

# ТЕХНОЛОГИЯ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ УПРОЩАЕТ ПРОВЕДЕНИЕ АНАЛИЗА ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

## DSP TECHNOLOGY AIDS HIGH-SPEED SERIAL DATA ANALYSIS

Тревор Смит (Trevor Smith), Tektronix, Inc.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широко применяются доказавшие свою надежность технологии последовательной передачи данных первого поколения. Многие потребительские товары поставляются со встроенными шинами PCI Express, Serial ATA и другими. Эти последовательные шины обеспечивают более высокую скорость передачи данных по сравнению с параллельными, и одновременно позволяют упростить компоновку схемы. В то же время начинают появляться более быстрые технологии последовательной передачи данных, включая архитектуры последовательных шин второго и третьего поколения, например, HDMI 1.3, SATA III и PCI-Express 2.0.

Технология последовательных шин «подняла планку» рабочих характеристик высокопроизводительного контрольно-измерительного оборудования, используемого при проектировании, проверке и диагностике. Высокие скорости передачи данных — это только начало. Разработчикам нужны приборы, способные выполнять наиболее важные измерения целостности сигналов и анализ глазковых диаграмм.

### ЦЕЛОСТНОСТЬ СИГНАЛОВ

Измерения целостности сигнала для последовательных шин стали для разработчиков важной составной частью их работы, связанной с измерениями. Многие проблемы, с которыми приходится сталкиваться при тестировании, обусловлены дефектами уровня осциллограмм, например, шумом, джиттером и искажениями синхронизации. Стандарты последовательной передачи данных привнесли более узкие допуски для синхронизации, требующие использования контрольно-измерительного оборудования с более широкой полосой пропускания и более высокой точностью. При этом выдвигаются дополнительные требования по минимизации влияния собственнo измерительного устройства.

### ИЗМЕРЕНИЯ ГЛАЗКОВЫХ ДИАГРАММ

Полоса пропускания осциллографа влияет на глазковую диаграмму сигнала. Это стандартное, повсеместно используемое изображение осциллографа является краеугольным камнем испытаний на соответствие и тестов проверки и представляет один «бит» или единичный интервал данных со всеми возможными переходами и состояниями фронтов. На конечном экране отображаются различные осциллограммы, окружаю-

щие приблизительно шестиугольную открытую область в центре. Эта область представляет собой «глазок», степень ее открытости является мерой качества сигнала (чем больше открыт «глазок», тем лучше). Для правильной реакции на данные логические устройства последовательной передачи данных должны четко различать в области глазка состояния «1» и «0». Для определения областей «прошел/не прошел» глазка часто используется графическая «маска».

Осциллографы с недостаточной полосой пропускания при приеме сигнала могут обеспечивать спад амплитуды до 1 дБ (по вертикали). К сожалению, такие потери, как правило, попадают в открытую область индикаторной диаграммы: точно в районе принятия двучиных решений. Поэтому достаточная полоса пропускания важна в измерениях индикаторных диаграмм, а также при измерениях фронтов сигналов.



Рис. 1. Цифровые анализаторы сигналов модели DSA70000 компании Tektronix

В настоящее время имеется контрольно-измерительное оборудование с полосой пропускания, необходимой для большинства важных измерений синхронизации и фронтов сигналов. В последних моделях последовательных анализаторов используется полоса пропускания 20 ГГц. Совместно с частотой дискретизации 50 Гвыб/с на всех каналах это покрывает весь диапазон последовательных шин, используемых в настоящее время (рис. 1). При такой дискретизации время нарастания входного сигнала на 10-90% участка фронта осциллограммы составляет менее 22 пс. Далее в этой статье мы покажем, как улучшение полосы пропускания на основе цифровой обработки сигнала (digital signal processing — DSP) позволяет получить частотные характеристики вплоть до пятой гармоники для самых быстрых стандартов последовательной передачи данных первого поколения. Эта же функция обеспечивает оптимальный частотный и амплитудный отклик на всех каналах.

### ИЗМЕРЕНИЯ ПЯТОЙ ГАРМОНИКИ

Скорость передачи данных в большинстве архитектур последовательных шин первого поколения находится в диапазоне от 2,5 до 3,125 Гбит/с: эти скорости соответствуют современным осциллографам с полосой пропускания 4 и 5 ГГц. Для измерений точности сигналов требуется намного большая полоса пропускания, большинство органов стандартизации признают необходимость определения инстpументов, достаточно быстрых для регистрации пятой гармоники синхросигнала.

Регистрация пятой гармоники обеспечивает точность, необходимую для категоризации и анализа сигналов с быстрым временем нарастания, а также допускает большее допустимое искажение сигнала для обеспечения точных результатов.

На рисунке 2 показано увеличенное допустимое искажение амплитуды и, в частности, разница в отображении сигнала между осциллографами с полосой пропускания 20 ГГц и 13 ГГц. Осциллограф с большей полосой пропускания позволяет измерять сигнал в шине PCI-E Gen2 с большими допустимыми искажениями с дискретизацией 6,25 Гвыб/с. В полосе пропускания 20 ГГц регистрируется пятая гармоника, большая часть допустимых искажений находится в чистой области глазка. Полоса пропускания 13 ГГц недостаточна для регистрации пятой гармоники, сигнал не проходит тест с применением маски.

Некоторые группы стандартов, прежде всего PCI SIG, указывают определенную полосу пропускания, которая должна быть доступна для регистрации пятой гармоники.

### МНОГОКАНАЛЬНЫЕ АРХИТЕКТУРЫ

Более быстрые последовательные шины передачи данных, включая архитектуры второго и третьего поколений, например HDMI 1.3, SATA III, и PCI-Express 2.0, обеспечивают улучшенную производительность в одноканальных устройствах, а также реализуются в виде архитектур шин последовательной передачи данных с применением нескольких каналов. В многоканальных конфигурациях пакеты данных, передаваемые последовательно, сначала разделяются на составные части, а затем передаются по четырем, восьми или более «каналам» одновременно (рис. 3). Проектировщикам при выполнении проверки или отладки в многоканальных шинах требуются испытательные системы, позволяющие регис-

трировать в реальном времени наборы данных, передаваемые по четырем или более каналам одновременно. При этом производительность должна быть достаточной для обслуживания последовательных шин последнего поколения. Для проверки данные требуется регистрировать с временной корреляцией одновременно во всех сигнальных каналах. В настоящее время доступны инструменты с частотами дискретизации до 50 Гвыб/с, обеспечивающие более высокое временное разрешение на всех входных каналах, и трафиком данных, передаваемых последовательно, с временной корреляцией до 4 мс на всех четырех каналах. Такое сочетание регистрации в реальном времени и большого объема памяти позволяет проектировщикам анализировать события, вызывающие неисправность, или предшествующие и последующие ошибки, связанные с потоком данных в каждом канале шины.

### ТЕСТИРОВАНИЕ ДЖИТТЕРА

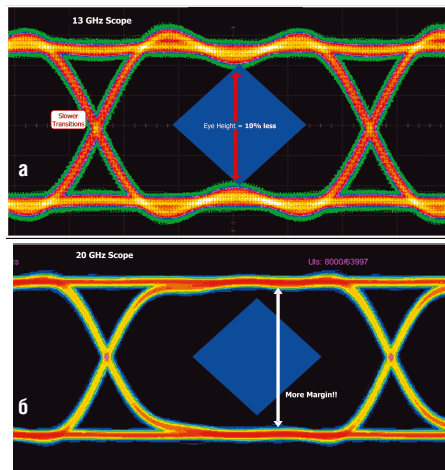
Джиттер представляет собой еще одну проблему для разработчиков последовательных шин данных. В некоторых случаях необходимо определить его влияние на фронты отдельных сигналов, но, что более важно, джиттер играет значимую роль в измерении индикаторных диаграмм. Джиттер может снизить ширину глазка, где пересекаются нарастающий и спадающий фронты, что потенциально ведет к нарушению маски.

При наличии джиттера необходимо определить, обусловлен ли он тестируемым устройством или вносится измерительным прибором. Свой вклад в измеряемый джиттер могут вносить джиттер переключения и уровень шума джиттера (JNF) осциллографа, все это приводит к сужению глазка и ошибкам при измерении с помощью маски.

Для минимизации джиттера переключения осциллографа были разработаны схемы программной коррекции: такой подход улучшает производительность в режимах регистрации в эквивалентном масштабе времени с необходимостью повторного переключения для каждой точки выборки. Но джиттер переключения не является серьезной величиной при измерениях джиттера на основе простой регистрации в реальном режиме времени. В данной ситуации на регистрацию в эквивалентном и реальном времени может оказывать влияние значение JNF.

В таких случаях для достижения высокого отношения сигнал-шум и исключительно низкого значения JNF (типичное среднеквадратичное значение 400 фемтосекунд) лучше использовать инструмент с достаточным динамическим диапазоном (например, десять делений по вертикали) в режиме вертикального аналого-цифрового преобразования. Такой осциллограф может обеспечить измерение джиттера с незначительным вкладом в джиттер самого осциллографа (рис. 4).

Измерение джиттера низкой частоты



**Рис. 2. Индикаторные диаграммы для осциллографов с полосой пропускания 13 ГГц (а) и 20 ГГц (б)**

представляет собой отдельную проблему. На осциллограф налагаются два противоречивых требования: регистрация малых фрагментов синхронизации и большие интервалы времени. Для регистрации джиттера с достаточным разрешением зачастую требуется задавать максимальную частоту дискретизации (например, 50 Гвыб/с, что соответствует интервалу выборки 20 пс). При такой дискретизации в памяти осциллограмм быстро накапливаются данные выборки. Но формирование джиттера низкой частоты происходит в интервалах порядка миллисекунд. Если инструменту для определения влияния НЧ-джиттера на измерение требуется зарегистрировать достаточно рабочих циклов, то необходимо использовать большой объем памяти.

Для осциллографа с памятью на канал 200 Мвыб при максимальной частоте дискретизации в памяти может храниться до 4 мс данных выборки. Это позволяет подробно просмотреть джиттер на отдельных фронтах, в изменениях джиттера в этой же осциллограмме, происходящих через миллион циклов.

### ВЛИЯНИЕ ВЫЧИТАНИЯ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ

Новые стандарты на последовательные шины передачи данных требуют удалять из результатов измерений эффекты прохождения в измеряемых каналах. Один из способов заключается в применении цифровых фильтров, позволяющих выполнять в осциллографе вычисления, для которых ранее требовалось отдельное программное обеспечение.

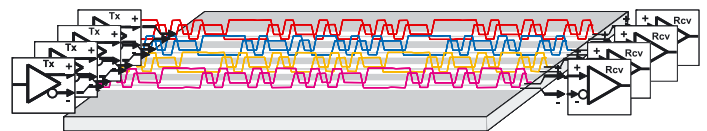
Фильтрация сигналов представляет собой процесс, возвращающий нас к ранним дням аналоговой электроники, когда фильтр являлся цепью, собранной из отдельных резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности. В современном мире DSP фильтр представляет собой математическую процедуру, изменяющую форму (то есть частотный спектр) сигнала таким же образом, как

и аналоговые предшественники. Но для этого сигнал должен быть представлен в цифровом виде, тогда с ним можно выполнять различные функции, начиная с простого умножения и до дифференциальных уравнений.

Такой процесс включает ввод в математическую систему осциллографа параметров фильтра КИХ (конечная импульсная характеристика). Цифровые фильтры удаляют из результатов измерений рассчитанные характеристики потерь, на осциллографе отображается «очищенный» сигнал. В результате получается индикаторная диаграмма, на которую не оказывают влияние подключения, глазок более точно отражает реальную работу устройства.

КИХ-фильтры, включенные в сигнальный тракт позволяют реализовать широкий диапазон произвольных характеристик фильтров, а также применять улучшенные методы измерений высокоскоростной последовательной передачи данных, включая «виртуальные контрольные точки» и выполнение анализа недоступных сигналов.

DSP-фильтры обеспечивают большее разрешение, линейность и стабильность в сравнении с аналоговыми. КИХ-фильтры стабильны и не могут осциллировать, такие фильтры обеспечивают линейную фазовую характеристику, то есть для всех частот, проходящих через фильтр, используется одно значение задержки времени, что сводит к минимуму искажения. Более того, импульсная характеристика КИХ-фильтра имеет конечную, измеримую длительность, ее влияние является прогнозируемым и управляемым.



**Рис. 3. Архитектура многоканальных последовательных шин**

Имеется много вариантов измерений с помощью осциллографа, для которых полезно применять фильтрацию. Фильтрация также используется для решения серьезных проблем высокоскоростных измерений. Например, фильтрация позволяет ограничить полосу пропускания и уменьшить шум, сохраняя при этом высокое разрешение по времени. Фильтрацию также можно применять для управления способом «спада» характеристики осциллографа за пределами верхней границы частотного диапазона.

### ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В высокопроизводительных испытательных инструментах последнего поколения применяются произвольные КИХ-фильтры с характеристиками, которые можно изменять при помощи загрузки пользовательских коэффициентов, определенных в Matlab или других подобных программах (рис. 5).

Определяемая пользователями фильтрация является эффективным средством

вом для поддержки высокоскоростных измерений. Например, наблюдение сигналов становится ключевым для всех проектировщиков, измеряющих производительность устройств последовательной передачи данных, особенно для принимающих элементов. Имеются некоторые сигналы, которые просто невозможно просмотреть при помощи пробников или контрольных точек.

Особенно проблематичными с данной точки зрения являются измерения допусков на входе приемного устройства. В нормальных условиях работы вход в устройстве последовательной передачи данных представляет собой практически бесполезную точку доступа для просмотра сигналов. Нужные сигналы обрабатываются в устройстве фильтром для смещения ухудшений, происходящих при передаче по кабелям, платам PCB и коннекторам. Сигнал, поступающий в активную часть приемника (где необходимо оценить индикаторные диаграммы и другие характеристики), находится в устройстве, доступ к нему с помощью обычных методов невозможен.

Решение заключается в применении DSP-фильтра для имитации внутреннего фильтра приемника. Пользователь может загрузить в осциллограф такие же коэффициенты, которые использовались для разработки тестируемого устройства. При помощи фильтра пользователь осциллографа может подключиться к входному выводу и просмотреть сигнал так, как будто пробник подключен внутри устройства. Такая «виртуальная контрольная точка» позволяет просмотреть сигнал в приемнике после его прохождения через фильтр, хотя физическая контрольная точка представляет собой вывод на входе устройства. Такой процесс называют «извлечением».

Фильтры на основе DSP можно применять для реализации современных методов фильтрации сигналов, включая компенсацию с решающей обратной связью (DFE). Специализированные DFE-фильтры являются интеллектуальной собственностью и поддерживаются многими современными системами последовательной передачи данных. Цифровым фильтрам в осциллографе можно назначать произвольные коэффициенты КИХ-фильтров, которые позволяют загрузить в область пост-обработки

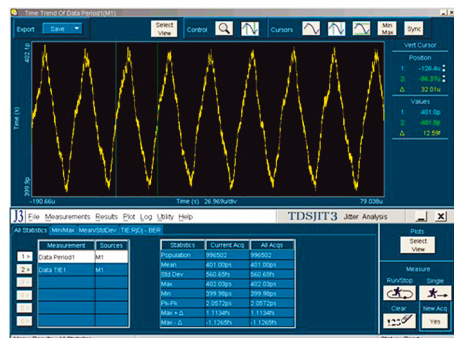


Рис. 4. Анализ джиттера многоканальных систем последовательной передачи данных

DFE-сигналов мгновенные значения DFE-коэффициентов.

DSP-фильтрацию также можно применять для сведения к минимуму влияния контактов и кабелей, подключаемых к тестируемому устройству. Построение характеристик или моделирование контактов и сохранение этой информации в виде соответствующих коэффициентов фильтров позволяет пользователям осциллографа создавать фильтры, «отключающие» фазовые сдвиги и искажения сигналов, вносимые внешними элементами.

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ DSP ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СБОРА ДАННЫХ

Цифровая обработка сигналов позволяет использовать преимущества всей системы регистрации сигналов осциллографов, включая улучшение частотной и фазовой характеристик, сопоставление каналов, производительность системы пробников, поведение отношения сигнал-шум и другие ключевые характеристики.

Улучшение производительности каналов на основе DSP можно применять для достижения исключительно плоской амплитудной характеристики и линейности фазочастотной характеристики. В идеале амплитудная характеристика осциллографа должна оставаться постоянной во всей полосе пропускания осциллографа (не должно быть пиков или провалов). В обычных системах регистрации осциллографов такой идеал недостижим. Применение DSP позволяет сгладить любые неровности и выровнять уровень характеристики во всей полосе пропускания. Преимуществом такого подхода является большая точность измерений в пределах заданной полосы пропускания. Например, осциллограф с полосой пропускания 12 ГГц может регистрировать сигнал с частотой 10 ГГц с такой же степенью точности, что и сигнал 100 МГц. Точность сигнала остается одинаковой во всем диапазоне.

DSP-обработка также положительно сказывается на спаде частотной характеристики инструмента. Цель здесь заключается в управлении скоростью спада характеристики для обеспечения оптимального баланса между сохранением переходной характеристики и снижением внеполосного шума. При слишком плавном спаде в полосу пропускания инструмента попадает много высокочастотных компонентов шума. Слишком крутой спад приводит к затуханию на высоких частотах, которые необходимы для создания точной и плавной переходной характеристики. DSP позволяет очень точно управлять формой спада и достигать оптимального баланса между подавлением шума и переходной характеристикой, что, в свою очередь, позволяет добиться очень высокого уровня четкости сигнала.

DSP также можно использовать для выполнения очень точного сопоставления каналов, где каждый канал откалиброван по одной и той же идеальной

АЧХ. Практически идентичные переходные характеристики для нескольких каналов крайне полезны при выполнении псевдодифференциальных измерений или поканальных измерений в многоканальных системах последовательной передачи данных. Эти же методы можно применять для точного сопоставления каналов нескольких инструментов.

DSP также можно применять при исследовании сигнального тракта, такая обработка позволяет осциллографу учитывать характеристики соответствующего дифференциального пробника и его съемного широкополосного накопечника.



Рис. 5. Пользовательские КИХ-фильтры на основе технологии DSP

Система DSP здесь действует в качестве номинального выравнивающего фильтра для тракта пробника и эффективно и более плотно интегрирует пробник в систему осциллографа. Это позволяет получить максимально плоскую общую частотную характеристику для пробника и осциллографа.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важность целостности сигналов в общей производительности системы возрастает с возникновением стандартов последовательной передачи данных со скоростью несколько гигабит в секунду. Высокопроизводительное измерительное оборудование нового поколения соответствует требованиям разработчиков последовательных шин и отличается полосой пропускания и частотой дискретизации, достаточными для поддержки точной регистрации характеристик и индикаторных диаграмм сигналов, передаваемых последовательно с высокой скоростью. Сверхмалый внутренний джиттер позволяет этим инструментам измерять джиттер сигнала, сводя к минимуму влияние самого измерительного инструмента. Кроме того, новые встроенные средства фильтрации позволяют исключить из результатов измерений влияние измерительного тракта.

*In this article, the author shows how digital signal processing (DSP) can deliver benefits across the whole oscilloscope acquisition system, including the enhancement of frequency and phase response, channel matching, probe system performance, signal-to-noise behaviour and other key characteristics.*