

# Технология 5G в диапазоне миллиметровых волн

Стив Дудкевич, Ричард Хилтон (Maury Microwave)

Перевод: Елена Кириленко (ekirilenko@maurymw.com)

**При разработке устройств для нового стандарта мобильной связи 5G требуется проведение ряда сложных измерений. В данной статье рассматриваются особенности проведения измерений load-pull в миллиметровом диапазоне.**

Стандарт 5-го поколения мобильной связи, также известный как 5G, представляет собой новую ступень эволюции беспроводных коммуникаций. Он предназначен для высокоскоростной передачи данных, голоса, видео, а также для Интернета вещей, автомобилей, смарт-домов, смарт-городов, промышленной автоматизации и т.д. Создание и развитие данной технологии возможно, если задействовать сразу несколько диапазонов частот – от низких мегагерцовых до сверхвысоких гигагерцовых. Для решения данной задачи потребуются большое количество исследований в области широкого диапазона от 450 МГц до 6 ГГц, в диапазоне 28–30 ГГц и миллиметровом диапазоне 37–39 ГГц.

Несмотря на наличие определенных проблем и особенностей, диапазоны миллиметровых волн имеют множество преимуществ в области беспроводной связи, включая более широкую полосу пропускания, более высокую скорость передачи данных, улучшенную защиту данных и высокую энергоэффективность.

Одной из значимых частей инфраструктуры, позволяющей реализовать

данные преимущества в миллиметровом диапазоне волн, являются усилители мощности (УМ), которые должны быть разработаны для получения оптимальных характеристик. Под оптимальными характеристиками УМ подразумеваются высокие выходная мощность и коэффициент полезного действия при сохранении линейности на приемлемом уровне. Полезным инструментом в арсенале разработчика для получения требуемых характеристик УМ является методика load-pull.

## МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ LOAD-PULL

Процесс измерений load-pull представляет собой изменение импеданса, подключенного к тестируемому устройству (ТУ), чаще всего транзистору, с целью определения его характеристик на большом сигнале. Различные параметры ТУ (выходная мощность, усиление, КПД) измеряются или рассчитываются для различных значений импеданса. На рисунке 1 показаны контуры фиксированных значений выходной мощности и КПД. С помощью данных контуров можно опреде-

лить точку максимального значения интересующего параметра, скорость его изменения, а также оптимальный импеданс, обеспечивающий компромисс между различными критериями оптимизации.

Как работает load-pull? Для начала представим ТУ в виде двухполюсника, как показано на рисунке 2. Затем предположим, что сигнал  $a_1$  подается на первый порт ТУ. Часть этого сигнала будет доставлена в ТУ, в то время как другая часть, волна  $b_1$ , будет отражена вследствие рассогласования между входным импедансом ТУ и импедансом источника. Рассмотрим также измененный сигнал  $b_2$ , который является выходным сигналом второго порта ТУ. Часть данного сигнала уйдет в нагрузку, а другая часть отразится от нее в виде сигнала  $a_2$ , что также является следствием рассогласования между выходным импедансом ТУ и импедансом нагрузки.

Амплитуда отражения  $\Gamma_L$  рассчитывается из соотношения:

$$\Gamma_L = \frac{a_2}{b_2}$$

В измерениях load-pull мы управляем амплитудой отраженного сигнала  $a_2$  на выходе ТУ, а также изменяем фазу отраженного сигнала. Другими словами, если достигается требуемый уровень сигнала  $a_2$ , любой импеданс нагрузки, рассчитанный по формуле:

$$Z = Z_0 \times \left( \frac{1 + \Gamma_L}{1 - \Gamma_L} \right),$$

может быть подключен к выходу ТУ. Существуют две известные методологии управления импедансом на выходе ТУ: активный и пассивный load-pull.

Пассивный load-pull основывается на использовании механических тюнеров импеданса для варьирования амплитуды и фазы отраженного сигнала  $a_2$  и, следовательно, изменения импеданса нагрузки (см. рис. 3).

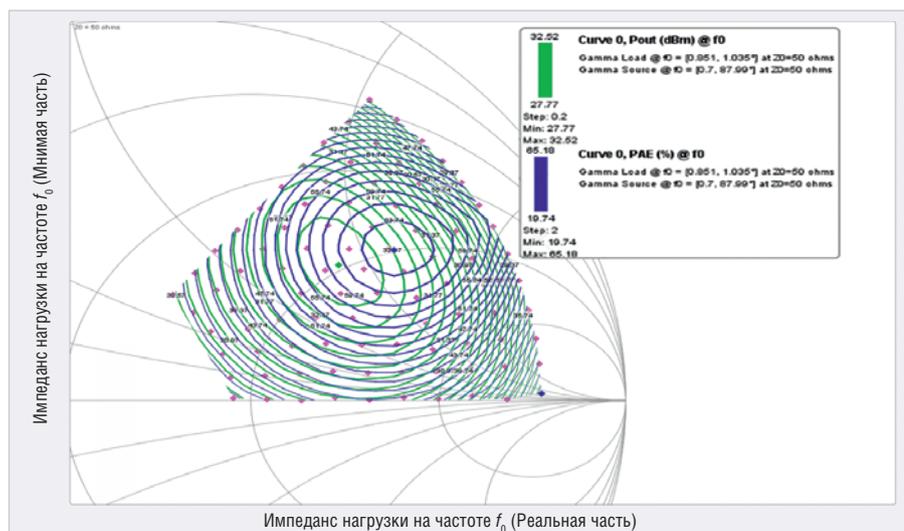


Рис. 1. Контуры измерений выходной мощности и КПД

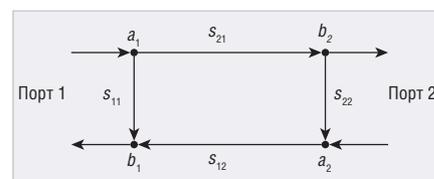


Рис. 2. Представление ТУ в виде двухполюсника



Рис. 3. Выходная цепь базовой пассивной load-pull-установки

Амплитуда и фаза импеданса нагрузки устанавливаются путём изменения позиции зонда относительно осей X и Y вдоль 50-омной воздушной линии (см. рис. 4). Амплитуда импеданса регулируется вертикальным движением зонда относительно 50-омной линии, фаза устанавливается перемещением зонда вдоль линии. Такими вертикальными и горизонтальными перемещениями зонда можно установить практически любой импеданс  $\Gamma_L < 1$  при условии достаточного уровня отражённого от нагрузки сигнала  $a_2$ . Важно понимать, что, поскольку отражённый от нагрузки сигнал  $a_2$  всегда будет меньше  $b_2$  из-за потерь в СВЧ-тракте между выходом ТУ и тюнером импеданса.

Активный метод формирования импеданса в открытом контуре показан на рисунке 5. В данном методе нет необходимости использовать тюнер импеданса для отражения части выходного сигнала  $b_2$  и получения таким образом сигнала  $a_2$ . Вместо этого для создания сигнала  $a_2$  используется генерация СВЧ-сигнала с требуемыми амплитудой и фазой. С помощью использования в цепи усилителя мощности можно достигать любого уровня сигнала  $a_2$  и, следовательно, любого коэффициента отражения  $\Gamma_L$ .

На первый взгляд, активный метод load-pull может показаться более совершенным по сравнению с пассивным ввиду отсутствия видимых ограничений на значение амплитуды коэффициента отражения  $\Gamma_L$ . На практике же величина может быть ограничена недостатком мощности, требуемой для формирования сигнала  $a_2$ , который, в свою очередь, подаётся на выход ТУ.

Активный метод load-pull имеет ряд преимуществ перед пассивным. Среди них – значительное увеличение скорости измерений, покрытие всей области диаграммы Смита (теоретическая возможность достигать  $\Gamma_L > 1$ ). Данные преимущества обусловлены отсутствием необходимо-

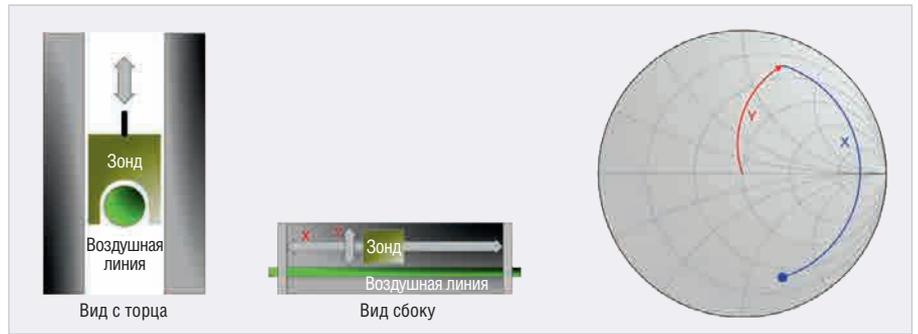


Рис. 4. Устройство пассивного тюнера импеданса со скользящим зондом

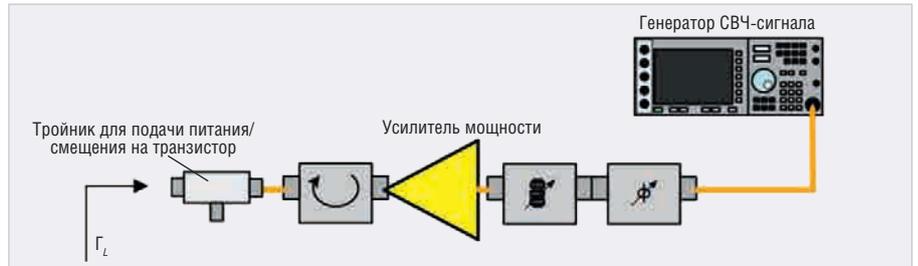


Рис. 5. Выходная цепь базовой активной load-pull-установки

сти в механических перемещениях и прямой генерацией сигнала  $a_2$ , значение которого может превышать значение  $b_2$ , и, соответственно, коэффициент отражения  $\Gamma_L$  может быть больше 1. Обратимся вновь к рисунку 5. Вследствие рассогласования между 50-омным усилителем и не 50-омным ТУ часть сигнала будет отражаться и возвращаться обратно к усилителю, и чем сильнее рассогласование, тем большая часть сигнала вернётся. В случаях экстремального рассогласования существует вероятность того, что только 10% сигнала, доступного на выходе ТУ, будет действительно доставлено к ТУ. Таким образом, для выполнения данных измерений может потребоваться более мощный усилитель.

Гибридно-активный метод load-pull решает данную проблему с помощью предварительного согласования ТУ от сильно рассогласованного к умеренно рассогласованному, таким образом уменьшая мощность, требуемую для обеспечения того же сигнала  $a_2$  на выходе ТУ.

Во время измерений load-pull желательно иметь возможность получения «закрытых» контуров (когда оптимальное значение импеданса полностью окружено результатами измерений). В случае «открытого» контура существует вероятность того, что импеданс, соответствующий максимуму искомой характеристики, не является оптимальным.

### ИЗМЕРЕНИЯ LOAD-PULL В ДИАПАЗОНЕ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

Современные нитрид-галлиевые транзисторы (GaN) обладают выходным импедансом порядка 1–2 Ом, которому соответствуют значения  $\Gamma = 0,96$  и  $\Gamma = 0,92$ . Для того чтобы иметь возможность получить так называемые «закрытые» контуры в результате измерений load-pull, амплитуды коэффициента отражения должны быть больше, чем амплитуда выходного импеданса ТУ.

В пассивной системе измерений load-pull амплитуда отражения в опорной плоскости ТУ может быть рассчитана следующим образом:

$$RL_{\text{tuner}} + RL_{\text{coupler+cable+probe}} = RL_{\text{DUT}};$$

$$RL_{\text{tuner}} = -20 \log \left( \frac{VSWR_{\text{tuner}} - 1}{VSWR_{\text{tuner}} + 1} \right);$$

$$RL_{\text{coupler+cable+probe}} = 2 \times (IL_{\text{coupler+cable+probe}});$$

$$\Gamma_{\text{DUT}} = 10 \times \left( \frac{-RL_{\text{DUT}}}{20} \right).$$

В случае типичных значений КСВН-тюнера, потерь в направленном ответвителе, кабеле и зонде на 30 ГГц,  $VSWR_{\text{tuner}} = 20:1$ ,  $IL_{\text{coupler+cable+probe}} = 2,5$  дБ максимальное значение амплитуды коэффициента отражения снижается с  $\Gamma = 0,9$  в опорной плоскости тюнера импеданса до  $\Gamma = 0,5$  в опорной плоскости ТУ.

На рисунке 6 представлены результаты пассивных измерений load-pull GaN-транзистора на частоте 30 ГГц. Максимальная выходная мощность тран-

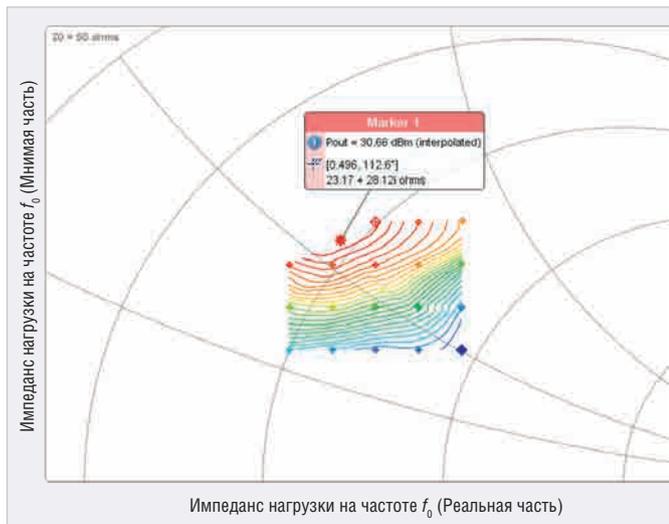


Рис. 6. Пассивные измерения load-pull на подложке на частоте 30 ГГц

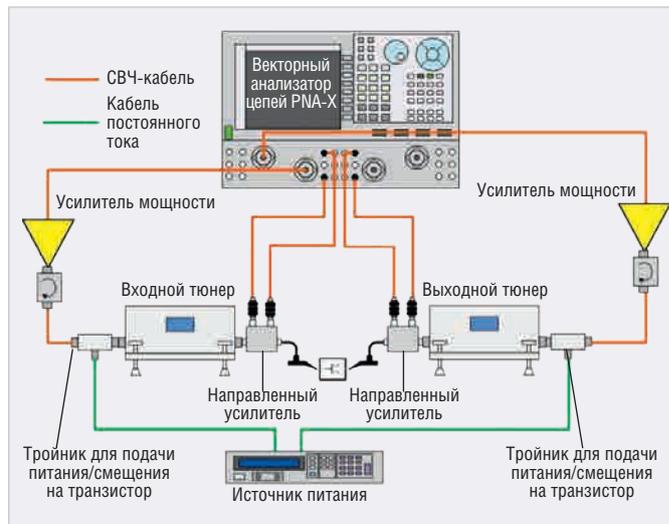


Рис. 7. Блок-схема гибридно-активной системы load-pull

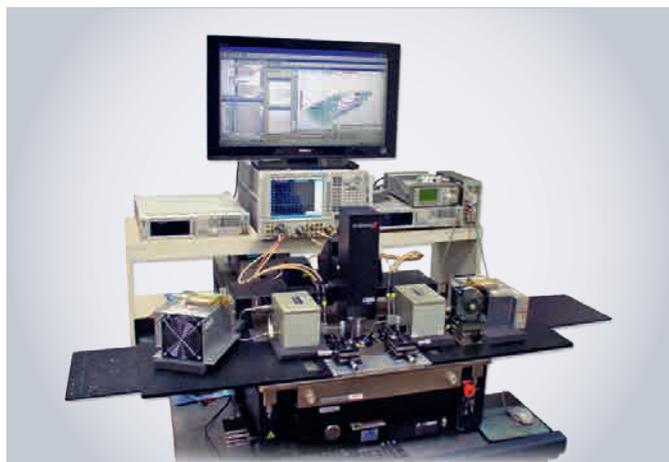


Рис. 8. Гибридно-активная load-pull-установка



Рис. 9. Результаты гибридно-активных измерений load-pull на подложке на частоте 30 ГГц

зистора составляет 30,66 дБм. Нужно отметить, что контуры измеренных значений не «закрыты» и, следовательно, нет уверенности в том, что максимум выходной мощности определен верно.

Как уже было сказано ранее, гибридно-активные измерения load-pull помогают преодолеть ограничение амплитуды коэффициента отражения, имеющееся в пассивных измерениях load-pull, посредством активной инъекции сигнала для увеличения сигнала  $a_2$  и, таким образом, увеличения  $\Gamma$ . Схема гибридно-активной системы load-pull представлена на рисунке 7. На рисунке 8 изображена измерительная load-pull-установка.

Формула, описывающая взаимосвязь между импедансом нагрузки, импедансом системы, инжектируемой мощностью и диапазоном подстройки, выглядит следующим образом:

$$Z_L = \frac{Z_{sys} + K \times Z_{DUT} - \sqrt{(Z_{sys} + K \times Z_{DUT})^2 - (1-K)(Z_{sys}^2 - K \times Z_{DUT}^2)}}{1-K}$$

где  $Z_L$  – импеданс нагрузки,  $Z_{sys}$  – импеданс системы,  $Z_{DUT}$  – выходной импеданс ТУ.

Коэффициент  $K$  определяется формулой:

$$K = \frac{P_{a2}}{P_{b2}} \times \frac{1 - |\Gamma_{sys}|^2 |Z_{sys} + Z_0|^2}{1 - |\Gamma_{DUT}|^2 |Z_{DUT} + Z_0|^2}$$

где  $Z_L$  – активная мощность, инжектируемая на выход ТУ в опорной плоскости ТУ;  $P_{b2}$  – выходная мощность ТУ,  $Z_0 = 50$  Ом.

Амплитуда коэффициента отражения, возможная на выходе ТУ, может быть рассчитана по формуле:

$$\Gamma_L = \frac{Z - 50}{Z + 50}$$

Благодаря использованию усилителя мощности (40 дБм) и тюнера импеданса для преобразования импеданса системы из 50 в  $(23,17 + j28,12i)$  Ом стало возможным получить коэффициент отражения  $\Gamma = 0,85$  и успешно «закрыть» контуры измерений выходной мощности. Контуры, показанные на рисунке 9, демонстрируют макси-

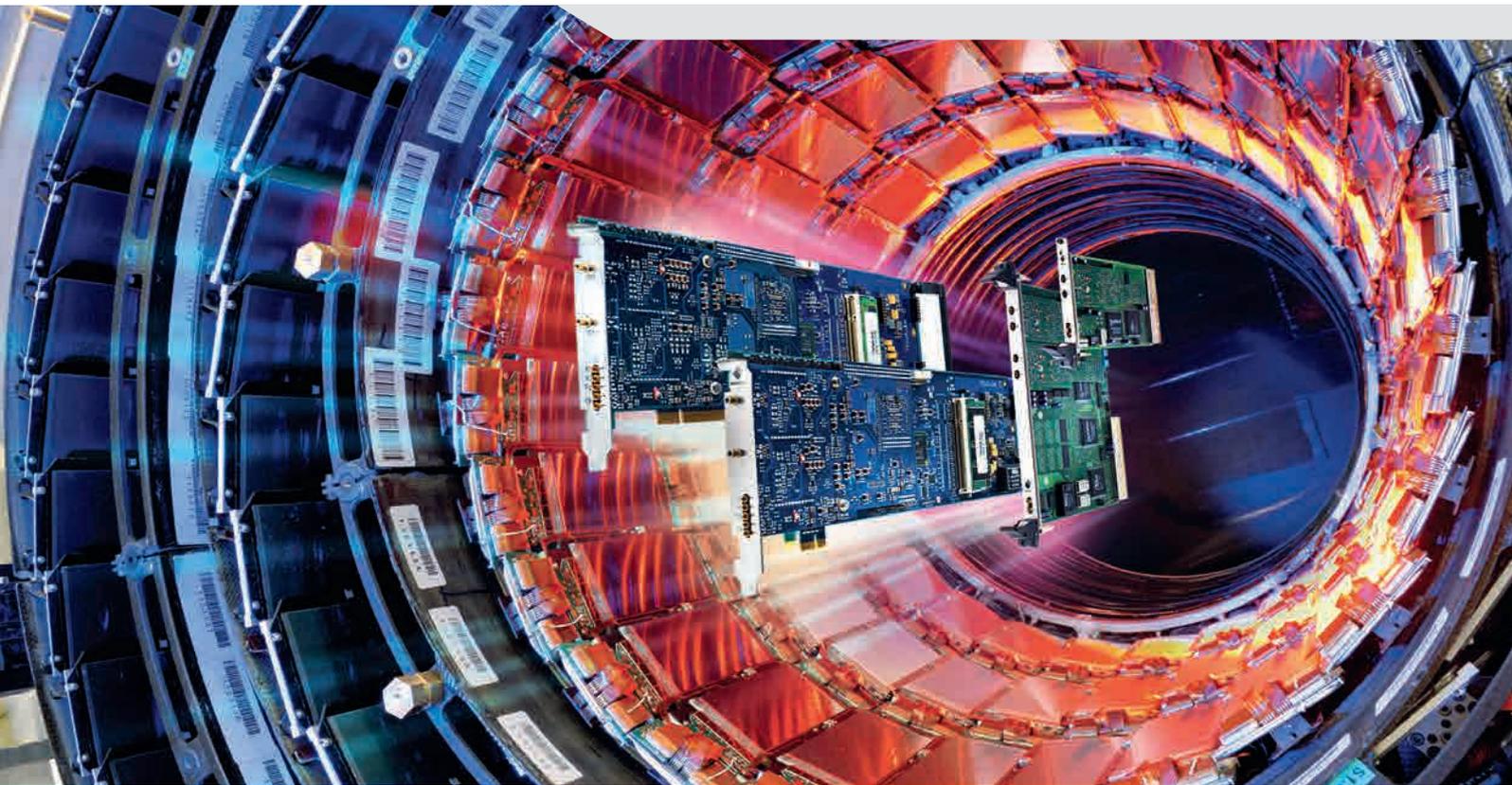
мум выходной мощности 31,12 дБм, полученный на том же GaN-транзисторе, то есть на 0,46 дБ или на 12% мощности больше, чем изначально определено в пассивных измерениях и «незакрытых» контурах.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В связи с активной разработкой технологии 5G и большой конкуренцией на рынке решений в данном сегменте оптимизация мощности, коэффициента полезного действия и линейности является приоритетным направлением исследований. Небольшое преимущество в несколько децибел мощности или несколько процентов КПД может стать ключевым фактором, определяющим конкурентоспособность разрабатываемых систем.

Гибридно-активные измерения load-pull помогают решить многие проблемы при разработке УМ, избавиться от неопределенности результатов и достигнуть практически идеального согласования. Таким образом, сторонники данной методологии получают заметное преимущество на рынке новейших разработок.





## Для широкого спектра решений по сбору данных и генерации сигналов

### PCI/PCI-X и PCI Express

- Свыше 200 моделей плат
- До 16 синхронных каналов
- Разрешение от 8 до 16 бит
- Частота опроса до 1 ГГц
- Встроенная память до 4 Гбайт
- Тактирование и многомодульная синхронизация

### 6U CompactPCI

- Около 80 вариантов модулей
- До 16 каналов
- Разрешение до 16 бит
- Частота опроса до 500 МГц

### 3U PXI

- Более 45 моделей
- Соответствие стандарту PXI
- Межмодульная синхронизация
- Тактирование 10 МГц
- Память до 512 Мбайт

### Программное обеспечение



- Собственное ПО SBench 6
- Поддержка ОС Windows, Linux
- Разработка систем сбора и записи данных по ТЗ заказчика
- Индивидуальное консультирование по выбору оборудования для конкретных применений

### LXI-системы сбора сигналов



- Более 60 моделей
- Соответствие стандарту LXI
- Число каналов 2–48
- Частота опроса до 500 МГц
- Разрешение от 8 до 16 бит
- Полоса частот от 100 кГц до 250 МГц

