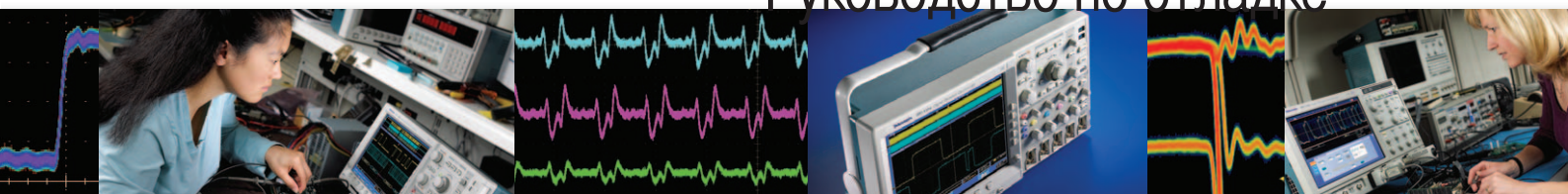


Цифровые устройства

Руководство по отладке



Оглавление

Введение	4
Прослеживание помех	4 - 7
Эффекты линии передачи сигнала	4
«Звон» и отражения	4
Колебания в шине заземления	5
Перекрестные помехи	6
Меры предосторожности	7
Обнаружение нарушений времени установки и фиксации	7 - 8
Задержка распространения	8
Стробированная задержка распространения	8
Тактируемая задержка распространения	8
Устранение конфликтов на шине	9 - 10
Синхронизация по моделям	10
Синхронизация по состоянию	10
Регистрация метастабильных состояний	10
Регистрация выбросов	12
Обнаружение нестабильности фронтов	12
Автоматизированные измерения и анализ	15
Анализ временных характеристик и нестабильности фронтов	15
Статистические измерения	15
Выводы	16

Введение

По мере роста быстродействия систем и уменьшения их размеров разработчикам схем становится все труднее обеспечить идеальные цифровые характеристики сигнала. Высокое быстродействие и плотная упаковка компонентов устройств приводят к ряду нежелательных электрических явлений, неблагоприятно влияющих на работу схемы. В конструировании быстродействующих устройств большую роль играют размещение компонентов, разводка дорожек, наличие помех и малых изменений сигнала. Например, в схемах, работающих на частотах гигагерцевого диапазона, индуктивность проводящих дорожек оказывает значительное влияние на работу устройства.

Разработчикам необходимо быстро обнаруживать и анализировать помехи, нарушения времени установки и фиксации, выбросы, метастабильные состояния, конфликты на шине, нестабильность фронтов и другие неполадки. Наблюдение высокочастотного цифрового сигнала и просмотр его в аналоговом представлении позволяет упростить поиск многих неполадок цифровых устройств.

Причина неполадки, проявляющейся в виде смещенного цифрового импульса, может скрываться в его аналоговых характеристиках. Аналоговые характеристики могут вызвать цифровые сбои, когда сигналы с низкой амплитудой преобразуются в неверные логические состояния или когда импульсы сдвигаются во времени из-за затянутого фронта нарастания. Просмотр потока цифровых импульсов одновременно с аналоговым представлением этих импульсов – первый шаг при поиске подобных неисправностей.

Цифровые осциллографы, например приборы серии DPO4000 или DPO7000, используемые в качестве средств отладки позволяют устранять неисправности при разработке быстродействующих встроенных систем. Следует иметь в виду, что при подробном просмотре вид сигналов может сильно измениться; точность измерений при этом повышается.

Прослеживание помех

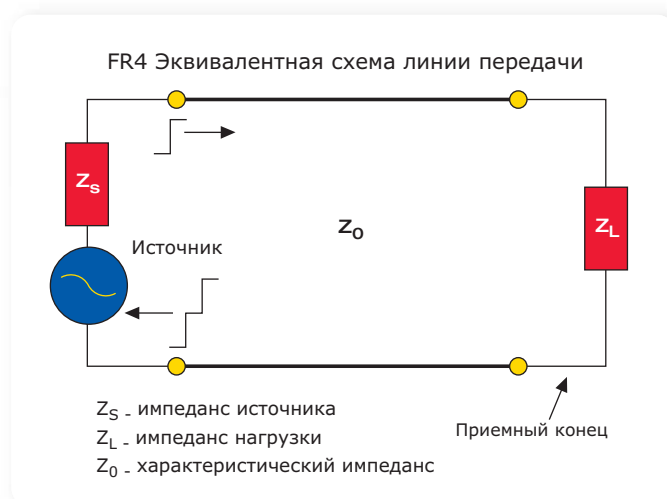
Помеха в цифровой системе – это любой нежелательный сигнал. Влияние линий передачи, колебания в шине заземления, отражения, перекрестные помехи, «звон», распространение волн – это проблемы помех, вызванные переходом к более компактным и быстродействующим схемам. Время нарастания логических сигналов уменьшается (скорость нарастания несколько В/нс), и инженерам часто приходится отлаживать устройства с временем нарастания сигнала менее 1 нс.

Эффекты линии передачи сигнала

Соединение рассматривается как линия передачи в том случае, когда распространение сигнала по линии и обратно занимает больше времени, чем завершение перехода (когда $2T_{prop} > T_{rise}$). Для типичной платы из материала FR4 скорость распространения сигнала примерно равна 15 см/нс. При времени нарастания сигнала 1 нс эффекты длинной линии проявляются на любой дорожке длиннее 7 см. Сигналы на передающем и приемном концах линии часто различаются из-за отражений и «звона». При измерении таких быстрых сигналов важно разместить пробник на приемном конце линии (Схема 1).

«Звон» и отражения

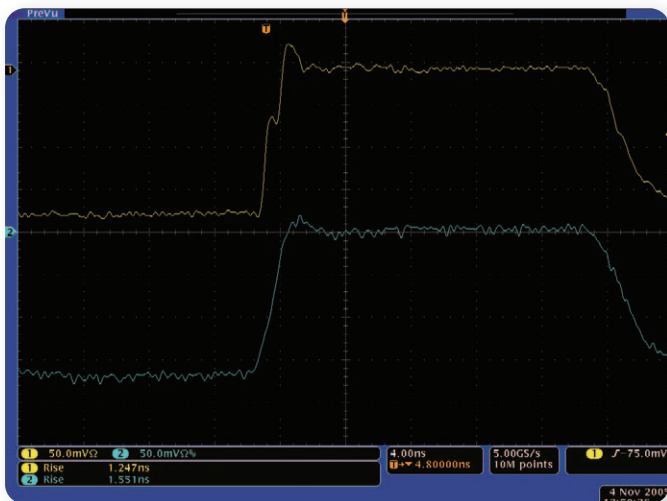
При недостаточном демпфировании резонансного контура в нем возникает «звон» и выбросы. Недостаточное шунтирование цепей питания, подключение к устройству длинных проводов питания и заземления и неудачное подключение пробника могут вызвать «звон» и выбросы. Отражения в несогласованных или незаглушенных линиях могут вызвать выбросы и другие нарушения формы фронта.



► **Схема 1.** Схема с эквивалентом передающей линии иллюстрирует возникновение отражений сигнала вследствие рассогласования импедансов.

Эти нарушения могут вызвать нежелательные изменения состояния или неопределенность во времени. В некоторых цифровых схемах нужные события повторяются редко. Цифровой осциллограф с соответствующей полосой пропускания и частотой дискретизации свободно захватывает эти неповторяющиеся события в реальном масштабе времени.

Вид пробников и способ их подключения влияют на качество измерения. Большая емкостная нагрузка может замедлить нарастание фронтов сигнала и скрыть некоторые неполадки, создавая вместо них другие. Прикосновение пробника к схеме может привести к исчезновению некоторых признаков. Индуктивность проводника заземления пробника и входная емкость пробника образуют последовательный колебательный контур; если резонансная частота этого контура не превышает полосы частот осциллографа, влияние контура проявляется в виде «звона».



► **Рис. 1.** На верхней осциллограмме (канал 1) виден нарастающий фронт длительностью 1,3 нс, захваченный осциллографом DPO4000 при полосе 1 ГГц. Нижняя осциллограмма (канал 2) идентична верхней, но здесь полоса пропускания ограничена до 250 МГц; такое изображение появилось бы на 250-МГц осциллографе. Отражение сигнала маскируется из-за недостаточно широкой полосы пропускания. (Заметим, что недостаточная ширина полосы пропускания приводит к погрешностям измерения времени нарастания сигнала.)

Чтобы увеличить резонансную частоту, необходимо укоротить проводник заземления и уменьшить входную емкость пробника. Емкостная нагрузка обычных пробников может достигать 10 – 15 пФ. У активных пробников это значение меньше. Например, входная емкость активного пробника TekVPI™ с полосой пропускания 2,5 ГГц <составляет всего 0,8 пФ. При такой емкости «звон» уменьшается, что позволяет удлинить проводники заземления.

Рис. 1 иллюстрирует значение полосы пропускания и частоты дискретизации для просмотра отражений. На сигнале в области нарастания перехода имеется отражение. Такой дефект тактового сигнала может вызвать неопределенность во времени (нестабильность фронтов) тактируемого выхода. Верхняя осциллограмма (канал 1) зарегистрирована осциллографом DPO4000 при частоте дискретизации 5 Гвыб/с и полосе пропускания 1 ГГц. Для имитации результата измерения осциллографом с относительно низкими характеристиками нижняя осциллограмма (канал 2) зарегистрирована при частоте выборки 5 Гвыб/с с фильтром 250 МГц. Чтобы обнаружить нарушения на логическом переходе с помощью цифрового осциллографа, необходимо обеспечить соответствующие значения частоты дискретизации и полосы пропускания.

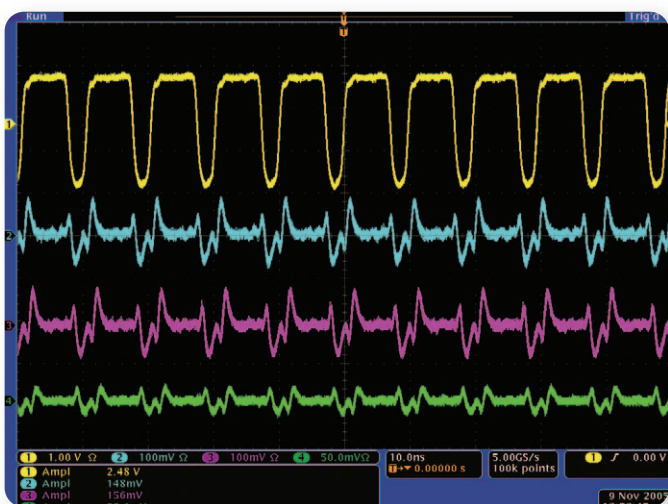


► **Рис. 2.** Колебания в шине заземления при переключении выхода на канале 1.

Колебания в шине заземления

Колебания в шине заземления – это смещение опорного уровня заземления, вызванное токовым выбросом в плоскости заземления. При синхронном переключении нескольких выходов устройства на заземление может поступать значительный переходной ток. Падение напряжения на соединительных проводниках, проводе заземления и пути возврата тока может вызвать колебание потенциала заземления внутри устройства относительно заземления системы. «Звон» или выбросы на переключаемых и непереключаемых выходах могут вызвать нежелательные логические переходы в других устройствах. Колебания в шине заземления могут даже вызвать сброс данных в устройстве.

На рис. 2 в канале 1 зарегистрирован сигнал с одного из выходов счетверенной микросхемы логического И 74LVC00. На один из входов каждого из трех элементов И счетверенной микросхемы подано напряжение питания +3,3 В, а один вход четвертого элемента И заземлен. На оставшиеся четыре входа микросхемы подан сигнал частотой 48 МГц. На канал 2 подается сигнал с четвертого логического элемента, который не переключается. Из-за колебаний в шине заземления на канале 2 появляются помехи размахом немного более одного вольта. Анализ сигнала в канале 2 показывает, почему колебания, соответствующие ниспадающему фронту сигнала в канале 1 больше колебаний, соответствующих нарастающему фронту в этом канале.



▶ **Рис. 3.** Пример фиксации перекрестной помехи с помощью синхронизации по фронту на осциллографе DPO4000 с полосой пропускания 1 ГГц. Высокочастотные импульсы в одном из нескольких параллельных проводников с нагрузкой 50 Ом (канал 1) порождают сильное излучение. Этот источник помехи создает наводки в соседних проводниках. Наводки ясно видны на каналах 2 и 3, подсоединенных к проводникам, ближайшим к источнику помехи. По мере удаления от проводника-источника уровень перекрестных помех уменьшается. Это видно по амплитуде помехи в канале 4, равной 32 мВ; этот канал подсоединен к проводнику-приемнику, наиболее удаленному от источника помехи.

Выход элемента И, один вход которого подключен к земле, соединен с заземлением практически напрямую, если не считать небольшой эквивалентной индуктивности. При переключении выходов остальных элементов И через них протекают токи, наводящие ток через эквивалентную индуктивность на выходе неперекрывающегося элемента И; поэтому на канале 2 появляется большой выброс. Заметим, что если элемент И с заземленным входом подсоединить к напряжению питания, большой выброс будет соответствовать нарастающему фронту на канале 1.

Перекрестные помехи

Этот вид помех часто встречается в цифровых устройствах там, где линии асинхронных сигналов проходят рядом с линиями тактирующих сигналов. Перекрестные помехи вызывают ложные логические переходы или затягивание фронтов тактовых импульсов, что приводит к ошибкам синхронизации или нарушениям времени установления и удержания. Положение ухудшается при уменьшении времени нарастания. Слишком длинный провод заземления может вызвать появление ложных перекрестных помех, поскольку длинные провода образуют большие контуры.

При наблюдении перекрестных помех на осциллографе необходимо учитывать число каналов, частоту дискретизации и ширину полосы. Для регистрации на цифровом осциллографе сигнала в реальном масштабе времени необходимо установить по всем каналам соответствующую частоту дискретизации.

Например, если имеется связь (емкостная или индуктивная) линии сигнала с быстрыми перепадами на схемной плате с ближайшими сигнальными проводниками, появляются перекрестные помехи.

При отладке следует принимать во внимание три вида перекрестных помех: индуктивные перекрестные помехи, синфазные помехи и дифференциальные помехи.

Индуктивные перекрестные помехи возникают, когда изменяется уровень сигнала, распространяющегося по линии (источнику помех); при этом возникает токовый выброс, порождающий магнитное поле. Этот импульс магнитного поля в свою очередь наводит токовый выброс в соседней линии (приемнике помех). При трансформаторной связи возникает два выброса напряжения противоположной полярности в прямом направлении и положительные выбросы в обратном направлении.

Синфазные помехи – это сумма однополярных напряжений в линии-приемнике, распространяющихся в направлении источника помехи. Она отображается в виде широкого импульса малой амплитуды, ширина которого соотносится с длиной линии. Амплитуда синфазной помехи не зависит от времени нарастания фронта импульса источника помехи. Она зависит от соотношения импедансов.

Дифференциальная помеха – это сумма двух импульсов противоположной полярности, зависящих от соотношения емкости и индуктивности. Распространяется в сторону первичного источника помехи. Эта помеха наблюдается в конце линии-приемника помехи в виде узкого выброса, длительность которого равна длительности фронта нарастания импульса в линии-источнике помехи. Чем короче время нарастания фронта в источнике, тем круче фронт нарастания, больше амплитуда импульса помехи и меньше его длительность. Величина дифференциальной помехи зависит от длины удвоенной линии. Поскольку перекрестная помеха распространяется вместе с фронтом импульса источника помехи, энергия дифференциальной помехи в линии-приемнике оказывается больше.



► **Схема 2.** На этой схеме дано определение времени установки ($T_{установки}$) и времени фиксации ($T_{фиксации}$) для тактируемой логической схемы. Время установки измеряется между точками 1 и 2. Время фиксации измеряется между точками 2 и 3.

Меры предосторожности

Осциллограф DPO4000 с частотой дискретизации 2 Гвыб/с по всем четырем каналам, полосой 500 МГц и активным пробником идеально подходит для обнаружения аналоговых эффектов.

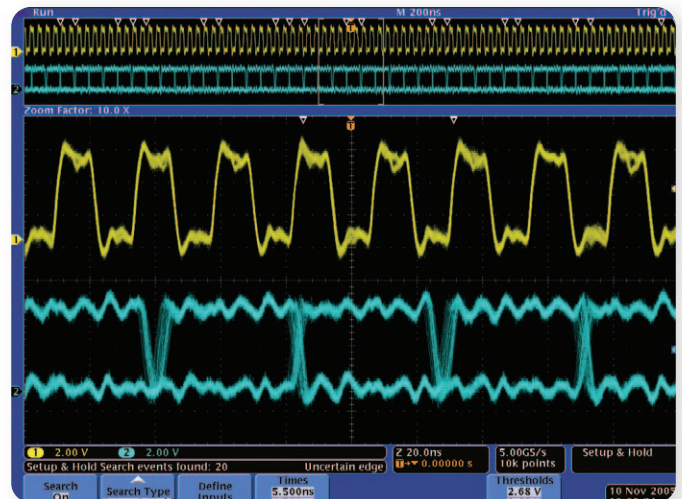
При разработке с цифровыми устройствами рекомендуется помнить о следующем:

- Пути распространения сигнала должны быть короткими.
- Эффекты передающей линии следует учитывать, когда задержка распространения в проводнике превышает половину времени нарастания.
- Плоскости питания и заземления, связанные эффективными шунтирующими конденсаторами, могут устранить многие проблемы, связанные со «звонами» и перекрестными помехами.
- При появлении неполадок убедитесь, что полоса пропускания и частота дискретизации по всем четырем каналам осциллографа достаточны для наблюдения указанных событий.

Поиск нарушений времени установки и фиксации

В цифровых системах имеются тактируемые логические устройства, от триггеров до микропроцессоров. Время установки и фиксации для каждого из этих устройств задается производителем.

С увеличением быстродействия цифровых систем уменьшается время установления данных перед приходом тактирующего сигнала. Время установки — это интервал перед приходом фронта тактирующего сигнала, в течение которого входной сигнал



► **Рис. 4.** Функции поиска и установки маркеров в осциллографе DPO4000 в сочетании с синхронизацией по нарушению времени установки и фиксации. Все нарушения времени установления и фиксации отмечены белыми незаполненными треугольниками в верхней части экрана; заданные пользователем величины времени установки и фиксации равны соответственно 5,5 нс и 4,5 нс.

должен быть стабильным (достоверным). Время фиксации — интервал после прихода фронта тактирующего импульса, на котором данные на входе устройства должны оставаться стабильными; в этом случае данные на выходе устройства будут достоверными. См. временную диаграмму установки и фиксации на схеме 2.

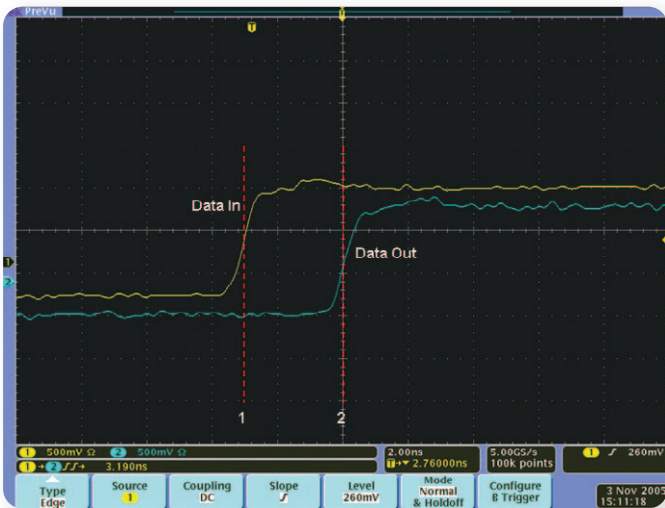
На рис. 4 время установки отсчитывается между точкой 1 на осциллограмме данных и точкой 2 на осциллограмме тактового сигнала. Минимальное время установки, заданное производителем, равно 5 нс. Время фиксации отсчитывается между точкой В на тактовом сигнале и точкой С на осциллограмме данных. Минимально допустимое время фиксации равно 4 нс.

Если сигнал изменяется в течение времени установки и фиксации, появляется сбой, то есть нарушение времени установки и фиксации. При наличии перекрестных помех и отражений в тактовом сигнале и сигнале данных целостность этих сигналов нарушается и появляются указанные нарушения. По мере увеличения быстродействия цифровых устройств время установки и фиксации уменьшается. Это затрудняет отладку временных соотношений.

При нарушении времени установки и фиксации на выходе устройства могут появиться непредсказуемые выбросы, либо состояние выхода может вообще не измениться. Синхронизация цифрового осциллографа по установке/фиксации позволяет синхронизировать прибор по значениям времени установки и фиксации между тактовым сигналом и сигналом данных, поступающими на входы двух каналов осциллографа. При просмотре этих сигналов на цифровом осциллографе можно выполнить точные измерения нарушений времени установки и фиксации.

Руководство по отладке цифровых систем

▶ Начальное руководство



▶ **Рис. 5.** Функция измерения времени задержки в осциллографе DPO4000 позволяет измерять и отображать время задержки распространения от нарастающего фронта сигнала входных данных (точка 1) до нарастающего фронта сигнала выходных данных (точка 2); результат равен 3,190 нс.

Задержка распространения

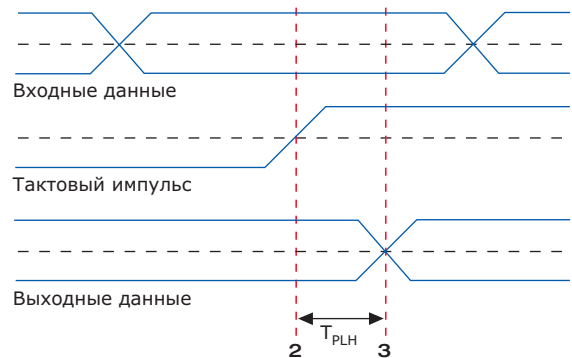
На распространение сигнала от одной точки системы к другой, например от входа схемы до ее выхода или от выхода одного устройства до входа другого, затрачивается определенное время. Это время – задержка распространения в сигнальном тракте. Обычно для схем задается два разных значения задержки распространения, в зависимости от полярности перепада входного сигнала. Эти параметры задаются в виде значений t_{plh} (задержка при переключении от низкого уровня к высокому), t_{phl} (задержка при переключении от высокого уровня к низкому).

Стробированная задержка распространения

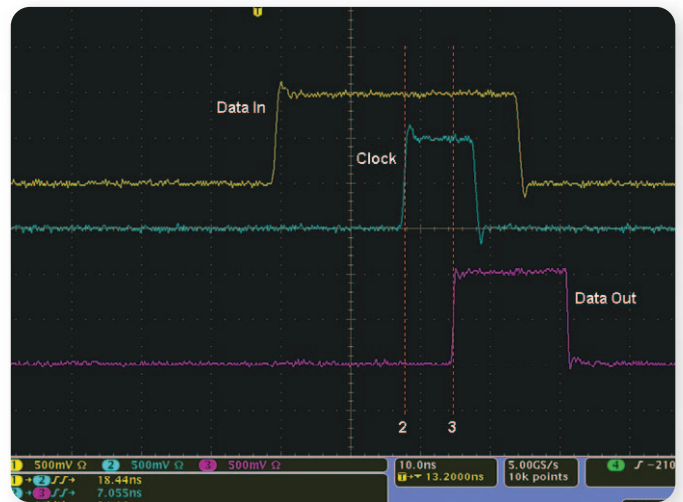
Для логического элемента задержкой распространения называется время прохождения сигнала от входа до выхода элемента. Задержка распространения для устройства, осциллограммы сигналов которого приведены на рис. 5, измеряется между сигналом входных данных (точка 1) и сигналом выходных данных (точка 2).

На рис. 5 приведены осциллограммы входного и выходного сигналов, зарегистрированные с помощью осциллографа DPO4000. На пробник канала 1 поступает сигнал входных данных, на пробник канала 2 – сигнал выходных данных. С помощью функции измерения задержки выбирается измерение времени от первого фронта нарастания по каналу 1 до первого фронта нарастания по каналу 2. На экране цифрового осциллографа отображается измеренная задержка распространения, равная 3,190 нс.

Задержка распространения тактового импульса



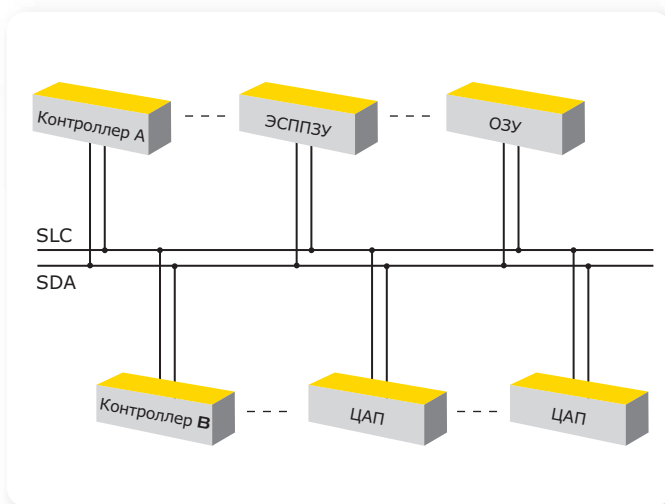
▶ **Схема 3.** Эта временная диаграмма иллюстрирует время задержки распространения перепада с высокого уровня в низкий (T_{PLH}), для тактируемой логической схемы это время измеряется между точкам 2 и 3.



▶ **Рис. 6.** Универсальная функция измерения времени задержки в осциллографе DPO4000 позволяет измерять тактируемую задержку распространения – время между нарастающим фронтом сигнала выходных данных (точка 3) и нарастающим фронтом тактового сигнала (точка 2). Тактируемая задержка распространения равна 7,055 нс.

Тактируемая задержка распространения

В тактируемой схеме, например в триггере или «защелке», тактируемой задержкой распространения называется время, проходящее между активным фронтом тактового импульса и изменением состояния на выходе схемы, то есть задержка распространения от тактового входа CLK до выхода Q. Максимальная задержка распространения триггера, временная диаграмма которого изображена на схеме 3, при переходе от низкого уровня к высокому (T_{PLH}) равна 8 нс. Иначе говоря, не позже чем через 8 нс после перехода тактового сигнала к высокому уровню состояние выхода изменится на состояние сигнала на входе данных.



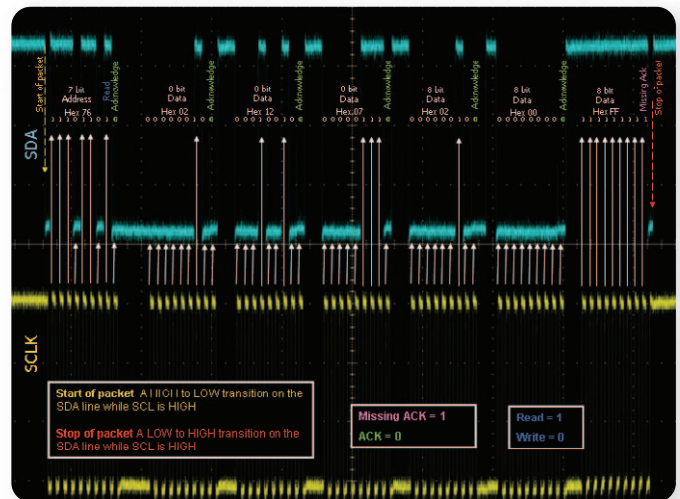
► **Схема 4.** Схема шины I²C с подключенными к ней различными устройствами; выбор нужного устройства осуществляется по уникальному идентификатору адреса, содержащемуся в каждом из передаваемых последовательных пакетов.

На экране, изображенном на рис. 6, отображены данные, зарегистрированные осциллографом DPO4000. Частота дискретизации была равна 5 Гвыб/с, канал 1 подсоединен к входу данных, а канал 2 – к выходу данных. Цифровой осциллограф синхронизируется по нарастающему фронту сигнала на входе данных, а канал 2 подсоединен к выходу тактового сигнала.

Устранение конфликтов на шине

Такие устройства как цифровые процессоры сигналов (DSP), ОЗУ, ЭСПЗУ, ППЗУ, ПЗУ, АЦП и ЦАП, а также схемы ввода-вывода обычно обмениваются информацией с окружающими устройствами по низкоскоростным и высокоскоростным последовательным шинам. Конфликт на шине – один из примеров, показывающих, что отладка последовательных шин сложнее, чем отладка параллельных. На схеме 4 изображены стандартная конфигурация и протокол низкоскоростной шины I²C, разработанной компанией Philips Semiconductor.

В большинстве цифровых осциллографов, например в приборах серий DPO4000 и DPO7000, имеется синхронизация по сочетанию логических сигналов, называемая синхронизацией по модели или по состоянию. Рис. 7 иллюстрирует процедуру побитового декодирования последовательной шины I²C; сначала необходимо найти переход, обозначающий начало пакета, затем первые семь битов первого байта, составляющие адрес, затем найти восьмой бит первого байта, определяющий запись-считывание, и декодировать до восьми байт данных. Из-за коррекции битов некоторые последовательные шины, например шина CAN, вообще не поддаются декодированию вручную.



► **Рис. 7.** Отображение на цифровом осциллографе сигналов шины I²C для ручного декодирования. Адрес равен 76, операция — чтение.



► **Рис. 8.** Синхронизация осциллографа DPO4000 по шине I²C осуществляется по выбранному адресу (76) для чтения или записи. Автоматическое декодирование каждого пакета устраняет необходимость в ручном декодировании, снижает вероятность ошибки и экономит время.

Дополнительные возможности синхронизации осциллографа DPO4000 по шинам I²C, SPI и CAN позволяют устранять конфликты, характерные для этих шин, при скоростях обмена до 10 Мбит/с. Используя эти способы синхронизации, можно настраивать нужные сочетания сигналов на шине. Например, пусть требуется синхронизироваться на шине I²C по началу или концу пакета, по типу кадра (данные, дистанционный, ошибка или перегрузка), по стандартному или расширенному идентификатору и даже по отсутствию подтверждения. Осциллограф DPO4000 позволяет синхронизироваться по наиболее распространенной информации пакетов и выполнять ее поиск.

Руководство по отладке цифровых систем

▶ Начальное руководство



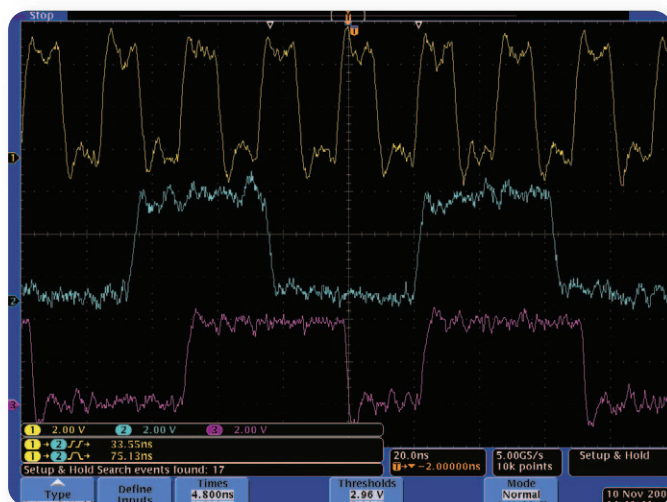
▶ **Рис. 9.** На экране цифрового осциллографа отображаются временные параметры для запуска по модели для устройства. При переходе сигналов в каналах 2 и 3 на высокий уровень на входной линии (канал 3) должен быть высокий уровень. При установке низкого уровня для канала 3 обнаруживается неполадка в виде дополнительной задержки.

Синхронизация по модели

Модель становится истинной при появлении заданного сочетания логических уровней, сохранении его в течение всего события. Пользователь может выбрать синхронизацию цифрового осциллографа по наступлению истинности модели (началу выполнения набора условий) или по наступлению ее ложности (прекращению выполнения набора условий).

Синхронизация по состоянию

В синхронных системах (в которых применяются системные тактовые сигналы), можно задавать синхронизацию по состояниям. В уже использованном примере шины заменим приемный буферный элемент на буфер с защелкой. На рис. 9 изображена установка состояний входов устройства при синхронизации по модели. Для канала 3 установлен низкий уровень. Для каналов 1 и 2 установлен высокий уровень. Фиксируется неправильное состояние; обнаруживается неполадка, состоящая в слишком большой задержке сигнала по каналу 3. Для правильной работы защелки необходимо, чтобы при переходе каналов 1 и 2 на высокий уровень на входной линии канала 3 был высокий уровень. Такой подход можно применять только в тех системах, где сигналы управления различных устройств и адресация шин синхронизируются главным тактовым сигналом.

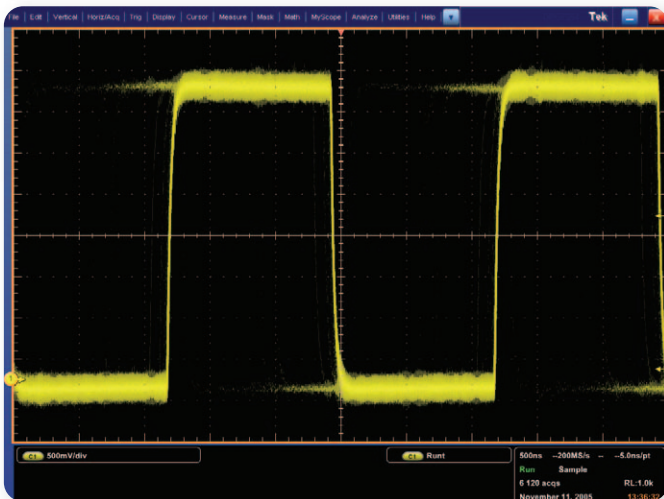


▶ **Рис. 10.** С помощью синхронизации осциллографа DPO4000 по нарушениям времени установки и фиксации, а также функции поиска и маркировки обнаруживаются метастабильные состояния, отмеченные белыми треугольниками в верхней части экрана. Канал 1 – тактовый сигнал, канал 2 – сигнал данных. Канал 3 – метастабильный выход (Q) D-триггера-защелки.

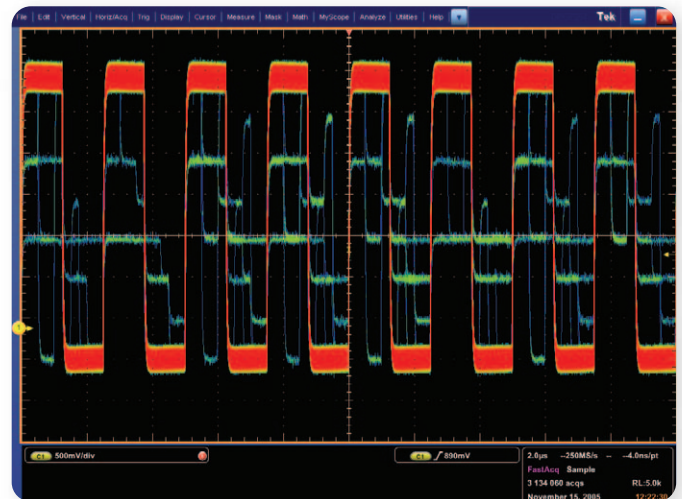
Регистрация метастабильных состояний

Метастабильность проявляется в виде неопределенных или нестабильных состояний данных. При этом в выходном сигнале могут появиться выбросы, ведущие к неполадкам. Обычно такие состояния появляются редко, что затрудняет обнаружение и фиксацию подобных явлений. Метастабильные состояния могут появиться из-за нарушений времени установки и фиксации на входе схем с защелками, схожих с D-триггером, осциллограммы которого изображены на рис. 10.

На рис. 11 изображены сигналы данных (DATA) и тактов (CLOCK) при асинхронном запуске триггера. Иногда из-за нарушения времени установки и фиксации нарастающий фронт тактового сигнала совпадает с изменением состояния данных. При этом состояние выхода триггера может либо сохранить исходное значение, либо измениться в соответствии с изменением данных, либо «зависнуть» между этими двумя состояниями. Во время этого кратковременного «зависания» триггер становится метастабильным, а на его выходе (Q или /Q) наблюдается случайный сигнал.



► **Рис. 11.** На цифровом осциллографе сигналы отображаются в их подлинном виде, что позволяет проследить за влиянием выбросов на работу устройства. Благодаря большому послесвечению, в верхней части экрана DPO7000 отображаются весьма кратковременные выбросы сигнала. На экране с послесвечением фиксируется визуальная история сигнала.



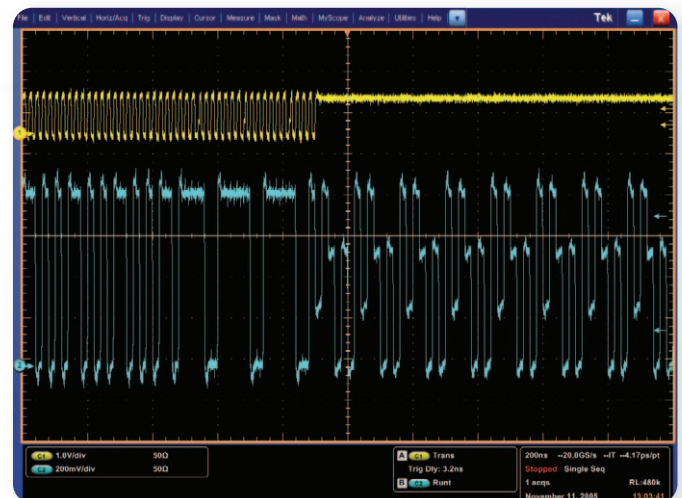
► **Рис. 12.** В режиме быстрой регистрации (FastAcq) осциллографа DPO7000 нетрудно обнаружить потенциальные ошибки в виде импульсов недостаточной высоты и ошибочных переходов.

На рис. 13 триггер не может захватить данные, возвращающие его в предыдущее состояние. Хотя такие состояния не обнаруживаются с помощью обычной синхронизации, синхронизация по состояниям позволяет надежно фиксировать метастабильные состояния, в данном случае – переход к импульсу недостаточной высоты. В синхронизации по переходу и по импульсам недостаточной 1 высоты для захвата метастабильных сигналов используется условие двойного порога по амплитуде.

Обнаружение метастабильности, как и устранение других трудных проблемы во время отладки, облегчается при использовании сложных видов синхронизации. Система синхронизации Pinpoint в цифровом осциллографе DPO7000 предоставляет один из самых полнофункциональных механизмов синхронизации для отладки цифровых систем, поскольку может использоваться во всей ширине полосы пропускания осциллографа. Характеристики и функции системы Pinpoint позволяют обнаруживать трудноуловимые события в прототипах устройств.

Регистрация выбросов

Выброс – общий термин, обозначающий любое отклонение от идеальной формы цифрового сигнала. Выбросы – очень узкие и крутые случайные импульсы, которые могут интерпретироваться в системе как изменения логического состояния. Выбросы порождают много разнообразных ошибок и с трудом поддаются обнаружению. Их влияние на работу системы непредсказуемо. Большинство неполадок в системе проявляется в виде выброса на одном или нескольких сигналах. Часто выбросы служат

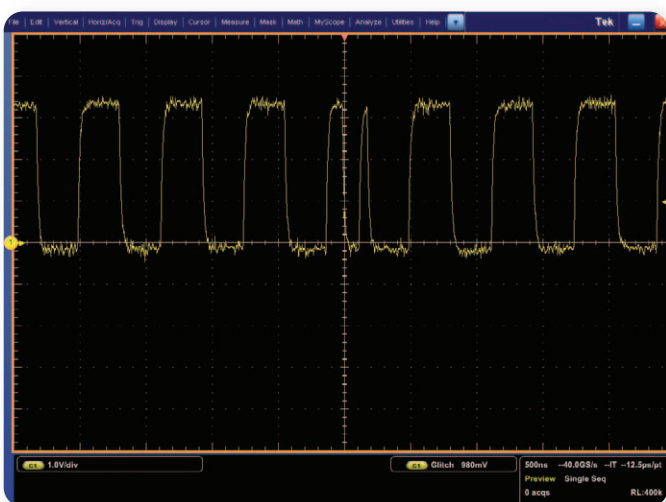


► **Рис. 13.** Система синхронизации Pinpoint™ в осциллографе DPO7000 позволяет применять сложные виды синхронизации как по событию В, так и по событию А. Чтобы выделить два последовательных неудачных перехода, событие В задается аналогично событию А. Не имеет значения, происходит ли событие В сразу после события А или существенно позже. В любом случае запускается регистрация данных. Логические импульсы недостаточной высоты никогда не пересекают логические уровни, по которым определяются допустимые импульсы.

первым признаком различных сбоев устройства, включая шумы, логические гонки, неправильное согласование нагрузок, ошибки буферных усилителей, перекрестные помехи, нарушение времени установки и фиксации и другие нарушения временных соотношений.

Руководство по отладке цифровых систем

► Начальное руководство

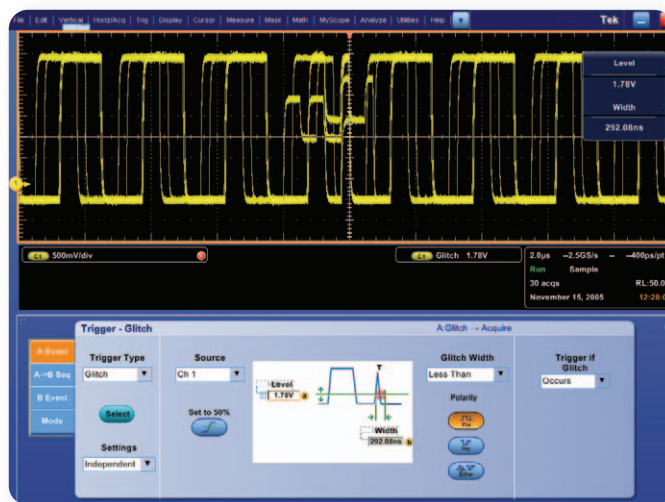


► **Рис. 14.** Синхронизация осциллографа DPO7000 по выбросам позволяет фиксировать редкие метастабильные состояния на выходе (Q) D-триггера.

Крутые фронты цифровых сигналов содержат высокие частоты; поэтому необходимо соответствующее согласование нагрузок проводников на печатной плате устройства. Из-за крутых фронтов увеличиваются переходные токи; в результате увеличиваются динамические токи, приводящие к появлению колебаний в шине заземления или выбросов в шине питания. Кроме того, из-за крутых фронтов увеличиваются перекрестные помехи. Проводники на печатной плате, которые ранее рассматривались как цепи с сосредоточенными параметрами, теперь превратились в передающие линии, требующие соответствующего согласования нагрузки.

При неправильной работе схемы разумно будет начинать отладку с поиска выбросов. Чтобы рассмотреть выбросы, рекомендуется сравнить аналоговое и цифровое представления сигнала на цифровом осциллографе. Большинство неполадок проявляется в виде выбросов по меньшей мере в одном сигнале, а часто и в нескольких.

Например, на цифровом осциллографе могут отображаться искажения нарастающего и ниспадающего фронтов цифрового импульса. Нарастающий фронт недостаточно медленный, чтобы вызвать логический переход; поэтому выброс не появляется. С помощью цифрового осциллографа, например DPO7000, с синхронизацией по длительности импульса можно, захватывая такие периодически появляющиеся выбросы, проследить источник неполадки.



► **Рис. 15.** Пока цифровой осциллограф не регистрирует данные, выбросы могут остаться незамеченными. При увеличенной частоте обновления сокращается время, необходимое для захвата выбросов.

Обнаружение нестабильности фронтов

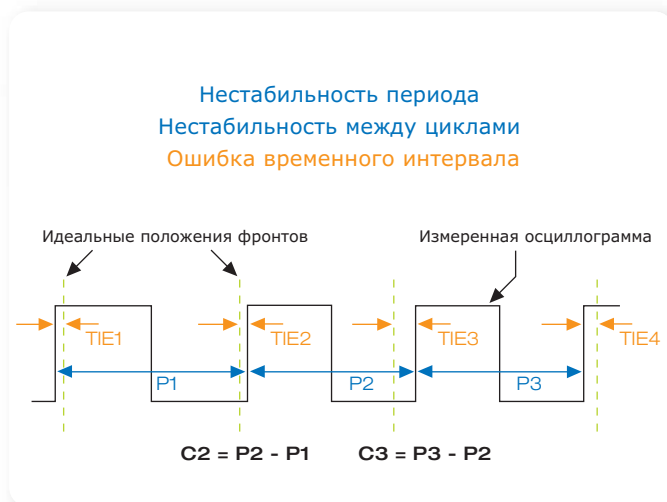
Нестабильностью фронтов называются нежелательные изменения временных соотношений в любой последовательности тактовых импульсов или сигналов данных. Нестабильность фронтов проявляется во всех электрических системах, в которых для представления информации о временных соотношениях используются перепады напряжения. Это кратковременные отклонения цифрового сигнала от его идеального положения во времени. Нестабильность фронтов, как случайный процесс, снижает быстродействие системы и мешает отладке.

Быстрые изменения временных соотношений, влияющие на период или фазовый сдвиг соседних или отдаленных фронтов импульсов, вызывают нестабильность фронтов. Проще говоря, нестабильность – это отклонение фронтов от «правильного» положения во времени.

Работает три типовых способа измерения нестабильности фронтов по осциллограмме: нестабильность периода, нестабильность между циклами и нестабильность временного интервала. На временной диаграмме (схема 5) показано, как соотносятся между собой эти измерения.

Нестабильность за период – измеряется в каждом периоде тактового импульса на осциллограмме. Если осциллограф синхронизируется по первому фронту одного периода, при этом на втором фронте определяется нестабильность за период.

На схеме 5 изображен тактовый сигнал с временной нестабильностью. Пунктирными линиями обозначены идеальные положения фронтов, соответствующие сигналу без нестабильности.



► **Схема 5.** Тактовый сигнал с нестабильностью фронтов. Пунктирными линиями обозначены идеальные положения фронтов, соответствующие сигналу без нестабильности.

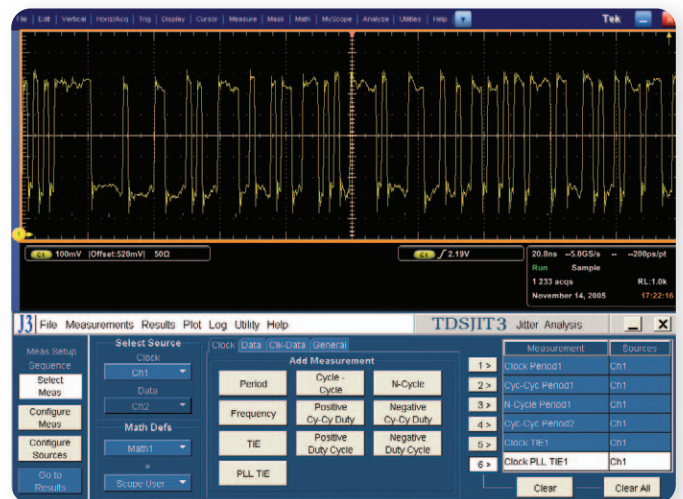
Нестабильность между циклами определяет величину изменения периода между двумя соседними периодами тактового сигнала.

Нестабильность между циклами, обозначенная на схеме 5 величинами C2 и C3, показывает, насколько изменяется период тактового сигнала между двумя циклами. Как видно, нестабильность между циклами можно определить, вычислив производную первого порядка от нестабильности за период.

Это измерение может представлять интерес постольку, поскольку оно отображает быстрые динамические изменения, которым может быть подвержена система ФАПЧ в схеме восстановления тактового сигнала. Для вычисления нестабильности за период и нестабильности между периодами не требуются ни сведения об идеальном положении фронтов, ни опорная частота.

Ошибка временного интервала (TIE) показывает, насколько отклоняется каждый активный фронт тактового сигнала от своего идеального положения. Для этого измерения необходимо либо знать идеальное положение фронтов, либо оценить его. Значение этого измерения в том, что оно показывает эффект накопления малой нестабильности периода с течением времени.

Нестабильность периода, отображенная в измерениях P1, P2 и P3 на схеме 5, это просто отсчеты длительности каждого периода тактового сигнала на осциллограмме. Это самое простое и непосредственное из возможных измерений.



► **Рис. 16.** С помощью приложения TDSJIT3 для исследования сложных сигналов, работающего на осциллографе DPO7000, можно быстро выполнять тонкие измерения с анализом нестабильности фронтов при разработке устройств.

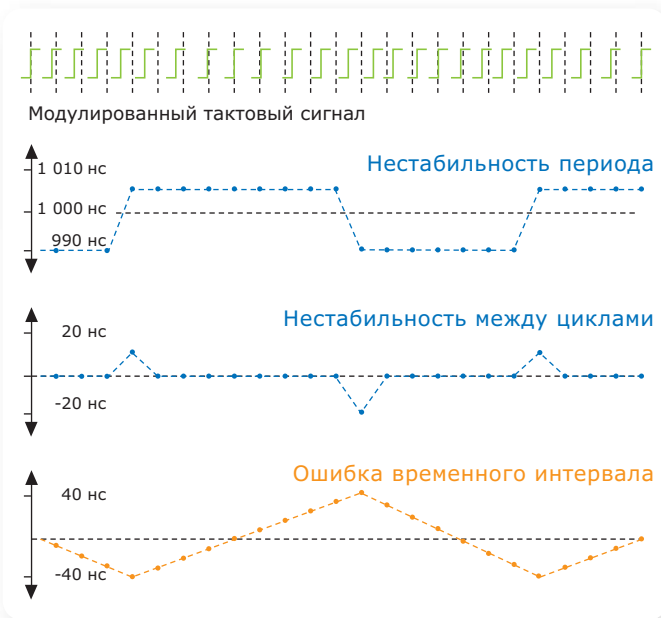
Значение размаха можно оценить, настроив цифровой осциллограф на отображение немного более чем одного полного периода тактового сигнала и установив неограниченное послесвечение. Если осциллограф синхронизируется по первому фронту, нестабильность периода проявляется на втором фронте, как показано на схеме 5.

Ошибка временного интервала показана на схеме 5 в виде измерений TIE1 – TIE4. Ошибка временного интервала (TIE) показывает, насколько сильно каждый активный фронт тактового сигнала отклоняется от идеального положения. Для выполнения этого измерения требуется знать или оценить идеальное положение фронтов. Непосредственное наблюдение ошибки временного интервала (TIE) на осциллографе, не оснащенном средствами восстановления тактовой частоты или цифровой обработки сигнала, затруднено.

Кроме того, ошибку временного интервала можно измерить путем интегрирования нестабильности периода после вычитания из каждого отсчета номинального (идеального) значения периода. Измерение ошибки временного интервала позволяет выявить эффект накопления малых значений нестабильности периода с течением времени. Если ошибка временного интервала достигает значения $\pm 0,5$ одиночного интервала, глазковая диаграмма закрывается, и в приемнике происходят ошибки в битах.

Руководство по отладке цифровых систем

▶ Начальное руководство

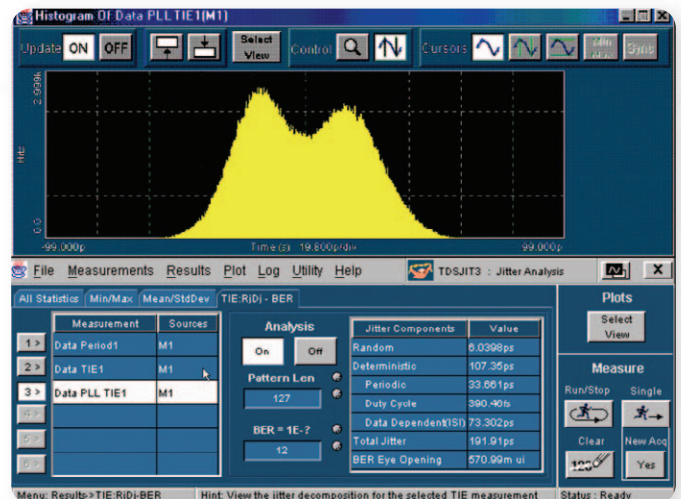


▶ **Схема 6.** Сопоставление на одной временной диаграмме трех видов измерения нестабильности фронтов: нестабильности периода, нестабильности между циклами и нестабильности временного интервала.

На схеме 6 сравниваются все три способа измерения нестабильности фронтов на одной осциллограмме. В этом примере номинальный период сигнала равен 1 мкс, а фактический изменяется с чередованием восьми периодов по 990 нс и восьми периодов по 1010 нс. В нестабильности фронтов присутствует как случайная, так и детерминированная составляющая. Из-за наличия случайной компоненты желательно представлять нестабильность с помощью обычных статистических приемов. Для получения значимых и повторяющихся результатов измерений используются такие параметры как среднее значение, среднеквадратичное (стандартное) отклонение и размах, а также определители, например доверительный интервал.

Детерминированная нестабильность (Dj) – это повторяющаяся и предсказуемая нестабильность временных соотношений. Размах детерминированной нестабильности (Dj) ограничен, и эти границы можно наблюдать или предсказать с высокой степенью уверенности по относительно небольшому числу наблюдений. Детерминированная нестабильность обусловлена следующими причинами:

- ▶ Периодическая нестабильность (Pj), вызванная такими источниками периодического шума как блоки питания, близко расположенные генераторы колебаний и в некоторых случаях – перекрестные помехи из близлежащих шин.

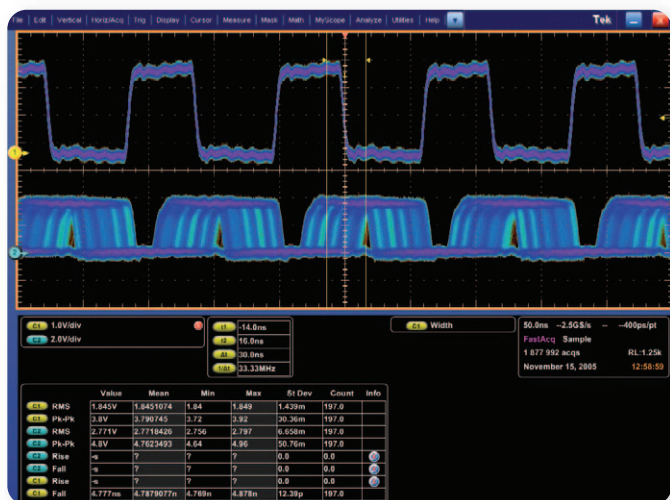


▶ **Рис. 17.** Осциллограф DPO7000 с приложением TDSJIT3 для анализа нестабильности фронтов обеспечивает измерение суммарной нестабильности фронтов сигнала данных, приблизительно равной 192 пс ($T_j = D_j + 2Q(\text{BER}) * R_j$), где $Q(10E-12) = 7$. На гистограмме измерений ошибки временного интервала схемы ФАПЧ представлено в графическом виде статистическое распределение данных сигнала.

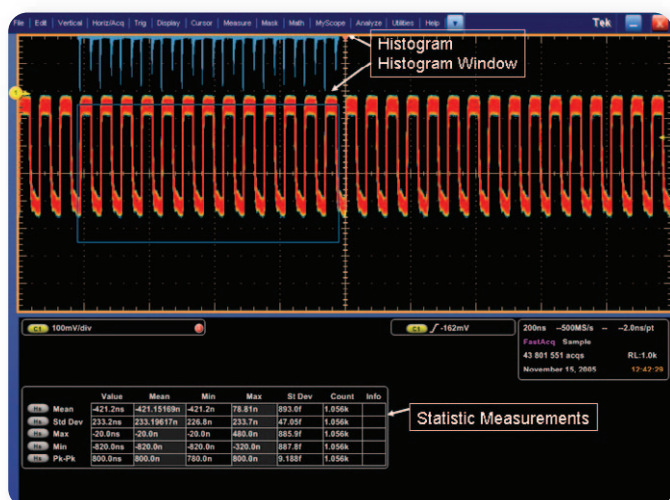
- ▶ Отклонения скважности (DCD) вызываются разбалансировкой уровней нагрузки выходного каскада или влиянием изменений температуры внутри передающего устройства.
- ▶ Межсимвольная интерференция (ISI), называемая также нестабильностью данных (DDj), вызывается потерей частот на тракте прохождения сигнала, по большей части из-за потерь в соединениях и кабелях.

Случайная нестабильность (Rj) – это неупорядоченный и непредсказуемый шум. Основным источником случайного шума в электрических цепях является тепловой шум (шумы Джонсона и шумовые выбросы). Случайный шум считается распределенным по закону Гаусса без ограничения размаха основного распределения, то есть чем больше выборок взято, тем больше измеренное значение размаха.

Периодическая нестабильность (Pj) циклически повторяется. Поскольку периодические колебания раскладываются по синусоидам в гармонический ряд Фурье, такая нестабильность иногда называется синусоидальной нестабильностью. Периодическая нестабильность обычно вызывается внешними источниками детерминированных помех, например помехами от импульсных блоков питания или от мощных местных радиосигналов. Кроме того, такие помехи могут быть вызваны нестабильностью системы ФАПЧ в схеме восстановления тактовых сигналов.



► **Рис. 18.** На осциллографе DPO7000 одновременно выполняется до восьми измерений, включая измерения времени нарастания, времени спада и размаха. Для получения результатов достаточно установить курсоры в нужные точки.



► **Рис. 19.** В режиме быстрой регистрации FastAcq осциллографа DPO7000 с применением статистических измерений на экране отображается относительно стабильный тактовый сигнал на канале 1. В выбранной и включенной области гистограммы отображаются данные статистического анализа, на основании которых можно удостовериться в соответствии устройства предъявляемым требованиям.

Нестабильность данных (DDj) – это любая нестабильность, коррелированная с последовательностями в потоке бит данных. Нестабильность данных часто обусловлена частотной характеристикой кабеля или устройства. Нестабильность данных называют также нестабильностью модели (PDj). Она является измеримым результатом межсимвольной интерференции (ISI).

Отклонения скважности (DCD) – это изменения скважности относительно номинального значения, равного 50%. Имеется две типичных причины отклонений скважности: отличие наклона нарастающих фронтов от наклона ниспадающих фронтов или отклонение порога срабатывания для сигнала в верхнюю или нижнюю сторону от номинального положения вследствие сдвига среднего значения сигнала по постоянному току.

Суммарная нестабильность при частоте ошибочных битов (Tj @ BER) – оценка размаха нестабильности при заданной пользователем частоте появления ошибочных битов. Кроме того, по частоте ошибочных битов (BER) в сочетании с единичным интервалом оценивается раскрытие глазковой диаграммы, которое отображается на U-образной кривой частоты ошибочных битов.

Автоматические измерения и анализ

Автоматические измерения и статистический анализ высокочастотных сигналов позволяют добиться лучшего понимания процессов при отладке устройства. Многочисленный

средства автоматических измерений и статистического анализа, имеющиеся в современных цифровых осциллографах, обеспечивают гибкость и производительность, необходимые для выполнения отладки. Одновременное отображение четырех или восьми осциллограмм позволяет сравнивать осциллограммы и прокручивать их для исследования из соотношений.

Автоматизированные измерения, запускаемые нажатием кнопки, открывают новые способы исследования неполадок, включающие сбор статистики измерений, определение опорных уровней и использование возможностей осциллографа для выполнения задач отладки. После регистрации и сопоставления нескольких экранных измерений цифровой осциллограф отображает статистику и возможные отклонения по каждому из них.

Это позволяет установить, работают ли компоненты в заданных пределах или их допуски изменились и нуждаются в коррекции. К числу типичных автоматических измерений, позволяющих ускорить отладку, относятся измерения длительности импульсов, выбросов, скважности размаха, а также более сложные статистические измерения, например измерение минимума, максимума и среднеквадратического значения (Root Mean Square, RMS).

Автоматический анализ временных соотношений и нестабильности фронтов

Автоматические измерения позволяют набрать статистическую информацию о нестабильности осциллограммы. Например, можно использовать это измерение для того, чтобы оценить характеристики цепи фазовой автоподстройки частоты и определить, находится ли период нестабильности кварцевого резонатора в заданных пределах или просмотреть окно достоверных данных по времени нарастания, скважности и длительности импульса на выходе компонента.

Статистические измерения

Цифровые осциллографы позволяют также производить статистическую оценку таких измерений как нестабильность фронтов или метастабильность. При отладке используются следующие типичные статистические измерения:

- ▶ Среднее значение – среднее арифметическое периода тактового сигнала. Это величина, обратная частоте.
- ▶ Среднеквадратичное отклонение – усредненная величина отклонения результата измерения от среднего значения. Эта величина применяется при исследовании гауссовских процессов, в которых распределение случайной величины задается средним значением и среднеквадратичным отклонением.
- ▶ Максимальное и минимальное значения и размах – величины, наблюдаемые на интервале измерения. Размах вычисляется как разность максимального и минимального значений.
- ▶ Гистограмма – график измеренных значений в наборе данных в зависимости от частоты, с которой встречается каждое из значений. Этот график не отображает порядка таких событий как нестабильность фронтов, но дает хорошую приблизительную оценку вероятности данного события.

Выводы

Цифровые осциллографы серий DPO4000 и DPO7000, применяемые в качестве средств отладки, позволяют упростить поиск неисправностей при разработке встроенных систем. Цифровые осциллографы повышают производительность разработки, проверки и отладки устройств. Такие функции, как непрерывная регистрация осциллограмм, обеспечивают получение углубленных сведений о шумах, выбросах, перекрестных помехах и других аналоговых параметрах, влияющих на логические состояния, длительность фронтов, время установки и фиксации и искажение идеальной формы импульсов.

Как связаться с корпорацией Tektronix:

АСЕАН, Океания (65) 6356 3900
Австрия +41 52 675 3777
Балканский полуостров, Израиль,
Южная Африка и юг Восточной Европы +41 52 675 3777
Бельгия 07 81 60166
Бразилия и Южная Америка 55 (11) 3741-8360
Канада 1 (800) 661-5625
Центр Восточной Европы, Украина, Прибалтика +41 52 675 3777
Центральная Европа и Греция +41 52 675 3777
Дания 80 88 1401
Финляндия +41 52 675 3777
Франция 33 (0) 1 69 86 81 81
Германия +49 (221) 94 77 400
Гонконг (852) 2585-6688
Индия (91) 80-22275577
Италия +39 (02) 25086 1
Япония 81 (3) 6714-3010
Люксембург +44 (0) 1344 392400
Мексика, Центральная Америка,
страны Карибского бассейна 52 (55) 5424700
Ближний Восток, Азия и Северная Африка +41 52 675 3777
Нидерланды 090 02 021797
Норвегия 800 16098
Китайская Народная Республика 86 (10) 6235 1230
Польша +41 52 675 3777
Португалия 80 08 12370
Корейская Республика 82 (2) 528-5299
Россия, СНГ, Прибалтика +7 (495) 7484900
Южная Африка +27 11 254 8360
Испания (+34) 901 988 054
Швеция 020 08 80371
Швейцария +41 52 675 3777
Тайвань 886 (2) 2722-9622
Великобритания и Ирландия +44 (0) 1344 392400
США 1 (800) 426-2200

Жителям других стран следует обращаться в компанию Tektronix, Inc.: 1 (503) 627-7111
Последнее обновление: 12 май 2006 г.

Дополнительные сведения

Корпорацией Tektronix создано всеобъемлющее, постоянно пополняемое собрание руководств по приложениям, технических описаний и других ресурсов, помогающих инженерам в использовании передовых технологий. Посетите наш веб-узел по адресу www.tektronix.com



© Tektronix, 2006. Все права защищены. Изделия корпорации Tektronix защищены патентами и патентными заявками в США и других странах. Приведенные в данном руководстве сведения заменяют любые ранее опубликованные. Права на изменение технических характеристик и цен сохранены. TEKTRONIX и ТЕК являются зарегистрированными товарными знаками Tektronix, Inc. Остальные упомянутые торговые названия являются знаками обслуживания, товарными знаками или зарегистрированными товарными знаками соответствующих владельцев.

01/06 DM

55U-19175-0

Tektronix
Enabling Innovation