

## Keysight Technologies

Высокочастотные пробники  
для измерений в частотной  
и временной областях

Рекомендации  
по применению



## Введение

Рост популярности беспроводной и сотовой связи, цифровых развлечений и увеличение объёма передаваемых данных в быту и деловой среде вызывает потребность в более высокоскоростных маршрутизаторах, серверах, мобильных телефонах и ПК. Технологии сотовой связи первого поколения эволюционировали до мультимедиа-сервисов и современных телекоммуникаций 4G. Аналогичная тенденция в технологиях высокоскоростной передачи данных привела к скоростям более 1 Гбит/с. Например, скорости передачи данных в SATA II (3 Гбит/с) и USB 3.0 (4,8 Гбит/с) значительно превышают 1 Гбит/с.

С возрастанием скорости передачи данных, основной задачей становится обеспечение целостности сигнала. Проблема обеспечения целостности сигнала в проектируемых электронных схемах требует решения двух основных вопросов:

- Синхронизация – приходит ли сигнал в место назначения в нужный момент?
- Качество сигнала – находится ли сигнал хорошем состоянии, когда он достигает места назначения?

В этих условиях паразитные сигналы, с которыми раньше сталкивались только при проектировании аналоговых ВЧ и СВЧ устройств, могут ухудшить качество сигнала и увеличить коэффициент битовых ошибок канала. Тестирование на физическом уровне позволяет удостовериться в том, что электрические характеристики компонентов, плат и внутрисхемных соединений поддерживают высокие скорости передачи без значительного ухудшения качества сигнала.

Разработчики цифровых систем должны проектировать платы так, чтобы обеспечить целостность сигнала и минимизировать ухудшение его характеристик. При возникновении подозрения на проблемы с целостностью сигнала первым прибором, который понадобится, будет осциллограф с пробником. Осциллограф является лучшим средством отображения сигнала во временной области. Он продолжает оставаться важным инструментом исследования целостности сигналов, но это только один из приборов, которые необходимы в настоящее время. Другие приборы, такие как анализаторы спектра/сигналов, анализаторы источников сигналов и анализаторы цепей, также играют важную роль в анализе целостности сигнала. Эти приборы в основном работают в частотной области. Часто случается, что интересные нас тракты или точки не имеют соединителей для подключения измерительного прибора. Чтобы получить выборки исходного сигнала для последующего анализа без ухудшения качества, необходим высокочастотный пробник. Как правило для наблюдения фактического сигнала используется осциллограф с пробником. Менее распространённым является применение пробников с анализатором сигналов/спектра для внутрисхемного поиска неисправностей при разработке высокоскоростных цифровых субмодулей или ВЧ/СВЧ схем.

В этих рекомендациях по применению будет обсуждаться использование пробников для выполнения измерений в частотной области.

## Применение пробников

Снятие сигнала при проектировании и испытаниях высокоскоростных цифровых систем представляет собой сложную задачу. Для тестирования отдельного компонента внутри модуля необходимо подключить пробник к выводам компонента или к соответствующим контактным площадкам. При решении этой задачи обычно возникает две проблемы:

1. Пробники должны иметь высокий входной импеданс и малое значение ёмкости, чтобы не перегружать исследуемую схему, так как это приводит к ошибкам измерений.
2. Сами по себе компоненты и внутрисхемные соединения имеют малые размеры, поэтому контактирование пробников рекомендуется выполнять с использованием микроскопа.

Для снятия высокочастотных сигналов используют пассивные и активные пробники. Как следует из названий, активный пробник имеет встроенный усилитель, а пассивный пробник не имеет активных компонентов и пропускает сигнал без обработки или является пассивным аттенуатором.

Общее решение для снятия сигнала с использованием измерительных приборов, работающих во временной области, таких как осциллограф или логический анализатор, в настоящем документе не рассматривается. Подробная информация содержится в руководстве по конфигурированию «Осциллографические пробники *Infiniium*, аксессуары и опции», номер документа 5968-7141EN.

Пассивные пробники обычно используют для измерения электрических характеристик внутрисхемных соединений, таких как S-параметры, коэффициентов отражения и передачи во временной области или импеданса линии передачи. Решающее значение для точности измерений имеют контрольные точки, в том числе начальная и конечная точки внутрисхемных соединений. На рисунках 1А, 1В и 1С показаны примеры использования двух пассивных пробников. На рис. 1А показано внутрисхемное соединение между двумя ИС. На рис. 1В показан некорректный вариант подключения пассивного пробника для рефлектометрических измерений во временной области (TDR) или измерения S-параметров. Поскольку используется пассивный пробник с входным импедансом 50 Ом, то при его подключении НЕ к концу линии передачи, пассивный пробник будет показывать холостой ход (обрыв) или результат измерения параллельного включения двух линии передачи. Правильное решение заключается в том, что следует снять обе ИС и подключить пробники, как показано на рис. 1С. На рис. 1С показано сквозное подключение пробников, при котором правильно измеряется сигнал, передаваемый из ИС1 в ИС2.

Высокоимпедансные пробники позволяют выполнять измерения в любой точке измеряемой схемы. В этом случае выборки сигналов захватываются активным пробником, который не оказывает существенного влияния на характеристики исследуемой схемы. Единственным недостатком использования активного пробника является то, что им можно измерять только принятый сигнал и нельзя передать сигнал обратно в линию передачи. Возможно подключить активный пробник сначала к ИС1, а затем к ИС2, чтобы сравнить амплитуды сигнала и определить, ухудшает ли внутрисхемное соединение качество сигнала, или нет.

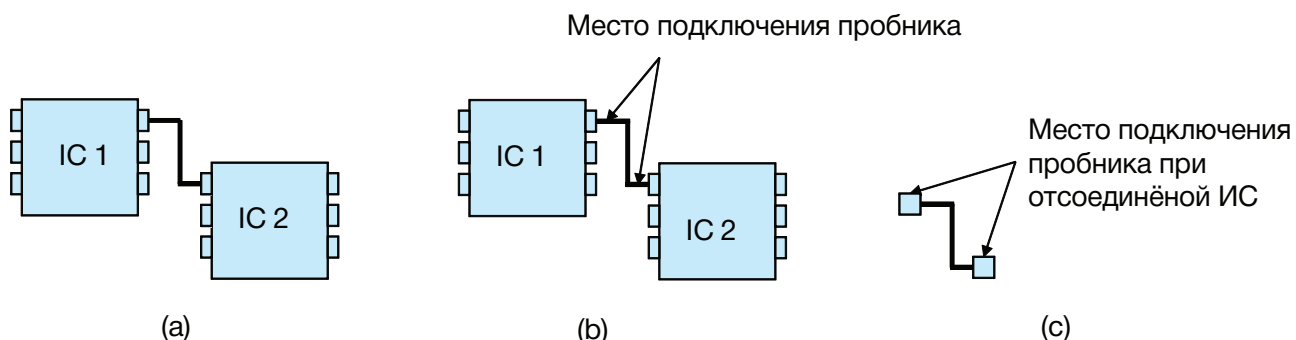


Рис. 1. Типовое внутрисхемное соединение интегральных схем

## Применение пробников (продолжение)

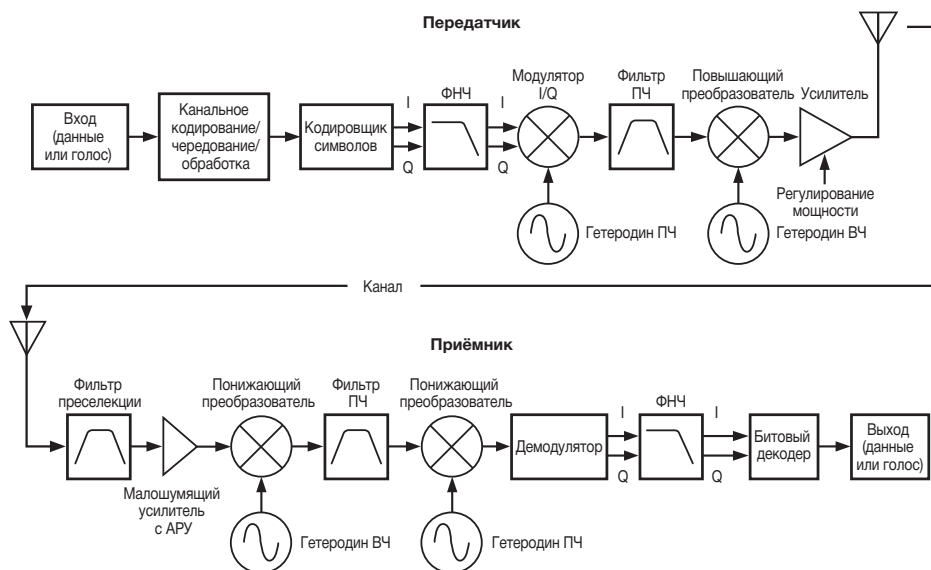


Рис. 2. Структурная схема цифровой радиостанции

На рис. 2 показана типовая структурная схема цифровой радиостанции.

Используя активные пробники с анализатором цепей, анализатором спектра или анализатором источников сигнала, можно выполнять измерения в радиочастотном тракте, в трактах модулирующего сигнала и гетеродина, а также в цепях питания постоянного тока с целью оценки качества сигнала (то есть измерять паразитные составляющие, гармоники, фазовый шум, уровень сигнала и т.д.). В случае отсутствия пробника причины ухудшения качества сигнала могут быть установлены только по результатам функционального тестирования или путем контроля параметров каждого компонента по отдельности. «Рекомендации по применению 1313 решения Keysight для тестирования беспроводной связи», номер документа 5989-3578E, а также «Рекомендации по применению 1314 тестирование и устранение ошибок при проектировании средств цифровой радиосвязи» номер документа 5968-3579E содержат подробное описание выполнения тестирования и устранения ошибок при проектировании средств цифровой радиосвязи.

При использовании пробника с анализатором сигналов можно выполнять измерения на частоте несущей или гетеродина для определения фазового шума, величина которого может быть первопричиной увеличения модуля вектора ошибки (EVM). Анализатор источников сигнала может отделить ФШ сигнала несущей от шума, чтобы определить исходную причину неисправности. Анализатор спектра может быть использован совместно с пробником для измерения уровня паразитных составляющих или внеполосных сигналов. Анализатор цепей с пробником можно использовать для пошагового измерения частотной характеристики при условии, что вход может быть подключен к анализатору цепей.

## Высокочастотные пробники

### Сравнение решений для измерений в частотной и временной областях

В решениях для измерений в частотной области пробник используется с анализатором спектра, анализатором источников сигналов и/или анализатором цепей. Эти приборы имеют превосходный динамический диапазон и могут точно измерять сигналы очень малой амплитуды. Уровень собственного шума широкополосных осциллографов лежит на уровне -40 дБм, в то время как у анализаторов спектра/сигналов экономичного класса (таких как Keysight EXA) он может достигать -120 дБм при полосе пропускания фильтра промежуточной частоты (ПЧ) равной 1 кГц. Таким образом, если вы в основном измеряете сигналы малой амплитуды, то предпочтительнее использовать прибор, работающий в частотной области, поскольку его динамический диапазон шире, чем у прибора для работы во временной области. В оборудовании беспроводной связи уровни измеряемых сигналов или шумов могут иметь очень малые значения. Например, чувствительность приёмника может достигать -90 дБм. В высокоскоростных системах низковольтной дифференциальной передачи сигналов (LVDS) используются уровни 350 мВ пик-пик, в отличие от уровней TTL 5 В в обычных высокоскоростных цифровых интерфейсах.

В решении для временной области пробник используется совместно с осциллографом реального времени или стробоскопическим осциллографом. Осциллограф необходим для наблюдения фактической формы сигнала. Ниже переведена сводная таблица, включающая измерительные возможности решений для выполнения измерений в частотной и временной областях.

Таблица 1. Измерительные возможности решений для выполнения измерений в частотной и временной областях

| Области применения | Возможности измерения и устранения ошибок | Во временной области          |                               | В частотной области |                              |                                | Примечания   |
|--------------------|---|-------------------------------|-------------------------------|---------------------|------------------------------|--------------------------------|--|
|                    |   | Осциллограф реального времени | Стробоскопический осциллограф | Анализатор цепей    | Анализатор сигналов/ спектра | Анализатор источников сигналов |  |
| Проводная связь    | Время нарастания/спада                    | x                             | x                             | o                   |                              |                                | Время нарастания может составить около 0,35/ПП                   |
|                    | Выбросы                                   | x                             | x                             | o                   |                              |                                | Обратные потери могут вызвать выброс                             |
|                    | Межсимвольные помехи                      | x                             | x                             | o                   |                              |                                | Могут вызываться ограниченной полосой                            |
|                    | Шум системы                               | x                             | x                             |                     | x                            | x                              | Решение для частотной области имеет лучший динамический диапазон |
|                    | Перекрестные помехи                       | x                             | x                             | x                   | x                            |                                |  |
| Беспроводная связь | Чувствительность                          |                               |                               | x                   | x                            |                                |  |
|                    | Избирательность                           |                               |                               | x                   | x                            |                                |  |
|                    | Подавление паразитных сигналов            |                               |                               |                     | x                            |                                |  |
|                    | Точка компрессии на 1 дБ (P1dB)           |                               |                               | x                   | x                            |                                |  |
|                    | Преобразование АМ-ФМ                      |                               |                               | x                   |                              |                                |  |
|                    | Фазовый шум                               |                               |                               |                     |                              | x                              |  |
|                    | Гармоники                                 |                               |                               | x                   | x                            |                                |  |

\* Примечание: x = измеряется напрямую, o = рассчитывается из результатов измерений

## Высокочастотные пробники (продолжение)

### Применение пробника с анализатором цепей

На примерах ниже рассматривается плата предварительного делителя частоты с входным диапазоном от 200 МГц до 12,4 ГГц, коэффициентом деления 4096 и выходным диапазоном от 0,39 МГц до 24,2 МГц и средствами обработки сигналов, такими как ограничитель для защиты от превышения мощности и усилитель для повышения чувствительности. Затем низкочастотный сигнал подаётся в следующий каскад по ленточному кабелю для дальнейшей обработки.

В ходе производственного тестирования ко входу ТУ подключают синтезатор со свипированием по частоте и мощности. Выход ТУ подключают к измерительному прибору для функциональной проверки минимальной и максимальной чувствительности. В случае отказа ТУ можно измерить только ток смещения, выполнить измерение по постоянному току для оценки смещения активных компонентов. Точного способа проверки ВЧ тракта не существует. Классический подход снятия сигнала в ВЧ тракте заключается в использовании пассивного пробника с закрытым входом, подключенного к анализатору спектра. Но при этом оказывается значительное воздействие на исследуемую схему, поскольку анализатор спектра становится дополнительной нагрузкой. Если не использовать закрытый вход, то можно повредить анализатор спектра, поскольку на нём уже присутствует постоянное смещение.

Для измерения АЧХ компонентов по отдельности следует изготовить испытательную плату, что потребует много времени, либо воспользоваться активными ВЧ пробниками для измерения АЧХ требуемых компонентов.

На рис. 3 показана схема измерений АЧХ с помощью анализатора цепей с активным дифференциальным пробником. Наконечник пробника имеет два вывода. Первый подключается к сигнальной дорожке, второй нужно подключить к земле, как в случае снятия несимметричного сигнала. Ниже описана процедура измерения АЧХ тракта между точками А и В.

1. Установите на анализаторе цепей диапазон частот от 200 МГц до 12 ГГц и подключите порт 1 к входному соединителю предварительного делителя частоты.
2. Подключите пробник от порта 2 анализатора цепей к точке А на ТУ.
3. Выполните калибровку с мерой «перемычка» (нормализацию). Эта калибровка устраняет влияние потерь в плоскости измерений между наконечником пробника и точкой А. В результате процедуры нормализации АЧХ значение  $S_{21}$ , устанавливается равным 0 дБ, как показано на рис. 5.
4. Подключите пробник в точку В для получения АЧХ тракта от А до В. Пробник можно подключать в любой точке ВЧ тракта, чтобы получить АЧХ вплоть до входа делителя 1/8.

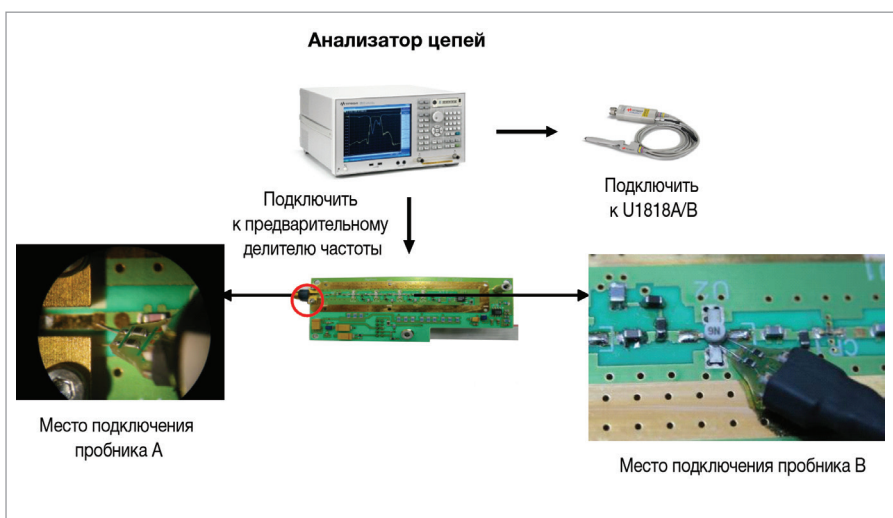


Рис. 3. Схема измерений АЧХ с помощью анализатора цепей

## Высокочастотные пробники (продолжение)

Очевидно, что это очень хороший инструмент для поиска и устранения неисправностей, поскольку можно получить доступ к любой точке ВЧ тракта. Что касается измерения избирательности приемника, то можно выполнить аналогичные измерения для получения частотной характеристики. Данная схема измерений позволяет измерять точку компрессии по уровню 1 дБ (P1dB), коэффициент преобразования АМ-ФМ и чувствительность, используя анализатор цепей на каждом этапе измерений.

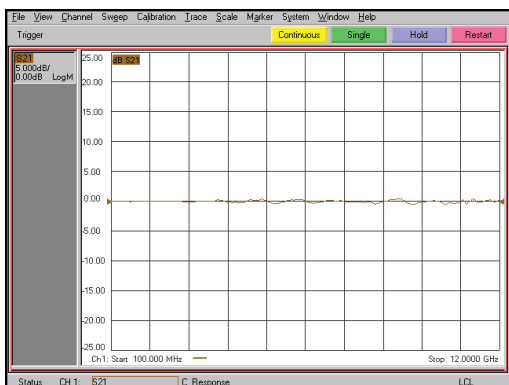


Рис. 4. Результаты калибровки АЧХ с пробником в точке А

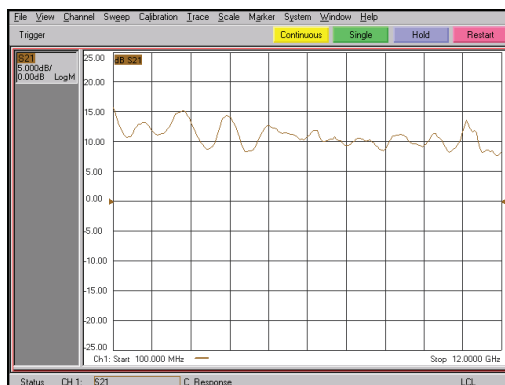


Рис. 5. Результаты измерений с пробником в точке В

## Применение пробника с анализатором сигналов/спектра

С помощью активного дифференциального пробника и анализатора сигналов/спектра на одном и том же ТУ можно измерять уровень мощности сигнала, паразитные и гармонические составляющие. Чтобы компенсировать потери, вносимые пробником, введите номинальную величину ослабления, вносимого пробником, равную 10 дБ в меню коррекции амплитуды в анализаторе сигналов/спектра и включите коррекцию.

Если вы исследуете различные точки ВЧ тракта, то анализатор сигналов/спектра будет отображать паразитные и гармонические составляющие в каждой точке измерения. Иногда необходимо включить встраиваемый аттенюатор для снижения мощности на входе пробника, чтобы избежать режима компрессии, или использовать предусилитель для измерения сигналов низкого уровня. В этих случаях в анализаторе сигналов/спектра следует включить соответствующие функции коррекции ослабления или коэффициента усиления предусилителя.

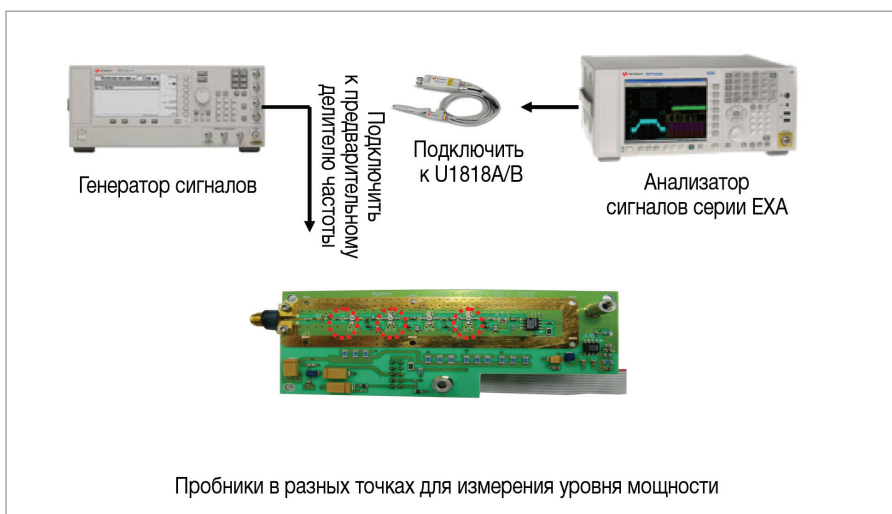


Рис. 6. Схема измерений уровня мощности с помощью анализатора сигналов

## Высокочастотные пробники (продолжение)

### Использование пробника с анализатором источников сигналов

Тема джиттера приобретает всё более важное значение для правильного проектирования цифровых подсистем. Значение джиттера 500 фс могло быть несущественным для тактовой частоты 100 МГц, но для современных интерфейсов, где тактовая частота составляет 1 ГГц, это очень большое значение. Джиттер является неотъемлемой составляющей фазового шума в полосе пропускания. Поэтому анализатор источников сигнала является крайне важным прибором, поскольку он может использовать результаты измерений джиттера для измерения фазового шума. Ниже приведен практический пример измерений фазового шума и джиттера, когда анализатор источников сигнала используется в качестве предварительного делителя частоты. Также показано, как определить источник джиттера.

Примечание. При использовании активного дифференциального пробника U1818A или U1818B к выходам предварительного делителя частоты может понадобиться подключить оконечную нагрузку 50 Ом.

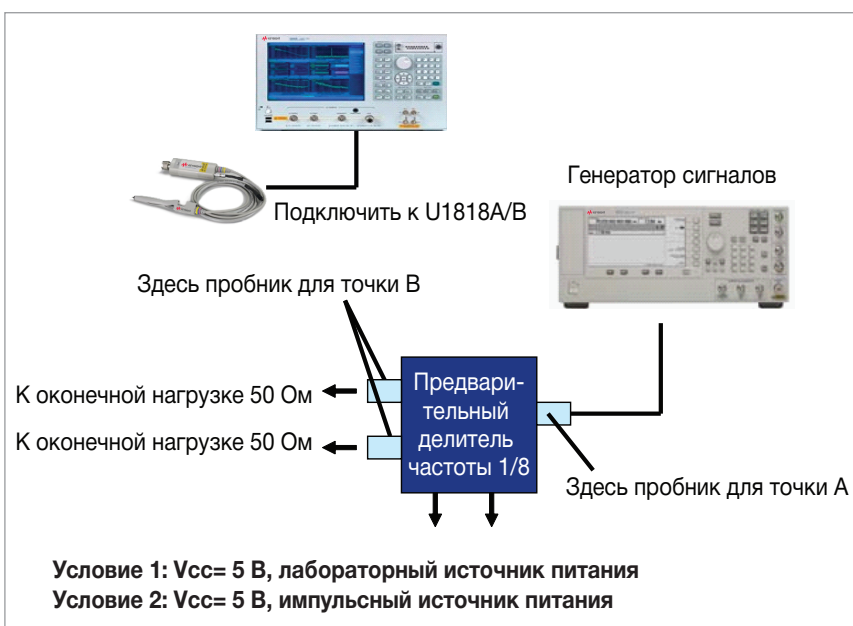


Рис. 7. Схема измерений джиттера предварительного делителя частоты с помощью анализатора сигналов

На рис. 7 показана структурная схема измерений. Были выполнены измерения при подаче на вход несколько несущих частот со специальным частотным диапазоном интегрирования джиттера. Сводные результаты измерений приведены в табл. 2. Сравниваются результаты измерений джиттера лабораторного («чистое» питание) и импульсного («зашумленное») источников питания. Видно, что при выходной частоте несущей 1,25 ГГц, среднеквадратичные значения джиттера в диапазоне от 10 кГц до 80 МГц для лабораторного источника питания составляют 119 фс и 158 фс для импульсного. Если использовать в качестве единицы измерения единичный интервал, то они равны соответственно 0,149 и 0,198. Поэтому если модуль имеет несколько каскадов, то для измерения джиттера очень удобно использовать активные дифференциальные пробники и анализатор источников сигналов.



## Характеристики джиттера для испытательной платы предварительного делителя частоты

Усилитель пробника: U1818A/B

Наконечник пробника: N5381A

Таблица 2. Сравнение результатов измерений джиттера с помощью лабораторного источника питания и импульсного источника питания

Входная частота предварительного делителя частоты: 2,5 ГГц при уровне 0 дБм

Выходная частота предварительного делителя частоты: 312,5 МГц при уровне -6,9 дБм

| Диапазон интегрирования | Лабораторный источник питания |              | Импульсный источник питания +5 В |              |
|-------------------------|-------------------------------|--------------|----------------------------------|--------------|
|                         | Ср. кв. джиттер, фс           | Ед. интервал | Ср. кв. джиттер, фс              | Ед. интервал |
| 100 Гц – 40 МГц         | 944                           | 0,000295     | 958                              | 0,000299     |
| 10 кГц – 20 МГц         | 663                           | 0,000207     | 672                              | 0,00021      |

Входная частота предварительного делителя частоты: 4 ГГц при уровне 0 дБм

Выходная частота предварительного делителя частоты: 500 МГц при уровне -6,9 дБм

| Диапазон интегрирования | Лабораторный источник питания |              | Импульсный источник питания +5 В |              |
|-------------------------|-------------------------------|--------------|----------------------------------|--------------|
|                         | Ср. кв. джиттер, фс           | Ед. интервал | Ср. кв. джиттер, фс              | Ед. интервал |
| 100 Гц – 40 МГц         | 426                           | 0,000213     | 434                              | 0,000217     |
| 10 кГц – 20 МГц         | 298                           | 0,000149     | 306                              | 0,000153     |

Входная частота предварительного делителя частоты: 6 ГГц при уровне 0 дБм

Выходная частота предварительного делителя частоты: 750 МГц при уровне -7,3 дБм

| Диапазон интегрирования | Лабораторный источник питания |              | Импульсный источник питания +5 В |              |
|-------------------------|-------------------------------|--------------|----------------------------------|--------------|
|                         | Ср. кв. джиттер, фс           | Ед. интервал | Ср. кв. джиттер, фс              | Ед. интервал |
| 100 Гц – 40 МГц         | 117                           | 0,000059     | 131                              | 0,000066     |
| 10 кГц – 20 МГц         | 81                            | 0,000041     | 96                               | 0,000048     |

Входная частота предварительного делителя частоты: 10 ГГц при уровне 0 дБм

Выходная частота предварительного делителя частоты: 1,25 ГГц при уровне -7 дБм

| Диапазон интегрирования | Лабораторный источник питания |              | Импульсный источник питания +5 В |              |
|-------------------------|-------------------------------|--------------|----------------------------------|--------------|
|                         | Ср. кв. джиттер, фс           | Ед. интервал | Ср. кв. джиттер, фс              | Ед. интервал |
| 100 Гц – 100 МГц        | 133                           | 0,000166     | 177                              | 0,000221     |
| 10 кГц – 80 МГц         | 119                           | 0,000149     | 158                              | 0,000198     |

## Характеристики джиттера для испытательной платы предварительного делителя частоты (продолжение)

На рис. 8 показан снимок экрана для выходной частоты предварительного делителя частоты, составляющей 1,25 ГГц. Светло-жёлтая трасса – результаты измерений для импульсного источника питания, жёлтая – лабораторного. Ясно видно, что при подаче «чистого» питания предварительного делителя частоты фазовый шум или величина джиттера значительно уменьшаются.

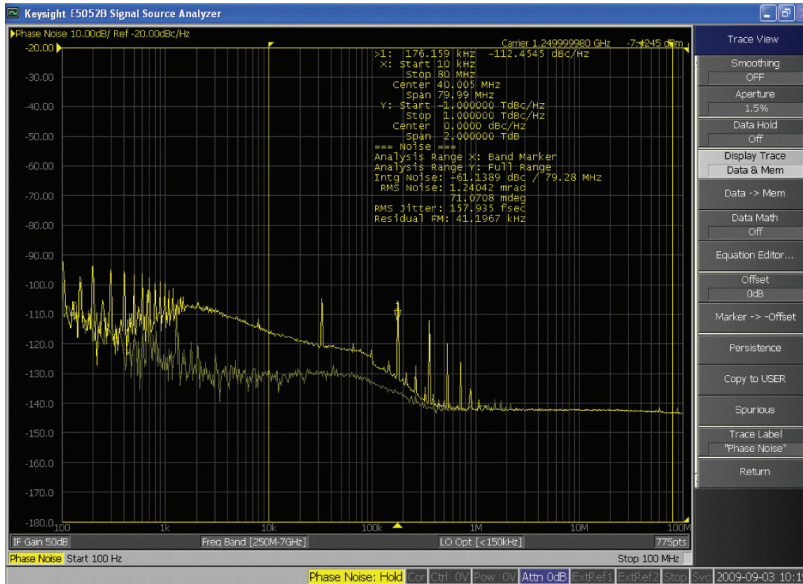


Рис. 8. Результаты измерений с выходной частотой предварительного делителя частоты 1,25 ГГц

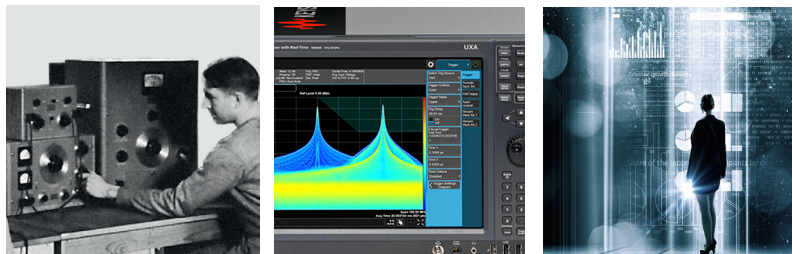
## Заключение

Сочетание активных высокочастотных дифференциальных пробников с ВЧ/СВЧ приборами с широким динамическим диапазоном обеспечивает возможность выполнения глубоких внутрисхемных измерений в частотной и временной областях. Данное решение особенно привлекательно для проверки и устранения ошибок в диапазоне частот частотах до 12 ГГц.

## Постоянное движение вперед

Уникальное сочетание наших приборов, программного обеспечения, знаний и опыта наших инженеров позволит вам воплотить в жизнь новые идеи. Мы открываем двери в мир технологий будущего.

От Hewlett-Packard и Agilent к Keysight.



Для получения подробной информации о продуктах, приложениях или услугах Keysight Technologies обратитесь в местное представительство компании. Полный перечень приведен по ссылке:

[www.keysight.com/find/contactus](http://www.keysight.com/find/contactus)

### Страны Северной и Южной Америки

|          |                  |
|----------|------------------|
| Канада   | (877) 894 4414   |
| Бразилия | 55 11 3351 7010  |
| Мексика  | 001 800 254 2440 |
| США      | (800) 829 4444   |

### Страны Азиатско-Тихоокеанского региона

|   |                |
|---|----------------|
| Австралия                                     | 1 800 629 485  |
| Китай   | 800 810 0189   |
| Гонконг                                       | 800 938 693    |
| Индия   | 1 800 11 2626  |
| Япония  | 0120 (421) 345 |
| Корея   | 080 769 0800   |
| Малайзия                                      | 1 800 888 848  |
| Сингапур                                      | 1 800 375 8100 |
| Тайвань                                       | 0800 047 866   |
| Другие страны Азиатско-Тихоокеанского региона | (65) 6375 8100 |

### Страны Европы и Ближнего Востока

|                |  |
|----------------|--|
| Австрия        | 0800 001 122   |
| Бельгия        | 0800 58580   |
| Финляндия      | 0800 523252  |
| Франция        | 0805 980333  |
| Германия       | 0800 6270999   |
| Ирландия       | 1800 832700  |
| Израиль        | 1 809 343051   |
| Италия         | 800 599100   |
| Люксембург     | +32 800 58580  |
| Нидерланды     | 0800 0233200   |
| Россия         | 8800 5009286   |
| Испания        | 800 000154   |
| Швеция         | 0200 882255  |
| Швейцария      | 0800 805353  |
| Великобритания | Опция 1 (нем.)<br>Опция 2 (фр.)<br>Опция 3 (ит.)<br>0800 0260637 |

Для других стран:

[www.keysight.com/find/contactus](http://www.keysight.com/find/contactus)  
(BP-9-7-17)



[www.keysight.com/go/quality](http://www.keysight.com/go/quality)

Система управления качеством Keysight Technologies, Inc. сертифицирована DEKRA по ISO 9001:2015 Система управления качеством

Технические характеристики и описания продуктов могут быть изменены без предварительного уведомления.

© Keysight Technologies, 2017  
Published in USA, December 1, 2017  
5990-4387RURU  
[www.keysight.com](http://www.keysight.com)

## myKeysight

myKeysight

[www.keysight.com/find/mykeysight](http://www.keysight.com/find/mykeysight)

Персонализированное представление интересующей вас информации.

[www.keysight.com/find/emt\\_product\\_registration](http://www.keysight.com/find/emt_product_registration)

Зарегистрируйте ваши приборы, чтобы своевременно получать актуальную информацию по эксплуатации и гарантийному обслуживанию.

## KEYSIGHT SERVICES

Accelerate Technology Adoption.  
Lower costs.

Услуги Keysight

[www.keysight.com/find/service](http://www.keysight.com/find/service)

Службы Keysight могут помочь вам на всех этапах жизненного цикла вашего измерительного оборудования – от приобретения до модернизации. Наши комплексные услуги – калибровка, ремонт, управление парком оборудования, обновление технологий, консультации, обучение и многое другое – помогают улучшить качество продукции и снизить затраты.

Планы технической поддержки Keysight

[www.keysight.com/find/AssurancePlans](http://www.keysight.com/find/AssurancePlans)

До десяти лет поддержки без непредвиденных расходов гарантируют, что ваше оборудование будет работать в соответствии с заявленной производителем спецификацией, а вы будете уверены в точности своих измерений.

Торговые партнеры компании Keysight

[www.keysight.com/find/channelpartners](http://www.keysight.com/find/channelpartners)

Получите двойную выгоду: глубокие профессиональные знания в области измерений и широкий диапазон решений компании Keysight в сочетании с удобствами, предоставляемыми нашими торговыми партнерами.

[www.keysight.com/find/mta](http://www.keysight.com/find/mta)

[www.keysight.com/find/RFprobeS](http://www.keysight.com/find/RFprobeS)

ATCA®, AdvancedTCA® и логотип ATCA являются зарегистрированными в США товарными знаками PCI Industrial Computer Manufacturers Group.

