

АНАЛИЗ ДЖИТТЕРА С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВЫХ ОСЦИЛЛОГРАФОВ R&S® RTO

JITTER ANALYSIS WITH THE R&S® RTO DIGITAL OSCILLOSCOPE

Матиас Хельвиг (Mathias Hellwig)

ВВЕДЕНИЕ

С ростом использования цифровой обработки и передачи сигналов, цифровые интерфейсы становятся преобладающими в области разработки электроники. Так как цифровые сигналы в целом более устойчивы и менее восприимчивы к помехам, чем аналоговые сигналы, то имеется тенденция увеличения скорости передачи данных и тактовой частоты, при этом уменьшаются допустимые временные искажения сигналов. В случае появления ошибок требуется выполнение более подробного анализа, проведение сложных испытаний и отладки. В качестве примера увеличения тактовой частоты можно привести такие хорошо известные цифровые стандарты как PCIe, SATA, USB или DDR.

Анализ допустимых временных искажений не ограничен анализом лишь сигнала, а может быть применен к тактовой частоте, содержащейся в сигнале данных, или опорной тактовой частоте. Более того, некоторые измерения джиттера доступны для применения в различных нецифровых областях, например, модуляции высокочастотных сигналов или временных характеристиках аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей. В настоящей статье речь пойдет об анализе джиттера цифровых сигналов с использованием возможностей осциллографов серии R&S RTO.

ИСТОЧНИКИ ДЖИТТЕРА

Согласно определению [1], джиттер — это кратковременные изменения значащих моментов девиации сигналов во времени относительно их идеального положения во времени. Здесь понятие кратковременность означает, что эти изменения имеют частоту порядка 10 Гц. Джиттер измеряется по отношению к идеальному источнику тактового сигнала или к самому себе.

Суммарный джиттер обычно вызван определенными (детерминированными) и случайными источниками. Определенный джиттер (Deterministic Jitter, DJ) также называется систематическим и, в свою очередь, разбивается на периодический джиттер (Periodic Jitter, PJ), джиттер, зависящий от данных (Data-Dependent Jitter, DDJ) и искажения коэффициента заполнения (Duty-Cycle Distortion, DCD). Определенный джиттер ограничен и характеризуется значением полного размаха. Случайный джиттер не ограничен и обычно характеризуется среднеквадратическим отклонением σ .

Из-за нерегулярного характера случайный джиттер (RJ) не коррелируется ни с какими другими сигналами и его времен-



RONDE & SCHWARZ

ное поведение непредсказуемо. Тепловой шум, дробовой шум и другие физические эффекты вносят свой вклад в случайный джиттер, и его математическим представлением является случайный процесс. Функция плотности вероятности случайного джиттера соответствует широко известному (нормальному) распределению Гаусса. Иногда для описания случайного джиттера используется измерение полного размаха в определенном дискретном интервале.

Периодический джиттер вызывается периодическими помехами. Хотя этот сигнал не обязательно является синусоидальным, его часто называют синусоидальным джиттером. Амплитуда периодического сигнала при этом ограничивает значение джиттера.

Межсимвольная интерференция (Inter Symbol Interference, ISI) приводит к появлению джиттера, зависящего от данных (DDJ). Когда происходит межсимвольная интерференция, могут иметь место возмущения сигнала с усилением, временные сдвиги с копированием сигнала или отдельных его частей.

Во временной области межсимвольная интерференция вызвана многолучевым распространением волн при беспроводной передаче и отражениями при проводной передаче. Отражения или эхо-сигналы появляются из-за рассогласования импедансов нагрузок, а также из-за неоднородностей физической среды на пути распространения, например разъемов. В частотной области межсимвольная интерференция вызвана дисперсией.

Таким образом, множество явлений в цифровых устройствах может приводить к фазовому дрожанию фронтов. Явление джиттера следует обязательно учитывать и анализировать.

ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ АНАЛИЗА ДЖИТТЕРА В ОСЦИЛЛОГРАФАХ R&S RTO

Рассмотрим возможности анализа джиттера с использованием осциллографов серии R&S RTO. В них Опция RTO-K12 позволяет выполнять анализ нескольких типов сигналов, например, тактовых или двоичных сигналов данных, а также высокочастотных сигналов.

Функция автоматических измерений обеспечивает получение статистических данных. Обычно при измерении джиттера требуется оценить статистику измерений частоты, периода или ширины импульса.

Так как измеренные данные содержат случайные компоненты, для описания характеристик сигнала подходят статистические параметры. Среди математических характеристик функции плотности вероятности используются преимущественно среднее значение и среднеквадратическое отклонение. Количество измерений является важным параметром для оценки уровня достоверности результатов измерений. Высокая частота сбора данных RTO дает преимущество в получении высокой достоверности измерений в течение короткого времени.

Один из наиболее простых способов наблюдения джиттера заключается в использовании послесвечения. Если установлен «бесконечный» режим послесвечения, то осциллограф R&S RTO будет накапливать осциллограммы на экране, и пользователь сможет, например, использовать курсоры для измерения разницы между точками пересечения на глазковой диаграмме, чтобы определить суммарный джиттер для заданного интервала времени или размера выборки. На рис. 1 показан пример использования послесвечения и цветовой градации, а также измерения суммарного джиттера с помощью курсоров.



Рис. 1. Использование режима послесвечения для анализа джиттера

Гистограмма, в общем случае, является графическим отображением распределения данных. В контексте анализа джиттера использование гистограмм помогает пользователю получать данные о джиттере (горизонтальная гистограмма по осциллограмме), шуме (вертикальная гистограмма по осциллограмме) и функции плотности вероятности измеренных значений (гистограмма по измерениям). Отдаленным аналогом гистограмм является предусмотренный в R&S RTO режим кривой измерения джиттера, позволяющий выявить его периодичность.

Режим спектрального анализа используется для случаев слабого джиттера, когда последний не отображается во временной области. Спектральные измерения позволяют определить шумо-

вые характеристики джиттера, такие как мощность и характерная полоса, путем исключения составляющих, относящихся к полезному сигналу.

Наиболее часто в практике проектирования цифровых устройств используют глазковые диаграммы. Такой режим также предусмотрен в осциллографах R&S RTO. Глазковая диаграмма создается многократным наложением множества осциллограмм цифрового сигнала. Обычно глазковая диаграмма отображается в виде горизонтальной проекции в диапазоне от 1,5 до 2 битовых интервалов. Временное распределение должно быть четко привязано к опорной тактовой частоте и временным точкам развертки.

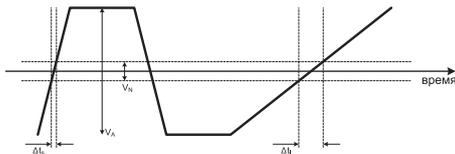


Рис. 2. Влияние шума на точность измерений джиттера

Для выполнения точных измерений в глазковую диаграмму должны быть включены все значимые битовые последовательности сигнала. Межсимвольная интерференция определяет количество битов в последовательности, влияющей на соседние биты. Например, стандартный запуск по фронту будет исключать последовательности, которые следуют только заднему фронту. Для получения хороших результатов запуск должен быть установлен по обоим фронтам — переднему и заднему. Наилучший способ получения глазковой диаграммы основан на функции восстановления тактовых сигналов. Если цифровой сигнал содержит тактовый импульс, то возможно восстановление этой тактовой частоты на основе сигнала, и она может быть использована для запуска и отображения осциллографом. Осциллограф R&S RTO имеет встроенное решение для получения глазковой диаграммы.

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ АНАЛИЗА ДЖИТТЕРА

Первый и наиболее важный аспект — это полоса пропускания цифрового осциллографа. Цифровые сигналы могут иметь низкую скорость данных или тактовую частоту, но при этом малое время нарастания или спада, что подразумевает наличие высокочастотных спектральных составляющих. Требуемую полосу пропускания можно оценить по формуле $f_{bw} = 0,35/t_{r(10-90)}$, где $t_{r(10-90)}$ — время нарастания импульса в диапазоне от 10 до 90 % амплитуды. Аналоговая входная полоса пропускания осциллографа должна быть больше полосы частот сигнала. Если используются пробники, пользователь должен учесть и их полосу пропускания.

Другой важный аспект — это влияние уровня сигнала и времени перехода (нарастания или спада). Если уровень входного сигнала мал или время перехода велико, входной шум аналогового входного каска-

да осциллографа может стать доминирующей составляющей анализа джиттера (рис. 2). На рисунке показано влияние времени перехода Δt (быстрого перехода Δt_s и медленного перехода Δt_f) на точность дискретизации. При увеличении скорости нарастания будет уменьшаться время перехода. Увеличение масштаба по вертикали приводит к снижению воспринимаемого уровня этой ошибочной составляющей джиттера. При оптимизации масштаба по вертикали интерполяция, используемая для определения точки пересечения сигнала с опорным значением, будет выполняться точнее.

Кроме перечисленных, важной проблемой является стабилизация по времени, как долгосрочная, так и краткосрочная. Изменение внутренней опорной тактовой частоты осциллографа добавляет шумы к захватываемому сигналу. Свойства внутреннего генератора, используемого в качестве источника опорной тактовой частоты, приводят к появлению долгосрочных изменений. Внутренний узел формирования частот увеличивает опорную частоту до частоты дискретизации. Его функционирование основано на фазовой автоподстройке частоты, что создает малые краткосрочные вариации частот и временных интервалов. Существуют и другие факторы, влияющие на точность измерений параметров джиттера.

ПРИМЕР ИЗМЕРЕНИЙ ДЖИТТЕРА

Рассмотрим пример типичного анализа джиттера с использованием прибора R&S RTO. Источник сигнала — выход цифровой тактовой частоты демонстрационной платы Rohde & Schwarz. Сигнал TTL (рис. 3) с номинальной частотой 10 МГц был подключен к активному несимметричному пробнику R&S®RT-ZS30, рассчитанному на частоты до 3 ГГц. Этот сигнал содержит возмущения, вызванные конструкцией и схемой платы.

Для удобства и в целях демонстрации для настройки измерений использовался мастер настройки Jitter Wizard опции RTO-K12. Она позволяет задать режимы и параметры измерений джиттера, а также режимы отображения результатов измерений. Остановимся на измерении в течение единичного периода сигнала с использованием кривой джиттера. После установки настроек измерений и вывода информации последняя была представлена в следующем виде (рис. 4). Важно отметить необходимость правильного выбора длины записи, увеличение которой позволяет

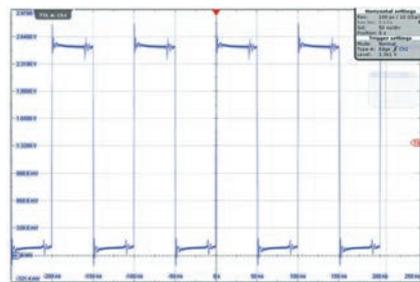


Рис. 3. Осциллограмма сигнала для исследований джиттера

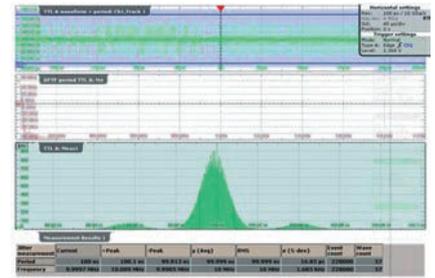


Рис. 4. Результаты измерений с использованием кривой джиттера

повысить точность измерений за счет статистического накопления.

Кривая джиттера периода выявляет два типа возмущений. В окрестностях основной линии с периодом 100 нс имеются небольшие возмущения порядка ± 40 пс. Есть также возмущения, встречающиеся время от времени, которые имеют величину около 100 пс. С другой стороны, становится ясно, что в масштабах всего времени захвата данных эти возмущения не являются преобладающими. Это указывает на то, что причиной таких возмущений являются перекрестные помехи, связанные с другими цифровыми сигналами данных. Возмущение величиной ± 40 пс приводит к получению трехмодальной функции плотности вероятности джиттера периода. Сигнал без возмущений дал бы одномодальную гауссовскую функцию плотности вероятности. Возмущения, вызванные внутренними перекрестными помехами, создают периодический джиттер. Функция плотности вероятности периодического джиттера включает три функции Гаусса с максимумами на -40 пс, 0 пс и $+40$ пс с амплитудным соотношением 1:10:1. Измеренное значение среднеквадратичного отклонения случайного джиттера составляет 16 пс.

Представленный пример иллюстрирует возможности приборов R&S RTO в части анализа джиттера, но отражает далеко не полностью возможности его анализа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в настоящей статье показана необходимость и оценены современные средства анализа джиттера в цифровых системах. Разработчики должны понимать важность практики таких исследований, в противном случае могут возникнуть нестабильные либо неприемлемые режимы функционирования. Для таких исследований следует использовать современное метрологическое обеспечение, например, осциллографы R&S RTO.

ЛИТЕРАТУРА

1. Определение и терминология сетей синхронизации. Женева. ITU-T, 1996. G.810. ☒

The present article contains the measurement aspects of the digital signal jitter characteristics by using R&S RTO oscilloscopes. You will read about the main jitter sources, analysis tools and their limitation as well as you will see an example of simple jitter analysis for a periodic signal.