

ОСЦИЛЛОГРАФЫ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ: МЕТОДЫ РАСШИРЕНИЯ ПОЛОСЫ ПРОПУСКАНИЯ

М. Мартин

За последние десять лет скорость передачи данных в цифровых каналах связи выросла более чем десятикратно – от 1 Гбит/с до 10 Гбит/с и выше. Оптические линии связи работают на скорости 100 Гбит/с и более. В настоящее время проводятся исследования, цель которых – достижение в ближайшем будущем скорости 1 Тбит/с. Современные радиочастотные широкополосные каналы связи работают в диапазонах выше 20 ГГц, что требует применения широкополосных (до 60–70 ГГц и более) осциллографов реального времени для проверки, сертификации и отладки таких систем. Сравним различные методы расширения полосы пропускания осциллографов реального времени и рассмотрим инновационное решение – технологию асинхронного чередования во времени (Asynchronous Time Interleaving, ATI).

ОБЫЧНЫЙ ВХОДНОЙ КАНАЛ С АЦП

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

Если предположить, что аналоговый интерфейс обеспечивает полную полосу пропускания канала, то основным ограничивающим фактором становится

частота дискретизации АЦП. Из теоремы Найквиста следует, что для точного представления всех составляющих сигнала в пределах необходимого диапазона частот частота дискретизации должна не менее чем вдвое превышать максимальную частоту сигнала. Например, для канала с полосой пропускания

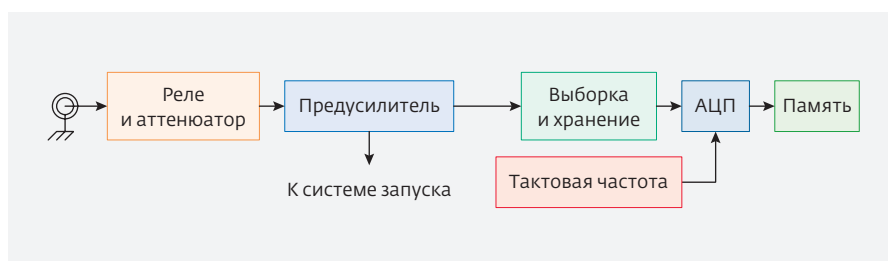


Рис.1. Обычный входной канал с АЦП

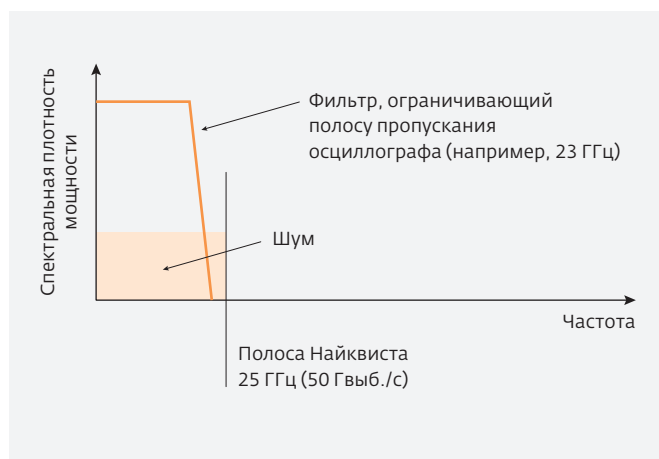


Рис.2. Спектральная плотность мощности белого шума

25 ГГц потребуется частота дискретизации не менее 50 Гвыб./с. По мере роста требований к полосе пропускания все труднее найти АЦП, отвечающий условиям теоремы Найквиста.

Уместно рассмотреть шум обычного входного канала с АЦП, поскольку это станет основой дальнейших рассуждений относительно шума канала, связанного с методами улучшения характеристик АЦП. Поскольку белый шум по определению содержит все частоты, спектральная плотность мощности равномерно распределена в полосе Найквиста (рис.2). Для канала с частотой дискретизации 50 Гвыб./с полоса пропускания, согласно теореме Найквиста, равна 25 ГГц. Фильтр, ограничивающий полосу пропускания осциллографа (так называемый фильтр защиты от наложения спектров), подавляет шум, который проявляется между частотой среза фильтра и частотой Найквиста для данного канала.

КАНАЛЫ С ВРЕМЕННЫМ УПЛОТНЕНИЕМ

Если частота дискретизации АЦП недостаточна для удовлетворения требований к полосе пропускания,

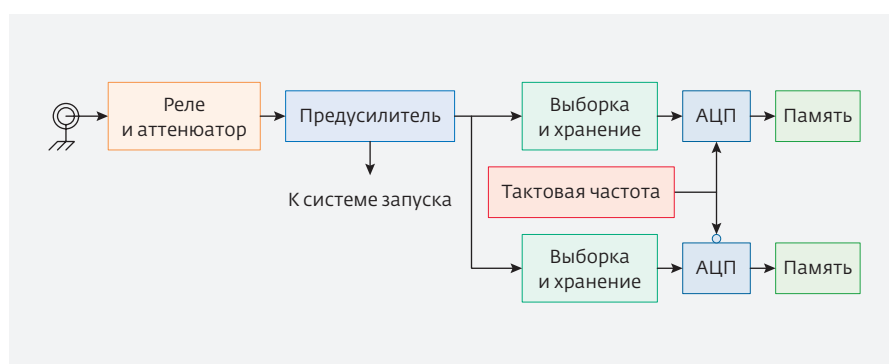


Рис.3. АЦП с временным уплотнением

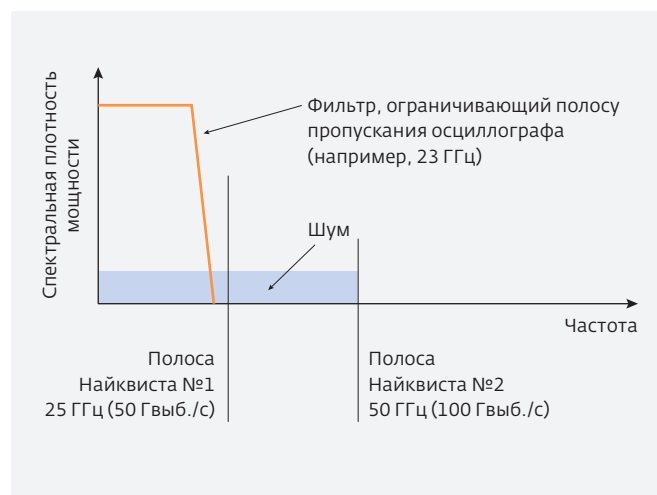


Рис.4. Расширение полосы Найквиста в результате временного уплотнения

приходится искать другие способы использования доступной элементной базы или создавать АЦП нового поколения. Распространенный метод расширения возможностей компонентов – временное уплотнение. В этом случае аналоговый интерфейс проектируется так, чтобы пропускать всю полосу сигнала, и применяются два параллельно включенных АЦП. Каждый АЦП должен поддерживать частоту дискретизации, равную, как минимум, половине частоты, необходимой для удовлетворения критерия Найквиста. Например, если аналоговый интерфейс обеспечивает полосу пропускания до 45 ГГц, то для достижения частоты дискретизации 100 Гвыб./с можно чередовать два АЦП с частотой дискретизации 50 Гвыб./с (рис.3). В этом случае тактовые сигналы 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 путем чередования полученных данных (иногда это называется демультимплексированием). Следует отметить, что ограничений количества чередующихся АЦП нет, хотя по мере увеличения числа АЦП их становится сложнее синхронизировать. Метод временного уплотнения для достижения гигагерцового диапазона используется всеми ведущими производителями осциллографов.

Отметим, что при повышении частоты дискретизации белый шум равномерно распределяется

по частоте дискретизации, что позволяет использовать более высокие частоты дискретизации для захвата сигнала.

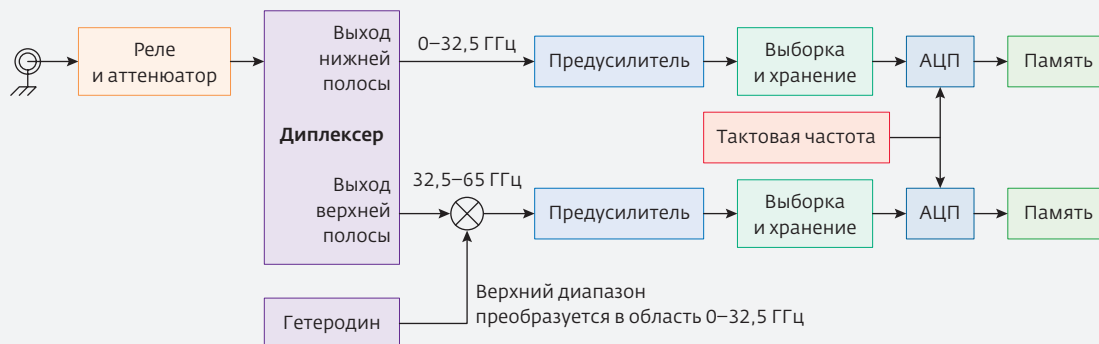


Рис.5. Пример канала со смесителем

по новой полосе Найквиста. Если частота дискретизации возрастает с 50 до 100 Гвыб./с, полоса Найквиста расширяется с 25 до 50 ГГц (рис.4). Когда шумовые характеристики обоих чередующихся каналов одинаковы, плотность мощности шума уменьшается вдвое. Конечно, цель временного уплотнения в нашем случае – расширение полосы пропускания системы за счет расширения полосы входного аналогового интерфейса и повышения частоты дискретизации. Однако следует отметить, что если полоса та же, что описана вначале (используется тот же фильтр для ограничения полосы пропускания

осциллографа), общий эффект заключается в снижении уровня шума.

Применение данного метода на практике обеспечивает снижение шума на 15–20%.

КАНАЛЫ С ЧАСТОТНЫМ УПЛОТНЕНИЕМ

Уже более ста лет в приемниках и других РЧ-устройствах используются понижающие преобразователи частоты. Концепция проста: смешиваем две частоты, получаем сумму и разность этих частот (процесс называется гетеродинированием). Если правильно выбрать одну из частот (например, частоту

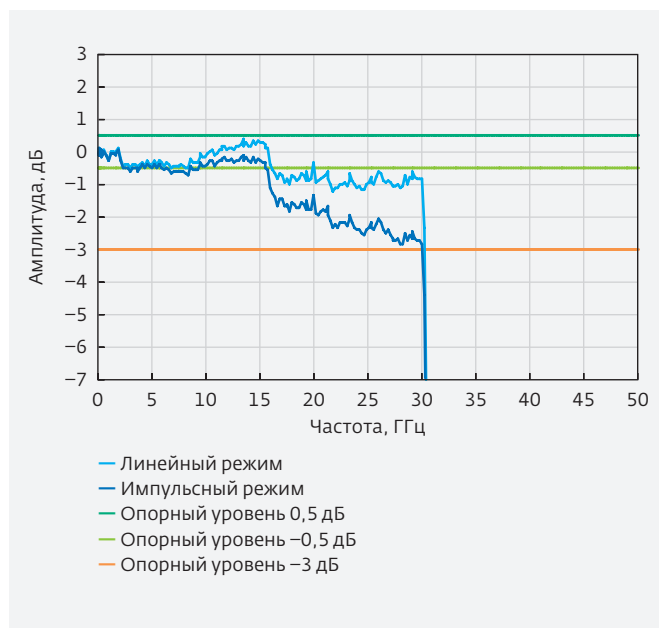


Рис.6. Амплитудно-частотная характеристика осциллографа LeCroy 830Zi-A (100 мВ/дел., 80 Гвыб./с, 30 ГГц)

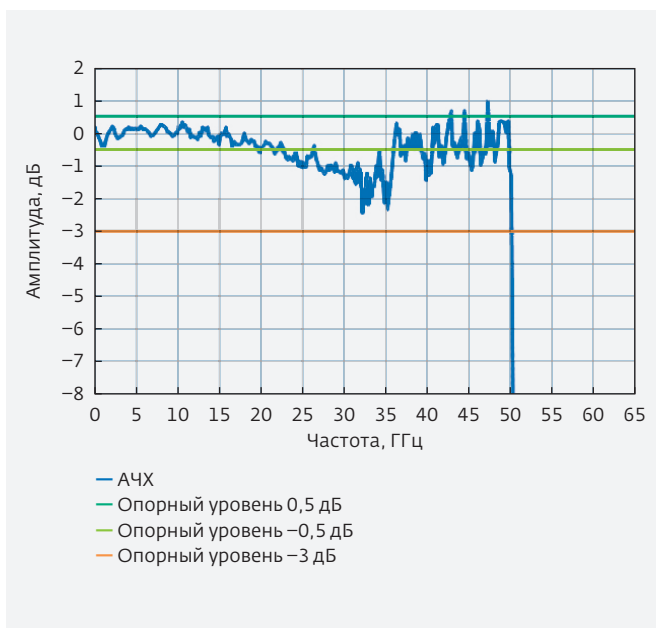


Рис.7. Амплитудно-частотная характеристика осциллографа Keysight DSAX95004Q (50 мВ/дел, 160 Гвыб./с, 50 ГГц)

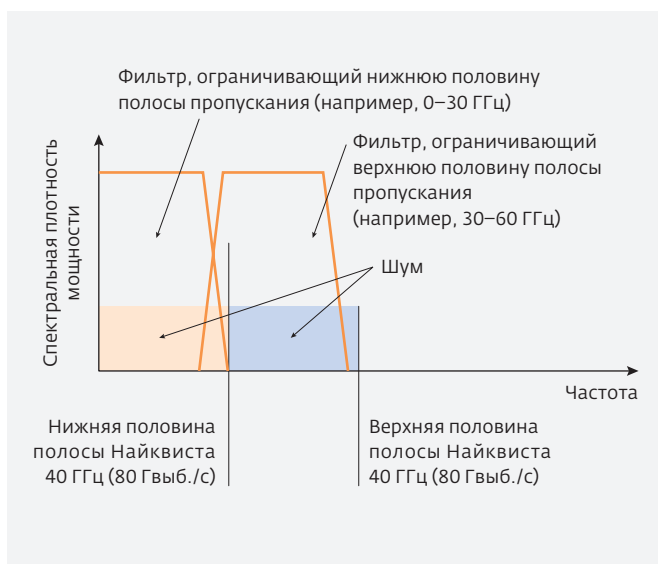


Рис.8. Спектральная плотность мощности шума в полосе Найквиста

гетеродина) по отношению к другой частоте, можно получить разностную частоту в более удобном (как правило, более низком) диапазоне и работать далее с ней.

В осциллографах понижающие преобразователи частоты тоже применяются очень давно. Раньше понижающий преобразователь был внешним блоком, его согласование и калибровка представлялись весьма непростой задачей. Затем понижающие преобразователи стали встраивать прямо в осциллографы. Если частоту гетеродина осциллографического канала установить равной половине полосы пропускания аналогового интерфейса, это позволит захватить сигналы верхней половины полосы осциллографа с помощью одного АЦП, а сигналы нижней половины – с помощью другого АЦП (рис.5). Реконструкция сигнала путем "склейки" верхней и нижней половин спектра выполняется в современных цифровых осциллографах реального времени цифровым сигнальным процессором.

Первой такой подход в виде встроенной в цифровой осциллограф функции, названной "Цифровым уплотнением полосы" (Digital Bandwidth Interleave, DBI), реализовала компания LeCroy. Недавно компания Keysight последовала этому примеру, предложив входные каналы "RealEdge". Основное преимущество для разработчиков осциллографов заключается в том, что для каждого АЦП достаточна частота дискретизации, превышающая общую полосу пропускания канала. Однако этот метод сопряжен с другими конструктивными проблемами. После захвата данных и их записи в память нужно повысить частоту

тракта верхнего диапазона до исходного значения с помощью методов цифровой обработки сигнала. Объединение двух половин спектра и реконструкция сигнала – достаточно сложные задачи. Поскольку сигнальные тракты не идентичны, нужно компенсировать различия путем калибровки, которая выполняется цифровым сигнальным процессором. Кроме того, в связи с применением полосовых фильтров для разделения спектра на две половины, точно восстановить центральную часть спектра проблематично. В зоне объединения возникают проблемы с равномерностью амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и линейностью фазы.

Рассмотрим амплитудно-частотную характеристику осциллографа LeCroy 830Zi-A, который использует DBI в диапазоне выше 16 ГГц (рис.6). Видно, что АЧХ достаточно равномерна в диапазоне 0–5 ГГц, но приобретает иной характер в диапазоне 15–30 ГГц.

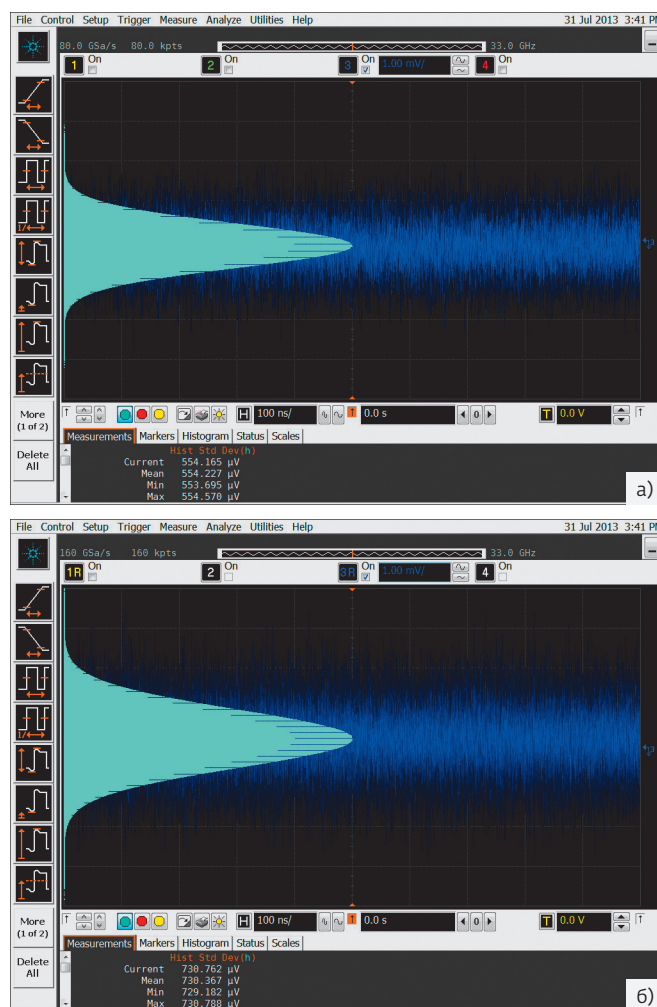


Рис.9. Сравнение шума входных каналов осциллографа Keysight DSAX95004Q: а – стандартный режим, б – режим "RealEdge"

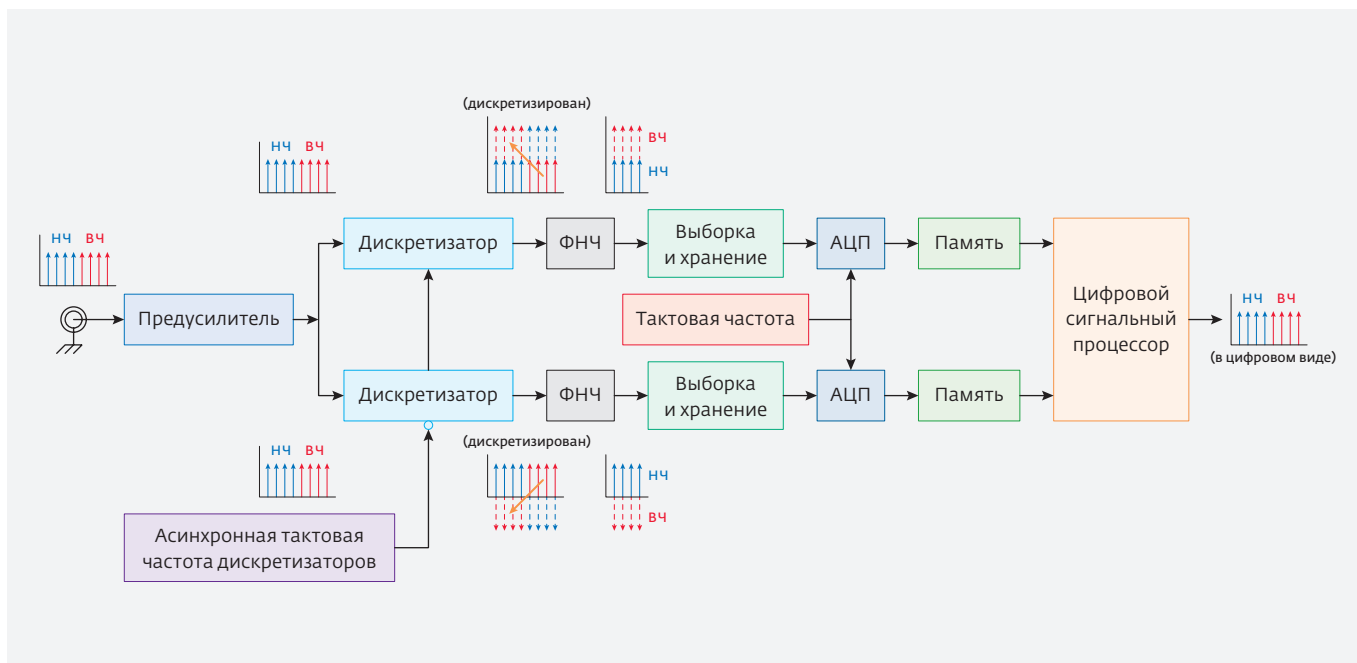


Рис.10. Структурная схема канала АТІ

Компания LeCroy предлагает различные режимы "оптимизации". Равномерность АЧХ для двух из этих 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%.

Подобная проблема наблюдается в осциллографе Keysight DSAX95004Q при использовании входов "RealEdge" (рис.7). В общем, Keysight лучше LeCroy справляется с выравниванием АЧХ, но обратите внимание на часть графика выше 32 ГГц. Осциллограф Keysight с полосой пропускания 50 ГГц использует ту же схему, что и 63-гигагерцевая модель, поэтому неудивительно, что аномалия в этом приборе наблюдается на частоте 32 ГГц, а не 25 ГГц. Отклонение амплитуды в этой области на два и более децибел означает, что погрешность ее измерения на этих частотах превышает 20%.

Рассмотрим, что происходит с шумом канала при использовании частотного уплотнения (рис.8). Как уже говорилось, спектральная плотность мощности шума равномерно распределяется в полосе Найквиста, равной половине частоты дискретизации канала. Поскольку каждый АЦП обрабатывает половину всего частотного диапазона, 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.

Это явление демонстрируют два снимка экрана осциллографа Keysight DSAX95004Q, полученные в стандартном канале с полосой 33 ГГц и в канале "RealEdge" с той же полосой (рис.9). Измеренный уровень собственного шума осциллографа Keysight имеет среднеквадратическое значение 554 мкВ в стандартном канале и 731 мкВ в канале "RealEdge", то есть шум канала "RealEdge" примерно на 32% превышает шум стандартного канала.

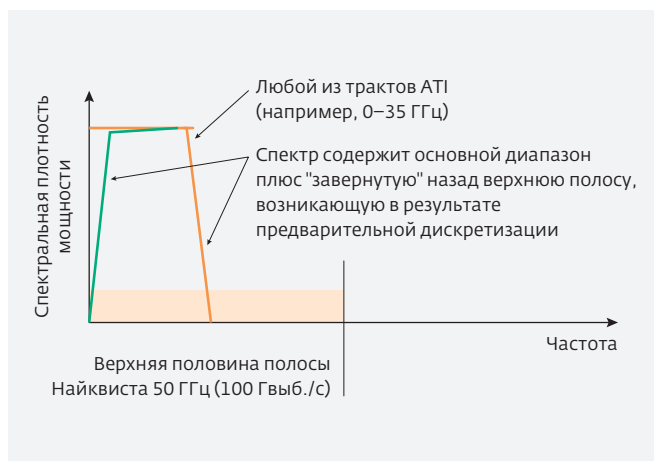


Рис.11. Сигнал в каждом тракте канала АТІ

ТЕХНОЛОГИЯ АСИНХРОННОГО ЧЕРЕДОВАНИЯ ВО ВРЕМЕНИ

С учетом технических проблем, связанных с частотным уплотнением, применяемым до сегодняшнего дня в осциллографах гигагерцового диапазона, компания Tektronix предложила новый подход, который позволяет обойти некоторые недостатки DBI и достичь той же расширенной полосы без применения новых АЦП. В методе асинхронного чередования во времени (ATI) в качестве гармонического смесителя используется предварительный дискретизатор (рис.10). Он выполняет субдискретизацию (sub-sample) входного сигнала, тем самым "заворачивая" спектр назад в полосу Найквиста АЦП. Например, 70-гигагерцовую систему можно получить с помощью асинхронной тактовой частоты 75 ГГц. В результате верхняя половина сигнала 70 ГГц "заворачивается" в диапазон от 0 до 37,5 ГГц. Затем результирующие данные от предварительного дискретизатора оцифровываются АЦП с частотой, независимой от частоты предварительной дискретизации, например 100 Гвыб./с. Отметим, что предварительный дискретизатор работает асинхронно с тактовой частотой АЦП.

Цепочка преобразований сигнала выглядит следующим образом (см. рис.10). Входной сигнал поступает на предусилитель и проходит через разветвитель на предварительные дискретизаторы. Спектр на выходе одного из предварительных дискретизаторов содержит разность спектров нижнего диапазона и "завернутого" в эту полосу верхнего диапазона, а спектр на выходе другого предварительного дискретизатора – их сумму. Затем эти сложные спектры проходят через фильтры нижних частот, которые подавляют верхний диапазон, а нижний диапазон (включая "завернутый" верхний диапазон) пропускают без изменений. Отфильтрованный сигнал поступает на схему выборки и хранения и преобразуется АЦП.

После преобразования и сохранения данных в памяти исходный сигнал можно восстановить путем цифрового смещения.

Следует отметить, что два предварительных дискретизатора работают в противофазе (со сдвигом на 180°), что важно для реконструкции сигнала. После цифрового смещения сигнал содержит составляющие со спектрами, полученными в результате сложения и вычитания спектров нижнего и "завернутого" в его полосу верхнего диапазонов исходных захваченных данных. Однако во время окончательного объединения этих сигналов части спектра, сдвинутые по фазе на 180°, взаимно подавляются, и остается только исходный спектр и часть суммарного

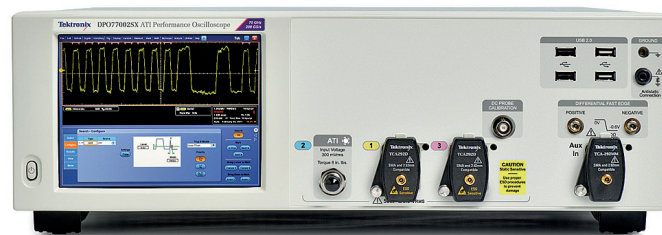


Рис.12. Осциллограф DPO77002SX ATI компании Tektronix

спектра, которая подавляется фильтром нижних частот с частотой среза 75 ГГц. В результате сохраняется лишь 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 ее исходному значению.

Спектральная плотность мощности шума в методе ATI равномерно распределяется в полосе, которая вдвое превышает частоту дискретизации каждого АЦП (рис.11). В результате общий шум в полосе пропускания получается ниже, чем в аналогичной архитектуре DBI.

Первая серийная модель, в которой используется технология ATI, – осциллограф Tektronix DPO77002SX ATI (рис.12). Он предоставляет один канал с полосой пропускания 70 ГГц и частотой дискретизации 200 Гвыб./с с технологией ATI или два канала с полосой пропускания 33 ГГц и частотой дискретизации 100 Гвыб./с с обычным захватом в режиме реального времени.

Таким образом, метод ATI компании Tektronix обладает целым рядом преимуществ: позволяет воспользоваться имеющимися АЦП для обработки более высокочастотных сигналов, обеспечивает высочайшую точность преобразования сигнала и минимальный уровень шумов.