

Анализ джиттера и временных диаграмм в присутствии перекрестных помех



Дин Майлс (Dean Miles), Tektronix

Стандарты последовательной передачи данных продолжают стремительно совершенствоваться, существенно повышая производительность ПК и серверных систем. Для обеспечения долговременной стабильности и достижения приемлемых значений коэффициента битовых ошибок (BER) особое внимание следует уделить измерению джиттера этих высокоскоростных последовательных шин. Эффективный анализ начинается с правильного выбора прибора и точного учета шума этого прибора, скорости нарастания и таких факторов, как уровень 3-ей, 4-ой и 5-ой гармоники.

Но все эти меры не ограничиваются одними лишь измерениями – соответствующий прибор нужно дополнить соответствующими средствами анализа. Кроме того, при тестировании высокоскоростных последовательных шин, работающих на скоростях выше 8 Гбит/с, важно учитывать и другие факторы, такие как разделение джиттера и исключение/встраивание цепей. В этой статье мы сфокусируемся на новом подходе к разделению джиттера в присутствии перекрестных помех, поскольку эта проблема становится все более актуальной по мере увеличения числа последовательных каналов для подъема пропускной способности системы.

Все электрические системы, использующие для передачи информации перепады напряжения, подвержены влиянию временного джиттера. Исторически сложилось так, что электрические системы менее подвержены влиянию временного джиттера (или просто джиттера) при низкой скорости передачи данных. Но по мере того, как скорость передачи поднимается выше 8 Гбит/с, джиттер занимает всю большую часть периода сигнала, и понимание причин возникновения джиттера приобретает особую важность для успешного внедрения технологий высокоскоростной последовательной передачи данных.

В сущности, джиттер представляет собой смещение фронта от того положения, где он теоретически должен находиться, как показано на рис. 1. По определению Международного союза электросвязи (ITU), джиттером называются “кратковременные

отклонения значащих компонентов цифрового сигнала от их идеального положения по времени”.

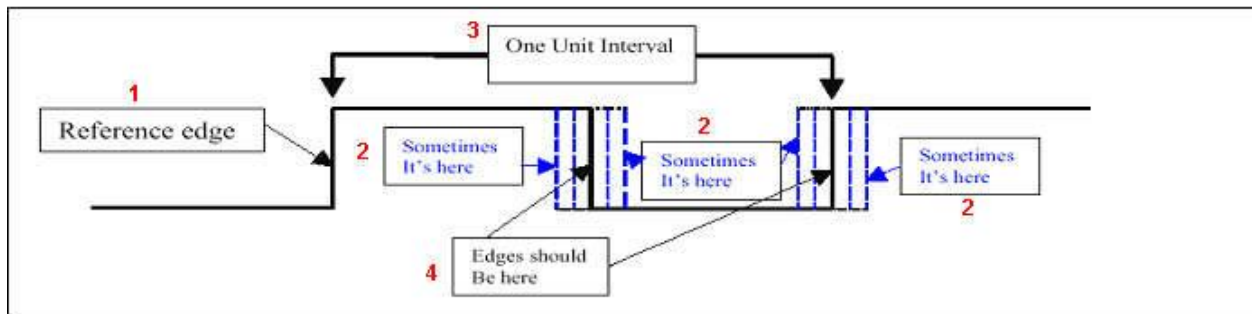


Рис. 1. Джиттером называется отклонение фронта от того положения, где он должен находиться.

1. Опорный фронт
2. Иногда он здесь
3. Один единичный интервал
4. Фронты должны быть здесь

У одного и того же сигнала можно измерить разные виды джиттера: джиттер периода, джиттер от периода к периоду или погрешность временного интервала (TIE). Причем актуальность того или иного измерения диктуется обычно конструкцией устройства. В случае автономного генератора сигнал представляет собой тактовую частоту и может выполнять скачкообразную перестройку частоты или свипирование по частоте. В этом случае лучше измерять джиттер периода. В случае передатчика последовательного потока данных ключевой проблемой являются межсимвольные помехи. В этом случае лучше измерять джиттер TIE.

Инженеры, занимающиеся измерением джиттера, могут использовать разные приборы, каждый из которых имеет сильные и слабые стороны:

- Цифровой запоминающий осциллограф реального времени (DSO) запоминает весь сигнал и может измерять любые параметры, что позволяет использовать его для измерения джиттера TIE, джиттера от периода к периоду и джиттера периода. Однако он имеет свои ограничения по частоте (или скорости передачи данных) и разрешению по спектру, мгновенному джиттеру и многоуровневой модуляции.
- Тестер коэффициента битовых ошибок (BERT) хорошо подходит для измерения джиттера TIE, особенно полного джиттера (TJ), который является одной из разновидностей джиттера TIE. Преимущество BERT заключается в том, что он подсчитывает каждый бит, но на выполнение измерений может уходить много времени.
- Анализатор спектра реального времени (RTSA) можно использовать для измерения джиттера от периода к периоду и джиттера периода сигнала со сложной модуляцией, свойственной мобильным устройствам, что позволяет исследовать генераторы тактовой частоты, системы ФАПЧ и выявлять тонкие особенности их динамического поведения. Ограничения включают малую полосу обзора (меньше 100 МГц) и внутриполосные сигналы с широким спектром модуляции.

- Стробоскопические осциллографы эквивалентного времени предлагают лучшую полосу пропускания и могут использоваться для всех измерений джиттера последовательных данных. В настоящее время это единственные приборы, способные анализировать шум и глаз BER. Ограничения включают невозможность регистрации в режиме реального времени, возможность применения только для периодически повторяющихся сигналов и сглаживание спектра некоторых типов джиттера.

Часто встает вопрос – зачем вообще думать о джиттере, если в конечном итоге нас беспокоит только коэффициент битовых ошибок (BER). Причина в том, что джиттер приводит к значительному закрытию глаза (по ширине), что порождает ошибки. Анализ джиттера и шума позволяет быстро прогнозировать и анализировать проблемы, возникающие с BER. В конечном итоге нас интересуют только ошибки, но устранение этих ошибок требует глубокого понимания причин возникновения повышенного джиттера.

Сначала нужно понять, как работает система с точки зрения общего BER. Это можно сделать путем построения глазковой диаграммы с помощью осциллографа и выполнения статистического анализа для построения U-образного графика, название которого связано с формой, которую он приобретает при изменении пределов. С помощью BERT можно построить график пикового джиттера на основе точного подсчета каждого бита. Как показано на рис. 2, полученный с помощью BERT пиковый джиттер (слева) и U-образный график осциллографа (справа) дают практически одинаковые результаты.

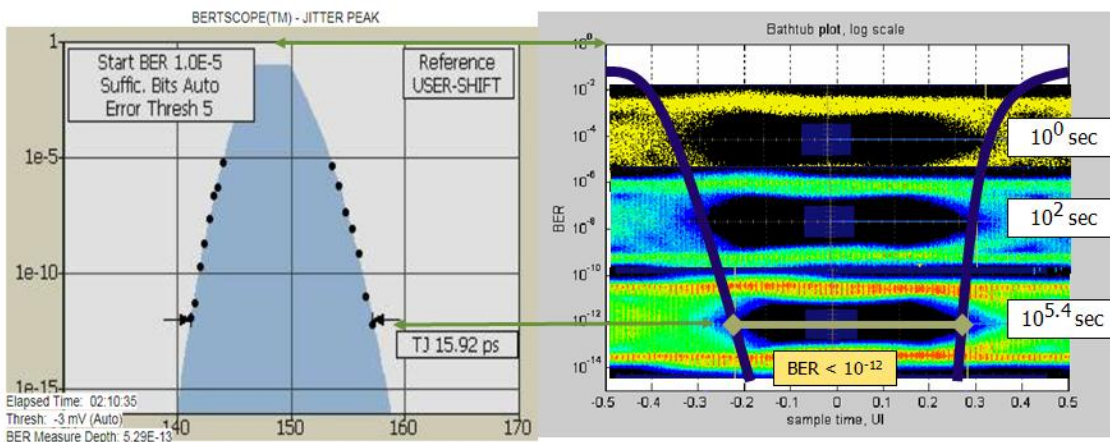


Рис. 2. Эквивалентность представления BER на графике пикового джиттера, построенном BERT (слева), и на U-образном графике осциллографа (справа).

В связи с близким совпадением результатов осциллограф является очень полезным дополнением для BERT, поскольку измерение TJ с помощью BERT при $BER=10^{-12}$ может занять несколько часов, и при этом результаты могут не показать, чем же вызван наблюдаемый джиттер. Осциллограф может интеллектуальным способом выполнять измерения по небольшому объему данных, а затем разбивать джиттер на отдельные компоненты, обычно используя для этого принятую модель джиттера, показанную на рис. 3. Опираясь на некоторые предположения, осциллограф может рассчитать TJ при заданном BER, который точно отражает результаты, полученные с помощью BERT, затратив на это очень мало времени, если, конечно, все предположения верны. Все модели сложных систем основаны на некоторых предположениях и упрощениях, поэтому

поведение модели и реальной системы всегда отличается. Как описано в последующей части этой статьи, самой сложной проблемой в наши дни являются перекрестные помехи.

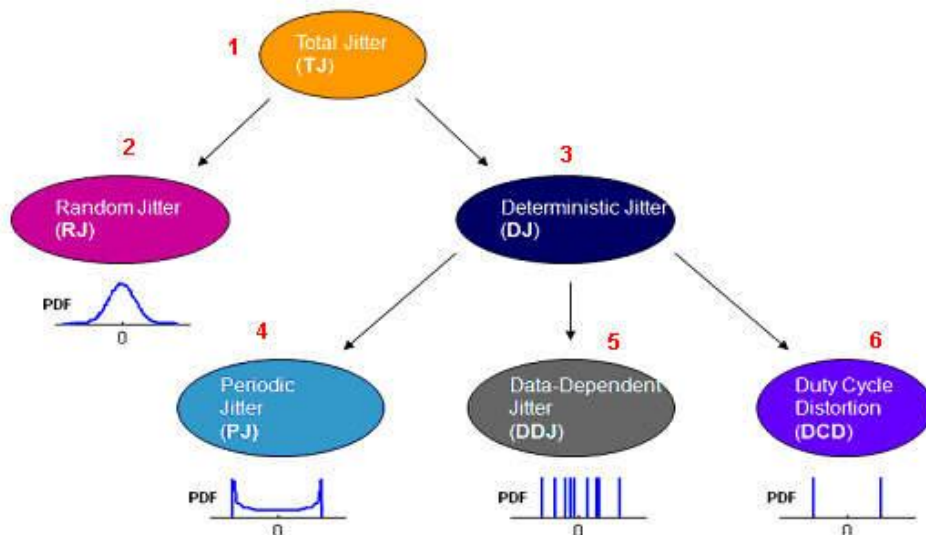


Рис. 3. Промышленная модель джиттера 2001-2010

1. Полный джиттер (TJ)
2. Случайный джиттер (RJ)
3. Детерминированный джиттер (DJ)
4. Периодический джиттер (PJ)
5. Джиттер, зависящий от данных (DDJ)
6. Искажение скважности (DCD)

Проблема перекрестных помех

Для достижения требуемой пропускной способности некоторые последовательные интерфейсы используют несколько каналов. С ростом частот и увеличением скоростей передачи данных более 10 Гбит/с, даже небольшие перекрестные помехи могут съесть запас устойчивости по джиттеру и создать проблемы синхронизации.

Перекрестные помехи возникают в том случае, когда один сигнал влияет на другой сигнал в соседнем канале. При больших скоростях передачи сигнал распространяется скорее, как направленная волна, чем как простой постоянный ток. Волна направляется проводником печатной платы, но при этом происходит излучение через диэлектрик – материал платы (FR4). В присутствии нескольких сигналов каждый проводник платы испытывает воздействие паразитных сигналов от всех других проводников. Согласно принятой терминологии говорят, что сигнал-агрессор создает помеху сигналу-жертве. Перекрестные помехи возникают в том случае, когда сигнал-агрессор наводится в

проводнике, передающем сигнал-жертву. Неизбежные неоднородности в топологии цепи, такие как соединители и переходные отверстия, создающие значительные емкостные связи, являются критическими точками, которые действуют, как антенны, излучая перекрестные помехи.

Стробоскопические осциллографы реального и эквивалентного времени используют для разделения разных компонентов джиттера методы спектрального анализа. В стробоскопических осциллографах реального времени, где частотные компоненты не сглаживаются, спектры джиттера и шума имеют пики на субгармониках, которые выглядят не тонкими линиями, а широкими резонансными кривыми. В приборах, использующих субдискретизацию, таких как стробоскопические осциллографы эквивалентного времени, где выполняется сглаживание спектра, перекрестные помехи проявляются в виде непрерывного шума.

В обоих случаях эти методы спектрального анализа джиттера, которые измеряют случайный джиттер (RJ) интегрируя спектр джиттера, преувеличивают RJ за счет влияния перекрестных помех на синхронизацию. Это приводит к увеличению RJ и переоценке TJ. Осциллографические измерения джиттера показаны на рис. 4, причем в этом примере используется тестируемое устройство с большим уровнем перекрестных помех.

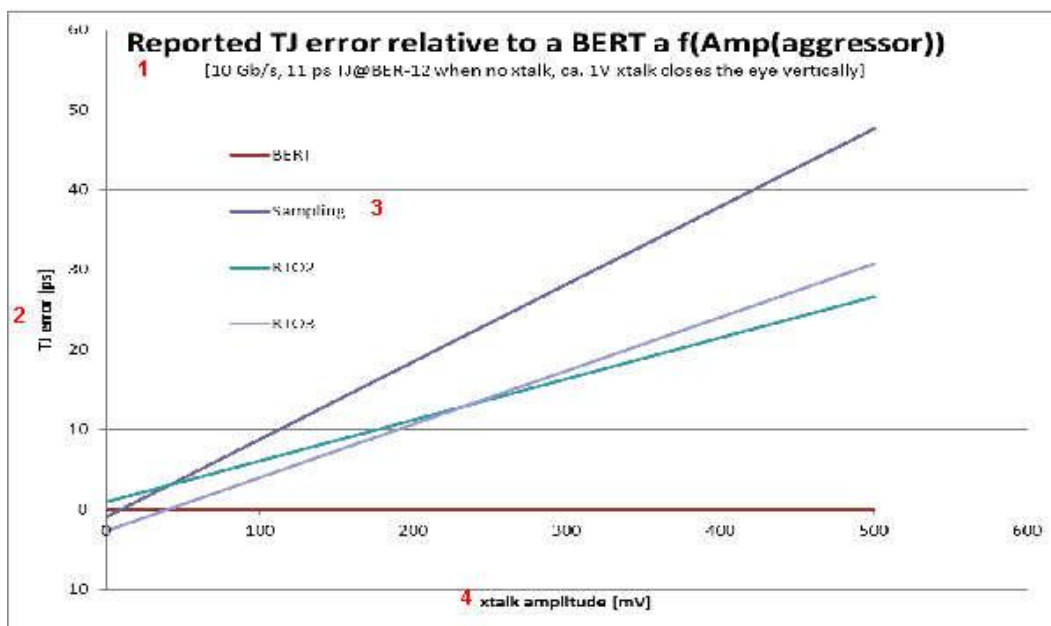


Рис. 4. Погрешность TJ при измерении осциллографом по сравнению с BERT. (Обозначения. ОРВ = осциллограф реального времени, ОЭВ = осциллограф эквивалентного времени)

1. Погрешность TJ при измерении осциллографом по сравнению с BERT f(Ампл(агрессора)) (10 Гбит/с, TJ = 11 пс при BER-12 при отсутствии перекрестных помех, перекрестные помехи 1 В закрывают глаз по вертикали)
2. Погрешность TJ, пс
3. BERT
ОЭВ

OPB2

OPB3

4. Амплитуда перекрестных помех, мВ

В осциллографе перекрестные помехи проявляются, как ограниченный некоррелированный джиттер (BUJ), поскольку он соответствует ограниченному распределению. Ограниченная природа распределения маскируется сложностью структуры данных. Кажущееся случайным распределение единиц и нулей порождает разный уровень шумов, передаваемых в каждом переходе сигнала-агрессора.

Подверженность влиянию BUJ, вызванному перекрестными помехами, зависит от измерительной системы. Осциллографические измерения или экстраполяции джиттера добавляют BUJ или NP-BUJ к RJ, и затем выдают завышенное значение TJ. Результаты измерения джиттера (RJ, TJ) сильно зависят от сложности структуры агрессора, причем наихудший случай соответствует сигналу PRBS31. С другой стороны, сигнал PRB7 обычно не создает большой ошибки. В случае осциллографов реального времени результаты измерения RJ и TJ зависят еще и от длины записи, причем более длинные записи дают большее число точек и обеспечивают лучшее разделение. Кроме того, точная причина проблемы зависит от реализации.

Решения для измерения BUJ

В настоящее время существует несколько способов анализа джиттера сигналов с возможными перекрестными помехами, но ни один из них не позволяет получить результат одним нажатием кнопки, подобно тому, как это делают осциллографы для DDJ и PJ. Одним из признаков наличия перекрестных помех является ситуация, когда анализатор джиттера показывает необычно высокий уровень RJ. Редко бывает, чтобы тепловые эффекты, являющиеся основной причиной RJ, превысили уровень 3 пс среднеквадратического значения. Если измеренный RJ превысил 3 пс, то, скорее всего, эта проблема связана с перекрестными помехами.

Другие приемы, позволяющие обнаружить перекрестные помехи, требуют расширенного контроля над каналом-агрессором. Например, можно выключить подозреваемый сигнал-агрессор, а затем сравнить результаты измерения RJ с включенным и выключенным сигналом-агрессором. Если RJ с агрессором больше RJ без агрессора, то проблема связана с перекрестными помехами. Чтобы обойти эту проблему, можно использовать измерение RJ с выключенным агрессором, а затем измерить двойной DJ Дирака с включенным агрессором в двойного модели Дирака для оценки общего джиттера системы при заданном значении BER. Проблема этого метода заключается в том, что он требует управления агрессорами, что не всегда возможно. Другая проблема заключается в том, что этот метод не применим к нелинейным системам (каковыми является большинство передатчиков), и дает оптимистические оценки, поскольку не учитывает некоторые перекрестные помехи.

Более оптимальный подход заключается в применении алгоритмов анализа джиттера, учитывающих BUJ. Такие алгоритмы используют дополнительный шаг в анализе джиттера после выделения DDJ и PJ для отделения NP-BUJ от RJ, как показано на рис. 5. Основное преимущество заключается в том, что этот метод работает в любом сценарии, поскольку не требует управления агрессором и не создает проблем с нелинейными передатчиками. Кроме того, неучтенные компоненты перекрестных помех корректно

оцениваются, как неучтенные. Недостатком этого метода является некоторый остаточный пессимизм результатов.

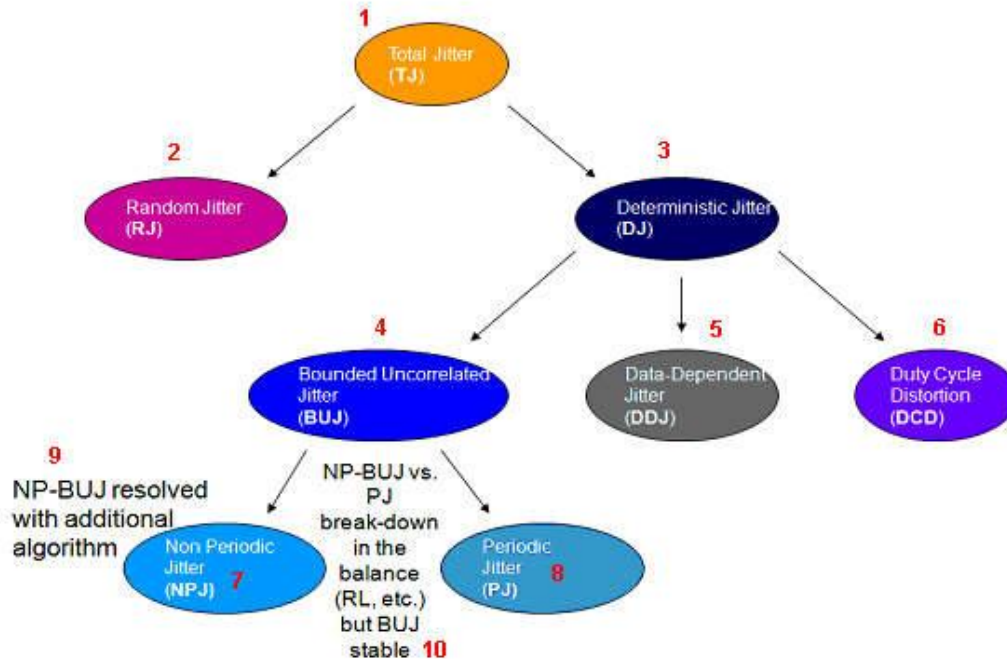


Рис. 5. Анализ джиттера с учетом BUJ и результирующая карта разложения джиттера

1. Полный джиттер (TJ)
2. Случайный джиттер (RJ)
3. Детерминированный джиттер (DJ)
4. Учтенный некоррелированный джиттер (BUJ)
5. Джиттер, зависящий от данных (DDJ)
6. Искажение скважности (DCD)
7. Непериодический джиттер (NPJ)
8. Периодический джиттер (PJ)
9. Выделение NP-BUJ с помощью дополнительного алгоритма
10. Сбалансированное разделение NP-BUJ от PJ (RL и т.п.), но BUJ при этом стабилен

Для проверки способности алгоритма анализа джиттера точно отделять BUJ от других источников случайного джиттера мы повторили тест, показанный на рис. 4, но с добавлением результатов, полученных на стробоскопическом осциллографе

эквивалентного времени с помощью алгоритма анализа джиттера, учитывающего ВУД. Результаты, показанные пунктирной линией на рис. 6, все еще демонстрируют некоторый пессимизм по сравнению с BERT. Результаты, полученные на осциллографе реального времени более пессимистичны. Это демонстрирует значительное снижение погрешности ТД, позволяя доверять осциллографу измерения ТД даже в схемах, где источником джиттера и шумов могут быть перекрестные помехи.

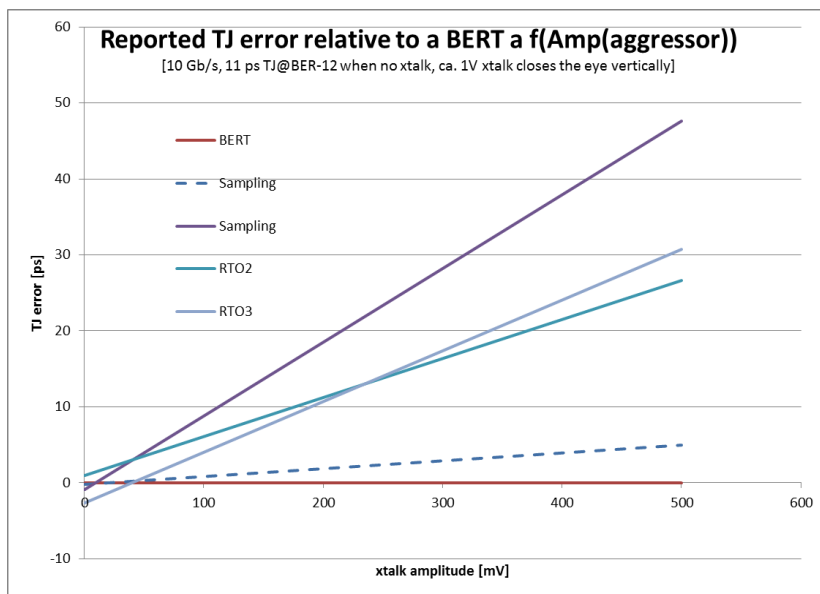


Рис. 6. Алгоритм анализа джиттера с учетом ВУД (пунктирная линия) демонстрирует существенное повышение точности для тестируемых устройств с большим уровнем перекрестных помех.

Заключение

Но по мере того, как скорости передачи данных продолжают расти, джиттер занимает всю большую часть периода сигнала, и понимание причин возникновения джиттера приобретает особую важность для разработчиков. Поскольку многие современные высокоскоростные последовательные интерфейсы используют несколько каналов, перекрестные помехи стали неизбежным следствием, которое надо учитывать в бюджете джиттера.

Но в настоящее время измерение джиттера, порожденного перекрестными помехами, или некоррелированного джиттера с помощью методов разделения джиттера, стало очень трудной задачей. Поскольку алгоритмы анализа джиттера не учитывают ВУД, он складывается с RJ, приводя к пессимистическим оценкам полного джиттера по сравнению с результатами, полученными с помощью тестера BER.

Для решения этой растущей проблемы, особенно на скоростях передачи более 10 Гбит/с, модель джиттера была расширена так, чтобы учитывать ВУД за счет применения соответствующих алгоритмов. При тестировании устройств с большим уровнем перекрестных помех новые модели доказали эффективность получения результатов ТД на стробоскопических осциллографах реального и эквивалентного времени по сравнению с результатами, полученными с помощью BERT. Кроме того, это позволяет выполнять

более тщательный анализ причин возникновения джиттера, включая анализ джиттера, порожденного перекрестными помехами.

#

Об авторе

Дин Майлс работает старшим менеджером по техническому маркетингу компании Tektronix и отвечает за линейку высокопроизводительных приборов Tektronix. За 20 лет работы в компании Дин занимал разные посты, в том числе пост менеджера по развитию глобального бизнеса в отделе РЧ технологий и менеджера по развитию бизнеса в отделе оптических устройств. Дин представлял технологии Tektronix более чем в 80 странах мира и встречался более чем с 10 000 инженерами.