это сигнал, в котором две синусоидальные несущие сдвинуты по фазе друг относительно друга на 90°, или на четверть периода. Данное смещение в совокупности с моделирующим сигналом, а это и есть амплитудные модуляции, служит базой для кодирования бинарных символов. О видах используемой для систем радиосвязи модуляции подробно рассказано в [16].

Для расширения частотного диапазона FR2, называемого FR2+, обсуждается создание более широкой полосы пропускания, например до 2, 2,16 или даже 3,2 ГГц. Независимо от того, что решит орган по стандартизации, возникнут новые проблемы при разработке устройств и компонентов инфраструктуры, поддерживающих эти дополнительные возможности. К счастью, анализатор спектра и сигналов R&S FSW уже сегодня обеспечивает полосу анализа сигналов до 8,3 ГГц, не имея аналогов в мире тестирования и измерений.

Компания Rohde & Schwarz рассматривает OpenRAN как эволюцию технологии, которая включает новые функции в RAN, что позволяет разделить архитектуру на модули, обеспечить программноопределяемую радиосвязь, интеллектуальное управление в реальном времени, сетевое управление и оркестровку, а также сетевые методы. В очень упрощенном виде системы для тестирования и измерения не делают различий между традиционными RAN и OpenRAN. Но хотя большинство требований к тестированию схожи, портфель компании Rohde & Schwarz содержит тестовые решения как для эмуляции O-DU (распределительный модуль), так и для тестирования и проверки O-RU (радиочастотный модуль).

### Устранение сложности при тестировании и испытаниях

Специалисты из компании NI [17] рассказали, что некоторые из ключевых проблем, наблюдаемые ими при испытаниях, связаны

с работой с более сложными, чем прежде, сигналами, причем еще и с широкой полосой пропускания. Дело в том, что обычно клиенты компании разрабатывают устройства, которые поддерживают несущие шириной не менее 100 МГц, переходя к полосе 200 и 400 МГц, к агрегированным сценариям тестирования несущих с сигналами 8×100 МГц, а также к межполосным комбинациям. Например, чтобы повысить энергоэффективность своих РЧ-интерфейсов, они ищут такие методы, как цифровое предискажение (digital predistortion, DPD) и отслеживание огибающей (envelope tracking, ET). Все это делается, чтобы достичь желаемой производительности тестового оборудования.

Однако применение линейаризации DPD к сигналам с большой полосой пропускания требует солидных вычислительных ресурсов и инструментов с еще большей полосой пропускания. Точно так же разработка тестового оборудования для сигналов с полосой 100, 200 МГц и более широких диапазонов с использованием современных технологий является очень сложной задачей, если не сказать невозможной.

Используя преимущества платформы PXI, компания NI может предоставить клиентам более широкие возможности обработки данных и в работе над передовыми технологиями цифрового предискажения сотрудничает с лидерами отрасли, такими как MaxLinear.

В настоящее время компания NI занимается, в частности, исследованиями и разработками в трех направлениях — более функциональным оборудованием (аппаратным обеспечением), более эффективными алгоритмами измерения и программными инструментами, а также готовой к работе интеграцией на системном уровне. Что касается измерительных приборов, компания NI продолжает инвестировать в широкополосные высоколинейные радиочастотные измерения для частот 5G диапазонов FR1 (менее 6 ГГц) и FR2 (область миллиметровых длин волн). Основой здесь является трансивер векторных сигналов (vector signal transceiver, VST), который объединяет генерацию и анализ векторных сигналов. VST обеспечивает проверку и тестирование новейших интерфейсов сотовой связи 5G и ранних версий Wi-Fi 7, приемопередатчиков и другого пользовательского оборудования (рис. 4).

Если говорить об алгоритмах измерения и программных инструментах, то компания NI продолжает расширять возможности генерации сигналов и анализа своих API-интерфейсов радиочастотных измерений (RFmx), не отставая от последних достижений в стандарте 3GPP 5G. RFmx предоставляет инженерам по валидации и тестированию гибкие возможности для создания и применения очень больших комбинаций форм сигналов 5G к тестируемым устройствам путем изменения нескольких параметров, таких как ширина полосы частот, разнос поднесущих, схема модуляции и комбинации агрегации несущих. Что касается анализа, то по сравнению с более традиционными подходами к последовательным измерениям RFmx реализует технологию



**Рис. 5.** Инженеры должны проводить измерения по радиоканалу (ОТА) в контролируемой радиочастотной среде внутри безэховых экранированных камер

многопоточной параллельной обработки для быстрого получения точных результатов.

Компания NI имеет ряд эталонных архитектур и высокоинтегрированных автоматизированных систем тестирования для проверки и тестирования полупроводниковых и электронных устройств 5G. Эталонная архитектура валидации радиочастотного интерфейса (RF Front-end Validation) предлагает инженерам по валидации, занимающимся широкополосными радиочастотными интерфейсами, жестко синхронизированный стенд PXI с несколькими приборами, которые выполняют измерения от постоянного напряжения до цифровых и радиочастотных, программное обеспечение для управления стендами, как в безэховой экранированной камере, а также доступ к последним алгоритмам линейаризации DPD и быстрый путь к автоматической характеристизации.

Разрабатывая многоэлементные антенные модули для соединений FR2 в области миллиметровых волн, инженеры сталкиваются с трудной задачей проверки и тестирования их характеристик управления лучом. С этой целью инженеры должны проводить измерения по технологии OTA в контролируемой радиочастотной среде внутри безэховых экранированных камер (рис. 5), которые должны поддерживать вращение испытываемого оборудования по азимуту и углу места. Это необходимо для определения трехмерной пространственной диаграммы направленности тестируемого устройства, эффективной изотропной излучаемой мощности (effective isotropic radiated power, EIRP), полной излучаемой мощности (total radiated power, TRP), расположения пиков и нулей диаграммы направленности и ряда других измерений.

Измерения по технологии OTA также помогают охарактеризовать возможности испытываемого оборудования по формированию диаграммы направленности и калибровать направление луча на основе определенных управляющих слов тестируемого оборудования. Чтобы помочь инженерам ускорить разработку в этой области, компания NI представила эталонную архитектуру проверки 5G миллиметрового диапазона, которая использует преимущества

управления движением NI для ускорения трехмерных пространственных измерений в 5–10 раз по сравнению с более традиционными методами.

На уровне полупроводников одной из самых актуальных тенденций также становится проверка и тестирование по технологии OTA. Во-первых, устройства увеличивают частоту в сторону верхнего диапазона FR2 — от 48 до 52 ГГц. Во-вторых, существует растущая потребность в очень надежных и быстрых решениях для производственных испытаний в области миллиметровых волн, которые поддерживают параметрическое тестирование антенных модулей, что можно реализовать опять-таки только по эфиру. Проблема здесь в том, что в соответствии с текущими тенденциями пользовательского и клиентского оборудования эти испытательные системы должны проверять тысячи устройств в час, чтобы удовлетворить спрос относительно возможностей миллиметрового диапазона.

Возможности тестирования в области миллиметровых волн будут и дальше распространяться, но уже от флагманских устройств к пользовательскому оборудованию среднего уровня. В пользовательском оборудовании конфигурация, работающая в таком диапазоне, опирается на несколько подматриц — это необходимо для того, чтобы сделать возможным трехмерное формирование диаграммы направленности и устранить проблемы, возникающие, если руки пользователя закрывают антенну. Типичные конфигурации могут включать три или четыре антенные решетки на смартфоне, каждая из которых состоит из четырех антенных элементов (рис. 6) [18]. Это приведет к увеличению спроса на более быстрые и экономичные решения для тестирования и оценки методом OTA, способные выполнять параметрические измерения в области миллиметровых волн для выявления потенциальных проблем формирования луча не только в лабораторных, но и в полевых условиях на местах эксплуатации. ■

### Литература

1. [www.vpgfoilresistors.com](http://www.vpgfoilresistors.com)

2. VPG Foil Resistors — Vishay Foil Resistors, Powertron и Alpha Electronics. [www.vishaypg.com/docs/49003/49003.pdf](http://www.vishaypg.com/docs/49003/49003.pdf)

3. FRFC Series 0805, 1206, 1506, 2010, 2512 (Z1 Foil Technology). [www.vishaypg.com/docs/63237/FRFC.pdf](http://www.vishaypg.com/docs/63237/FRFC.pdf)

4. RWA, RWB, RWC Precision SMD Bulk Metal Foil Resistor (Wraparound) 12664-EN, Rev 22-Jan-2021. [www.alpha-elec.co.jp/w2img/2016071917494812664-RWA-RWB-RWC\(EN\)\\_final\\_22Jan2021.pdf](http://www.alpha-elec.co.jp/w2img/2016071917494812664-RWA-RWB-RWC(EN)_final_22Jan2021.pdf)

5. Introducing CSM2726Y & CSM4026Y Series. [www.vishaypg.com/docs/63293/CSMxxxxY\\_flyer.pdf](http://www.vishaypg.com/docs/63293/CSMxxxxY_flyer.pdf)

6. [www.qorvo.com](http://www.qorvo.com)

7. Fusion20 — A next-generation RF Fusion™ 5G system solution offering. [www.qorvo.com/applications/mobile-products/rf-fusion](http://www.qorvo.com/applications/mobile-products/rf-fusion)

8. [www.uk.tek.com](http://www.uk.tek.com)

9. See beyond the noise with the NEW 6 Series B MSO. [www.uk.tek.com/oscilloscope/6-series-mso-mixed-signal-oscilloscope](http://www.uk.tek.com/oscilloscope/6-series-mso-mixed-signal-oscilloscope)

10. AWG70000B Arbitrary Waveform Generator. [www.uk.tek.com/signal-generator/awg70000-arbitrary-waveform-generator](http://www.uk.tek.com/signal-generator/awg70000-arbitrary-waveform-generator)

11. SignalVu (VSA Software) for Scopes. [www.uk.tek.com/product-software-series/signalvu-spectrum-analyzer-software](http://www.uk.tek.com/product-software-series/signalvu-spectrum-analyzer-software)

12. Рентюк В. От структуры сигналов к МИМО: пять важных моментов для понимания проблем 5G New Radio // Беспроводные технологии. 2020. № 1.

13. [www.rohde-schwarz.com](http://www.rohde-schwarz.com)

14. R&S ATS1800C — испытательная CATR-камера для миллиметрового диапазона 5G NR. [www.rohde-schwarz.com/ua/product/ats1800c-productstartpage\\_63493-687744.html](http://www.rohde-schwarz.com/ua/product/ats1800c-productstartpage_63493-687744.html)

15. Multi CATR antenna test range ATS1800M. [www.rohde-schwarz.com/us/knowledge-center/videos/multi-catr-antenna-test-range-ats1800m-video-detailpage\\_251220-1087684.html](http://www.rohde-schwarz.com/us/knowledge-center/videos/multi-catr-antenna-test-range-ats1800m-video-detailpage_251220-1087684.html)

16. ДеМартино К., Рентюк В. Различия между разными типами радиопередатчиков // СВЧ-электроника. 2017. № 3.

17. [www.ni.com](http://www.ni.com)

18. Рентюк В. 5G и миллиметровые волны // СВЧ-электроника. 2019. № 4.

