

# ЧАСТОТА ДИСКРЕТИЗАЦИИ ОСЦИЛЛОГРАФА И ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

## ЧАСТЬ 2. ТОЧНОСТЬ ДИСКРЕТИЗАЦИИ

**Джонни Хэнкок**, инженер, компания Agilent Technologies

Часть 2 статьи посвящена точности дискретизации. При выборе осциллографа для точных высокоскоростных цифровых измерений, точность дискретизации зачастую важнее ее максимальной частоты. Проводя измерения на осциллографах с разными значениями полосы пропускания и частоты дискретизации, мы продемонстрируем крайне неочевидный вывод: осциллографы с большей частотой дискретизации могут достигать меньшей точности отображения сигнала из-за некорректно работающей системы АЦП.

### ВВЕДЕНИЕ

Цифровые запоминающие осциллографы (ЦЗО) – это основное средство измерения качества сигнала, таких его характеристик, как время нарастания/спада, время удержания/установления, параметры глазковой диаграммы.

Две ключевые характеристики, которые определяют точность измерения осциллографом качества сигнала, – это полоса пропускания и частота дискретизации.

В части 1 этой статьи (ЭК №2, 2007) мы определили, что для осцил-

лографов с гауссовым типом частотной характеристики, типичным для приборов с полосой пропускания 1 ГГц и ниже, минимальное соотношение частоты дискретизации к полосе пропускания должно составлять 4:1. А минимально допустимое соотношение 2,5:1 подходит для осциллографов с максимально плоской частотной характеристикой, которая характерна для приборов с полосой пропускания, превышающей 1 ГГц.

В этой части статьи будет показано, что при выборе осциллографа для точных высокоскоростных цифровых

измерений точность дискретизации зачастую важнее ее максимальной частоты.

### ДИСКРЕТИЗАЦИЯ С ЧЕРЕДОВАНИЕМ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

После того, как технология АЦП достигла потолка в плане максимальной частоты дискретизации, как производители осциллографов смогли достичь еще больших ее значений? Борьба за высокую частоту дискретизации развернулась, вероятно, потому что у пользователей существовало мнение «чем больше – тем лучше», а также потому что более высокая частота дискретизации действительно могла понадобиться для измерений в реальном времени с помощью осциллографов с очень широкой полосой пропускания. Но получить более высокую частоту дискретизации в осциллографе – это не настолько просто, как взять с полки АЦП с более высокой частотой.

Общий способ решения этой проблемы, который используют все ведущие производители осциллографов – это чередование нескольких АЦП реального времени. Не стоит путать этот метод с чередованием выборок с повторным захватом данных, что обычно называют «дискретизацией эквивалентного времени» (а не реального) и используют в стробоскопических осциллографах.

На рисунке 1 показана блок-схема системы дискретизации в реальном времени, состоящая из 2 чередующихся АЦП

Рис. 1. Система дискретизации в реальном времени, состоящая из 2 чередующихся АЦП

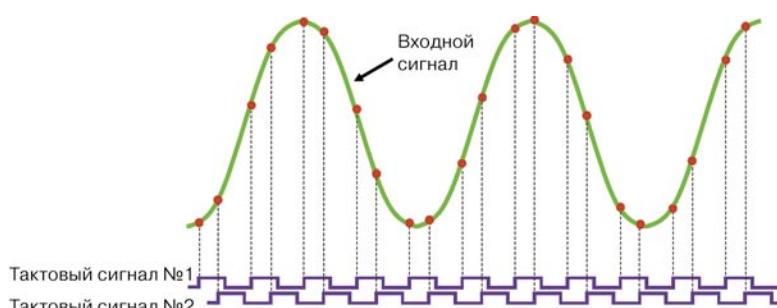


Рис. 2. Временная диаграмма, показывающая выборки через неравные интервалы времени

Осциллографы, использующие дискретизацию с чередованием в реальном времени, должны соответствовать двум основным требованиям. Для точного чередования, не вносящего искажения, вертикальное усиление,

отстройка и частотная характеристика обоих АЦП должны совпадать. Вторых, тактовые сигналы, смещенные по фазе, должны быть очень точно соотнесены во времени, чтобы соответствовать второму правилу Найквиста о равном интервале между выборками. Другими словами, такты второго АЦП должны быть задержаны по отношению к тактам первого строго на  $180^\circ$ . Оба эти фактора крайне важны и для более ясного понимания возможных ошибок, связанных с некорректным чередованием, в оставшейся части статьи они будут рассмотрены и подкреплены примерами.

Временная диаграмма на рисунке 2 показывает некорректную задержку во времени между чередующимися АЦП — в этом случае она составляет отнюдь не  $1/2$  периода дискретизации. Красные точки показывают, из какой части сигнала захватывались выборки. Но здесь второе правило Найквиста нарушено — выборки не эквидистантны.

Когда центральный процессор получает данные, сохраненные в памяти каждого АЦП, он исходит из того, что выборки взяты *через равные интервалы времени*. И при попытке восстановить исходный сигнал по выборкам фильтр восстановления осциллографа  $\sin(x)/x$  выдает серьезно искаженный сигнал, как показано на рисунке 3.

Так как соотношение фаз входного и тактового сигналов является случайному, искажения дискретизации в реальном времени, которые иногда называют «шумами дискретизации», можно ошибочно посчитать случайному шумом при просмотре повторяющихся захватов данных. Но эти искажения абсолютно неслучайны. Они связаны с паразитными гармониками тактового сигнала осциллографа.

## ТЕСТИРОВАНИЕ С ЦЕЛЬЮ ВЫЯВЛЕНИЯ ИСКАЖЕНИЙ ЧЕРЕДОВАНИЯ

К сожалению, производители осциллографов не приводят в своих спецификациях те параметры, которые напрямую отражают качество дискретизации. Однако есть ряд тестов, позволяющих не только измерить последствия искажений дискретизации, но также выявить сами эти искажения и измерить их. Вот список этих тестов:

1. Анализ эффективного количества битов с использованием синусоидальных сигналов.
2. Визуальный тест синусоидального сигнала.
3. Стабильность измерений.
4. Спектральный анализ.

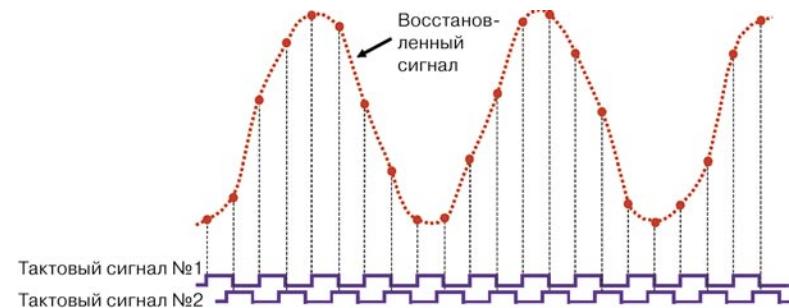


Рис. 3. Исажение исходного сигнала из-за неверной задержки тактового сигнала по фазе

### Анализ эффективного количества бит

Параметр, который производители все-таки указывают в спецификациях — это эффективное количество бит (ENOВ, effective number of bits). Однако этот параметр состоит из нескольких компонентов, включая гармонические искажения входного усилителя и случайные шумы. Хотя измерение этого параметра даст хорошие результаты, отражающие точность осциллографа в целом, и которые потом можно сравнить с показателями других моделей, он не дает ясного понимания качества дискретизации, кроме того, требуется дополнительно экспорттировать данные в РС. В принципе, ENOB-тест сначала извлекает из оцифрованного синусоидального сигнала идеальную синусоиду, максимально к нему близкую. Этот алгоритм подгонки кривых устраняет любые погрешности, внесенные усилителем осциллографа, а также неточностями отстройки. Затем тест рассчитывает СКЗ погрешности за один период оцифрованного синусоидального сигнала как его отношение к идеальному. Затем это СКЗ погрешности сравнивается с теоретическим идеальным значением СКЗ погрешности N-битного АЦП. Например, если система захвата осциллографа имеет эффективную точность 5,3 бит, считают, она генерирует то же СКЗ погрешности, что и 5,3-битный АЦП.

Более понятный и легкий тест для обнаружения искажений чередования АЦП — это подать на канал прибора с помощью хорошего генератора сигналов синусоиду с частотой, приближающейся к полосе пропускания осциллографа. А потом визуально оценить, насколько точна форма оцифрованного сигнала.

Еще один простой тест — это сравнение стабильности результатов параметрических измерений, таких, как стандартное отклонение времени нарастания, спада или напряжение от пика до пика на нескольких разных моделях

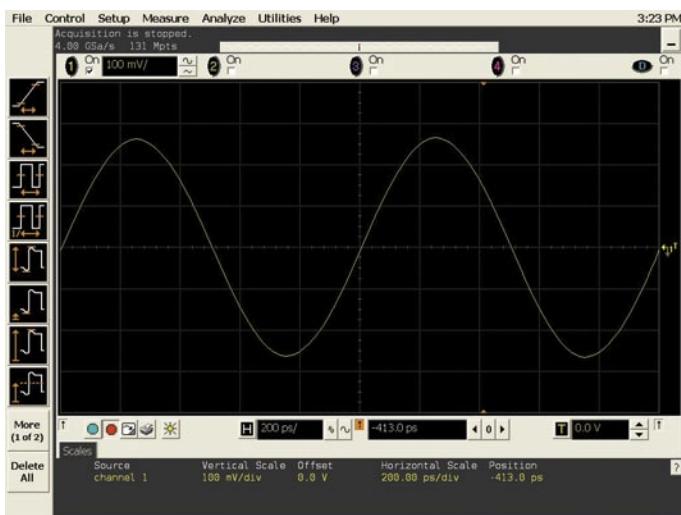
осциллографов с одной и той же полосой пропускания. Если есть искажения чередования АЦП — результаты измерений будут нестабильными, как при наличии случайного шума.

Искажения чередования АЦП можно измерить также и в частотной области, используя математическую функцию БПФ (быстрое преобразование Фурье) осциллографа. Если на вход поступает чистый синусоидальный сигнал, идеальный/неискаженный спектр должен состоять из одной частотной компоненты на частоте входного сигнала. Любые другие выбросы в спектре частот являются искажениями. Эту методику можно также применять для цифровых тактовых сигналов, но при этом спектр несколько сложнее, поэтому нужно точно знать, что вы ищете.

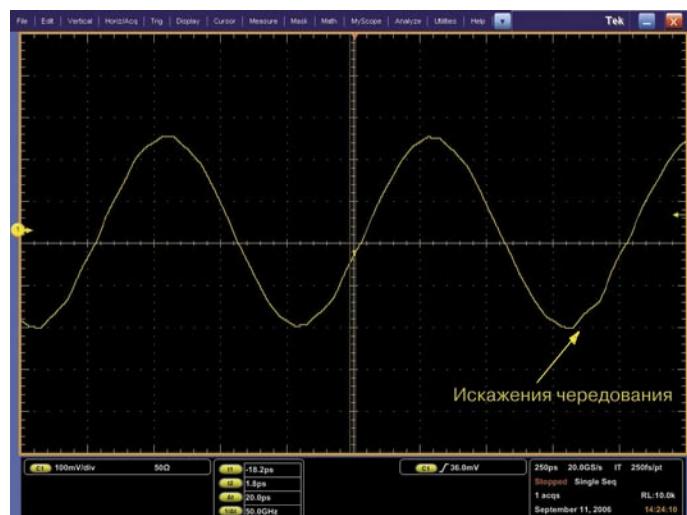
### Тестирование на основе визуального сравнения синусоидальных сигналов

На рисунке 4 показан самый простой и интуитивно понятный сравнительный тест — визуальное сравнение синусоидальных сигналов. Сигнал на рисунке 4а — это захват синусоиды частотой 1 ГГц осциллографом Agilent Infiniium MSO8104A с полосой пропускания 1 ГГц и частотой дискретизации 4 Гвыб./с. Соотношение частоты дискретизации к полосе пропускания этого осциллографа равно 4:1, технология чередования АЦП не используется. Сигнал на рисунке 4б — захват того же самого сигнала с помощью осциллографа Tektronix DPO7104 с полосой пропускания также 1 ГГц и частотой дискретизации 20 Гвыб./с. Благодаря чередованию АЦП соотношение частоты дискретизации к полосе пропускания у этого прибора достигает 20:1.

Хотя кажется, что осциллограф с большей частотой дискретизации при той же полосе пропускания должен обеспечить более точные результаты измерений, из этого сравнения видно, что осциллограф с меньшей частотой дискретизации гораздо точнее отобразил исходный синусоидальный

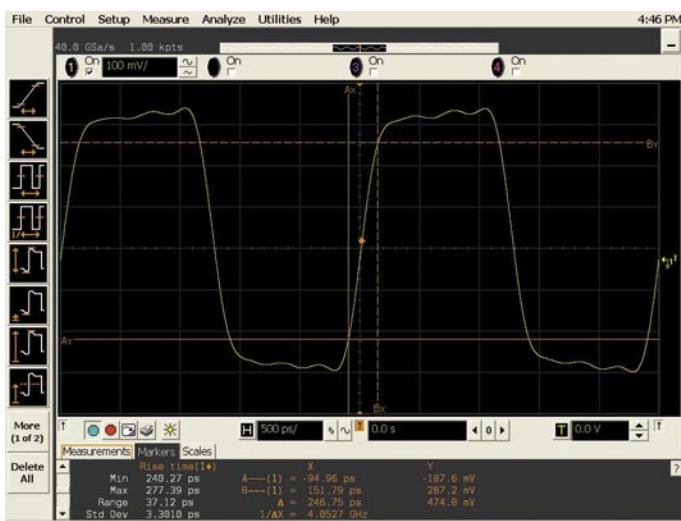


a)

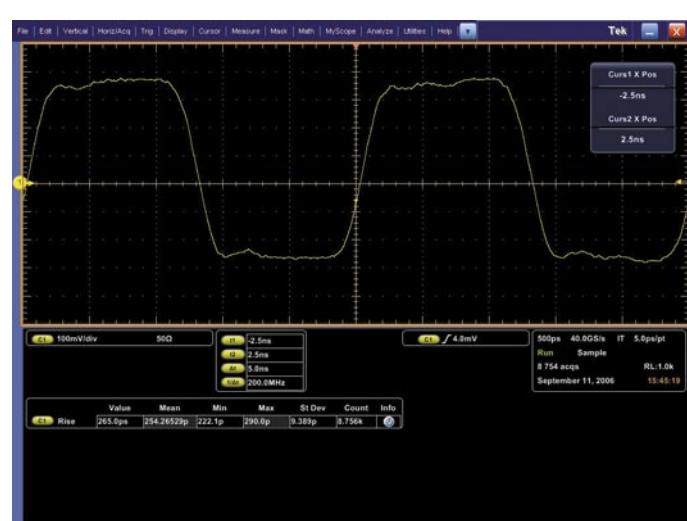


б)

Рис. 4. Синусоида с частотой 1 ГГц, захваченная осциллографом (а) Agilent MSO8104A (полоса 1 ГГц, частота дискретизации 4 Гвыб./с), (б) Tektronix DPO7104 (полоса 1 ГГц, частота дискретизации 20 Гвыб./с)



а)



б)

Рис. 5. Тактовый сигнал 400 МГц, захваченный осциллографом (а) Agilent Infiniium DSO80304B 3 ГГц с частотой дискретизации 40 Гвыб./с, (б) Tektronix DPO7254 2,5 ГГц с частотой дискретизации 40 Гвыб./с

сигнал. Это произошло отнюдь не потому, что более низкая частота дискретизации всегда лучше, а потому что некорректное чередование АЦП сводит на нет все плюсы высокой частоты дискретизации.

Точность чередования АЦП становится еще важнее в осциллографах с большей полосой пропускания и большей частотой дискретизации. Небольшой погрешностью, связанной с некорректной задержкой такта по фазе, при низкой частоте дискретизации осциллографа иногда можно пренебречь, но та же погрешность при высокой частоте дискретизации становится значительной (так как периоды дискретизации меньше).

#### Сравнительное тестирование стабильности результатов измерения цифрового тактового сигнала

Специалисты по цифровым разработкам могут сказать, что им безразлично искажение аналоговых сигналов, которое мы видели на примере синусоиды. Но следует помнить, что любой цифровой сигнал можно разложить на бесконечное количество синусоид. И если искажена пятая гармоника цифрового тактового сигнала, весь цифровой сигнал также искажен.

Хотя тестировать искажения дискретизации на цифровых сигналах сложнее, это вполне возможно. Визуальный тест в этом случае исключен — ведь такого явления, как «чистый» генератор цифровых сигналов, не существует. Цифровые сигналы, даже генерируемые самыми лучшими генераторами импульсов, могут содержать помехи, а также иметь колебания скорости нарастания фронтов. Кроме того, форму цифровых сигналов может искажать сам осциллограф вследствие импульсной характеристики и неидеальной АЧХ.

Но есть несколько тестов, которые можно провести для сравнения качества систем АЦП осциллографов, используя высокоскоростные тактовые сигналы. Один из таких тестов — это проверка стабильности результатов измерений параметров, таких, как стандартный разброс результатов измерения времени нарастания/спада. Искажения, возникающие из-за некорректного чередования, приводят к нестабильности результатов измерения скорости нарастания фронтов, а также вносят регулярный джиттер.

На рисунке 5 показаны два осциллографа с примерно одинаковой полосой пропускания, захватывающие цифровой тактовый сигнал с частотой 400 МГц и измеряющие

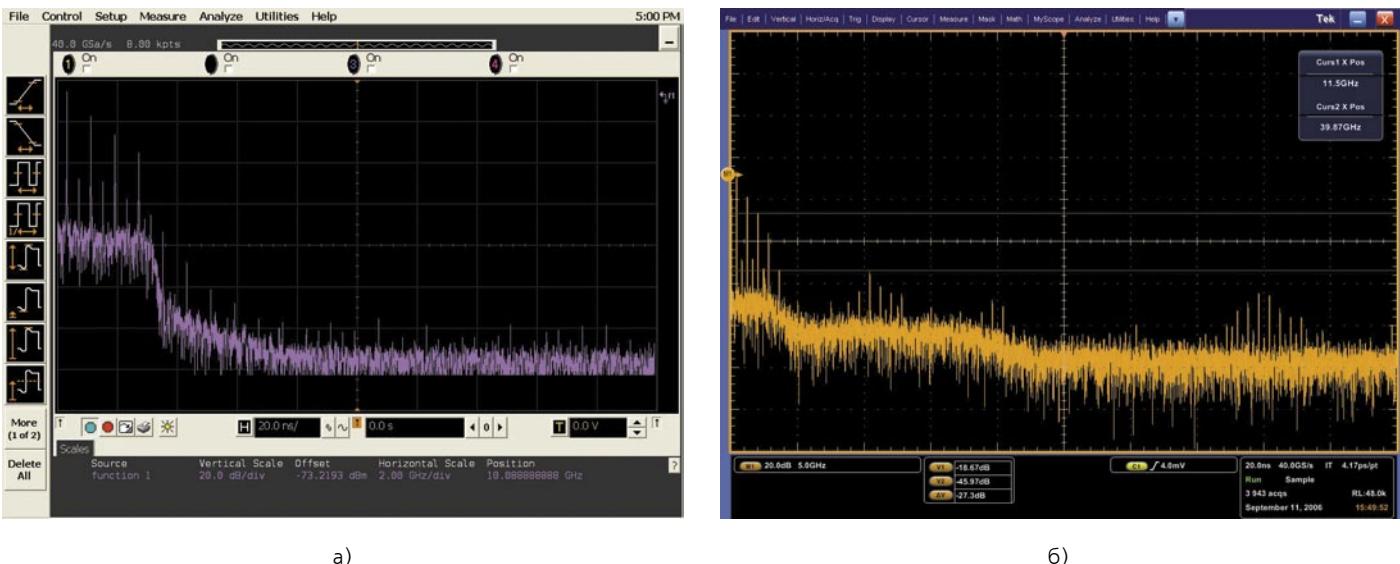


Рис. 6. БПФ-анализ 400 МГц тактового сигнала с использованием осциллографа (а) Agilent Infiniium DSO80304B с полосой пропускания 3 ГГц, (б) Tektronix DPO7254 с полосой пропускания 2,5 ГГц

время нарастания (у этого сигнала время нарастания находится в пределах 250 пс). На рисунке 5а показан прибор Agilent с полосой пропускания 3 ГГц, чередующий два АЦП с частотой дискретизации 20 Гвыб./с каждый для достижения 40 Гвыб./с. Измерения с накоплением времени нарастания дают разброс около 3,3 пс. На рисунке 5б показан осциллограф Tektronix с полосой пропускания 2,5 ГГц, чередующий 4 АЦП с частотой дискретизации 10 Гвыб./с каждый для достижения той же частоты дискретизации 40 Гвыб./с. Кроме более нестабильной картинки на экране, разброс результатов измерения этим прибором времени нарастания сигнала составляет 9,3 пс. Более корректно реализованная технология чередования АЦП в осциллографе Agilent, а также низкий уровень собственного шума позволяют прибору с большей точностью захватывать высокочастотные гармоники этого сигнала и, следовательно, осуществлять более стабильные измерения.

### Результаты сравнения спектрального анализа

Метод визуального сравнения синусоидального сигнала и сравнение стабильности измерений не показывают достаточно наглядно, что же является причиной искажений сигнала. Они просто показывают результат различных ошибок. Только анализ спектра (БПФ) позволяет идентифицировать составляющие искажений, включая гармонические искажения, случайный шум, а также искажения, вносимые некорректной дискретизацией. Если используется синусоидальный сигнал, генерируемый качественным генератором сигналов, во входном сигнале должна быть всего одна частотная компонента. Все остальные компоненты, обнаруженные с помощью метода БПФ, являются искажениями.

При просмотре частотных компонент цифрового тактового сигнала можно увидеть, что его спектр гораздо сложнее, чем при анализе простого синусоидального сигнала. Чистый тактовый сигнал, генерируемый хорошим генератором импульсов, должен состоять из основной частотной компоненты и ее нечетных гармоник. Если скважность тактового сигнала не равна точно 2, в спектре также будут и четные гармоники меньшей амплитуды. Но если вы знаете, что ищете, а на что можно не обращать внимания, то вполне возможно измерить искажения некорректного чередования АЦП в частотной области с помощью функции БПФ осциллографа.

На рисунке 6а изображен спектр 400-МГц тактового сигнала на экране осциллографа Agilent с полосой пропускания 3 ГГц, дискретизующего сигнал с частотой 40 Гвыб./с. Единственные выбросы, которые можно обнаружить — это основной сигнал, третья, пятая и седьмая гармоники — и еще несколько гармоник с малой амплитудой. Все остальные выбросы в спектре лежат ниже уровня шума осциллографа.

На рисунке 6б спектр этого же сигнала изображен на экране осциллографа Tektronix с полосой пропускания 2,5 ГГц, также дискретизующего сигнал с частотой 40 Гвыб./с. БПФ-анализ показывает не только основной сигнал и его гармоники, но и несколько выбросов, сконцентрированных на частотах 10 и 40 ГГц. Эти выбросы возникают именно из-за некорректно работающей системы чередования АЦП.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как сказано выше, точность отображения сигнала осциллографом зависит не только от частоты дискретизации. В некоторых случаях прибор с меньшей частотой дискретизации может осуществить более точные измерения.

Чтобы удовлетворить критерию Найквиста (Котельникова), нужен осциллограф, обладающий частотой дискретизации как минимум в 2,5...4 раза превышающей полосу пропускания, в зависимости от типа его частотной характеристики. Получение высокого значения частоты дискретизации потребовало от производителей измерительного оборудования внедрения технологии чередования АЦП реального времени. Однако при использовании этой технологии необходимо, чтобы чередующиеся АЦП были четко согласованы друг с другом по амплитуде, а система тактирования с задержкой по фазе была точной. Следует отметить, что проблема здесь не в количестве чередуемых АЦП — скорее, она в уровне точности их чередования. Иначе может быть нарушено второе правило Найквиста (выборки должны производиться через равные интервалы времени), что ведет к искажениям, сводящим на нет все преимущества высокой частоты дискретизации.

Данная тема более развернуто рассматривается в «Agilent application note #1587» под названием «Оценка частоты дискретизации осциллографа по отношению к точности дискретизации: как осуществлять самые точные цифровые измерения» ([www.agilent.ru](http://www.agilent.ru)).