

Трактовка эффективной разрядности при проведении измерений с помощью осциллографа

При обсуждении технических характеристик осциллографов или дискретизаторов часто звучит термин «Эффективное число разрядов» (ENOB или эффективная разрядность), но, судя по всему, смысл этого термина редко осознается полностью, особенно в том, что касается его значимости для измерения реальных сигналов. Эта статья посвящена обсуждению эффективной разрядности с той точки зрения, которая поможет лучше понять ее связь с реальными характеристиками.



Рисунок 1. Ошибки дискретизатора, влияющие на ENOB (с позволения datatranslation.com).

Эффективная разрядность является характеристикой, отражающей качество сигнала (или его снижение) аналого-цифровой системы в некотором диапазоне частот. Для лучшего понимания этой концепции давайте начнем с обсуждения некоторых основных моментов.

1. Все системы дискретизации подвержены ошибкам, которые влияют на регистрируемое значение напряжения в данный момент времени.
2. Все ошибки, как амплитудные, так и временные, проявляются в отклонении ожидаемого или «идеального» напряжения в данный момент времени.
3. Эффективная разрядность идеального дискретизатора совпадает с разрешением АЦП (например, 8 двоичных разрядов) и сохраняется неизменной в полосе от постоянного напряжения до максимальной рабочей частоты прибора. В действительности все приборы далеко не идеальны. Обычно ENOB отличается от разрешения АЦП в меньшую сторону, причем это отличие растет с ростом частоты.
4. При сравнении характеристик двух аналого-цифровых систем важно выполнить измерения в идентичных условиях. Нужно использовать одинаковые входные сигналы и одинаковые настройки сравниваемых приборов.

Следует отметить, что ENOB определяется спецификациями IEEE1057. Кроме того, спецификации IEEE 1057 описывают способы измерения ENOB. ENOB является общепризнанным показателем качества АЦП, осциллографов и других систем дискретизации.

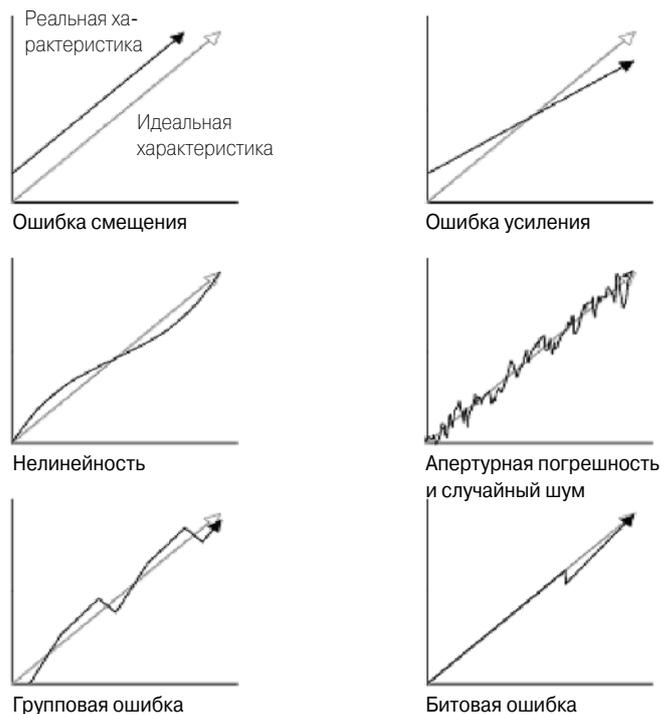


Рисунок 2. Типовые ошибки АЦП.

Ошибки систем дискретизации

Типовым ошибкам систем дискретизации посвящено множество работ. Превосходным примером такой работы является статья «Оценка динамических характеристик дискретизаторов путем измерения эффективной разрядности», доступная в интернете по адресу: http://www2.tek.com/cmsreplive/tirep/4405/2006.07.18.14.07.40_4405_EN.pdf.

На рис. 1 показаны примеры некоторых наиболее распространенных ошибок, влияющих на ENOB аналого-цифровых преобразователей.

Эффективная разрядность является совокупным показателем качества и включает эффекты, вызванные ошибками дискретизации, показанными на рис. 1 и 2. Особенно важно то, что она отражает зависимость этих ошибок от частоты, что позволяет оценить ухудшение характеристик того или иного прибора в заданном диапазоне частот. Следует отметить, что расчет ENOB делается с учетом всех спектральных составляющих, за исключением постоянного напряжения, поэтому из всех ошибок, показанных на рис. 2, на эффективную разрядность не влияет только ошибка смещения по постоянному току.

Число двоичных разрядов	Число уровней дискретизации	Процентное отношение самого младшего разряда к полному диапазону	Изменение напряжения, соответствующее изменению самого младшего разряда, при полном диапазоне сигнала 1 В
8	256	0,39 %	3,91 E-03
6,65	100	1,00 %	9,96 E-03
6	64	1,56 %	1,56 E-02
5	32	3,13 %	3.13 E-02
4	16	6,25 %	6,25 E-02

Таблица 1. Разрешение дискретизатора.

Разрешение дискретизации

Если разрешение системы дискретизации на постоянном напряжении составляет 8 двоичных разрядов, то такая система обеспечивает 256 уровней дискретизации. Это значит, что для того, чтобы на выходе АЦП произошли какие-то изменения, входной сигнал должен измениться не менее чем на 0,39% от полного диапазона. Если полный диапазон входного сигнала 8-разрядного АЦП составляет 1 В, то входное напряжение должно измениться более чем на 3,9 мВ, чтобы это изменение проявилось на выходе. Любые изменения сигнала менее чем на 3,9 мВ на выходе АЦП не отслеживаются.

Теперь посмотрим, что произойдет, если разрешение снизится. Пусть, например, разрешение упадет до 6,65 разрядов. При этом входной сигнал должен измениться примерно на 1%, чтобы это изменение проявилось на выходе АЦП. Меньшие изменения входного сигнала не скажутся на состоянии выхода АЦП. При полном диапазоне 1 В незаметными останутся изменения сигнала в пределах 10 мВ.

Аналогичным образом разрешение 5 разрядов обеспечивает 32 уровня дискретизации. В этой ситуации для того чтобы изменения проявились на выходе АЦП, входной сигнал должен измениться не менее чем на 3,13%. Если снова предположить, что полный диапазон сигнала равен 1 В, то изменения на выходе АЦП проявятся лишь в том случае, если входной сигнал изменится более чем на 31,3 мВ, как показано в табл. 1.

Эффективная разрядность

Эффективная разрядность представляется обычно, как функция частотной зависимости, и в общем случае (но не всегда) снижается с ростом частоты. Такое изменение разрешения проявляется практически так же, как описанное выше изменение разрешения дискретизации.

Давайте представим себе такую ситуацию. Предположим, что у нас есть 8-разрядный осциллограф реального времени. Этот осциллограф обладает разрешением 8 двоичных разрядов и полосой пропускания 13 ГГц. На постоянном токе и на низких частотах эффективная разрядность осциллографа будет, по всей видимости, близка к 8 разрядам. Однако

Число двоичных разрядов	Число уровней дискретизации	Процентное отношение самого младшего разряда к полному диапазону	Изменение напряжения, соответствующее изменению самого младшего разряда, при полном диапазоне сигнала 1 В
6,4	84,4	1,18 %	1,18 E-02
5,6	49	2,06 %	2,06 E-02

Таблица 2. Эффективная разрядность осциллографов Tektronix DPO/DSA70000B.



Рисунок 3. Частотная зависимость эффективной разрядности осциллографа DPO70000B при чувствительности 100 мВ/дел.

с ростом частоты входного сигнала влияние собственных шумов прибора и других ошибок, скорее всего, приведет к снижению эффективной разрядности.

На рис. 3 показан график частотной зависимости эффективной разрядности таких приборов.

На рис. 3 приведены характеристики осциллографа Tektronix DPO/DSA70000B в диапазоне частот от 200 МГц до 13 ГГц. Как видно на рисунке, на частоте 200 МГц осциллограф обладает эффективным разрешением 6,4 двоичных разрядов. С ростом частоты эта величина падает до 5,6 эффективных разрядов на частоте 13 ГГц.

Поведение эффективной разрядности АЦП практически не отличается от поведения «реальных разрядов», описанных выше в разделе «Разрешение дискретизации». В табл. 2 приведены характеристики этих уровней эффективного разрешения.

Видно, что на частоте 13 ГГц при полном диапазоне 1 В входной приведенный ко входу шум АЦП составляет 20 мВ. Другими словами, изменения входного сигнала менее чем на 20 мВ, скорее всего, потонут в шумах, искажениях и других системных ошибках.

Следует отметить, что АЦП будет по-прежнему выдавать 8-разрядные данные, но 2,4 разряда этих данных (на частоте 13 ГГц) будут представлять собой шумы, искажения и ошибки.



Рисунок 4. Сравнение эффективной разрядности двух осциллографов реального времени.

Не все системы дискретизации одинаково хороши

Возможно после изучения приведенного на рис. 3 графика частотной зависимости эффективной разрядности осциллографов DPO/DSA70000B вы задумались над тем, насколько хороша эта характеристика. Во-первых, создать систему, ведущую себя одинаково хорошо в диапазоне от постоянного тока до 13, 16 или даже 20 ГГц, чрезвычайно сложно. Ничего идеального в этом мире нет, и даже лучшие приборы демонстрируют некоторое ухудшение характеристик на высоких частотах.

Также не секрет, что одни приборы работают лучше других, и эффективная разрядность является отличным критерием, который можно использовать для быстрой оценки качества сигнала систем дискретизации при заданных настройках во всем диапазоне частот. Приведенные на рис. 4 графики эффективной разрядности позволяют сравнить осциллограф DPO/DSA70000B с аналогичным осциллографом другого производителя.

Обратите внимание, что при данных настройках (полный диапазон 400 мВ) осциллограф Tektronix имеет тот же диапазон эффективной разрядности от 6,4 до примерно 5,6 разрядов, что и на предыдущем графике (1 В полного диапазона), тогда как аналогичный осциллограф другого производителя демонстрирует диапазон эффективной разрядности от 5,9 до 4 разрядов.

Понятно, что при 4 эффективных разрядах собственный шум осциллографа составляет 62,5 мВ при полном диапазоне сигнала 1 В.

Число двоичных разрядов	Число уровней дискретизации	Процентное отношение самого младшего разряда к полному диапазону	Изменение напряжения, соответствующее изменению самого младшего разряда, при полном диапазоне сигнала 1 В
5,9	59,7	1,67 %	1,67 E-02
4	16	6,25 %	6,25 E-02

Таблица 3. Эффективная разрядность осциллографа Agilent DSO90000.

Взаимосвязь между отношением сигнал/шум, SINAD и эффективной разрядностью

Как уже говорилось, эффективная разрядность характеризует шум и прочие ошибки системы дискретизации. В стандартах IEEE-1241 и IEEE-1057 приведены формулы для расчета эффективной разрядности. Эти стандарты связывают отношение сигнал/шум и искажения (SINAD) с эффективной разрядностью через уравнение:

$$ENOB = \log_2(SINAD) - \frac{1}{2} \log_2(1,5) - \log_2 \left(\frac{A}{(FSR) / .} \right)$$

Из приведенной формулы следует, что эффективная разрядность зависит от отношения сигнал/шум, а также от искажений сигнала.

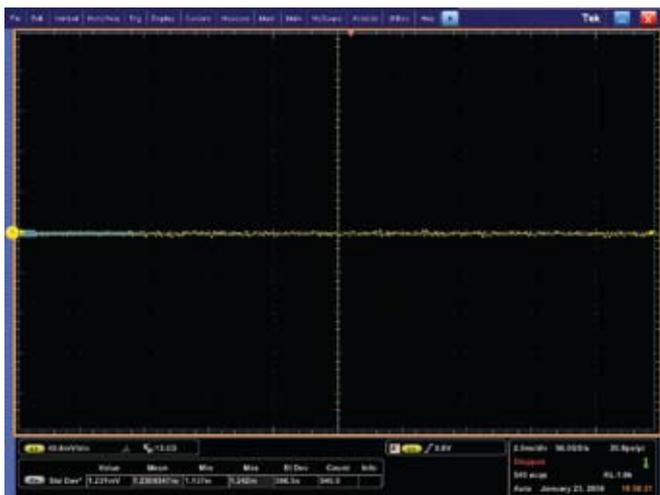


Рисунок 5. Измерение флуктуационных шумов.

Флуктуационный шум – не слишком хорошее представление ENOB

Флуктуационный шум (называемый иногда остаточным шумом) характеризует шум прибора при отсутствии входного сигнала (при заземленном входе). Это измерение выполняется путем измерения среднеквадратического значения переменного напряжения в канале или путем наложения вертикальной гистограммы на линию развертки осциллографа для получения того же конечного результата. Такое измерение выполняется быстро и просто, поскольку не требует входного сигнала, но оно ничего не может рассказать о характеристиках на заданной частоте. Поскольку эта величина никак не отражает шум прибора в динамических условиях, создаваемых входным сигналом заданной частоты и занимающим существенный диапазон АЦП, ее нельзя считать хорошим показателем качества сигнала.

Тем не менее, некоторые производители пытаются использовать флуктуационный шум для демонстрации «качества» своих регистрирующих систем. В таких случаях они определяют вертикальный шум, как уровень напряжения при заданной чувствительности (В/дел). Однако для объективного сравнения приборов важно сравнивать «% от полного диапазона», поскольку не все приборы обеспечивают одинаковый полный диапазон при одной и той же чувствительности. Также при сравнении характеристик двух разных приборов важно установить одинаковую полосу пропускания. Приборы с большей полосой неизбежно обладают большим уровнем шумов, и ограничение полосы позволяет снизить этот уровень.

Как уже говорилось, измерение флуктуационного шума можно выполнять путем наложения вертикальной гистограммы на линию развертки осциллографа. Стандартное отклонение гистограммы соответствует среднеквадратическому значению шума. Определив эту величину, легко рассчитать процент от полного диапазона для конкретного значения

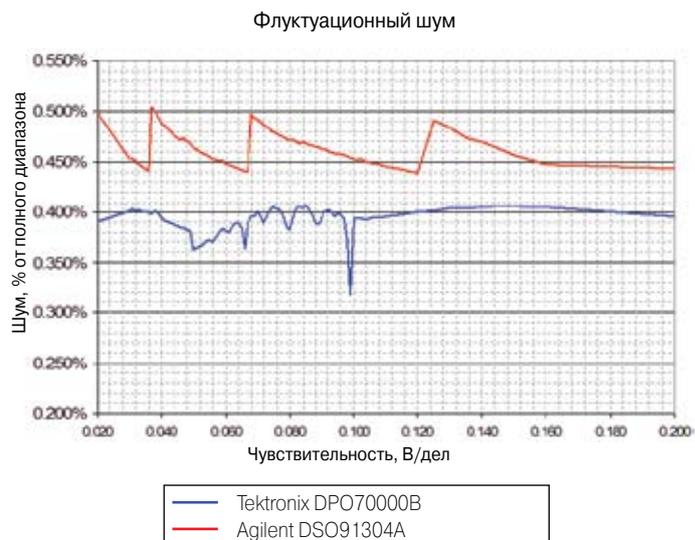


Рисунок 6. Сравнение флуктуационных шумов осциллографов Tektronix DPO70000B и Agilent DSO90000A.

чувствительности. Некоторые системы имеют встроенную математическую функцию для непосредственного измерения среднеквадратического значения переменного напряжения, что позволяет обойтись без ручного наложения гистограммы. При выполнении таких измерений важно не включать в результат постоянное смещение, поэтому следует использовать гистограммы или измерение среднеквадратического значения переменного напряжения. Снимок экрана на рис. 5 показывает измерение флуктуационных шумов.

Рис. 6 показывает сравнение флуктуационных шумов осциллографов Tektronix DPO70000B и Agilent DSO90000A. Полоса осциллографа Tektronix была ограничена до значения 13 ГГц, в соответствии с максимальной полосой осциллографа Agilent. На диаграмме показан флуктуационный шум при разных значениях чувствительности, что позволяет увидеть зависимость флуктуационного шума (в % от полного диапазона) от чувствительности (В/дел). При этом использовались те же два прибора, что и в сравнении эффективной разрядности на рис. 4.

Из приведенных диаграмм видно, что прибор Tektronix обладает меньшим флуктуационным шумом (примерно от 10 до 20 % в зависимости от установленной чувствительности), но в сравнении с результатами, приведенными в табл. 2 и 3, это составляет меньший процент от полного диапазона. В результате, разница флуктуационных шумов составляет менее 0,1% от полного диапазона, тогда как разница эффективной разрядности, наблюдаемая в табл. 2 и 3, достигает 4,25% от полного диапазона. Таким образом видно, что флуктуационный шум не позволяет объективно оценивать качество сигнала. Но что еще важнее, при его измерении не используется реальный сигнал, а значит, эту величину нельзя использовать для оценки таких характеристик, как отношение сигнал/шум или ENOB.

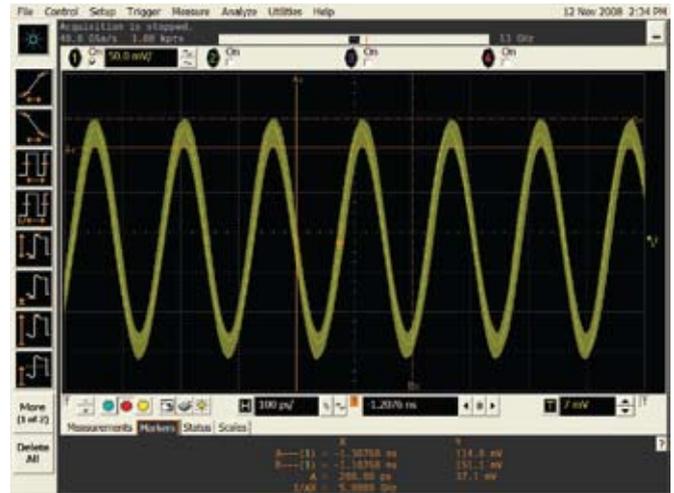
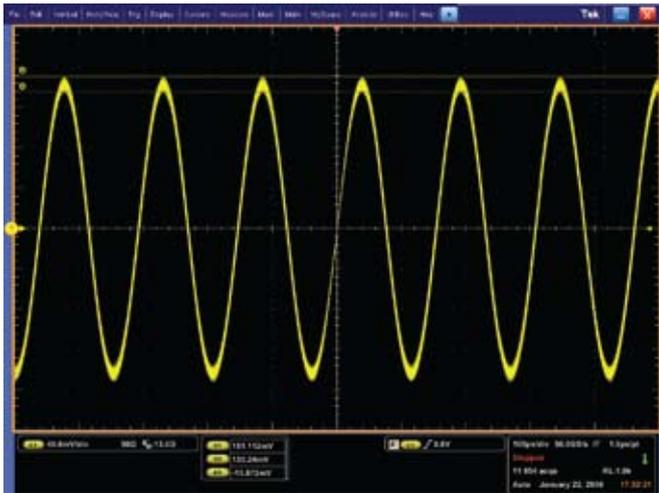


Рисунок 7. Непосредственное сравнение синусоидального сигнала частотой 6,5 ГГц на осциллографах Tektronix и Agilent.

Как проявляется ENOB на реальных сигналах

Эффективная разрядность оказывает влияние как на амплитудные, так и на временные измерения. Рассмотрим это влияние подробнее.

■ Влияние ENOB на измерение амплитуды

Предположим, что мы выполняем регистрацию синусоидального сигнала. Давайте снова сравним осциллографы Tektronix DPO/DSA70000B и Agilent DSO90000A, чтобы показать, как проявляется эффективная разрядность в реальных измерениях.

На рис. 7 мы подали один и тот же синусоидальный сигнал частотой 6,5 ГГц на оба осциллографа. Оба прибора настроены на полосу 13 ГГц и полный диапазон 400 мВ. Кроме того, на обоих приборах включено бесконечное послесвечение экрана, что позволяет увидеть все выполненные захваты. Усреднение ни в одном из приборов не применялось. Оба прибора выполнили примерно 10 тысяч захватов.

На осциллографе Tektronix видимая «толщина» линии на пиках сигнала составляет примерно 15,9 мВ. Это соответствует 3% от полного диапазона.

На осциллографе Agilent видимая «толщина» линии на пиках сигнала составляет примерно 37 мВ. Это соответствует 9% от полного диапазона.

На рис. 3 видно, что на частоте 6,5 ГГц эффективная разрядность осциллографа Tektronix достигает минимального значения (примерно 5,6), тогда как осциллограф Agilent имеет на этой частоте эффективную разрядность около 4,5.

Сравнение джиттера в режиме TIE
(ампл. значение)

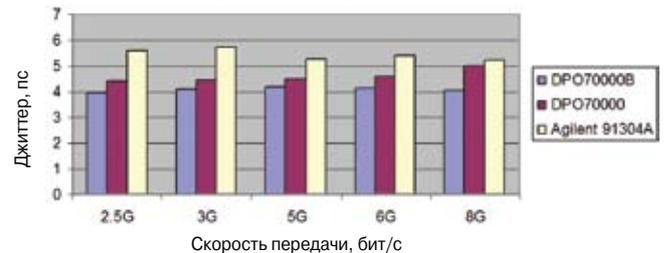


Рисунок 8. Сравнение измерений джиттера.

■ Влияние ENOB на измерение джиттера

Джиттер (апертурная погрешность и другие временные ошибки) является одним из элементов, дающих вклад в эффективную разрядность. Так что нет ничего удивительного в том, что эффекты реальных условий проявляются на измерениях джиттера. На рис. 8 показано измерение джиттера, в котором в качестве источника входного сигнала использовался генератор тестовых последовательностей для измерения коэффициента битовых ошибок (BERT), настроенный на последовательность 1010. Генератор BERT последовательностей – это генератор сверхчистых сигналов. Для данного теста было использовано 5 разных скоростей передачи данных, и на каждой скорости выполнялось измерение джиттера на каждом из сравниваемых приборов.

Осциллограф Tektronix DPO/DSA70000B продемонстрировал минимальные значения джиттера для всех скоростей передачи, тогда как джиттер осциллографа Agilent 90000A оказался от 26% до 41% больше. Ни один из приборов не продемонстрировал существенного отклонения для разных скоростей передачи.

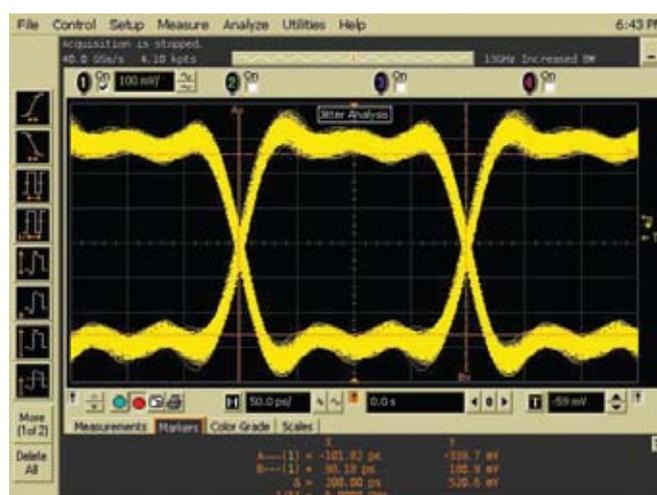
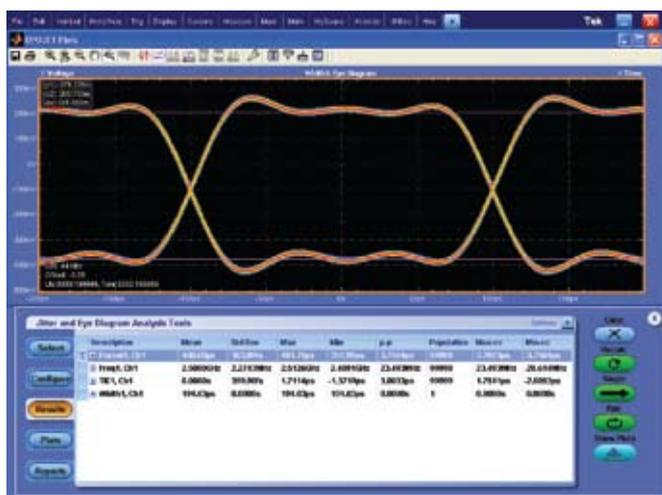


Рисунок 9. Конфигурация, использованная для измерения собственного джиттера.

Влияние ENOB на глазковую диаграмму

Как и следовало ожидать, влияние ENOB отражается и на глазковой диаграмме, причем оно проявляется и на амплитуде, и на джиттере глаза.

Следующие две глазковые диаграммы получены с помощью генератора BERT последовательностей в качестве источника входного сигнала, причем использовалась скорость передачи 5 Гбит/с. Это соответствует сигналам шин PCI-E Gen2 и USB 3.0. Упомянутый сигнал подавался на осциллографы Tektronix DPO70000B и Agilent DSO81304. Перед измерением оба прибора были настроены на максимально близкие параметры. Оба прибора использовались в режиме измерения джиттера TIE.

Непосредственное сравнение показывает, что влиянию подвержены и джиттер, и амплитудный шум. Джиттер, измеренный осциллографом Tektronix, оказался равным 3,08 пс (пик-пик), тогда как джиттер, измеренный осциллографом Agilent на том же сигнале, оказался равным 11,4 пс (пик-пик). Таким образом, осциллограф Agilent показал значение джиттера этого сигнала на 350% больше.

Аналогичным образом существенную разницу демонстрируют и измерения амплитуды. В этом случае грубое измерение высоты глаза (на уровне 50%) дает значение примерно 582 мВ на осциллографе Tektronix и примерно 521 мВ на осциллографе Agilent. В этом случае величина, измеренная осциллографом Agilent, оказалась на 10% меньше.

Заключение

Как было показано, эффективная разрядность является общим показателем качества сигнала любой аналого-цифровой системы, и в том числе осциллографов реального времени. Эффективная разрядность отражает кумулятивные ошибки системы дискретизации во всем диапазоне частот для фиксированных настроек прибора. В общем случае эффективная разрядность снижается с ростом частоты.

Было показано, что ошибки, связанные с уменьшением эффективной разрядности, проявляются на реальных сигналах в виде повышенного шума при измерениях амплитуды и повышенного джиттера при измерении джиттера.

При снижении эффективной разрядности снижается точность измерения прибора. Это непосредственно сказывается на допусках величин, тестируемых с помощью этих приборов. Например, может оказаться, что вы не укладываетесь в допуски при тестировании на соответствие некоторому стандарту, потому что используемый прибор просто не обладает достаточной точностью для указанных допусков тестируемых величин. Приборы с большей эффективной разрядностью обеспечивают более воспроизводимые измерения, благодаря большей точности измерительной системы.

Скорости передачи данных последовательных шин 2-го и 3-го поколений (Gen2 и Gen3) требуют повышенной производительности контрольно-измерительных приборов. Для выполнения таких измерений недостаточно обеспечить лишь требуемую полосу пропускания осциллографа. Необходимо также превосходное значение ENOB, которое гарантировало бы соответствующий запас точности выполняемых измерений.

Контактная информация:

Россия и СНГ +7 (495) 7484900

Австрия +41 52 675 3777
Ассоциация государств Юго-Восточной Азии / Австралия (65) 6356 3900
Балканы, Израиль, Южная Африка и другие страны ISE +41 52 675 3777
Бельгия 07 81 60166
Ближний Восток, Азия и Северная Африка +41 52 675 3777
Бразилия и Южная Америка (55) 40669400
Великобритания и Ирландия +44 (0) 1344 392400
Германия +49 (221) 94 77 400
Гонконг (852) 2585-6688
Дания +45 80 88 1401
Индия (91) 80-22275577
Испания (+34) 901 988 054
Италия +39 (02) 25086 1
Канада 1 (800) 661-5625
Люксембург +44 (0) 1344 392400
Мексика, Центральная Америка и страны Карибского бассейна 52 (55) 54247900
Народная республика Китай 86 (10) 6235 1230
Нидерланды 090 02 021797
Норвегия 800 16098
Польша +41 52 675 3777
Португалия 80 08 12370
Республика Корея 82 (2) 6917-5000
США 1 (800) 426-2200
Тайвань 886 (2) 2722-9622
Финляндия +41 52 675 3777
Франция +33 (0) 1 69 86 81 81
Центральная и Восточная Европа, Украина и страны Балтики +41 52 675 3777
Центральная Европа и Греция +41 52 675 3777
Швейцария +41 52 675 3777
Швеция 020 08 80371
Южная Африка +27 11 206 8360
Япония 81 (3) 6714-3010
Из других стран звоните по телефону: 1 (503) 627-7111

Дополнительная информация

Компания Tektronix может предложить вам богатую, постоянно пополняемую библиотеку указаний по применению, технических описаний и других документов, которые адресованы инженерам, разрабатывающим высокотехнологичное оборудование. Посетите сайт www.tektronix.com.



Продукты изготовлены на предприятиях, сертифицированных согласно стандарту ISO.

Copyright © 2008, Tektronix. Все права защищены. Продукты Tektronix защищены патентами США и иностранными патентами как действующими, так и находящимися на рассмотрении. Информация, приведенная в этой публикации, заменяет информацию, приведенную во всех ранее опубликованных материалах. Компания оставляет за собой право изменения цены и технических характеристик. TEKTRONIX и TEK являются зарегистрированными товарными знаками компании Tektronix, Inc. Все другие упоминаемые торговые наименования являются знаками обслуживания, товарными знаками или зарегистрированными товарными знаками соответствующих компаний.

1/09 FLG/WWW

55U-23761-0

Tektronix[®]