

# ИЗМЕРЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ И ДЖИТТЕРА ТАКТОВОЙ ЧАСТОТЫ С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА

## MEASURING DIGITAL CLOCK STABILITY AND JITTER WITH AN OSCILLOSCOPE

Скотт Дэвидсон (Scott Davidson), Tektronix

Сигналы тактовой частоты — это пульс встраиваемых систем, синхронизирующий между собой компоненты, функциональные узлы и целые системы. Нарушения амплитудных или временных параметров сигнала тактовой частоты могут снижать надёжность цифровых схем. Шум и искажения фронтов или джиттер тактовых сигналов могут ухудшать характеристики системы. Это значит, что тщательное определение характеристик сигналов тактовой частоты является очень важным шагом на пути к обеспечению надёжности встраиваемых систем.

Джиттером называют любые нежелательные отклонения фронтов сигнала от нужного положения. Некоторый джиттер неизбежно присутствует в любой системе, но если он невелик, то не оказывает существенного влияния на рабочие характеристики. Однако встраиваемые системы должны сохранять работоспособность за пределами контролируемой лабораторной среды, а в реальных (или в неблагоприятных, что вполне вероятно) условиях эксплуатации небольшие проблемы могут легко превратиться в большие. Поэтому для обеспечения стабильного функционирования системы в широком диапазоне рабочих условий обязательное измерение показателей стабильности сигналов тактовой частоты.

### ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУДЫ

Начинать оценку сигналов тактовой частоты лучше всего с визуального контроля их амплитуды. Как показано на рисунке 1, горизонтальная и вертикальная разметка экрана позволяет определить, что нижний уровень сигнала в данном примере составляет примерно



Рис. 1. Измерение амплитуды: нижний уровень сигнала в данном примере равен примерно 750 мВ, а верхний — 2,4 В

## Tektronix

750 мВ, а верхний уровень — около 2,4 В. Период тактовой частоты примерно равен 25 нс, что соответствует частоте 40 МГц. В некоторых случаях такой грубой оценки может оказаться вполне достаточно.

Более точные измерения амплитуды и длительности можно выполнить, растянув один период сигнала и используя курсоры. Как видно на рисунке 2, разрешение существенно улучшилось, но измерение выполняется по одному периоду и не позволяет оценить изменения сигнала во времени.



Рис. 2. Растяжка сигнала даёт больше деталей, но не позволяет оценить изменения сигнала во времени

Другим способом повышения точности измерений является применение автоматических алгоритмов измерения, использующих математическую обработку оцифрованных сигналов. Работа таких алгоритмов показана на рисунке 3. Обратите внимание, что измерения вершины и основания импульса аналогичны измерениям, выполненным ранее с помощью горизонтальных курсоров, но обладают большим разрешением. Кроме того, измерение размаха сигнала эквивалентно измерению разности между максимальным и минимальным значениями, а измерение амплитуды эквивалентно измерению разности между вершиной и основанием. Эти величины точно характеризуют сигнал в определённый момент, но как оценить изменения сигнала во времени?

Один из способов увидеть изменения результатов во времени заключается в построении таблицы, которая отображает результаты измерений и

статистические показатели. Расчёт статистических показателей по всем выборкам выполняется от момента первой выборки до текущей выборки, как показано на рисунке 4. Это помогает оценить стабильность сигнала за большой промежуток времени. Обладая накопленной статистикой амплитудных измерений, можно сравнить измеренные значения с данными, приведёнными в технических описаниях источника тактовой частоты и компонентов, на которые поступает тактовая частота, и убедиться в том, что амплитудные характеристики находятся в допустимых пределах. Например:

- максимальное значение при измерении максимума и минимальное значение при измерении минимума должны лежать в пределах диапазона абсолютных значений входного уровня приёмника;
- минимальное значение при измерении вершины должно быть больше параметра  $V_{OHmin}$  передатчика и параметра  $V_{IHmin}$  приёмника;



Рис. 3. Автоматические измерения с применением математической обработки оцифрованных сигналов

- максимальное значение при измерении основания должно быть меньше параметра  $V_{OLmax}$  передатчика и параметра  $V_{ILmax}$  приёмника.

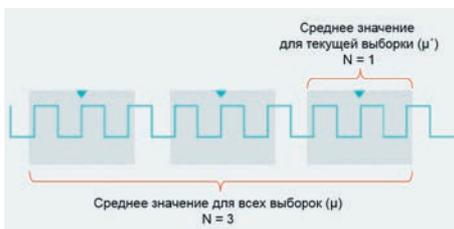
### ИЗМЕРЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ЧАСТОТЫ

Аналогичным образом автоматические измерения временных характеристик можно использовать для выполнения быстрых измерений по горизонтальной оси. Значения  $\mu$ , показанные среди результатов в правой части дисплея на рисунке 5, представляют усреднённые по времени измеренные значения для текущей выборки. В данном примере измерения

периода дают результаты, близкие к результатам измерения, выполненного ранее с помощью курсоров, но с большим разрешением и более высокой скоростью обновления.

Как и ожидалось, значение периода равно сумме длительности положительного и отрицательного импульсов, а значение частоты равно обратной величине от периода. Получив эти значения, вы можете сравнить их с данными, приведёнными в технических описаниях компонентов приёмника, на которые поступает сигнал тактовой частоты, и убедиться, что они соответствуют заявленным характеристикам. Например:

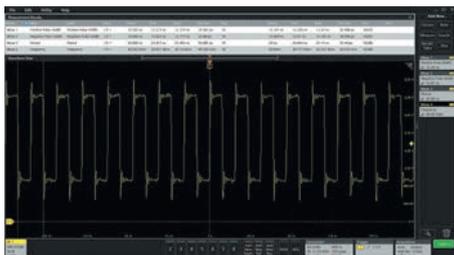
- максимальное и минимальное значения измеренной частоты должны попадать в допустимый диапазон тактовой частоты (fclock);



**Рис. 4. Статистические измерения очень полезны для оценки соответствия амплитудных характеристик требованиям спецификаций**

- минимальное значение измеренной длительности положительного импульса должно быть больше заявленной в спецификациях минимальной длительности (CLK high);
- минимальное значение измеренной длительности отрицательного импульса должно быть больше заявленной в спецификациях минимальной длительности (CLK low).

Стандартные автоматические измерения временных характеристик являются хорошей отправной точкой для анализа джиттера, позволяя убедиться в том, что тактовая частота соответствует требованиям спецификаций. Дополнительные статистические данные, такие как минимальная и максимальная частота, дают уверенность в том, что тактовые импульсы следуют непрерывно. А стандартное отклонение ( $\sigma$ ) даёт количественную оценку стабильности частоты во времени. Тем не менее, эти статистические данные не дают полной информации о характере изменений частоты.



**Рис. 5. Стабильность можно определить с помощью автоматического измерения периода**

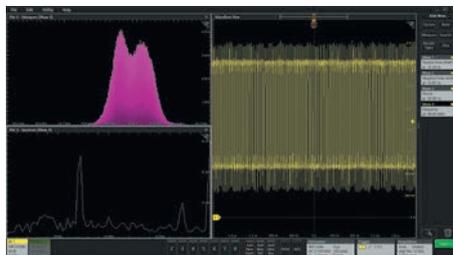


**Рис. 6. График тенденции изменений позволяет лучше понять характер изменения частоты**

Для более глубокого анализа, как показано на рисунке 6, окно захвата было расширено до 10 мкс, чтобы увеличить число периодов в выборке. Коррелированный по времени график тенденции изменений в нижней части экрана показывает изменение частоты в пределах выборки. В отличие от статистических данных, этот график позволяет глубже понять характер изменения частоты, но по-прежнему не даёт информации о том, носят ли эти изменения случайный характер или вызваны такими систематическими факторами, как другие сигналы, проходящие по соседним проводникам.

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ

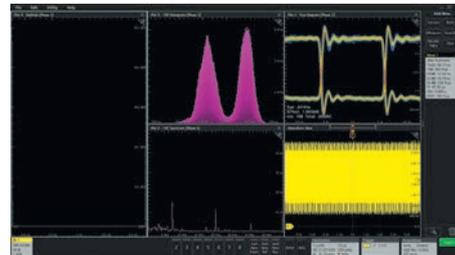
Гистограмма измеренных значений частоты в левой верхней части рисунка 7 позволяет предположить, что изменения частоты не являются чисто случайными (поскольку форма гистограммы отличается от классического распределения Гаусса). По форме гистограммы можно предположить, что возможны перекрёстные помехи от других сигналов. График спектра демонстрирует достаточно большой уровень частотных составляющих на частотах около 7 и 20 МГц. Эти измерения и знание конструкции в целом могут помочь в определении причин флуктуаций тактовой частоты, но по-прежнему не позволяют понять, какие из этих потенциальных причин оказывают доминирующее влияние. Для этого надо разложить временной джиттер на составляющие.



**Рис. 7. Флуктуации частоты могут быть не чисто случайными, демонстрируя присутствие джиттера**

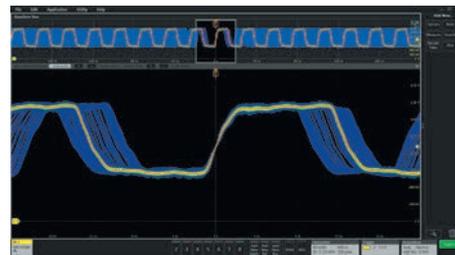
Поиск джиттера лучше всего начинать с поиска ошибки временного интервала (TIE) и измерений фазового шума. TIE описывает временные отклонения сигнала тактовой частоты от идеального сигнала. Приложения для анализа джиттера позволяют выполнить быстрый анализ показанного выше тактового сигнала частотой 40 МГц, вклю-

чая анализ TIE и построение глазковой диаграммы. Результаты измерений в правой части рисунка 8 демонстрируют автоматическое измерение TIE в сравнении с идеальным сигналом. Кроме того, они показывают разложение временного джиттера на полный джиттер (TJ), случайный джиттер (RJ), детерминированный джиттер (DJ), периодический джиттер (PJ), джиттер, зависящий от данных (DDJ) и искажения скважности (DCD).



**Рис. 8. Спектр в центре нижней части экрана содержит значительные компоненты джиттера на частотах 7,1, 20 и 30,3 МГц**

В данном примере, как и было предсказано по гистограмме на рисунке 7, присутствуют систематические искажения сигнала тактовой частоты. Детерминированный джиттер значительно превышает случайный джиттер, но, в свою очередь, уступает по величине искажению скважности. Спектр, показанный в центре нижней части экрана, содержит значительные компоненты джиттера на частотах 7,1, 20 и 30,3 МГц. В данном случае основные помехи сигналу тактовой частоты 40 МГц создаёт соседняя линия с сигналом 7,1 МГц.



**Рис. 9. Большие отклонения частоты показаны синим цветом, что свидетельствует о том, что происходят они относительно редко**

В данном примере мы рассматривали одну и ту же схему, собранную на разных макетных платах. В процессе этого исследования мы наблюдали эпизодические сбои в работе схемы. Однако наблюдение сигнала тактовой частоты на экране осциллографа не выявило каких-либо очевидных проблем. Один из методов углублённого анализа заключается в применении режима захвата, который регистрирует миллионы фрагментов сигнала частотой 40 МГц и накладывает их друг на друга на экране осциллографа. В таком режиме можно увидеть присутствие значительных флуктуаций частоты тактового сигнала, на тех платах, где наблюдались сбои.

В режиме отображения с «градацией по температуре» большие отклонения частоты выделены синим цветом, что свидетельствует о том, что происходят они относительно редко.

Теперь, когда мы осведомлены о наличии флуктуаций, мы можем построить гистограмму измеренных значений частоты в логарифмическом масштабе по оси Y, что позволяет лучше понять характер флуктуаций, как показано на рисунке 10. Обратите внимание, что логарифмическая шкала даёт возможность рассмотреть больше деталей в области меньших значений. После накопления 10 миллионов измерений частоты, начинает выявляться истинно редкая природа появления частотных флуктуаций. Средняя частота очень точна, но могут происходить случайные отклонения до 35 МГц вниз и почти до 55 МГц вверх. Без



Рис. 10. Такие статистические измерения помогают выявить редко возникающие аномалии



Рис. 11. Дальнейший анализ этого генератора тактовой частоты с помощью запуска по длительности импульса показал, что контроллер ФАПЧ периодически сбрасывался

таких статистических измерений редкие аномалии, подобные этим, можно вообще не обнаружить.

Зная, что частота периодически снижается, можно использовать запуск по длительности импульса для захвата аномально широких импульсов и захватить момент возникновения ошибки. Как показано на рисунке 11, осциллограф настроен на запуск по импульсам длительностью больше 14 нс, что превышает номинальное значение 12,5 нс. Тенденция изменения частоты в нижней части экрана графически демонстрирует отклонения частоты вверх и вниз от идеального значения 40 МГц.

Дальнейший анализ этого генератора тактовой частоты показал, что контроллер ФАПЧ периодически сбрасывался. Когда это происходило,

управляемый напряжением генератор терял синхронизацию и моментально уходил от нужной частоты.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Являясь пульсом встраиваемых систем, сигналы тактовой частоты весьма важны для обеспечения синхронизации компонентов, функциональных узлов и целых систем. Как видно из приведённых выше примеров, современные осциллографы предлагают широкий набор средств, позволяющих эффективно измерять характеристики джиттера сигналов тактовой частоты. ☑

*As the heartbeat of embedded systems, clocks are critical to maintaining timing references and synchronization across components, subsystems and entire systems. As these examples of measurements have shown, modern oscilloscopes offer a broad set of measurements that take the mystery out of characterizing and verifying jitter in clock circuits.*

## ЧАСТОТОМЕРЫ AFC-2124/2125

**АКТАКОМ**  
www.aktakom.ru www.aktakom.com



- ✓ Дисплей LED, 8 разрядов
- ✓ Два канала
- ✓ Максимальная частота измерения 2,4 ГГц
- ✓ Высокая стабильность частоты опорного генератора
- ✓ Вход для низкочастотных измерений
- ✓ Задаваемое время счета
- ✓ Вход для измерения частоты кварцевых осцилляторов (AFC-2124)

	AFC-2124	AFC-2125
Диапазон ВЧ входа	50 МГц ... 2,4 ГГц	50 МГц ... 2,4 ГГц
Диапазон НЧ входа	10 Гц ... 50 МГц	0,01 Гц ... 50 МГц
Подсчет числа импульсов	до 99 999 999	---
Измерение частоты кварцевых осцилляторов	3,5 МГц ... 16 МГц	---
Время счета	0,1 с / 1 с / 5 с / 10 с	плавно, 100 мс...10 с
Входной импеданс	50 Ом / 1 МОм	



ЭЛИКС, 115211, г. Москва, Каширское шоссе, д. 57, к. 5.  
Тел./факс: (495) 781-49-69 (многоканальный)  
Web: www.eliks.ru; E-mail: eliks@eliks.ru

БОЛЬШЕ ИНФОРМАЦИИ  
НА [www.eliks.ru](http://www.eliks.ru)

