

5G



АНАЛИТИЧЕСКИЙ
ДОКЛАД

Первые шаги в 5G

Проектирование новых средств радиосвязи стандарта 5G New Radio – проблемы и пути решения

Часть 2: Спектры сигналов миллиметрового диапазона длин волн

Стандарт 5G ставит смелые цели. Для предоставления таких возможностей, как просмотр потокового видео в формате UHD с разрешением 4K или 8K и реализации основных целевых сценариев использования сетей с улучшенным мобильным широкополосным доступом (eMBB) требуются скорости передачи данных до 20 Гбит/с в нисходящем канале (DL) и 10 Гбит/с в восходящем канале (UL). Увеличить скорости передачи данных можно разными способами, но основой обеспечения высоких скоростей при использовании мобильного широкополосного доступа является спектр сигнала. Стандарт 5G New Radio (NR) определяет новые частотные диапазоны ниже 6 ГГц и предполагает дальнейший переход на частоты миллиметрового диапазона длин волн, где доступны более широкие и непрерывные полосы частот для организации каналов связи с большой пропускной способностью.

Более широкие полосы пропускания обещают потребителям повышение качества передачи данных, а инженерам – новые проблемы, с которыми им придется столкнуться при выполнении всех требований к качеству сигналов в миллиметровом диапазоне. Негативные факторы, борьба с которыми не составляла большой проблемы на частотах ниже 6 ГГц, теперь вызывают значительные затруднения и требуют принятия дополнительных мер, а также применения новых методов измерений, способных обеспечить нужные показатели точности при оценке характеристик компонентов и устройств стандарта 5G.

Частотный спектр стандарта 5G

Для предоставления полного перечня возможностей для потребителей и покрытия по всему миру требуется согласованное использование частотного спектра во всех регионах. Стандарт 5G NR регламентирует использование частот до 52,6 ГГц с общей занимаемой полосой радиочастот сигналов (поддиапазонов) порядка 10 ГГц.

- **Диапазон 1: от 400 МГц до 6 ГГц** добавляет полосу частот 1,5 ГГц со следующими поддиапазонами: 3,3–4,2 ГГц, 3,3–3,8 ГГц, 4,4–5 ГГц.
- **Диапазон 2: от 24,25 до 52,6 ГГц** добавляет полосу частот 8,25 ГГц со следующими поддиапазонами: 26,5–29,5 ГГц, 24,25–27,5 ГГц, 37–40 ГГц.

В ключевых регионах уже проводились исследования и испытания на некоторых поддиапазонах ниже 6 ГГц, а на частотах сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн уже были развернуты участки сетей и проведены пробные запуски, как показано в таблице 1.

Таблица 1. Испытания и пробное развертывание сетей 5G на частотах до 6 ГГц и выше, вплоть до миллиметрового диапазона

Частотный спектр	Ниже 6 ГГц					Миллиметровый диапазон			...	64–71 ГГц 71–76 ГГц
	0,6 ГГц	2,5 ГГц	3,4–3,7 ГГц		4,4–4,9 ГГц	28 ГГц	39 ГГц			
Регионы	США	США	Европа	Китай	Япония Южная Корея	Япония	США	Япо- ния	США	уточняется
Развер- тывание услуг на ком- мерческой основе	2019	к концу 2019	уточ- няется	2020	2020	середина 2020	2018	после 2020	2018	уточняется

- В диапазоне до 1 ГГц имеется несколько поддиапазонов, которые планируется задействовать для нужд устройств Интернета вещей (IoT). Это частоты порядка 600, 700 и 800 МГц.
- Диапазон 1–6 ГГц будет использоваться для увеличения зон покрытия и пропускной способности сетей. Основной диапазон для Китая, Европы, Кореи и Японии – 3,3–3,8 ГГц – может быть задействован для внедрения множества различных сервисов связи стандарта 5G. Также в Китае и Японии рассматривается использование диапазона 4,4–4,9 ГГц.
- Диапазон свыше 6 ГГц в основном будет задействован для тех случаев, когда требуются очень широкополосные сигналы. Начальные целевые частоты миллиметрового диапазона для Японии и США – 28 и 39 ГГц. Несмотря на то, что спецификации стандарта 5G NR версии 15 предполагают использовать частоты до 52,6 ГГц, уже начаты исследования для внедрения будущих версий стандартов, в которых планируется задействовать частотные поддиапазоны 64–71 ГГц и 71–76 ГГц.

По аналогии со стандартом LTE для формирования широкополосных сигналов могут использоваться многокомпонентные несущие, причем для диапазона 2 (по таблице 2) полоса частот может составлять до 800 МГц. Объемы использования частотного спектра будут определяться различными странами индивидуально. Пока разработана только стартовая версия стандарта 5G NR, и ожидается, что с более поздними версиями будут продолжены намеченные тенденции использования частотного спектра, расширения полос пропускания и совершенствования используемых сигналов с учетом новых задач и целевых сценариев использования.

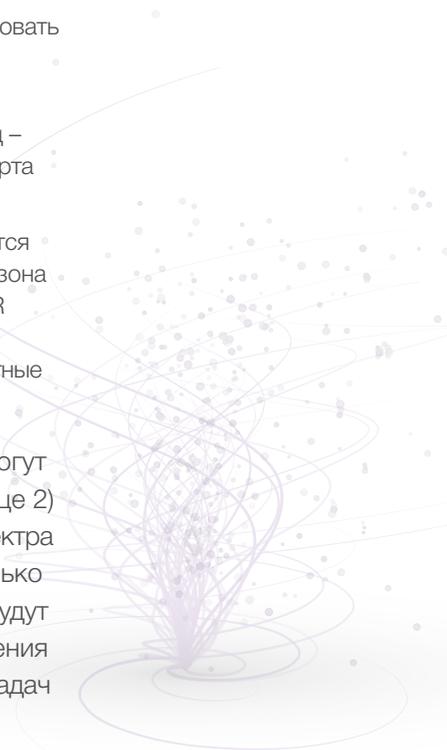


Таблица 2. Спецификации частотных диапазонов и типов сигналов стандарта 5G New Radio версии 15 (стартовой)

Частота	Диапазон 1: 450 МГц – 6 ГГц Диапазон 2: 24,25–52,6 ГГц
Максимальная полоса несущей	Диапазон 1: до 100 МГц Диапазон 2: до 400 МГц
Частотный интервал между поднесущими	Ниже 6 ГГц: 15 кГц, 30 кГц, 60 кГц >6 ГГц: 60 кГц, 120 кГц, 240 кГц
Максимальное количество поднесущих	3300 (до 4096 с БПФ)
Объединение несущих	до 16 несущих при максимальной полосе до 800 МГц
Тип сигналов и модуляции	CP-OFDM (UL/DL): QPSK, 16QAM, 64QAM и 256QAM DFT-s-OFDM (UL): $\pi/2$ -BPSK, 16QAM, 64QAM и 256QAM
Применение технологии пространственного кодирования MIMO (множественный вход – множественный выход)	8x8 MIMO до 8 уровней в нисходящем канале и до 4 – в восходящем

В диапазоне до 6 ГГц возникают несколько новых проблем, связанных с разработкой устройств в новых поддиапазонах 3,4-3,7 ГГц и 4,4-4,9 ГГц и обусловленных многочисленными нестандартными измерительными задачами, которые требуется решать при испытаниях устройств, трудностями с совместимостью и контролем качества конструкций антенных решеток, выполненных по технологии MIMO, методом измерений по радиоэфиру (over-the air – OTA). Но, как бы то ни было, особенности диапазона до 6 ГГц в сущности являются следствием расширения уже существующих возможностей стандарта LTE-A, а настоящие проблемы начнутся с переходом в миллиметровый диапазон.

В конце 2018 года операторы планируют впервые запустить фиксированный беспроводной доступ в миллиметровом диапазоне¹. На сегодняшний день стандарты Wi-Fi IEEE 802.11ad/ay уже обеспечивают фиксированный беспроводной доступ на частотах порядка 60 ГГц в режимах «от точки к точке» или «от точки к многим точкам». На начальном этапе при реализации фиксированного беспроводного доступа по стандартам 5G предполагается использование аналогичных конфигураций MIMO и форм сигналов, а для привязки и управления, скорее всего, будут использоваться существующие сети 4G eNB, т.е. предполагается работа в неавтономном режиме (NSA). Основные отличия появятся, когда технологии мобильной связи перейдут в миллиметровый диапазон. Придется решать проблемы по предоставлению и поддержанию канала связи при перемещении абонентского устройства, например, в пределах площади автостоянки, по шоссе или в скоростном поезде. В настоящее время уже проводятся испытания подобных случаев использования мобильных устройств миллиметрового диапазона. Поскольку модели каналов разрабатываются с учетом различных целевых сценариев использования, компоненты и устройства должны удовлетворять требованиям, важным для реализации этих функций в миллиметровом диапазоне.

¹ Отчет о состоянии рынка 5G, стратегии и возможности, 2017 год, подготовленный компанией IHS Markit.

Проблемы, связанные с качеством сигналов в миллиметровом диапазоне

На качество сигнала может оказывать влияние множество факторов, включая обработку в основной полосе, модуляцию, фильтрацию и перенос спектра сигнала на более высокие частоты. С распространением более широкополосных каналов, которые будут использоваться, как ожидается, при переходе в миллиметровый диапазон, проектирование устройств на модулирующих частотах и на ВЧ может осложниться проблемами, связанными с нарушениями формы сигнала, которые при переносе спектра на более высокие частоты или при расширении полосы становятся еще более значительными. Присущие системам связи с OFDM-модуляцией (мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов) свойства ортогональности препятствуют взаимному влиянию перекрывающихся несущих. Однако, нарушения формы сигнала, связанные с IQ-искажениями, фазовым шумом, линейной (AM-AM) и нелинейной (AM-ФМ) компрессией, а также частотные сдвиги, могут стать причиной искажений модулированного сигнала. Фактором, который наиболее часто вызывает проблемы в системах связи с OFDM-модуляцией миллиметрового диапазона, является фазовый шум. Очень высокий уровень фазовых шумов в устройстве может привести к тому, что поднесущие будут испытывать взаимное влияние, ухудшая качество демодулированного сигнала.

Подобные проблемы довольно трудно разрешить, а их влияние может ухудшить общие характеристики устройства. Устройства должны проектироваться таким образом, чтобы преодолевать физические проблемы, связанные с особенностями широкополосных сигналов миллиметрового диапазона, а средства измерений, которые применяются для контроля характеристик этих устройств, должны иметь еще более высокие характеристики, позволяющие обеспечить надлежащую точность при проведении измерений параметров сигналов и оценки их качества, не создавая при этом новых проблем.

Оценка качества сигналов

Анализ параметров модуляции – один из наиболее полезных показателей качества сигналов. Ошибки, вызванные искажениями сигнала, можно выявить при изучении сигнального созвездия на комплексной плоскости. Другим ключевым показателем качества модуляции сигнала является величина модуля вектора ошибки (EVM), по результатам измерений которой можно оценить искажения формы сигнала в целом.

5G NR регламентирует использование сигналов с CP-OFDM модуляцией (мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов и циклическим префиксом), которая представляет собой схему модуляции с множеством несущих. Фазовый шум, а также любые отклонения фазы или амплитуды, возникшие в узлах устройства и проявляющиеся в виде искажений спектра широкополосного сигнала, отразятся на результатах измерений модуля вектора ошибки. Модуль вектора ошибки представляет собой нормализованную разность двух векторов на комплексной плоскости (рисунок 1): вектора измеренного IQ-сигнала и вектора опорного IQ-сигнала (расчетная величина). Он характеризует степень отклонения реального сигнала от идеального (образцового). Как правило, модуль вектора ошибки выражается в дБ или процентах.

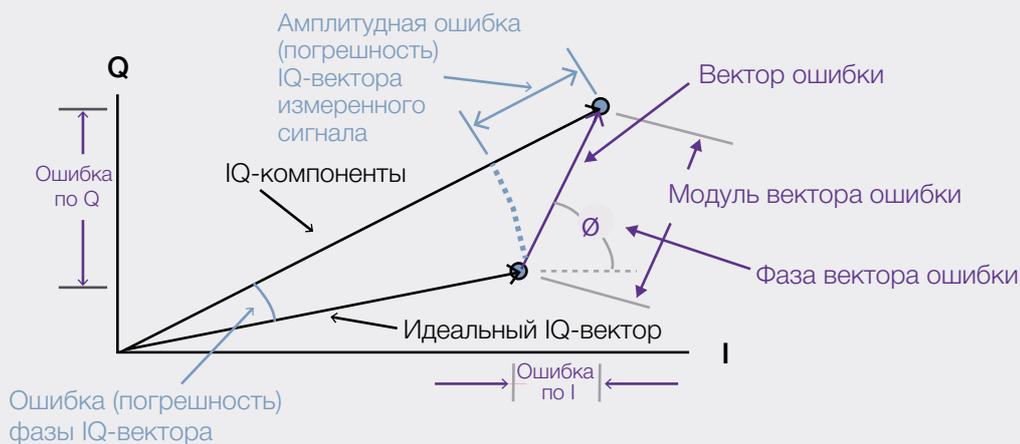


Рисунок 1. Особенности вычисления модуля вектора ошибки.

По мере того, как плотность модуляции будет возрастать, а ожидается, что в стандарте 5G будут применяться схемы модуляции с высокой плотностью (от 256 QAM изначально до 1024 QAM в будущем), к компонентам и устройствам будут предъявляться все более жесткие требования в части модуля вектора ошибки. Например, таблица 3 показывает, как возрастают требования в части модуля вектора ошибки (EVM) для абонентских устройств (UE) стандарта 3GPP с ростом плотности модуляции.

Таблица 3. Требования стандарта 3GPP TS 38.101-1 в части модуля вектора ошибки (EVM) для схем модуляции 5G

Схема модуляции для физического канала нисходящего потока данных (PDSCH)	Требования к модулю вектора ошибки
QPSK	17,5 %
16QAM	12,5 %
64QAM	8 %
256QAM	3,5 %

Кроме того, для подтверждения соответствия параметров спектра сигналов требуется провести их измерение. При измерениях параметров спектра сигналов абонентских устройств стандарта 5G контролируются следующие показатели: переданная мощность, ширина занятой (спектром сигнала) полосы частот (OBW), проникновение сигнала в смежный канал (ACPR), соответствие спектральной маске излучений (SEM) и уровень паразитных составляющих спектра.

Для компонентов и устройств стандарта 5G требуется, чтобы измерительное оборудование обладало характеристиками, достаточными для получения достоверной оценки сигнального созвездия и модуля вектора ошибки. Кроме того, по мере развития стандартов 5G, важное значение будет иметь гибкость измерительного оборудования для переноса измерений параметров спектра на более высокие частоты и широкие полосы пропускания.

Выбор измерительного решения

Для обеспечения высокого качества выполняемых измерений параметров широкополосных устройств на частотах миллиметрового диапазона требуется измерительное оборудование, модуль вектора ошибки которого лучше, чем у исследуемого устройства (ИУ) или системы. Типовые требования:

- для измерений параметров компонентов: на 10 дБ лучше, чем у системы в целом;
- для измерений параметров системы: на 3 дБ лучше, чем у образцового источника радиосигналов.

Типовая схема измерений параметров передатчика, приемника, приемопередатчика или других компонентов в устройствах беспроводной передачи данных (в зависимости от типа) обычно включает источник сигналов для формирования входного воздействия и ИУ, ИУ и анализатор, или все вместе. Измерения в основной полосе частот и в диапазоне до 6 ГГц, как правило, выполняются с использованием кабелей. Измерения на частотах сантиметрового и миллиметрового диапазонов, скорее всего, придется выполнять методом ОТА из-за высокого уровня интеграции, ожидаемого в антеннах и радиочастотных интегральных схемах, вследствие которого соединители в контрольных точках для подключения кабелей могут просто отсутствовать.

На рисунке 2 показана блок-схема **испытательного стенда для формирования и анализа сигналов стандарта 5G (типовое решение)**. Оно имеет характеристики, требуемые для оценки характеристик компонентов и устройств стандарта 5G на предмет искажений сигналов, которые могут создать проблемы на частотах миллиметрового диапазона. Для формирования сигнала с цифровой модуляцией стандарта 5G NR и подачи на вход ИУ используется векторный генератор сигналов. Для захвата радиочастотного сигнала на выходе ИУ, оцифровки и исследования его параметров, в том числе параметров модуляции, используется векторный анализатор сигналов. Данное решение обладает гибкостью конфигурации для работы с измерительными задачами при различных комбинациях частот и поддиапазонов, а также с различной степенью достоверности, обусловленной характеристиками измеряемых компонентов и устройств стандарта 5G.

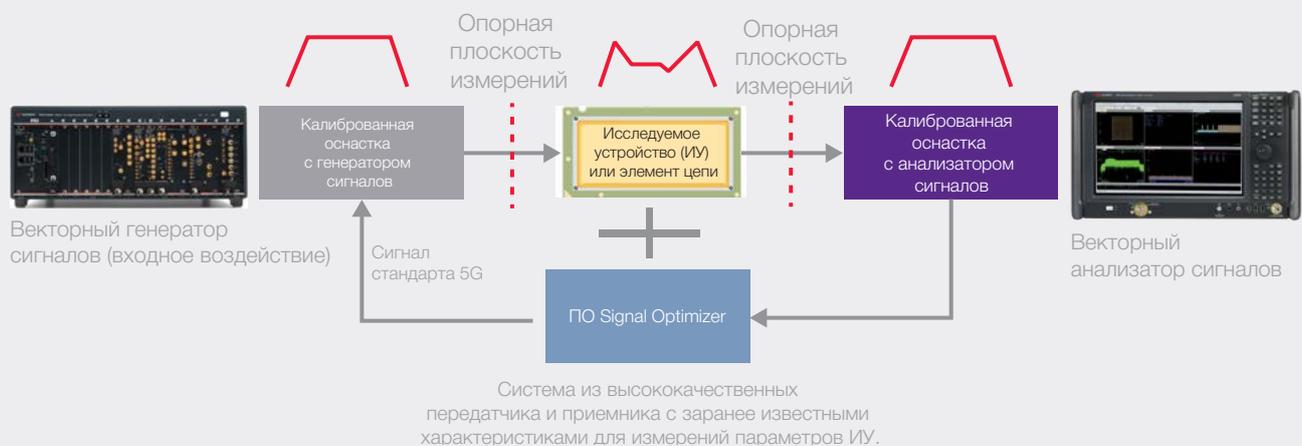


Рисунок 2. Схема стенда для испытаний устройств стандарта 5G на основе измерительных приборов и программного обеспечения, адаптированных для 5G NR, включая программное обеспечение Signal Optimizer.

Прочие источники погрешностей измерительной системы могут скрываться в самой схеме измерений. При построении схемы измерений в условиях очень высоких частот и широких полос пропускания такое вспомогательное оборудование, как тестовая оснастка, кабельные сборки, переходы, направленные ответвители, фильтры, предусилители, разветвители и коммутаторы между ИУ и измерительными приборами, могут оказать гораздо более негативное влияние, чем при измерениях на частотах до 6 ГГц. Для обеспечения максимальной точности измерений измерительная система должна быть откалибрована в измерительной плоскости, соответствующей месту подключения ИУ. Задача заключается в том, чтобы получить характеристики ИУ без учета негативного влияния тестовой оснастки и вспомогательного оборудования. Измерительная система должна обеспечивать еще более высокие характеристики, чем те, к которым мы стремимся при проектировании устройства. Возможность выполнения измерений в плоскости ИУ является залогом высокой точности и повторяемости. Правильно выполненная калибровка измерительной системы устраняет составляющие систематической погрешности измерений, связанные с АЧХ и ФЧХ тестовой оснастки, и крайне полезна при работе с широкополосными сигналами. В состав предлагаемого измерительного стенда для испытаний устройств стандарта 5G входит программное средство для калибровки системы Signal Optimizer. Данное ПО обеспечивает перенос плоскости измерений на разъем ИУ, как показано на рисунке 2.



Соединители, кабели и переходы

Помимо калибровки точность измерительной установки может быть улучшена посредством правильного выбора и использования кабелей, соединителей и переходов. Используемые в них материалы, их структура и геометрия специально оптимизируются для работы в определенном диапазоне частот. Использование кабелей и элементов соединения плохого качества в дорогостоящей измерительной системе может привести к значительному ухудшению ее характеристик. Поскольку большинство анализаторов сигналов миллиметрового диапазона способны работать на более низких частотах, на которых совместно с ними может использоваться низкочастотная измерительная оснастка, может иметь место ситуация, когда эта же измерительная оснастка будет использована на более высоких частотах, что может ухудшить качество измерений. При уменьшении длины волны уменьшаются и геометрические соотношения в кабелях и соединителях. Это означает, что принадлежности с традиционными соединителями типа SMA и прецизионными 3,5 мм уже не могут использоваться для измерений на частотах миллиметрового диапазона, хотя они и физически совместимы с соединителями типа 2,92 мм.

Если требуется проводить измерения в различных областях частот, стоит рассмотреть принадлежности с соединителями типов 2,4 мм или 2,92 мм. Несмотря на то, что они имеют немного большие потери, чем соединители SMA и 3,5 мм (в основном свыше 30 ГГц), принадлежности с соединителями типов 2,4 мм и 2,92 мм могут использоваться для измерений во всем диапазоне, включая низкочастотный участок, и при этом обеспечивают хорошую повторяемость.



Измерения параметров устройств стандарта 5G NR в миллиметровом диапазоне

Выбрав оптимальный набор измерительного оборудования, соединителей, переходов и средств калибровки измерительной системы, вы сможете выполнить высокоточные измерения для достоверной оценки характеристик компонентов и устройств стандарта 5G. На рисунке 3 показаны результаты калиброванных измерений параметров антенны стандарта 5G, полученные с использованием испытательного стенда для формирования и анализа сигналов стандарта 5G компании Keysight, позволяющего с высокой точностью исследовать характеристики устройств стандарта 5G NR на ВЧ и частотах миллиметрового диапазона при полосе модулированного сигнала до 2 ГГц. С программным обеспечением, адаптированным под стандарт 5G NR, легко формировать и анализировать сигналы с соответствующими стандарту 5G индексацией и параметрами для восходящего и нисходящего каналов передачи данных. Кроме того, данное программное обеспечение может использоваться для испытаний на совместимость стандартов 5G NR и LTE.



Рис. 3. Анализ сигналов стандарта 5G NR с модуляцией 256 QAM и диаграммы направленности антенны



Заключение

Начало работе устройств и сетей стандарта 5G в миллиметровом диапазоне уже положено. Версия 15 стандарта 5G NR регламентирует использование миллиметрового диапазона на частотах до 52,6 ГГц с полосами каналов до 800 МГц. На частотах миллиметрового диапазона сигналы становятся более чувствительны к вносимым искажениями и нарушениям структуры, что требует особого внимания при выборе измерительного оборудования, кабелей, соединителей и средств калибровки измерительной системы для получения точных и достоверных результатов измерений. Испытательный стенд для формирования и анализа сигналов стандарта 5G компании Keysight обеспечивает высокую точность измерений характеристик устройств и показателей качества сигналов стандарта 5G NR на ВЧ и частотах миллиметрового диапазона. Он обладает требуемыми техническими характеристиками и полосами пропускания, а также достаточной гибкостью для адаптации к изменяющимся требованиям в процессе эволюции стандартов 5G.

Более подробную информацию о решениях для 5G NR, а также новые выпуски аналитического доклада «Первые шаги в 5G» вы сможете найти на странице www.keysight.com/find/5GNR. В следующем выпуске мы рассмотрим проблемы, связанные измерениями параметров конструкций антенных решеток MIMO и подтверждением их соответствия требованиям стандартов, а также особенности формирования диаграмм направленности для устройств стандарта 5G.

Подробную информацию см. на сайте www.keysight.com

Для получения дополнительных сведений о продукции, приложениях и услугах Keysight Technologies обратитесь в местное представительство компании Keysight. Полный перечень представительств приведен на сайте www.keysight.com/find/contactus.

