

СОВЕТЫ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ДЖИТТЕРА И ВЫЯВЛЕНИЮ ПРИЧИН ЕГО ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВО ВСТРАИВАЕМЫХ СИСТЕМАХ

TIPS FOR CHARACTERIZING AND TROUBLESHOOTING JITTER ON EMBEDDED SYSTEMS

Скотт Дэвидсон (Scott Davidson), Tektronix

Тактовая частота — это пульс встраиваемых систем, задающий опорные временные интервалы и обеспечивающий синхронизацию между компонентами, подсистемами и целыми системами. Чрезмерный джиттер сигналов тактовой частоты может существенно ухудшить характеристики системы.

Джиттером называют любое нежелательное отклонение фронтов сигнала от того места, где они должны находиться. Джиттер неизбежно присутствует во всех встраиваемых системах и

Tektronix

позволяющих выполнить начальный анализ джиттера и убедиться, что сигнал тактовой частоты отвечает требованиям спецификаций. Применение статистических функций, например, функции измерения максимальной и минимальной частоты, даёт возможность убедиться, что тактовая частота не выходит за пре-

делы допусков, а стандартное отклонение позволяет количественно оценить стабильность частоты. Тем не менее, сами по себе статистические показатели практически ничего не говорят о характере флуктуаций частоты. Вот здесь на сцену выходят графические средства, такие как функция построения гистограмм, которые дают дополнительную информацию о различных параметрах флуктуации частоты.

В примере, показанном на рисунке 1, на передних и задних фронтах каждого периода тактового сигнала частотой 40 МГц измерялась частота и погрешность интервала времени (TIE). Измерения временных характеристик выполнялись относительно средней тактовой частоты. Статистические показатели, расположенные в окнах справа и в результирующей таблице сверху, позволяют оценить флуктуации частоты. Статистические показатели в левой части таблицы представляют текущий захват, а показатели в правой части таблицы представляют сумму всех предшествующих захватов.

Две гистограммы слева отображают измерения частоты и TIE на передних фронтах тактовой частоты и позволяют понять характер временных флуктуаций. В данном случае распределение очень близко к Гауссовскому, что позволяет сделать вывод о преимущественно случайном характере джиттера.

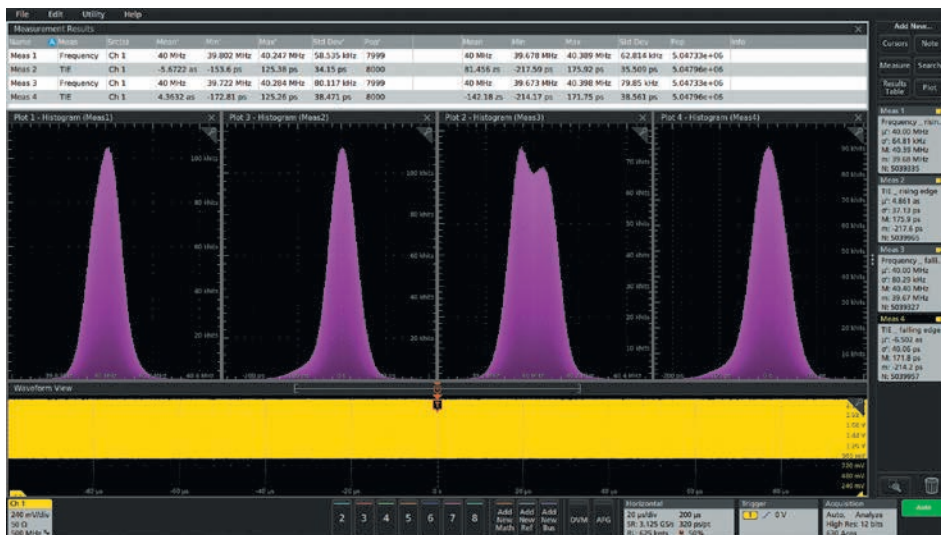


Рис. 1. Необычная форма гистограммы частоты заднего фронта наводит на мысль о потенциальной проблеме. Это измерение выполнялось с помощью осциллографа смешанных сигналов Tektronix серии 5 с полосой пропускания 2 ГГц

каналов связи. Поэтому для обеспечения надёжной работы систем в широком диапазоне условий, без тщательного измерения параметров джиттера никак не обойтись.

Понимание всего, что нужно знать о джиттере — непростая задача. О джиттере написаны многие тома, что красноречиво демонстрирует сложность проблем, связанных с временными погрешностями. К счастью современные цифровые осциллографы превратили измерение временных соотношений и джиттера в почти тривиальную задачу, что хорошо видно из приведённых ниже примеров.

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЖИТТЕРА ТАКТОВОЙ ЧАСТОТЫ

Современные осциллографы поддерживают множество измерений,

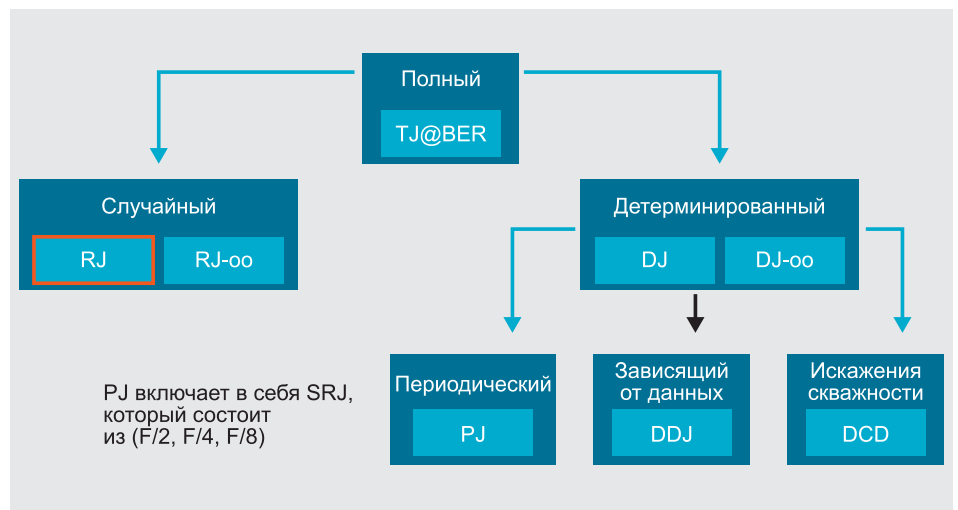


Рис. 2. Джиттер и его компоненты

В то же время две гистограммы справа представляют измерения частоты и ТПЕ на задних фронтах тактовой частоты. Заметьте, что форма гистограммы частоты сильно отличается от формы других гистограмм, что наводит на мысль о необходимости дополнительных исследований.

Для измерения джиттера и выявления причин его появления нужно понять, какой именно тип джиттера мог вызвать такие флуктуации фронтов. Как показано на рисунке 2, джиттер фронтов можно разложить на компоненты, которые позволяют сделать

предположение о возможных причинах возникновения проблем и определить, насколько корректно ведут себя разные тактовые частоты и цепи в исследуемой системе.

На рисунке 3 приведены результаты измерения джиттера тактовой частоты 40 МГц, показанного на рисунке 1, включая глазковую диаграмму сигнала, гистограмму, спектр ТПЕ и разложение джиттера на отдельные компоненты. С первого же взгляда видно, что открытый глазок на глазковой диаграмме говорит о том, что джиттер сигнала тактовой частоты достаточно мал. И в самом деле, полный джиттер (TJ@BER) равен примерно 554 пс, что составляет примерно 2,2% от периода тактовой частоты 40 МГц. Разложение джиттера на компоненты показывает, что случайный джиттер составляет лишь очень малую часть полного джиттера.

Следовательно, доминирующей компонентой должен быть детерминированный джиттер. К тому же две вершины гистограммы ТПЕ наводят на мысль о большом уровне детерминированного джиттера. DJ в свою очередь можно разложить на периодический джиттер (PJ), джиттер, зависящий от данных (DDJ) и искажения скважности (DCD).

В данном случае компонента PJ равна примерно одной четвертой части джиттера. В спектре ТПЕ хорошо видны пики на частотах 7, 17 и 32 МГц, что позволяет сделать предположение о присутствии большого некоррелированного детерминированного джиттера, вызванного, по всей вероятности, взаимовлиянием сигналов на печатной плате или внутри ПЛИС. Поскольку этот сигнал представляет собой не данные, а тактовую частоту, то DDJ равен нулю. Кроме того, DCD составляет примерно пятую часть полного джиттера, что наводит на мысль о необходимости дальнейшего анализа и оптимизации цепи, формирующей тактовую частоту.

Что ещё может происходить в этой системе? Чтобы это понять, давайте исследуем другую тактовую частоту, в данном случае 1,25 МГц. Как показано на рисунке 4, этот сигнал демонстрирует несколько иные параметры джиттера. Открытый глазок глазковой диаграммы говорит о том, что джиттер тактовой частоты невелик, и это подтверждается измерением значения TJ, которое равно примерно 4,4 нс, то есть, менее 0,55% от периода тактовой частоты. Разложение джиттера на компоненты показывает, что компонента RJ очень мала по сравнению с полным джиттером. Компонента PJ тоже сравнительно мала, и в спектре ТПЕ отсутствует явно выраженный пик, а это свидетельствует о том, что джит-

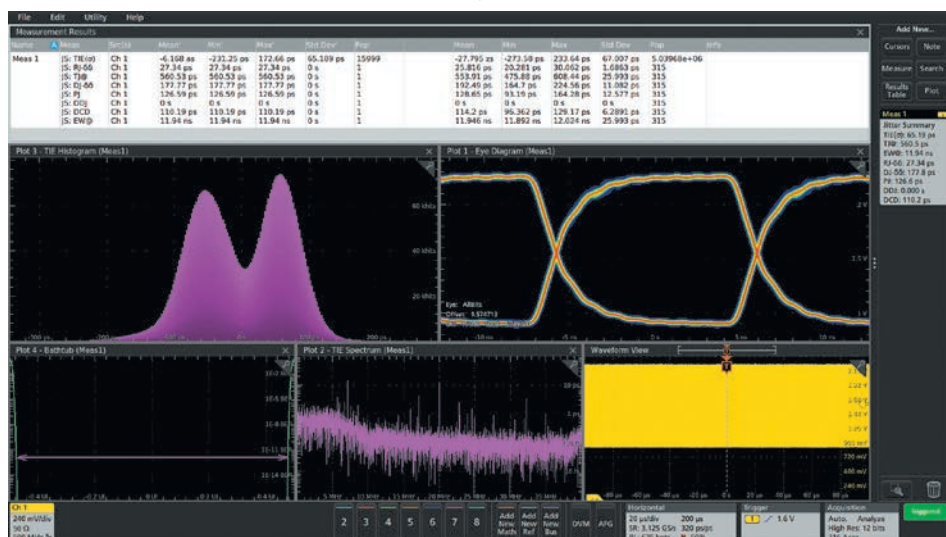


Рис. 3. Более глубокий анализ позволил предположить, что цепь, формирующая тактовый сигнал 40 МГц, требует дальнейшего анализа и оптимизации



Рис. 4. Джиттер тактовой частоты 1,25 МГц не связан с некоррелированными компонентами DJ

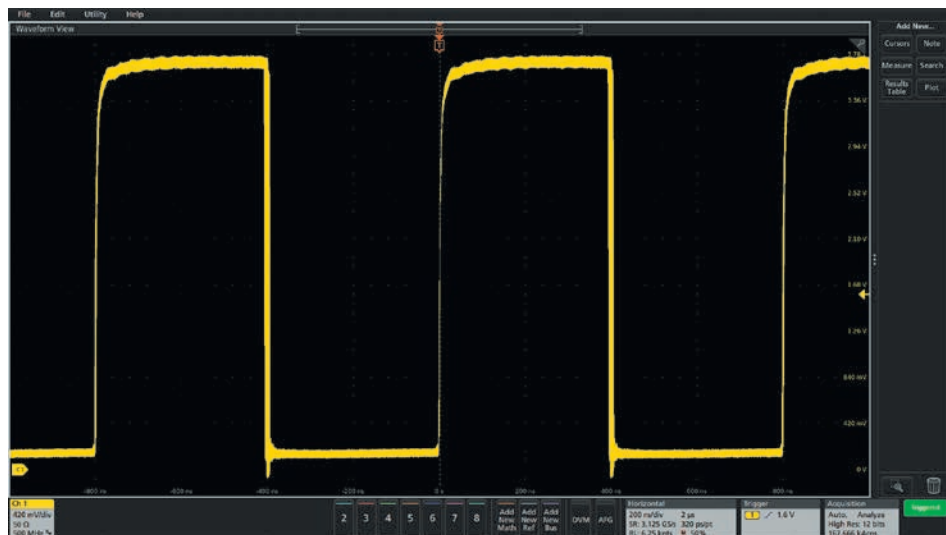


Рис. 5. На задних фронтах тактового сигнала 1,25 МГц видны флуктуации скважности

тер сигнала слабо связан с некоррелированными компонентами DJ.

На рисунке 5 показана осциллограмма сигнала тактовой частоты, широкие задние фронты которой яв-

ся, что демонстрируется горизонтальным размытием сигнала вдали от точки запуска.

Статистические измерения этого сигнала помогут численно оценить

флуктуацию частоты и проверить, отвечает ли тактовая частота требованиям спецификаций, но они не дадут сведений о том, как именно меняется частота. В данном случае сигнал представляет собой сигнал тактовой частоты с распределённым спектром, частота которого намеренно промодулирована. Но работает ли схема так, как предполагалось?

Как показано на рисунке 7, в предполагаемых флуктуациях частоты преобладает компонента PJ, что подтверждается таблицей результатов в верхней части экрана и седлообразной формой гистограммы TIE. TIE, вызванную модуляцией, можно наблюдать на оранжевом графике изменения во времени в нижнем правом углу экрана.

По графику изменения во времени TIE и по измерению пиков спектра TIE в центре экрана можно сделать вывод, что частота модуляции равна примерно 39 кГц. Форма спектра с преобладанием нечётных гармоник с быстро спадающей амплитудой позволяет предположить, что модулирующий сигнал скорее всего имеет прямоугольную или треугольную форму. Но TIE представляет собой интеграл от модулирующего сигнала, а значит, сигнал тактовой частоты с распределённым спектром скорее всего промодулирован треугольным сигналом частотой 39 кГц.

Эту теорию можно проверить, взглянув на измерения частоты и построив гистограмму, спектр и график изменения во времени, как показано на рисунке 8. Выполнив измерения спектра с помощью курсоров, можно увидеть, что модулирующий сигнал действительно является треугольным сигналом частотой 39 кГц. Гистограмма, как и ожидалось, является плоской в диапазоне от 97 до 100 МГц, а график изменения во времени даёт ещё одно представление той же модуляции.

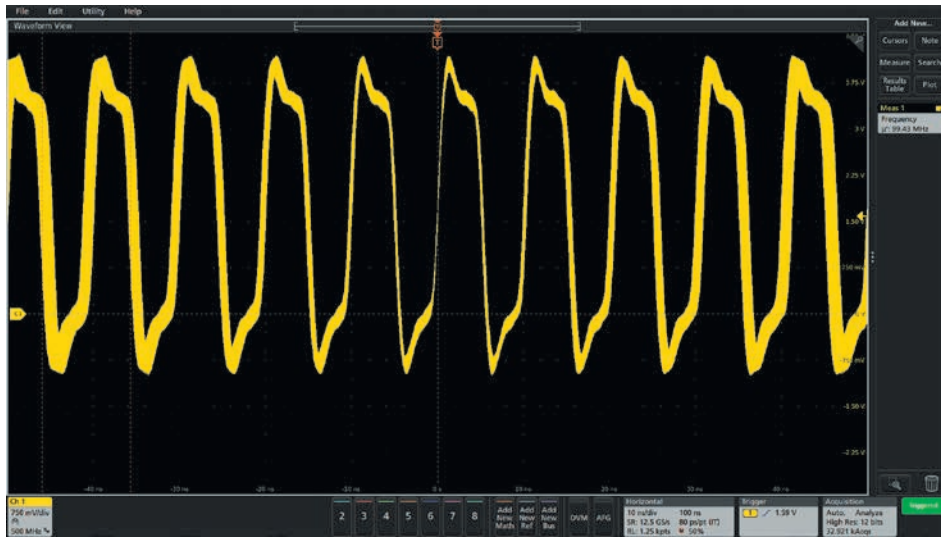


Рис. 6. На этой осциллограмме с бесконечным послесвечением хорошо заметно изменение периода сигнала тактовой частоты 98 МГц

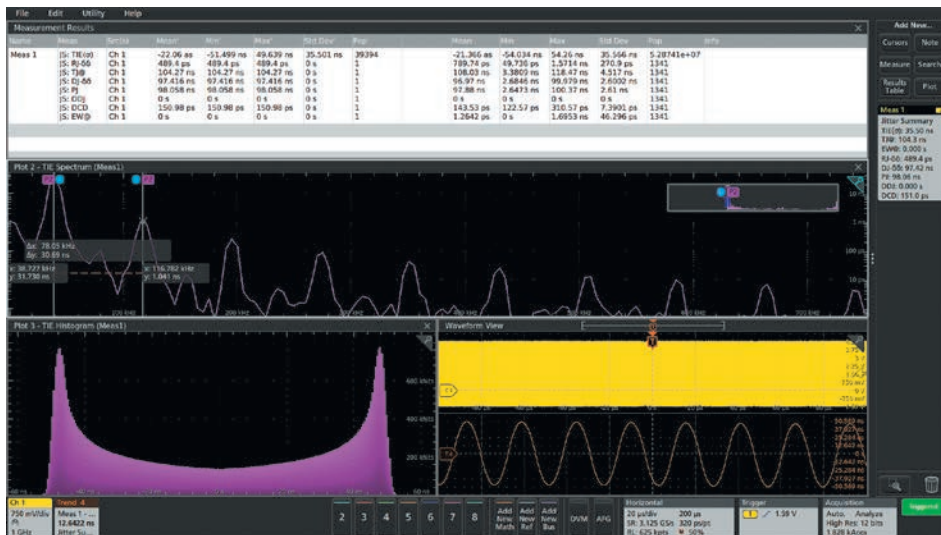


Рис. 7. Результаты измерения параметров джиттера сигнала тактовой частоты 98 МГц с распределённым спектром

но демонстрируют сильно меняющуюся скважность. Если во всех частях встраиваемой системы используются только передние фронты тактовой частоты, то флуктуации скважности могут не представлять проблемы. Но если часть схемы использует передние фронты, а часть — задние, то джиттер может привести к некорректной или ненадёжной работе системы.

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛА ТАКОВОЙ ЧАСТОТЫ С РАСПРЕДЕЛЁННЫМ СПЕКТРОМ

В качестве следующего примера мы рассмотрим осциллограмму тактового сигнала частотой 98 МГц в режиме с бесконечным послесвечением. Как показано на рисунке 6, измеренная частота меняется со временем примерно от 97 до 100 МГц. Период тоже изменяет-

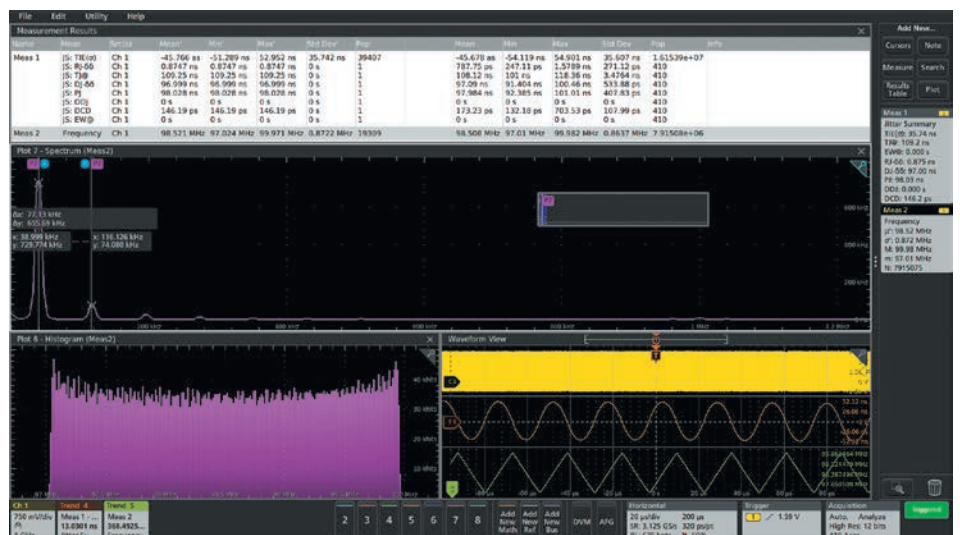


Рис. 8. Измерение частоты тактового сигнала 98 МГц с распределённым спектром подтверждает предположение о треугольной форме и частоте 39 кГц модулирующего сигнала

ИЗМЕРЕНИЕ ДЖИТТЕРА НИЗКОСКОРОСТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ШИНЫ

Джиттер влияет и на параметры последовательных шин, включая шины с самосинхронизацией. На рисунке 9 показан анализ дифференциального сигнала передатчика шины CAN со скоростью передачи 500 кбит/с. Аналогичный метод измерения можно применять к приёмникам и передатчикам других последовательных шин.

В первую очередь для выполнения анализа надо выделить из последовательного сигнала данных сигнал тактовой частоты. В данном случае осциллограф выполняет восстановление тактовой частоты с помощью системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) с узкой полосой пропускания, что позволяет сохранить синхронизацию между пакетами данных. Затем восстановленная тактовая частота используется в качестве опорной для анализа джиттера.

Разложение джиттера на компоненты показывает, что большую часть полного джиттера передатчика составляет джиттер, зависящий от данных (DDJ), а

случайная и зависящая от скважности компоненты очень малы. Имеется также значительная компонента RJ, которая, по всей видимости, связана с амплитудной модуляцией сигнала в начале каждого пакета данных (а не с отдельными битами данных), что видно на глазковой диаграмме и на представлении сигнала во временной области.

ИЗМЕРЕНИЕ ДЖИТТЕРА ТАКТИРУЕМЫХ ДАННЫХ

И в качестве последнего примера давайте рассмотрим анализ джиттера синхронной логической схемы. В отличие от предыдущих примеров эта схема имеет отдельный сигнал тактовой частоты, поэтому измерения джиттера выполняются на голубом сигнале данных канала 2 по отношению к жёлтому сигналу тактовой частоты канала 1, как показано в нижнем углу рисунка 10.

Частота сигнала равна всего 1,25 МГц, дорожки печатной платы короткие, поэтому сигналы достаточно чисты, что демонстрируется малым случайным джиттером и широко откры-

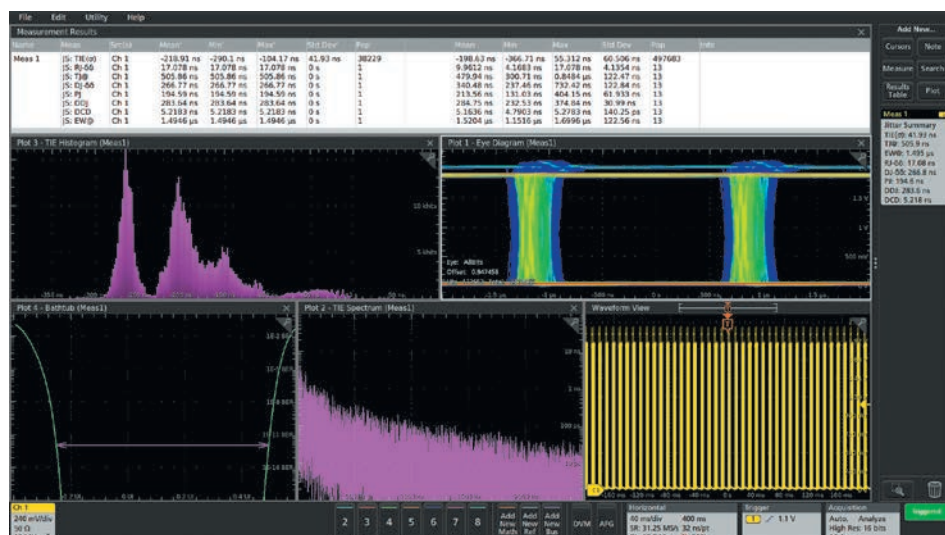


Рис. 9. Влияние джиттера передатчика на шину с самосинхронизацией, такую, как CAN

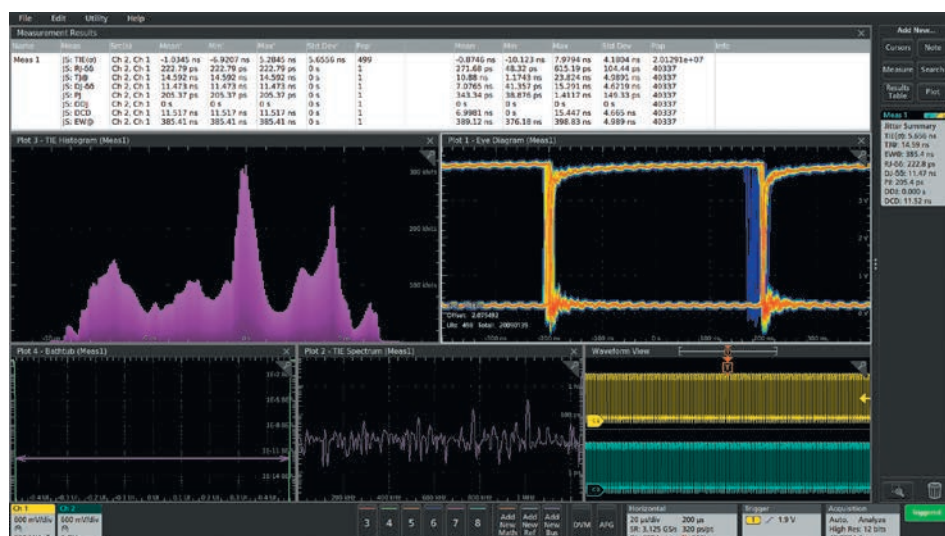


Рис. 10. Анализ джиттера синхронного логического сигнала показывает, как искажения скважности тактового сигнала влияют на другие сигналы системы

Tektronix

Новый уровень простоты

Мультиметр и система сбора данных DMM6500/DAQ6510

Узнайте больше на ru.tek.com



тым глазом. Поскольку эта схема использует отдельный сигнал тактовой частоты, джиттер, как правило, от данных не зависит.

В данном случае в джиттере преобладает компонента, связанная с искажением скважности. Дальнейший анализ схемы показывает, что тактовый сигнал в ней получен из сигнала, показанного на рисунке 5. Не удивительно, что значительная часть полного джиттера этой схемы порождается искажением скважности тактового сигнала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Являясь пульсом встраиваемых систем, сигналы тактовой частоты чрезвычайно важны для правильной синхронизации компонентов, подсистем и систем в целом. Как показали эти примеры измерения немодулированной тактовой частоты, тактовой частоты с распределённым спектром, последовательной шины с самосинхронизацией и тактируемых данных, современные осциллографы предлагают широкий набор измерений, позволяющих сорвать покров тайны с измерения параметров и проверки джиттера встраиваемых систем.

Fundamentally, jitter is any unwanted deviation in signal edge timing from where it should be. Jitter is a fact of life in the design of embedded systems and communication links. As such, for systems to operate reliably under a broad range of conditions, thorough characterization of jitter is a must.