

Какой осциллограф выбрать — с оцифровкой в реальном или эквивалентном времени?



Дин Майлз, Tektronix

По методу регистрации осциллографы в основном делятся на осциллографы реального и эквивалентного времени. Для некоторых типов измерений, например для последовательности включения питания, выбор метода очевиден, в то время как, например, в случае последовательной передачи данных выбор метода затрудняется.

И несмотря на то что современные осциллографы реального времени работают с более широкой полосой пропускания сигнала, характер работы с последовательной передачей данных, особенно в оптических приложениях, изменился незначительно. Это означает, что в ближайшем будущем по-прежнему будут востребованы осциллографы эквивалентного времени — с более широкой полосой пропускания и большей точностью. Чтобы правильно выбрать подходящий инструмент, важно четко понимать преимущества и недостатки каждого инструмента. Далее мы рассмотрим примеры использования осциллографов эквивалентного времени для последовательных и оптических тестов.

Основы технологии выборки

Несмотря на распространенность технологии цифровой дискретизации (выборки) в различных областях, современные цифровые осциллографы используют в основном два метода: выборку в реальном времени и выборку в эквивалентном времени. Метод выборки в эквивалентном времени, в свою очередь, делится еще на две категории: случайный или последовательный. Каждый метод имеет свои преимущества в зависимости от типа измерений.

Метод выборки в реальном времени подходит для сигналов, частота которых меняется в диапазоне не более половины максимальной частоты выборки осциллографа. В этом случае осциллограф регистрирует достаточно точек в одной развертке осциллограммы и может воссоздать достаточно точный график, как показано на рис. 1 ниже. Метод выборки в реальном времени идеально подходит для регистрации нестационарных сигналов с быстрыми и одиночными импульсами с помощью цифровых осциллографов. Полоса пропускания в этом случае связана с частотой выборки следующей зависимостью: например, $BW = \text{Частота выборки}/2,5$.

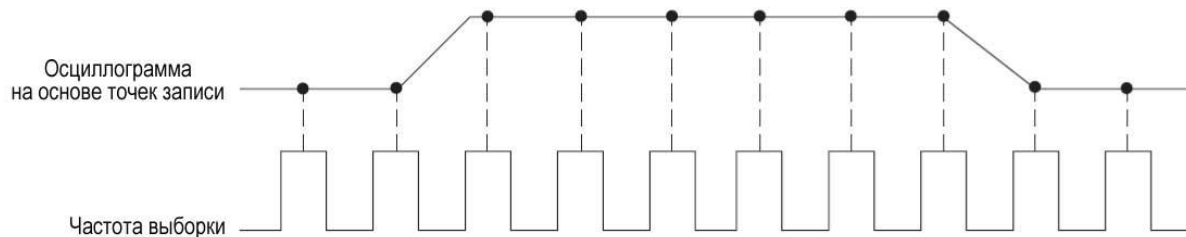


Рисунок 1. В режиме выборки в реальном времени регистрируются все точки после одного события синхронизации

При измерении сигналов высокой частоты осциллографы не всегда могут зафиксировать достаточное количество точек в одной развертке. Метод оцифровки в эквивалентном времени используется для точной регистрации сигналов, частота которых превышает соотношение частоты выборки/2,5. В этом случае получается изображение повторяющегося сигнала, причем при каждом повторе регистрируется соответствующий бит информации, как показано на рис. 2 ниже. Восстановление формы осциллограммы происходит пошагово. При этом осциллограф точно регистрирует сигналы, частотные составляющие которых могут значительно превышать частоту выборки осциллографа.

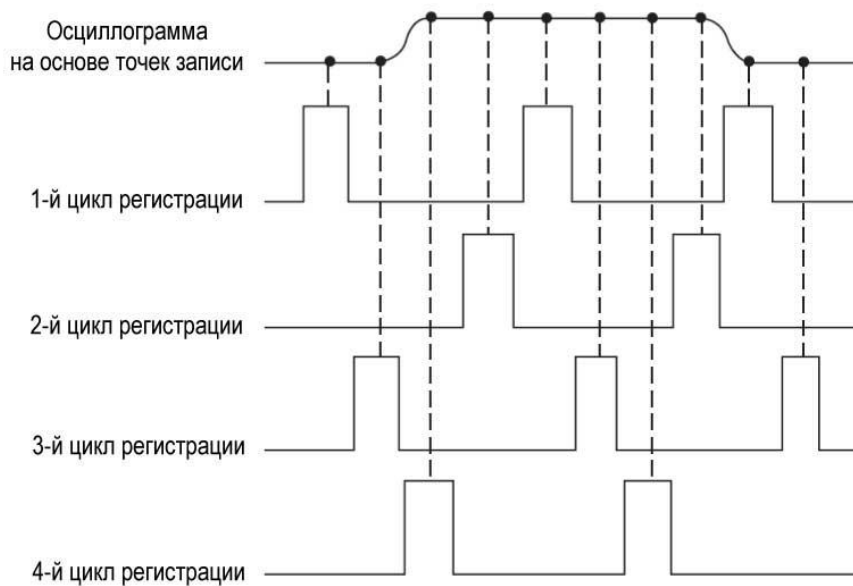


Рисунок 2. В режиме выборки в эквивалентном времени распознавание формы осциллограммы происходит после нескольких циклов синхронизации. Это пример распознавания случайных сигналов

Режимы регистрации сигналов

Осциллографы реального времени достаточно просты в использовании: они быстро регистрируют выборки и восстанавливают форму сигнала в пределах своей полосы пропускания и динамического диапазона. Это означает, что они должны сделать выборку выше частоты Найквиста, т. е. их частота выборки должна быть больше, чем удвоенная полоса пропускания; например, 50 Гвыб./с достаточно для осциллографа на 20 ГГц. Обычно оцифровка происходит с помощью источника тактовой частоты, работающего асинхронно с проверяемым устройством. В случае получения последовательного потока данных регистрация сигнала будет происходить в случайно выбранной фазе между последовательными сигналами (или потоком данных) и аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Позже мы увидим, что в таких случаях часто можно обойтись без синхронизации.

Кроме работы в режиме регистрации в реальном времени многие осциллографы реального времени поддерживают режим эквивалентного времени. В этом режиме цифровой преобразователь продолжает работать асинхронно с проверяемым устройством и, так как регистрация одного сигнала повторяется несколько раз, фаза между АЦП осциллографа и устройством тактового импульса меняется в случайном порядке. Отличие состоит в том, что в этом случае имеет значение тактирование синхронизации; все зарегистрированные точки переносятся на график в соответствии со своей точкой синхронизации, которая при регистрации последовательных данных будет зависеть от тактовой частоты проверяемого устройства.

Ввиду большого количества зарегистрированных сигналов шаг выборки будет меньше, чем шаг выборки АЦП, а итоговая частота выборки может достигнуть уровня нескольких теравыборок в секунду. А так как фаза сигнала является случайной величиной, такой режим получил название

режим случайной оцифровки в эквивалентном времени. Это означает, что шаг выборки случайным образом уменьшается при увеличении количества входных сигналов, хотя это нельзя утверждать с полной уверенностью, потому что процесс по-прежнему носит случайный характер.

Теперь для эквивалентного времени осциллографа, выполняющего выборки, система регистрации сигналов синхронизирована по времени. В случае последовательных данных синхронизация включается по сигналу или тактовому импульсу проверяемого устройства, а выборки сигнала синхронно переносятся на синхронизацию. Для регистрации последовательных данных это означает наличие четкой фазовой зависимости с проверяемым устройством. Другими словами, выборки производятся в последовательности слева направо по мере увеличения времени или фазы от синхронизации; такой метод называется последовательной выборкой в эквивалентном времени.

Стоит отметить, что термин «осциллограф с выборкой» был введен очень давно (когда аналоговые осциллографы использовались как для параметров времени, так и для измерений по вертикали); так как все современные осциллографы делают выборки по времени, термин «осциллограф с выборкой» становится перегруженным и поэтому его можно смело считать архаизмом. Другие термины (анализатор сигналов или коммуникационных сигналов) остаются употребимыми, но не столь специфичными, в связи с чем иногда возникает путаница в терминах.

Случайная и последовательная оцифровка в эквивалентном времени

Как было указано выше, большинство высокопроизводительных осциллографов реального времени могут работать в режиме эквивалентного времени, однако этот режим несравним с работой традиционных «осциллографов с выборкой». В осциллографах реального времени производится случайная регистрация в эквивалентном времени, а в традиционных «осциллографах с выборкой» регистрация сигналов происходит последовательно.

В первом случае происходит регистрация выборок, асинхронных источнику тактовой частоты; также существует блок, который может задать положение выборки. Преимущество такого способа состоит в том, что он позволяет регистрировать выборки до синхронизации (в отличие от приборов реального времени).

Однако точность позиционирования выборок значительно уступает аналогичным возможностям приборов с последовательными выборками. В результате может образоваться размытая глазковая диаграмма с джиттером. Тот факт, что осциллографы последовательной выборки в эквивалентном времени могут регистрировать сигналы только после синхронизации (если не используется линия задержки), обычно не является проблемой для испытаний с высокочастотными последовательными данными.

Последовательные данные и метод регистрации данных осциллографа

Главная особенность приемника последовательных данных — это зависимость от синхронизации данных и тактовой частоты устройства. Например, поток данных в приемник может прийти со

сдвигом фазы (появляется джиттер), но если устройство тактовой частоты обнаружит сдвиг фазы, а данные и устройство тактовой частоты синхронизированы или доступны через пользовательский интерфейс, то данные можно восстановить.

Измерительный инструмент должен следовать этой логике, поэтому последовательный поток данных обычно изображается с указанием сдвига фазы относительно устройства тактовой частоты. В осциллографах реального времени восстановленная тактовая частота может задаваться программным обеспечением, которое обрабатывает зарегистрированный поток данных. В осциллографах эквивалентного времени отсутствует понятие «поток данных реального времени», поэтому восстановленная тактовая частота не должна быть виртуальной и должна исходить от устройства тактовой частоты, аналогичного реальному приемнику (если необходимо).

Оцифровка в эквивалентном времени для последовательных данных

Высокая скорость передачи последовательных данных часто перегружает систему регистрации данных реального времени и влияет на частоту выборки. Если осциллограф регистрирует несколько выборок в одном пользовательском интерфейсе, регистрация может по-прежнему продолжаться в рамках частоты Найквиста, но даже небольшое превышение скорости выборки приводит к неспособности осциллографа интерполировать выборки и формировать четкую глазковую диаграмму. За пределами частоты Найквиста появятся небольшие помехи, которые будут влиять на точность интерполяции данных даже при идеальном соблюдении алгоритма.

Оцифровка в эквивалентном времени может ограничить или пропустить интерполяцию, так как скорость эквивалентной (виртуальной) регистрации не ограничена скоростью выборки АЦП и может быть сколь угодно большой. Такое свойство приводит к повышению стоимости — как упоминалось выше, в этом случае требуется аппаратное восстановление тактовой частоты. Кроме этого, джиттер в полученных данных дополняется джиттером устройства тактовой частоты и цепи синхронизации осциллографа. Это означает, что уровень джиттера при измерении будет еще больше, чем при регистрации выборок в реальном времени. В осциллографах реального времени целесообразно попробовать оба метода (регистрацию данных в режиме реального и эквивалентного времени) для сравнения эффективности.

Последовательный осциллограф эквивалентного времени предлагает иной компромисс: усилиями конструкторов осциллографов джиттер синхронизации максимально снижен до незначительного уровня. Так как доступная полоса пропускания обычно значительно шире, чем спектр сигнала проверяемого устройства, сужение полосы пропускания осциллографа не отражается на зарегистрированных сигналах устройства. Благодаря отсутствию проблем с вертикальной интерполяцией и низкому уровню джиттера осциллографы эквивалентного времени являются наиболее точными устройствами для регистрации последовательных данных. Компромисс заключается в ограниченной области применения последовательных осциллографов эквивалентного времени — они не подходят для неповторяющихся или нечасто повторяющихся измерительных задач.

Точка синхронизации, точка обратной синхронизации

В зависимости от настройки проверяемого устройства в нем также может находиться устройство тактовой частоты, поэтому часто возникает желание использовать это устройство для настройки тактирования во время измерений. Это практичный подход, позволяющий сэкономить на аппаратном восстановлении тактовой частоты, однако при этом возникают дополнительные проблемы, о которых лучше знать заранее.

В случае осциллографа реального времени использование источника тактовой частоты проверяемого устройства может привести к заведомо улучшенному результату. Это связано с тем, что осциллографы реального времени запускаются мгновенно и ошибки единичных интервалов не накапливаются (по крайней мере не в точке синхронизации). Цепь восстановления тактовой частоты проверяемого устройства (приемника), напротив, не сразу реагирует на ошибки сигнала тактовой частоты, поэтому может произойти накопление джиттера. Результаты могут отличаться от изображения на экране осциллографа реального времени. Это суждение остается актуальным, когда осциллограф реального времени работает в случайном режиме эквивалентного времени.

В этом случае лучшим решением будет либо использование более строгого метода регистрации данных с помощью расширенной синхронизации и подбор цепи восстановления тактовой частоты или ФАТЧ аналогично проверяемому устройству, либо проведение дополнительной проверки стабильности устройства тактовой частоты во время проверки проверяемого устройства.

В случае последовательных осциллографов эквивалентного времени определенный уровень джиттера все равно будет присутствовать ввиду длительности сигнала между синхронизацией и выборкой; этот метод может также частично использоваться в осциллографах реального времени. Тем не менее полная проверка системы восстановления тактовой частоты (в данном случае аппаратного восстановления) — это самый надежный способ изучить поведение приемника.

Природа джиттера

С учетом всего вышесказанного можно сделать вывод, что осциллографы с оцифровкой в эквивалентном времени с функцией восстановления тактовой частоты могут быть полезным инструментом для анализа джиттера при обработке последовательных данных и идеальной альтернативой осциллографам реального времени. Например, на рис. 3 ниже, в верхнем левом углу, глазковая диаграмма функции возможного распределения (PDF) указывает на возможность «закрытия» глаза при использовании хорошо оснащенного осциллографа эквивалентного времени. Изображение получено путем комбинации коррелированных и некоррелированных данных по горизонтали и вертикали.

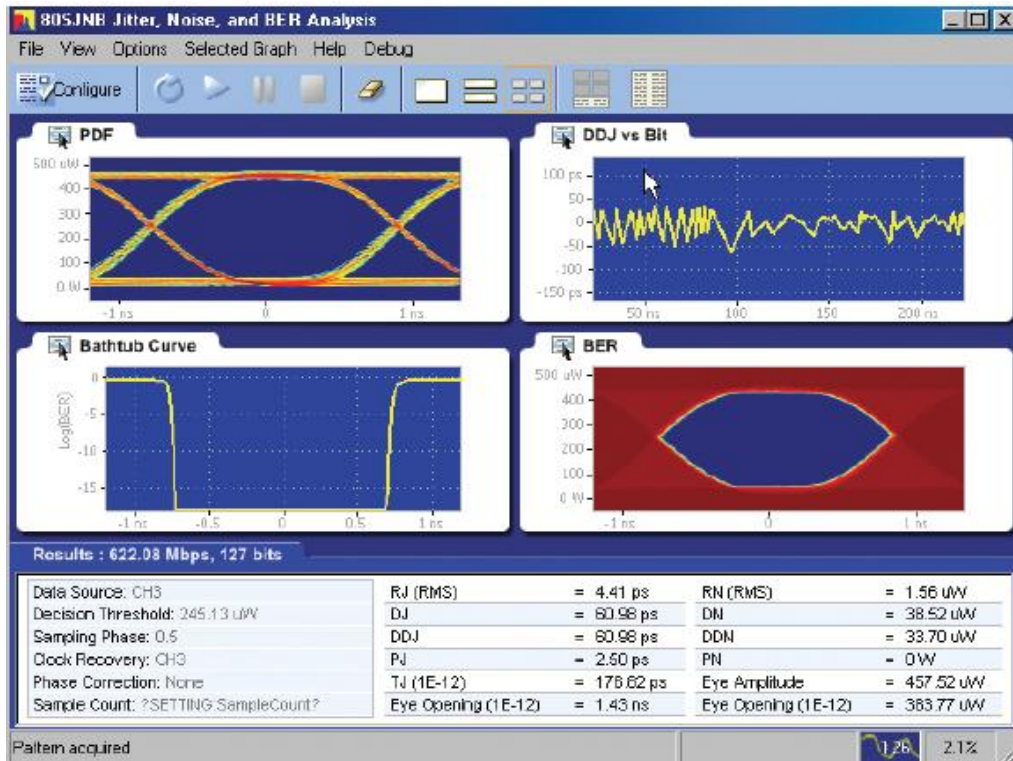


Рисунок 3. Анализ джиттера при использовании осциллографа с оцифровкой в эквивалентном времени.

Несмотря на схожесть со стандартной глазковой диаграммой, диаграмма PDF является не просто изображением выборок и она не «закрывается» при увеличении времени регистрации сигнала. Изображение по-прежнему отражает единичный интервал вертикально и горизонтально преобразованного сигнала с высоким разрешением, а третья характеристика — это рассчитанная вероятность попадания последующих сигналов в соответствующую точку.

Глазковая диаграмма PDF позволяет предвидеть результат ошибок по битам не только путем регистрации большого количества данных, но также используя возможности выборок для определения характеристики осциллограммы соответствующей функции распределения. Распределения накапливаются до тех пор, пока не будут измерены все компоненты джиттера и шума и их PDF не будут точно определены. В этом случае во всей области диаграммы возможно определить ошибку по битам на уровне 1×10^{-18} .

Использование осциллографов эквивалентного времени

Последовательные осциллографы эквивалентного времени являются универсальным инструментом для разработки и тестирования высокочастотных устройств, компьютеров и электроприборов, работающих с объемами данных в несколько гигабит. Они используются для изучения характеристик оптических или электрических передатчиков, а также для проверки устройств, модулей и систем, входящих в состав этих продуктов.

Кроме этого, они подходят для изучения свойств трактов электрического сигнала (пакетов, печатных плат и электрических кабелей). Благодаря исключительно широкой полосе пропускания, точности воспроизведения сигнала и модульной архитектуре эти инструменты обеспечивают высокую эффективность при работе в режиме TDR (Time Domain Reflectometry — измерение коэффициента отражения методом совмещения прямого и отраженного испытательных сигналов), выполнении анализа соединительных каналов, точного анализа искажений сигнала и расчета коэффициента битовой ошибки для современных и перспективных технологий последовательной передачи данных. Кроме того, осциллографы «с выборкой» — это идеальное решение для оптических и электрических приложений, где требуется очень широкая полоса пропускания, очень высокое разрешение по вертикали, низкий уровень джиттера и точность временных интервалов.

Ниже приведены обобщенные рекомендации по выбору правильного типа осциллографа для конкретной области применения.

Осциллограф реального времени

- Требуется только синхронизация, регистрирует сигналы в режиме одного прохода.
- Высокий диапазон входного напряжения (6,25 В, для осциллографов эквивалентного времени — 1 В).
- Подходит для отладки (например, изучение событий со смежных точек) с сохранением истории.
- Восстанавливает тактовую частоту при входящих последовательных сигналах, что позволяет быстро анализировать глазковую диаграмму и уровень джиттера.

Осциллограф эквивалентного времени

- Осциллографы реального времени имеют широкую полосу пропускания (30 ГГц и выше), однако осциллографы эквивалентного времени располагают еще более широкой полосой пропускания (70 ГГц и выше).
- Модули на основе оптических приемников позволяют напрямую регистрировать оптические сигналы (от 700 до 1800 нм).
- Низкий уровень шума/джиттера (<200 пс).
- Идеально для изучения характеристик; повторяющийся характер работы позволяет их использовать, например, при тестировании схем SerDes или модуля TDR (Time Domain Reflectometry — измерение коэффициента отражения методом совмещения прямого и отраженного испытательных сигналов).

Благодаря широкой полосе пропускания осциллографы эквивалентного времени совместимы с большим количеством измерительных и аналитических инструментов для оптических приложений. Помимо стандартных измерений амплитуды и тактирования (например, время нарастания/спада, амплитуда, среднее квадратическое значение джиттера, среднее квадратическое значение шума, частота, период и т. д.) расширены возможности измерения оптических величин (оптической мощности, коэффициента затухания, высоты и ширины глазковой диаграммы, амплитуды оптической модуляции).

Мы рассмотрели возможности осциллографов реального и эквивалентного времени для регистрации сигналов, восстановления тактовой частоты и синхронизации, а также дополнительные области применения осциллографов эквивалентного времени, например серии DSA8300 от компании Tektronix.

###

Об авторе

Дин Майлз является старшим техническим менеджером по маркетингу компании Tektronix, он отвечает за линейку высокоэффективных продуктов компании. Дин работает в компании уже более 20 лет, за это время он сменил несколько должностей — был менеджером по развитию глобального бизнеса радиочастотных технологий Tektronix и менеджером по развитию подразделения оптических приложений Tektronix. Он представлял продукты Tektronix более чем в 80 странах мира и провел встречи более чем с 10 000 инженеров.