

Методы расширения полосы пропускания осциллографов реального времени

За последние десять лет скорость передачи данных в цифровых каналах связи выросла более чем десятикратно. Ранее широко использовались скорости 1 Гбит/с, а теперь повсеместное распространение получают каналы со скоростью более 10 Гбит/с. Оптические линии связи работают сейчас на скоростях 100 Гбит/с и выше. Ведутся исследования, нацеленные на достижение в ближайшем будущем скоростей 1 Тбит/с. Радиочастотные широкополосные каналы связи работают в настоящее время в диапазонах выше 20 ГГц, при этом радиосвязь и оптические линии передачи используют сложные схемы модуляции и малые амплитуды сигналов для достижения требуемой ёмкости каналов и удовлетворения требований нормативных документов. Это порождает потребность в широкополосных осциллографах реального времени для проверки, сертификации и отладки таких новых систем. В результате разработчики осциллографов вынуждены расширять полосу пропускания осциллографов реального времени до 60-70 ГГц и более.

В настоящей статье сравниваются различные методы расширения полосы пропускания осциллографов реального времени и описывается последнее инновационное решение – **технология асинхронного чередования во времени (ATI)**.

Обычный входной канал с АЦП

Обычный входной канал цифрового осциллографа реального времени использует аналоговый входной интерфейс, состоящий из предусилителя, аттенюатора и схемы выборки и хранения для фиксации амплитуды сигнала на время выборки. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) используется для последовательного преобразования уровней напряжения, поступающих со схемы выборки и хранения, в поток числовых значений (рис. 1).

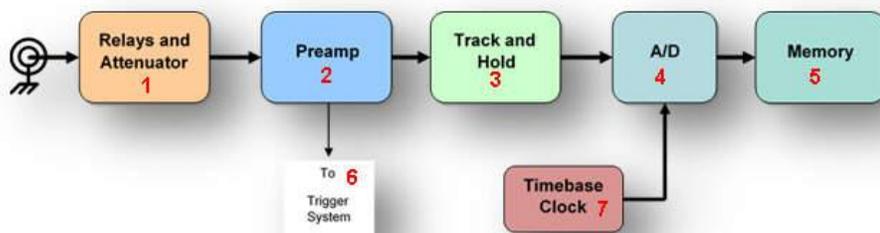


Рис. 1. Обычный входной канал с АЦП.

1. Реле и аттенюатор
2. Предусилитель

1. Официальный документ

Как расширить полосу пропускания осциллографов реального времени

Методы расширения полосы пропускания осциллографов реального времени

3. Схема выборки и хранения
4. АЦП
5. Память
6. К системе запуска
7. Тактовая частота

Если предположить, что аналоговый интерфейс обеспечивает полную полосу пропускания канала, то основным ограничивающим фактором становится частота дискретизации АЦП. Из теоремы Котельникова следует, что для точного представления всех составляющих сигнала в пределах необходимого диапазона частот, частота дискретизации должна не менее чем в два раза превышать максимальную частоту сигнала. Например, для канала с полосой пропускания 25 ГГц потребуется частота дискретизации не менее 50 Гвыб./с. С ростом требований к полосе пропускания становится всё труднее найти АЦП, отвечающий требованиям теоремы Котельникова.

Здесь уместно было бы обсудить шум обычного входного канала с АЦП, поскольку это станет основой дальнейших рассуждений относительно шума канала, связанного с методами улучшения характеристик АЦП.

На рис. 2 показана спектральная плотность мощности белого шума.

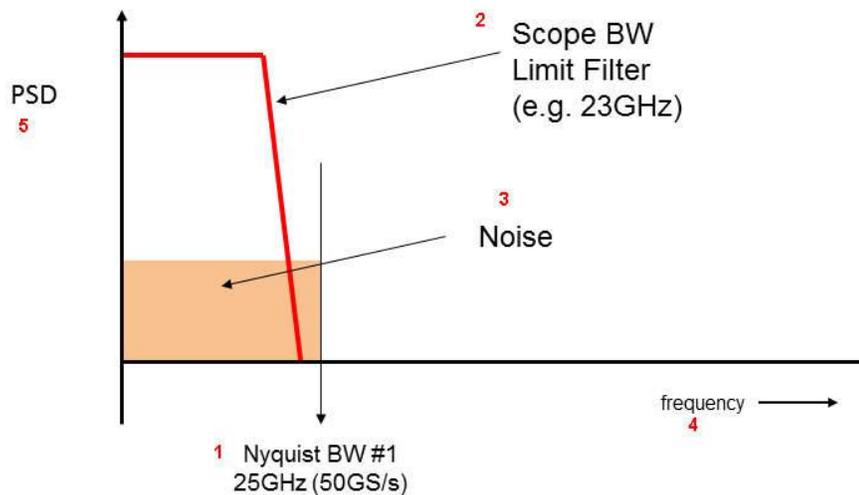


Рис. 2. Спектральная плотность мощности белого шума.

1. Полоса пропускания №1 согласно теореме Котельникова 25 ГГц (50 Гвыб./с)
2. Фильтр, ограничивающий полосу пропускания осциллографа (например, 23 ГГц)
3. Шум
4. Частота
5. Спектральная плотность мощности

Поскольку белый шум по определению содержит все частоты, спектральная плотность мощности равномерно распределена в полосе Котельникова. Для канала с частотой дискретизации 50 Гвыб./с, полоса пропускания согласно теореме Котельникова равна 25 ГГц.

Некоторое подавление шума, заметное на рис. 2, связано с фильтром, ограничивающим полосу пропускания осциллографа (так называемый фильтр защиты от наложения спектров), который подавляет шум, расположенный между частотой среза фильтра и частотой Котельникова для данного канала.

Каналы с временным уплотнением

Если частота дискретизации имеющихся АЦП недостаточна для удовлетворения требований к полосе пропускания, то приходится искать другие способы использования доступной элементной базы для соответствия таким жестким условиям или

2. Официальный документ

Как расширить полосу пропускания осциллографов реального времени

Методы расширения полосы пропускания осциллографов реального времени

создавать АЦП нового поколения. Распространённым методом расширения возможностей имеющихся компонентов является временное уплотнение. В этом случае аналоговый интерфейс проектируется так, чтобы пропускать всю полосу сигнала, а дальше используются два параллельно включенных АЦП. Каждый АЦП должен поддерживать частоту дискретизации, равную, как минимум, половине частоты, необходимой для удовлетворения критерия Котельникова. Например, если аналоговый интерфейс обеспечивает полосу пропускания до 45 ГГц, то для достижения частоты дискретизации 100 Гвыб./с можно использовать чередование двух АЦП с частотой дискретизации 50 Гвыб./с (рис. 3). В этом случае тактовые частоты АЦП должны быть сдвинуты по фазе на 180°. Данные сохраняются в памяти, включенной после каждого АЦП, и по завершении захвата можно реконструировать полный сигнал с частотой дискретизации 100 Гвыб./с путём чередования полученных данных (что иногда называется демультимплексированием). Следует отметить, что никаких ограничений на число чередующихся АЦП не накладывается, хотя с ростом числа АЦП их становится сложнее синхронизировать. Метод временного уплотнения для достижения гигагерцового диапазона используется всеми ведущими производителями осциллографов.

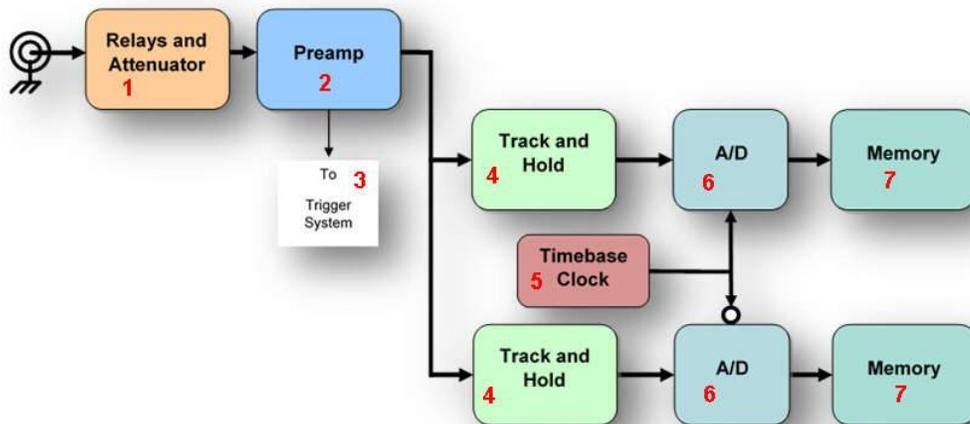


Рис. 3. АЦП с временным уплотнением.

1. Реле и аттенюатор
2. Предусилитель
3. К системе запуска
4. Выборка и хранение
5. Тактовая частота
6. АЦП
7. Память

Важно отметить, что с ростом частоты дискретизации белый шум равномерно распределяется по новой полосе Котельникова. В примере, показанном на рис. 4, частота дискретизации возрастает с 50 до 100 Гвыб./с, в результате чего полоса Котельникова расширяется с 25 до 50 ГГц. Если шумовые характеристики обоих чередующихся каналов одинаковы, то плотность мощности шума уменьшается вдвое и равномерно распределяется в пределах новой полосы Котельникова. Конечно, целью временного уплотнения в нашем случае является расширение полосы пропускания системы за счёт расширения полосы входного аналогового интерфейса и повышения частоты дискретизации, но следует отметить, что если полоса остаётся той же, что описана в начале (используется тот же фильтр для ограничения полосы пропускания осциллографа), то общий эффект заключается в снижении уровня шума.

Практическая реализация этого метода демонстрирует снижение шума на 15 - 20 %.

Как расширить полосу пропускания осциллографов реального времени

Методы расширения полосы пропускания осциллографов реального времени

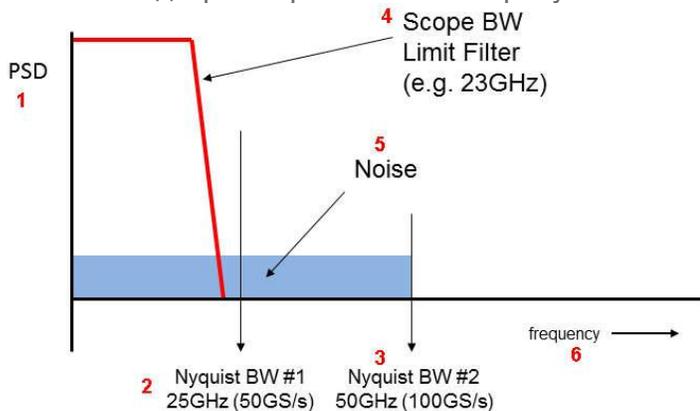


Рис. 4. Расширение полосы Котельникова в результате временного уплотнения.

1. Спектральная плотность мощности
2. Полоса пропускания №1 согласно теореме Котельникова 25 ГГц (50 Гвыб./с)
3. Полоса пропускания №2 согласно теореме Котельникова 50 ГГц (100 Гвыб./с)
4. Фильтр, ограничивающий полосу пропускания осциллографа (например, 23 ГГц)
5. Шум
6. Частота

Каналы с частотным уплотнением – воспользуемся понижающим преобразователем частоты

Понижающие преобразователи частоты уже более ста лет используются в приёмниках и других РЧ устройствах. Концепция проста: смешиваем две частоты и получаем сумму и разность этих частот (этот процесс называется гетеродинированием). Если правильно выбрать одну из этих частот (например, частоту гетеродина) по отношению к другой частоте, то можно получить разностную частоту в более удобном (как правило, более низком) диапазоне и работать далее с этой частотой.

В осциллографах понижающие преобразователи частоты тоже применяются очень давно. Раньше понижающий преобразователь был внешним блоком, и его согласование и калибровка представлялось весьма непростой задачей. Позже понижающие преобразователи стали встраиваться прямо в осциллографы. Если частоту гетеродина осциллографического канала установить равной половине полосы пропускания аналогового интерфейса, то это позволит захватить сигналы верхней половины полосы осциллографа с помощью одного АЦП, а сигналы нижней половины – с помощью другого АЦП. Реконструкция сигнала путём “склейки” верхней и нижней половин спектра выполняется в современных цифровых осциллографах реального времени цифровым сигнальным процессором.

Как расширить полосу пропускания осциллографов реального времени

Методы расширения полосы пропускания осциллографов реального времени

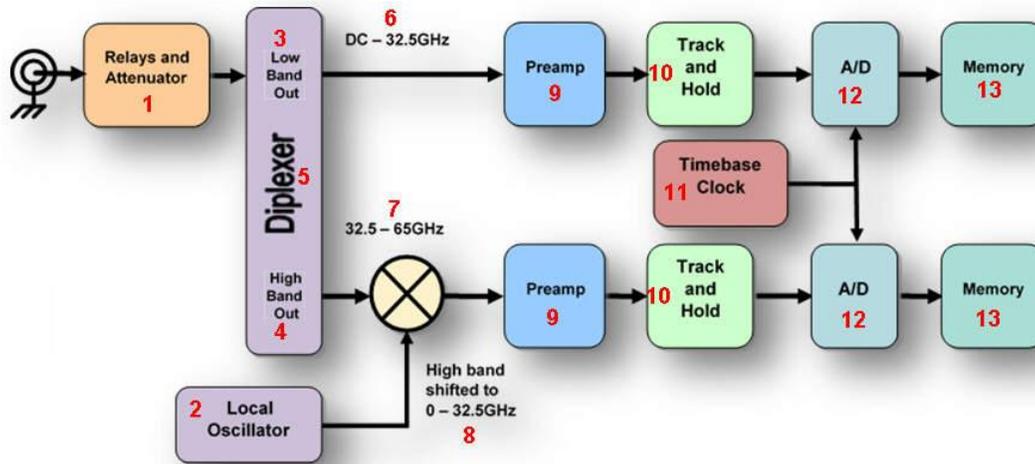


Рис. 5. Пример канала со смесителем.

1. Реле и аттенюатор
2. Гетеродин
3. Выход нижней полосы
4. Выход верхней полосы
5. Диплексер
6. 0 - 32,5 ГГц
7. 32,5 - 65 ГГц
8. Верхний диапазон преобразуется в область 0 - 32,5 ГГц
9. Предусилитель
10. Выборка и хранение
11. Тактовая частота
12. АЦП
13. Память

Первой такой подход в виде функции, встроенной в цифровой осциллограф, которую назвали “Цифровым уплотнением полосы” (DBI), реализовала компания LeCroy. Недавно компания Keysight последовала этому примеру, предложив входные каналы “RealEdge”. Основное преимущество для разработчиков осциллографов заключается в том, что каждый АЦП должен иметь частоту дискретизации, превышающую общую полосу пропускания канала. Однако этот метод сопряжён с другими конструктивными проблемами. После захвата данных и записи их в память нужно повысить частоту тракта верхнего диапазона до исходного значения с помощью методов цифровой обработки сигнала. Объединение двух половин спектра и реконструкция сигнала является достаточно сложной задачей. Поскольку сигнальные тракты не идентичны, нужно компенсировать эти различия путём калибровки, которая является задачей цифрового сигнального процессора. Кроме того, в связи с применением полосовых фильтров для разделения спектра на две половины, точное восстановление центральной части спектра оказывается проблематичным. В зоне объединения наблюдаются проблемы с равномерностью АЧХ и линейностью фазы.

Как расширить полосу пропускания осциллографов реального времени

Методы расширения полосы пропускания осциллографов реального времени

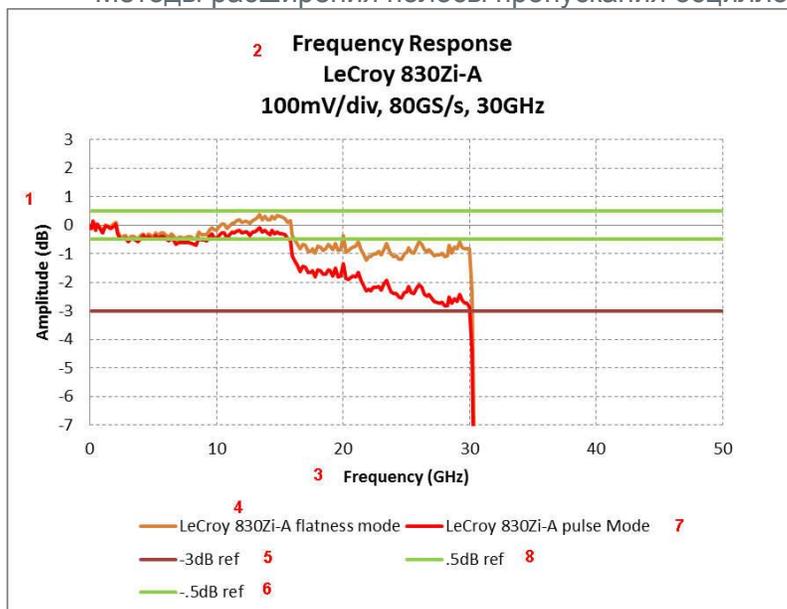
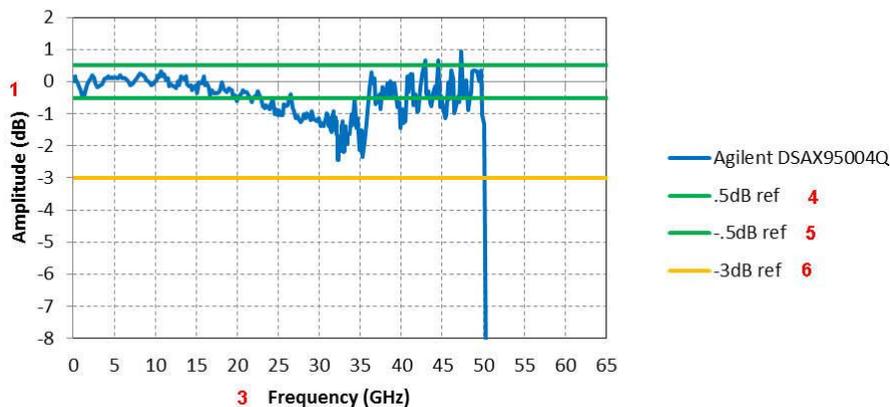


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика осциллографа LeCroy 830Zi-A.

1. Амплитуда, дБ
2. АЧХ осциллографа LeCroy 830Zi-A 100 мВ/дел., 80 Гвыб./с, 30 ГГц
3. Частота, ГГц
4. Линейный режим LeCroy 830Zi-A
5. Опорный уровень -3 дБ
6. Опорный уровень -0,5 дБ
7. Импульсный режим LeCroy 830Zi-A
8. Опорный уровень 0,5 дБ

На рис. 6 показана амплитудно-частотная характеристика осциллографа LeCroy 830Zi-A, который использует DBI в диапазоне выше 16 ГГц. Обратите внимание, что АЧХ достаточно равномерна в диапазоне 0-5 ГГц, но приобретает иной характер в диапазоне 15-30 ГГц. Компания LeCroy предлагает три различных режима "оптимизации". Равномерность АЧХ для двух из этих трех режимов разительно отличается. Например, значение амплитуды на частоте 22 ГГц в линейном режиме будет примерно на 10 % меньше реального значения. В режиме импульсной оптимизации значение амплитуды на той же частоте 22 ГГц будет меньше на 20 %.

2 Agilent DSAX95004Q Frequency Response 50mV/div, 160GS/s, 50GHz bw



6. Официальный документ

Как расширить полосу пропускания осциллографов реального времени

Методы расширения полосы пропускания осциллографов реального времени

Рис. 7. Амплитудно-частотная характеристика осциллографа Keysight DSAX95004Q

1. Амплитуда, дБ
2. АЧХ осциллографа Keysight DSAX95004Q
50 мВ/дел, 160 Гвыб./с, 50 ГГц
3. Частота, ГГц
4. Keysight DSAX95004Q
Опорный уровень 0,5 дБ
5. Опорный уровень -0,5 дБ
6. Опорный уровень -3 дБ

Подобная проблема наблюдается в осциллографе Keysight DSAX95004Q при использовании входов "RealEdge". Амплитудно-частотная характеристика этого прибора показана на рис. 7.

В общем, Keysight лучше справляется с выравниванием АЧХ по сравнению с LeCroy, но обратите внимание на часть графика выше 32 ГГц. Осциллограф Keysight с полосой пропускания 50 ГГц использует ту же схему, что и 63 ГГц модель, так что не удивительно, что аномалия в этом приборе наблюдается на частоте 32 ГГц, а не на частоте 25 ГГц. Отклонение амплитуды в этой области на 2 и более дБ означает, что измерения амплитуды на этих частотах дают погрешность более 20 %.

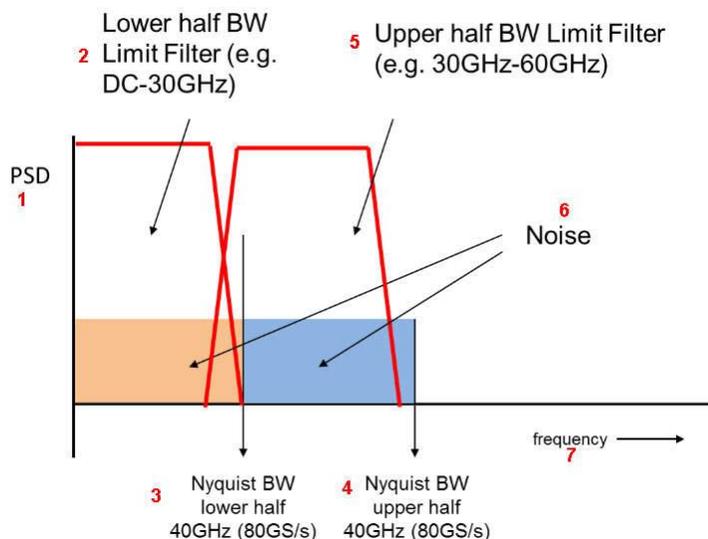


Рис. 8. Спектральная плотность мощности шума в полосе Котельникова.

1. Спектральная плотность мощности
2. Фильтр, ограничивающий нижнюю половину полосы пропускания (например, 0-30 ГГц)
3. Нижняя половина полосы Котельникова
40 ГГц (80 Гвыб./с)
4. Верхняя половина полосы Котельникова
40 ГГц (80 Гвыб./с)
5. Фильтр, ограничивающий верхнюю половину полосы пропускания (например, 30-60 ГГц)
6. Шум
7. Частота

Возвращаясь к рассмотрению шума (рис. 8), будет полезно узнать, что происходит с шумом канала при использовании частотного уплотнения. Как уже говорилось, спектральная плотность мощности шума равномерно распределяется в полосе Котельникова, равной половине частоты дискретизации канала. Поскольку каждый АЦП обрабатывает половину всего частотного диапазона, то потенциальная возможность снижения шумов при переходе от временного уплотнения к частотному отсутствует (при сохранении той же полосы пропускания). На самом деле при использовании частотного уплотнения шум даже возрастает. На рис. 9 показаны два снимка экрана, демонстрирующие это явление в осциллографе Keysight DSAX95004Q путём сравнения шума стандартного канала с полосой 33 ГГц (слева) с шумом канала "RealEdge" с той же полосой 33 ГГц (справа):

7. Официальный документ

Как расширить полосу пропускания осциллографов реального времени

Методы расширения полосы пропускания осциллографов реального времени

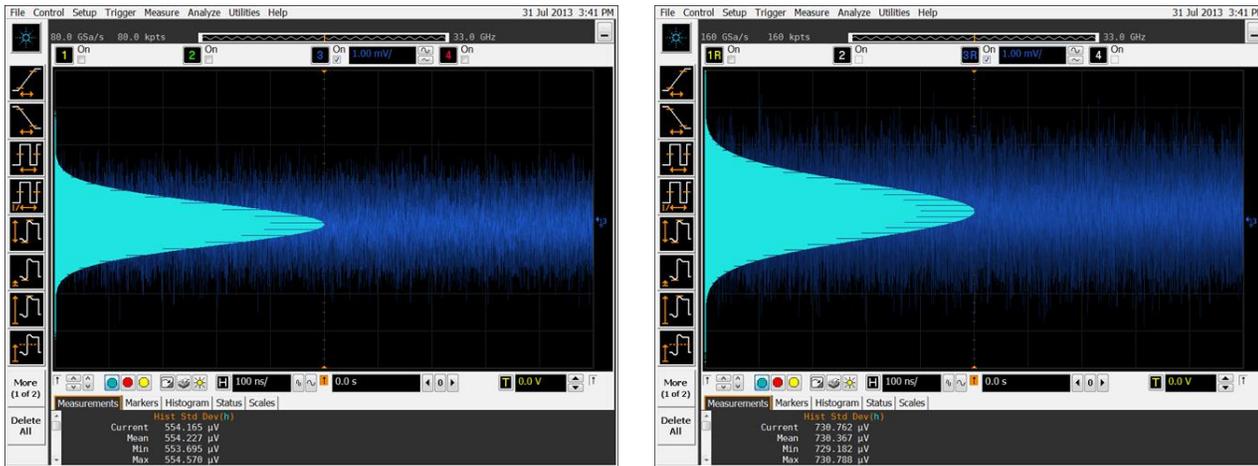


Рис. 9. Сравнение шума входных каналов осциллографа Keysight DSAX95004Q (стандартный режим и режим "RealEdge").

Измеренный уровень собственного шума осциллографа Keysight имеет среднеквадратическое значение 554 мкВ в стандартном канале и 731 мкВ в канале "RealEdge" в одинаковой для обоих режимов полосе 33 ГГц. Шум канала "RealEdge" примерно на 32 % превышает шум стандартного канала.

Технология асинхронного чередования во времени – ещё один метод понижения частоты

Учитывая технические проблемы, связанные с частотным уплотнением, применяемым до сегодняшнего дня в осциллографах гигагерцового диапазона, компания Tektronix предложила новый подход, который позволяет обойти некоторые недостатки DBI и достичь при этом той же расширенной полосы без применения новых АЦП. В методе асинхронного чередования во времени (АТИ) в качестве гармонического смесителя используется предварительный дискретизатор. Структурная схема асинхронного чередования во времени показана на рис. 10:

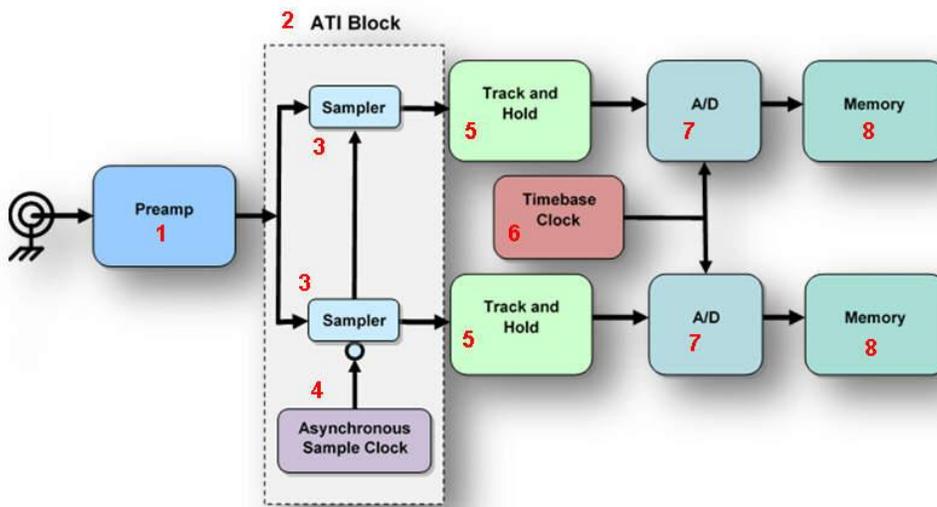


Рис. 10. Структурная схема асинхронного чередования во времени.

8 Официальный документ

Как расширить полосу пропускания осциллографов реального времени

Методы расширения полосы пропускания осциллографов реального времени

1. Предусилитель
2. Блок асинхронного чередования во времени (АТИ)
3. Дискретизатор
4. Асинхронная тактовая частота дискретизаторов
5. Выборка и хранение
6. Тактовая частота
7. АЦП
8. Память

Первое, что бросается в глаза, это симметрия сигнальных трактов. Здесь нет особенной разницы в задержке прохождения или сдвиге фазы между двумя трактами канала. Это упрощает последующие процессы цифровой реконструкции по сравнению с DBI, минимизируя погрешность в области перехода диапазонов. При использовании АТИ на оба АЦП подаётся полная полоса сигнала. При этом спектральная плотность мощности шума равномерно распределяется по общей частоте дискретизации, которая в 2 раза превышает частоту дискретизации каждого АЦП. В результате общий шум в полосе пропускания получается ниже, чем в аналогичной архитектуре DBI.

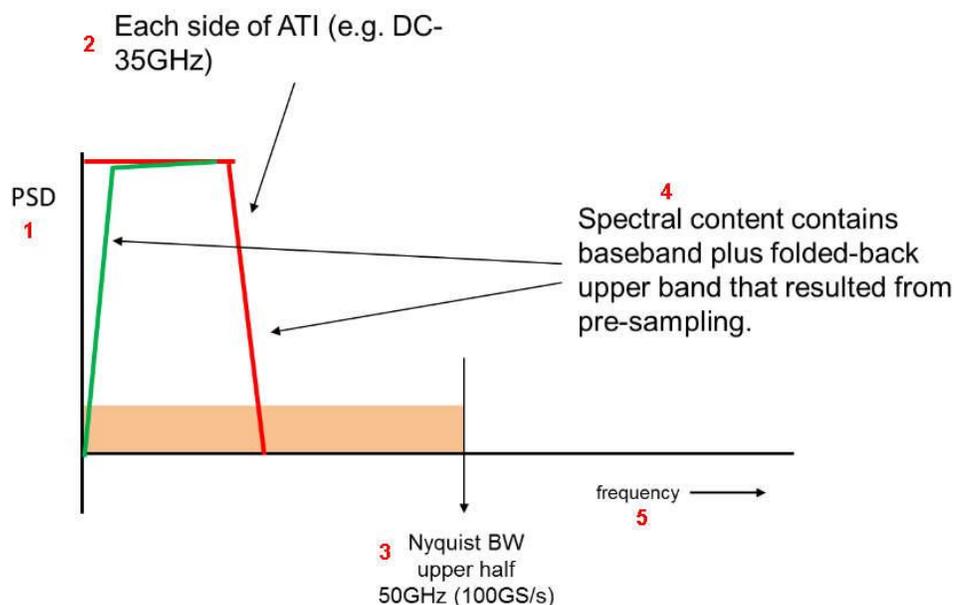


Рис. 11. Сигнал в каждом тракте канала АТИ.

1. Спектральная плотность мощности
2. Любой из трактов АТИ (например, 0-35 ГГц)
3. Верхняя половина полосы Котельникова 50 ГГц (100 Гвыб./с)
4. Спектр содержит основной диапазон плюс закрученную назад верхнюю полосу, возникающую в результате предварительной дискретизации
5. Частота

Поскольку гармоническое смещение и дискретизация по времени, в сущности, являются одним и тем же, смеситель, показанный на структурной схеме АТИ (рис. 10), можно заменить предварительным дискретизатором. Эта схема использует предварительный дискретизатор для субдискретизации входного сигнала, тем самым заворачивая спектр назад в полосу Котельникова АЦП. Например, 70-гигагерцовую систему можно получить с помощью асинхронной тактовой частоты 75 ГГц. В результате верхняя половина сигнала 70 ГГц закрутится назад в диапазон от 0 до 37,5 ГГц. Затем результирующие данные от предварительного дискретизатора оцифровываются АЦП с частотой, независимой от частоты предварительной

Как расширить полосу пропускания осциллографов реального времени

Методы расширения полосы пропускания осциллографов реального времени дискретизации, например, с частотой 100 Гвыб./с. Обратите внимание, что предварительный дискретизатор работает асинхронно с тактовой частотой АЦП. На рис. 11 показан сигнал в каждом тракте канала АТИ.

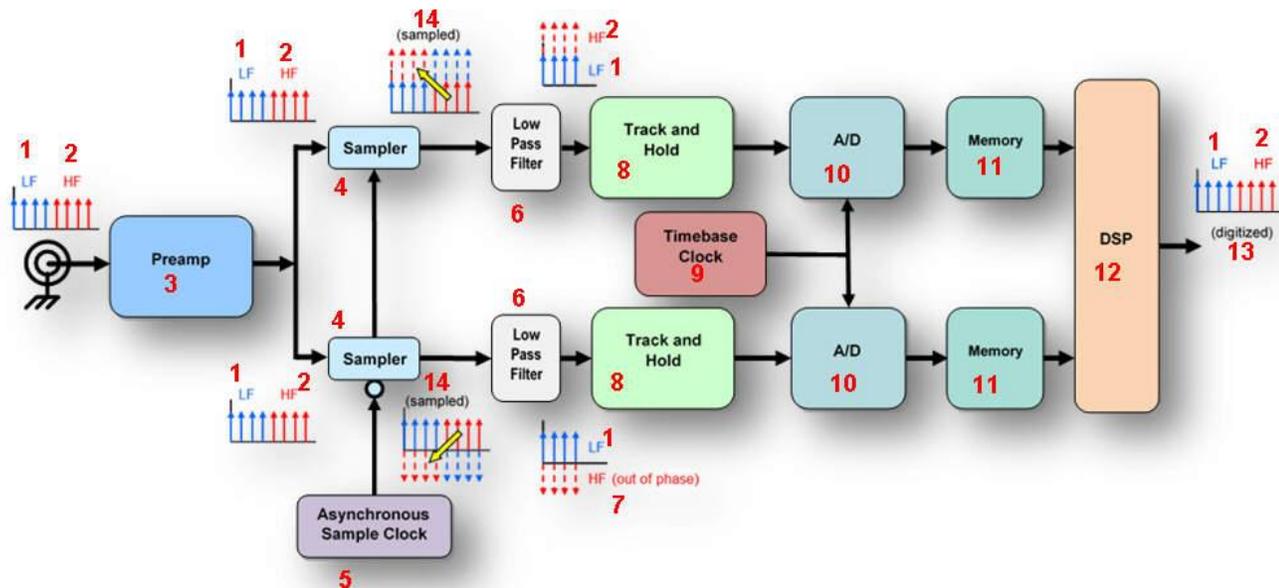


Рис. 12. Структурная схема канала АТИ.

1. НЧ
2. ВЧ
3. Предусилитель
4. Дискретизатор
5. Асинхронная тактовая частота дискретизаторов
6. ФНЧ
7. ВЧ (в противофазе)
8. Выборка и хранение
9. Тактовая частота
10. АЦП
11. Память
12. Цифровой сигнальный процессор
13. (в цифровом виде)
14. (дискретизирован)

На рис. 12 показана более полная структурная схема канала с асинхронным чередованием во времени, и показан спектр сигнала в ключевых точках. Как видно из рисунка, спектр поступает на предусилитель и проходит через разветвитель на предварительные дискретизаторы. Спектр на выходе предварительного дискретизатора содержит разностный спектр верхнего диапазона, завёрнутый назад в нижний диапазон, а также сумму спектра нижнего диапазона, наложенного на верхний диапазон. Затем этот сложный спектр проходит через фильтр нижних частот, который подавляет верхний диапазон, а нижний диапазон (включая завёрнутый назад верхний диапазон) пропускает без изменений. Затем этот отфильтрованный сигнал поступает на схему выборки и хранения и преобразуется АЦП.

После преобразования и сохранения данных в памяти, исходный сигнал можно восстановить путём цифрового смешения сигнала с помощью методов цифровой обработки. В этом месте, в качестве входного сигнала цифрового смесителя вместо физического асинхронного сигнала тактовой частоты может использоваться математическое представление этого сигнала, если принять меры к тому, чтобы фазы исходного аналогового асинхронного сигнала тактовой частоты и его математического представления совпадали.

Как расширить полосу пропускания осциллографов реального времени

Методы расширения полосы пропускания осциллографов реального времени

Обратите внимание, что два предварительных дискретизатора работают в противофазе (со сдвигом на 180°). Это важно для реконструкции сигнала. После цифрового смещения в процессе реконструкции, цифровой сигнал содержит суммарный и разностный спектр исходных захваченных данных. Однако во время окончательного объединения этих сигналов, части спектра, сдвинутые по фазе на 180°, взаимно подавляются, и остаётся только исходный спектр, плюс часть суммарного спектра, которая подавляется фильтром нижних частот с частотой среза 75 ГГц. В результате остаётся только спектр сигнала от 0 до 70 ГГц, исходно поступившего на осциллограф.

Последний этап объединения представляет собой сложение и деление на два. Эта функция приводит амплитуду входного сигнала к её исходному значению, но влияет и на средний шум всего захвата, снижая, тем самым, общий шум измерительного канала.

Первая реализация: DPO77002SX

Производительный осциллограф Tektronix DPO77002SX 70 ГГц АТІ является первой серийной моделью, использующей технологию АТІ. Он предоставляет один канал с полосой пропускания 70 ГГц и частотой дискретизации 200 Гвыб./с с технологией АТІ или два канала с полосой пропускания 33 ГГц и частотой дискретизации 100 Гвыб./с с обычным захватом в режиме реального времени.



В итоге метод АТІ компании Tektronix обладает следующими достоинствами:

- Позволяет воспользоваться имеющимися АЦП для обработки более высокочастотных сигналов.
- Обеспечивает высочайшую точность преобразования сигнала.
- Обладает минимальным уровнем шумов.

Применение технологии 9HP SiGe BiCMOS компании IBM (с $F_t = 300$ ГГц) позволяет получить характеристики сигнального тракта, обеспечивающие целевую полосу пропускания 70 ГГц для осциллографов следующего поколения.