

ЧАСТОТА ДИСКРЕТИЗАЦИИ ОСЦИЛЛОГРАФА И ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

ЧАСТЬ 1. МИНИМАЛЬНО ДОСТАТОЧНАЯ ЧАСТОТА ДИСКРЕТИЗАЦИИ

Джонни Хэнкок, инженер, компания Agilent Technologies

Цифровой запоминающий осциллограф (ЦЗО) — это основной инструмент современного разработчика цифровых схем, используемый для измерения параметров качества сигнала, таких, как время нарастания/спада, время удержания/установления, глазковой диаграммы.

Две ключевых характеристики осциллографа, определяющие точность измерения, — это полоса пропускания и частота дискретизации. Многие инженеры прекрасно представляют себе, какая полоса пропускания требуется им для цифровых измерений. А вот оценка величины частоты дискретизации часто вызывает сомнения и неуверенность. Чаще всего считается, что осциллограф с самой высокой частотой дискретизации обеспечивает самые точные цифровые измерения. Но так ли это?

Первая часть этой статьи и посвящена проблеме выбора частоты дискретизации.

ТЕОРЕМА ДИСКРЕТИЗАЦИИ НАЙКВИСТА

Какая частота дискретизации необходима для вашего приложения? Некоторые инженеры, абсолютно доверяя теореме Найквиста, полагают, что достаточно частоты, вдвое превышающей полосу пропускания осциллографа. Другие же не доверяют технологиям цифровой фильтрации, основанным на теореме Найквиста, и предпочитают, чтобы частота дискретизации осциллографа превышала его полосу пропускания в 10–20 раз. Истина лежит где-то посередине. Чтобы понять почему, необходимо разобраться в теореме Найквиста и понять, какое отношение она имеет к частотной характеристике осциллографа.

Теорема Найквиста утверждает: если аналоговый сигнал занимает полосу частот от 0 до $F_{\max}$, то, чтобы абсолютно точно восстановить его по выборкам, частота дискретизации F_s должна быть как минимум вдвое выше максимальной частоты $F_{\max}^1$.

Из теоремы дискретизации Найквиста следуют два простых правила, хотя применительно к технологии ЦЗО они не так уж просты:

1. Частота дискретизации должна быть более чем в два раза выше частоты самой высокочастотной компоненты дискретизируемого сигнала.

2. Второе, часто забываемое правило — выборки должны находиться на равном расстоянии друг от друга.

То, что Найквист называет $F_{\max}$ — это то, что мы обычно называем частотой Найквиста f_N , которая представляет собой отнюдь не то же самое, что частота пропускания осциллографа f_{BW} . Если полоса пропускания осциллографа строго равна частоте Найквиста, это означает, что осциллограф обладает идеальной частотной характеристикой, которая обрывает-

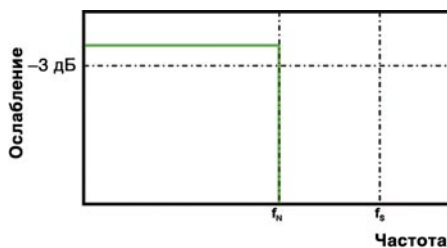


Рис. 1. Идеальная частотная характеристика

ся на этой частоте, как показано на рисунке 1. Составляющие с частотой ниже частоты Найквиста идеально пропускаются (усиление = 1), а превышающие ее — идеально блокируются. К сожалению, подобный идеальный частотный фильтр невозможно реализовать на практике.

Большинство осциллографов с полосой пропускания 1 ГГц или ниже имеют т.н. гауссову частотную характеристику (см. рис. 2). По мере приближения частоты входного сигнала к границе полосы пропускания осциллографа измеряемая амплитуда постепенно уменьшается. Сигнал может ослабляться примерно на 3 дБ (~30%) в полосе пропускания осциллографа. Если полоса пропускания осциллографа равна частоте Найквиста, как показано на рисунке 2, частотные компоненты входного сигнала, превышающие эту частоту, хотя и подавляются больше чем на 3 дБ, могут быть дискретизированы (область, заштрихованная красным цветом), особенно если входной сигнал имеет короткие фронты, характерные для цифровых сигналов. Это нарушает первое правило Найквиста.

Большая часть производителей осциллографов не задает полосу пропускания равной частоте Найквиста f_N (хотя некоторые так поступают). Однако для производителей устройств записи и оцифровки сигнала

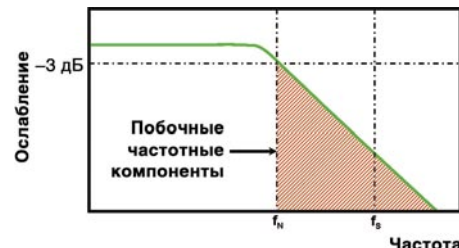


Рис. 2. Типичная гауссова характеристика с полосой пропускания f_{BW} равной частоте Найквиста f_N

¹ В нашей стране эта теорема больше известна как теорема В.А. Котельникова, который в 1929 г. доказал ее в более общей формулировке (для полосовых сигналов) — прим. ред.

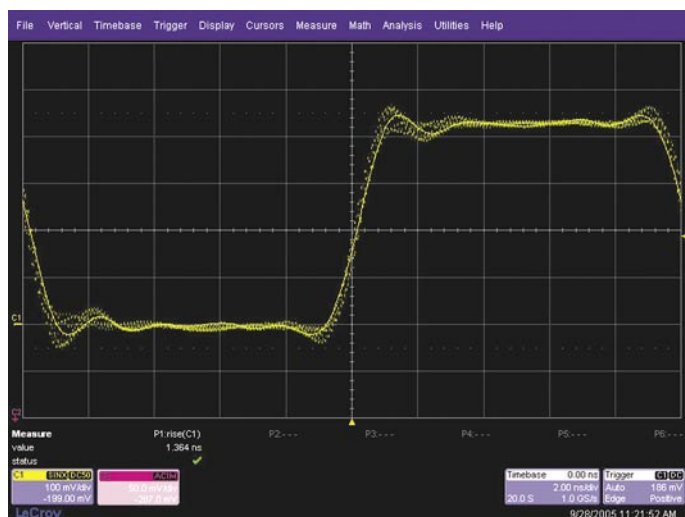


Рис. 3. Осциллограф с полосой пропускания 500 МГц и частотой дискретизации 1 Гвыб./с вносит искажения во фронты импульсов

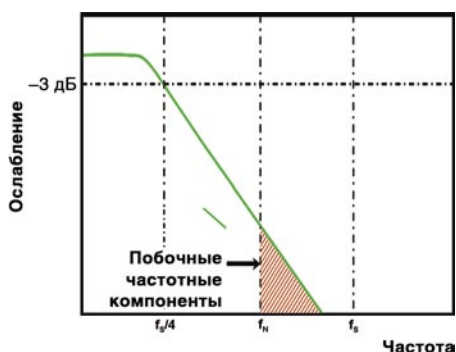


Рис. 4. Ограничение полосы пропускания осциллографа f_{BW} величиной $1/4$ частоты дискретизации ($f_{BW} = f_s/4$) снижает количество частотных компонент выше частоты Найквиста

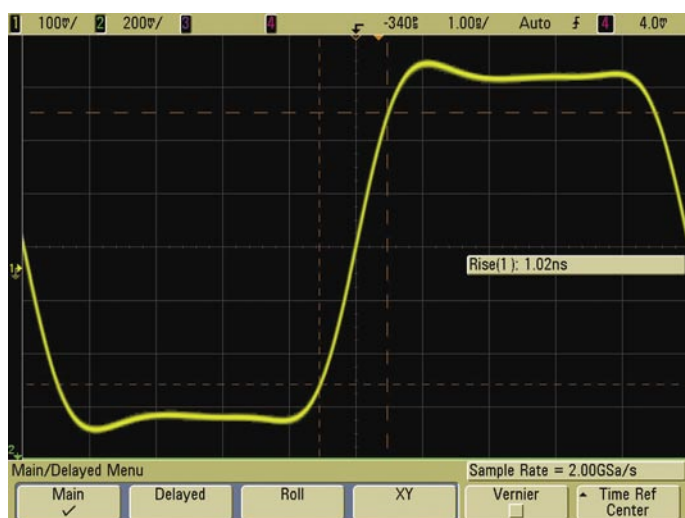
лов такая практика вполне обычна. Давайте посмотрим, что может произойти, если полоса пропускания осциллографа равна частоте Найквиста f_N .

На рисунке 3 показан осциллограф с полосой пропускания 500 МГц и частотой дискретизации 1 Гвыб./с со включенными 3 и 4 каналами. Хотя основная, тактовая частота входного сигнала находится в пределах критерия Найквиста, фронты сигнала содержат высокочастотные компоненты, заметно выходящие за пределы f_N . При анализе сигнала видны артефакты дискретизации: фронты колеблются, «плавают» их крутизна, меняются выбросы на краю фронтов. Этот

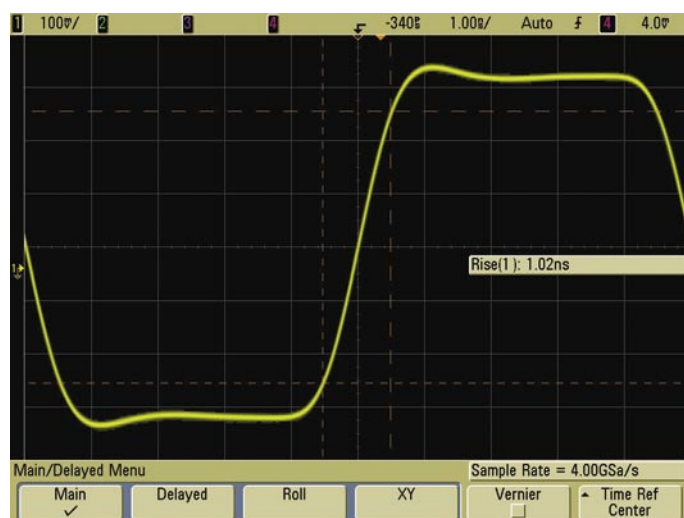
пример свидетельствует о том, что отношения частоты дискретизации к полосе пропускания 2:1 недостаточно для точных цифровых измерений.

Итак, каким же должно быть соотношение частоты пропускания осциллографа f_{BW} и частоты дискретизации f_s , так же, как и частоты Найквиста f_N ? Чтобы минимизировать дискретизацию составляющих, лежащих за пределами частоты Найквиста f_N , их надо предварительно отфильтровать, поэтому большинство производителей осциллографов задают гауссову частотную характеристику пропускания своих приборов на уровне $1/4 \dots 1/5$ частоты дискретизации осциллографа и даже ниже, как показано на рисунке 4. Хотя дискретизация на еще более высоких частотах еще лучше минимизирует количество составляющих за пределами частоты Найквиста, отношения частоты дискретизации к полосе пропускания 1:4 вполне достаточно для точных измерений.

Частотная характеристика осциллографов с полосой пропускания порядка 2 ГГц и выше обычно спадает более круто. Подобный тип частотной характеристики называется «максимально плоской», так как характеристика пропускания такого осциллографа приближается к идеальному фильтру низких частот. Для точного представления исходного сигнала с использованием цифровой фильтрации требуется не так много отсчетов. Теоретически производители могут задать границу полосы пропускания с этим типом частотной характеристики (при условии,



а)



б)

Рис. 5. Измерение 100-МГц тактового сигнала с длительностью фронта 1 нс на осциллографе Agilent MSO6054A с полосой пропускания 500 МГц: а) частота дискретизации 2 Гвыб./с — осциллограф точно отображает сигнал; б) дискретизация с частотой 4 Гвыб./с не обеспечивает значительного улучшения

разумеется, что аппаратная часть прибора позволяет этого добиться) приблизительно на уровне $f_s/2,5$. Однако большинство производителей стараются не выходить за значение $f_s/3$. На рисунке 5а показан осциллограф с полосой пропускания 500 МГц, захватывающий тактовый сигнал с частотой 100 МГц с длительностью фронтов около 1 нс (перепад от 10 до 90%). Значение полосы пропускания 500 МГц является минимально рекомендованной частотой, необходимой для точного захвата этого цифрового сигнала. Этот прибор способен оцифровывать сигнал с частотой 4 Гвыб./с в двухканальном режиме работы или 2 Гвыб./с в трех- или четырехканальном режиме работы. На рисунке 5б показан осциллограф с частотой дискретизации 2 Гвыб./с, что вдвое превышает частоту Найквиста f_N и в четыре раза полосу пропускания f_{BW} . На этом примере видно, что осциллограф с отношением частоты дискретизации к полосе пропускания 4:1 обеспечивает очень стабильное и точное представление входного сигнала. А с цифровой фильтрацией типа $\sin(x)/x$, позволяющей восстановить/интерполировать сигнал,

осциллограф обеспечивает разрешение для измерений пикосекундных выборок и отображения сигнала на интервале порядка 10 с. Как можно видеть, стабильность отображения сигнала и точность здесь гораздо выше, чем в ранее рассмотренном примере на рисунке 3, где показан осциллограф с той же полосой пропускания и с вдвое большей частотой дискретизации f_N .

Так что же произойдет, если удвоить частоту дискретизации с 2 до 4 Гвыб./с ($f_{BW} \times 8$)? Интуитивно кажется, что осциллограф будет обеспечивать значительно лучшее отображение сигнала. Но, как видно на рисунке 5б, улучшение минимально. Если внимательно присмотреться к сигналам на рисунках 5а и 5б, можно видеть, что при частоте дискретизации 4 Гвыб./с чуть меньше выбросы, но измерение времени нарастания показывает одинаковый результат (1,02 нс).

Как сказано выше, осциллографы с полосой пропускания выше 1 ГГц имеют максимально плоскую частотную характеристику. Так как такая характеристика значительно лучше подавляет составляющие сигнала, находящиеся за пределами полосы

пропускания, чем характеристика гауссова типа, для точного восстановления сигнала с использованием цифровой фильтрации требуется меньше выборок.

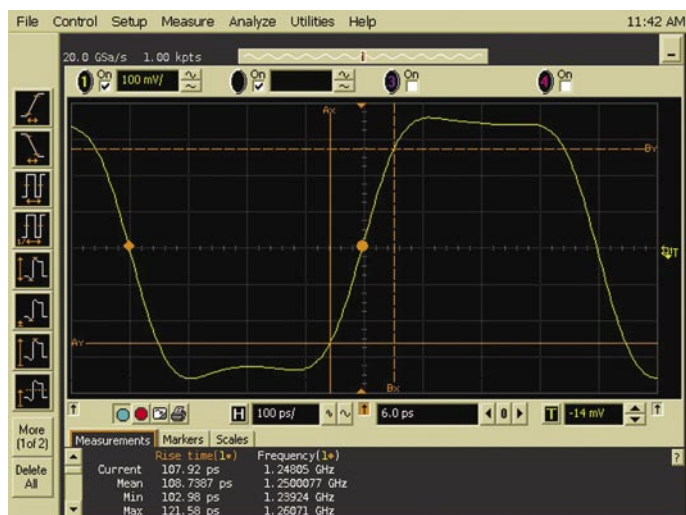
На рисунке 6а изображен тактовый сигнал с частотой 1,25 ГГц и длительностью фронта порядка 100 пс (перепад 10% к 90%), захваченный осциллографом Agilent Infiniium DSO80604B с полосой пропускания 6 ГГц и частотой дискретизации 20 Гвыб./с. Этот входной сигнал может представлять, например, сигнал без возврата к нулю (NRZ) стандарта PCI-Express со скоростью передачи данных 2,5 Гбит/с. Описанные выше значения полосы пропускания и частоты дискретизации являются минимальными для захвата такого сигнала. Они обеспечивают соотношение частоты дискретизации к полосе пропускания на уровне 3,3:1.

При использовании только двух каналов в этом четырехканальном приборе пары однокристальных АЦП по 20 Гвыб./с каждый работают в режиме чередования, что позволяет повысить частоту дискретизации до 40 Гвыб./с, как показано на рисунке 6б. Это обеспечивает соотношение частоты дискретиза-

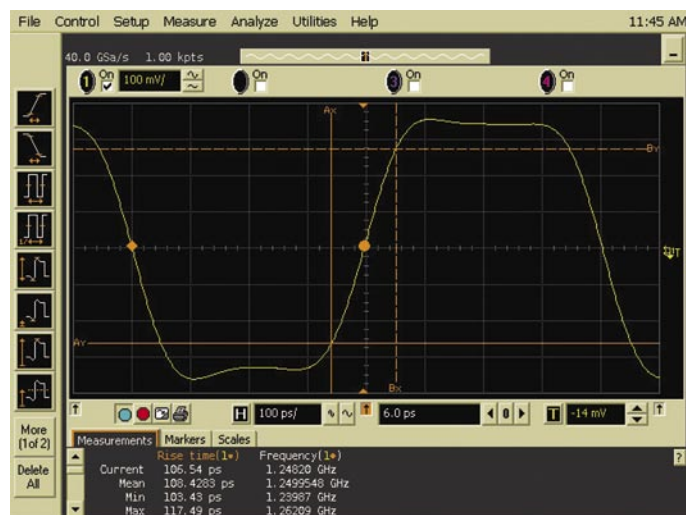
PS ELECTRO

ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ

БЫСТРО - 14 ДНЕЙ
ОЧЕНЬ БЫСТРО - 7 ДНЕЙ
Super **БЫСТРО - 2 ДНЯ**
И НЕДОРОГО - 4 НЕДЕЛИ ОТ 40РУБ./ ДМ²
WWW.PSELECTRO.RU



а)



б)

Рис. 6. Измерение тактового сигнала частотой 1,25 ГГц с длительностью фронта 100 пс на осциллографе Agilent Infiniium DSO80604B с полосой пропускания 6 ГГц: а) частота дискретизации 20 Гвыб./с обеспечивает точные измерения; б) дискретизация с частотой 40 Гвыб./с не обеспечивает значительного улучшения

ции к полосе пропускания на уровне 6,6:1. Однако, как видно из показанного примера, особого улучшения точности измерения и качества отображения сигнала нет. Измеренное значение времени нарастания отличается всего лишь на 300 фс.

Раз для осциллографа на 6 ГГц нет никакого смысла в увеличении частоты дискретизации больше 20 Гвыб./с, возникает закономерный вопрос: «Зачем компания Agilent обеспечивает частоту 40 Гвыб./с на двух каналах?» Дело в том, что все осциллографы Infiniium 80000, поставляемые с различными значениями полосы пропускания в зависимости от модели, используют один и тот же «движок» захвата данных. Из-за этого общего «движка» с частотой дискретизации до 40 Гвыб./с модели с меньшей полосой пропускания можно легко «проапгрейдить» до моделей с большей полосой. Это позволяет пользователям защитить свои вложения в измерительный прибор — им не нужно покупать новый при возникновении необходимости в большей полосе пропускания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показано в части 1 этой статьи, полоса пропускания осциллографа никогда не должна быть равной частоте Найквиста. В осциллографах с частотной характеристикой гауссова типа, характерной для большинства моделей с полосой пропускания 1 ГГц и ниже, соотношение частоты дискретизации к полосе пропускания должно быть не менее 4:1. Осциллографы с максимально плоской характеристикой, характерной для большинства моделей с полосой пропускания выше 1 ГГц, должны иметь соотношение 2,5:1. Хотя частота дискретизации, превышающая минимальную, может что-то дать, эффект от ее увеличения незначителен.

Более подробную информацию (на английском языке) можно найти на сайте www.agilent.com в документе «Evaluating Oscilloscope Sample Rates vs. Sampling Fidelity: How to Make the Most Accurate Digital Measurements».

Микроконтроллеры, микропроцессоры

>> Процессор формата VPX на базе двухъядерного микропроцессора MPC8641D



Curtiss-Wright Controls Embedded Computing выпустила DSP-процессор, построенный на базе двухъядерного микропроцессора Freescale PowerPC/Altivec MPC8641D.

MPC8641D работает на тактовой частоте до 1,5 ГГц и содержит два ядра PowerPC e600, 64 Кбайт L1-кэша и 1 Мбайт L2-кэша на каждое ядро, два контроллера памяти 64-битной DDR/DDR2 SDRAM, четыре контроллера Gigabit Ethernet, интерфейсы PCI Express и Serial RapidIO, а также 128-разрядный векторный процессор Altivec.

Процессорный модуль CHAMP-AV6 выпускается в формате 6U VPX (Versatile Performance Switching, стандарт VITA-46) и содержит четыре двухъядерных микропроцессора MPC8641D, соединенные между собой и с коммутируемой структурой VPX через 8-портовый коммутатор Serial RapidIO. В 8-процессорной конфигурации CHAMP-AV6 имеет пиковую производительность 64 GFLOPs на тактовой частоте 1 ГГц.

Модуль CHAMP-AV6 работает в расширенном диапазоне температур $-40...85^{\circ}\text{C}$ в исполнениях для воздушного и кондуктивного охлаждения. Программное обеспечение процессора CHAMP-AV6: операционные системы Curtiss-Wright Linux 2.6 и Wind River VxWorks 6.x/Workbench 2.x, а также библиотека DSP-функций SSSL, оптимизированная для Altivec-устройства процессоров PowerPC.

Curtiss-Wright Controls Embedded Computing
AVD Systems
www.avdsys.ru