

Методы расширения полосы пропускания осциллографов реального времени

Tektronix, Inc.

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

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 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 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 этих новых систем. В результате разработчики осциллографов вынуждены расширять полосу пропускания осциллографов реального времени до 60–70 ГГц и более.

Обычный входной канал с АЦП

Обычный входной канал цифрового осциллографа реального времени использует аналоговый входной интерфейс, состоящий из предусили-

теля, 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 (см. рис. 1).

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 превышать максимальную частоту сигнала не менее чем в два раза. Например, для канала с полосой пропускания 25 ГГц потребуются 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 рисунке 2 показана спектральная плотность мощности белого шума.

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 рисунке 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 жёстким условиям или 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 включённых 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

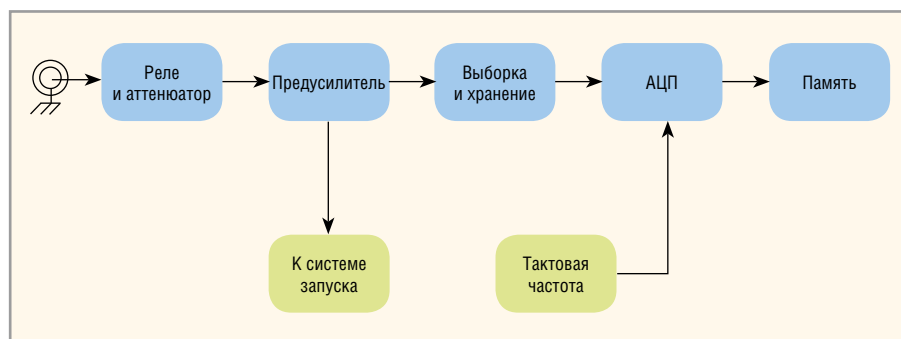


Рис. 1. Обычный входной канал с АЦП

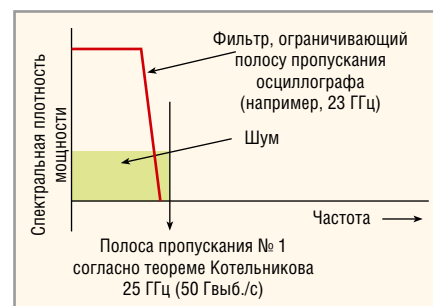


Рис. 2. Спектральная плотность мощности белого шума

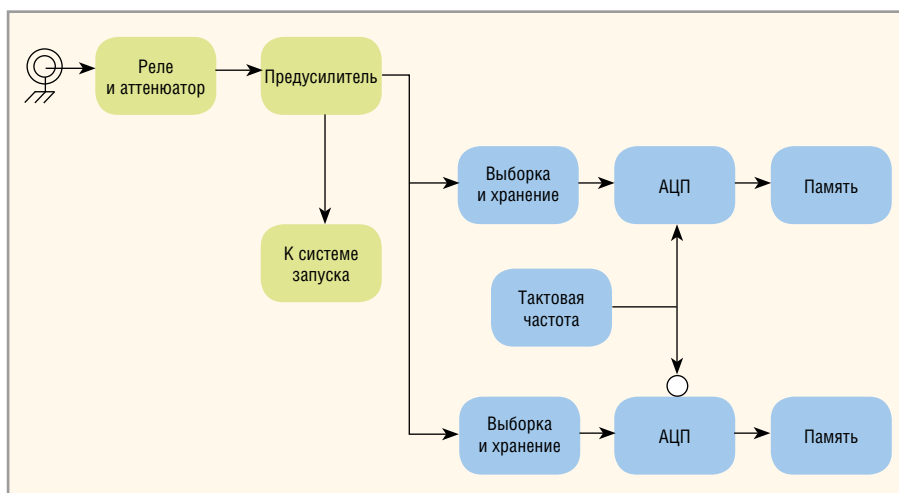


Рис. 3. АЦП с временным уплотнением

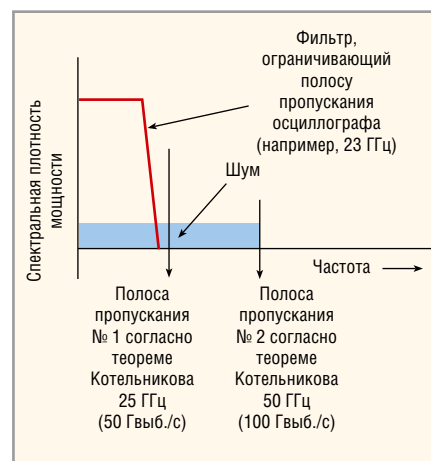


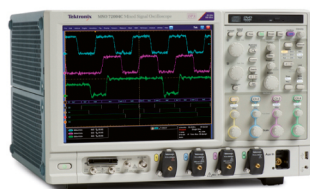
Рис. 4. Расширение полосы Котельникова в результате временного уплотнения

достижения частоты дискретизации 100 Гвыб./с можно использовать чередование двух АЦП с частотой дискретизации 50 Гвыб./с (см. рис. 3). В этом случае тактовые частоты АЦП должны быть сдвинуты по фазе на 180° . Данные сохраняются в памяти, включённой после каждого АЦП, и по завершении захвата можно реконструировать полный сигнал с частотой дискретизации 100 Гвыб./с путём чередования

полученных данных (что иногда называется демультиплексированием). Следует отметить, что никаких ограничений на число чередующихся АЦП не накладывается, хотя с ростом числа АЦП синхронизировать их становится всё сложнее. Метод временного уплотнения для достижения гигагерцового диапазона используется всеми ведущими производителями осциллографов.

Важно отметить, что с ростом частоты дискретизации белый шум равномерно распределяется по новой полосе Котельникова. В примере, показанном на рисунке 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

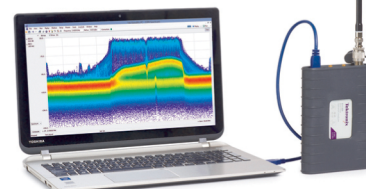
Требуется анализ аналоговых и цифровых сигналов в реальном времени?



Осциллографы



Осциллографы с анализатором спектра



Анализаторы спектра

Предельные значения параметров:

- Диапазон частот – до 80 ГГц
- Полоса анализа в реальном времени – до 165 МГц
- Задержка реакции на событие – от 50 пс

Tektronix

Официальный дистрибутор Tektronix в России
Тел.: +7 (499) 613-7001, www.rodnik.ru

С 1991 года
РОДНИК
СИСТЕМНЫЙ ИНТЕГРАТОР

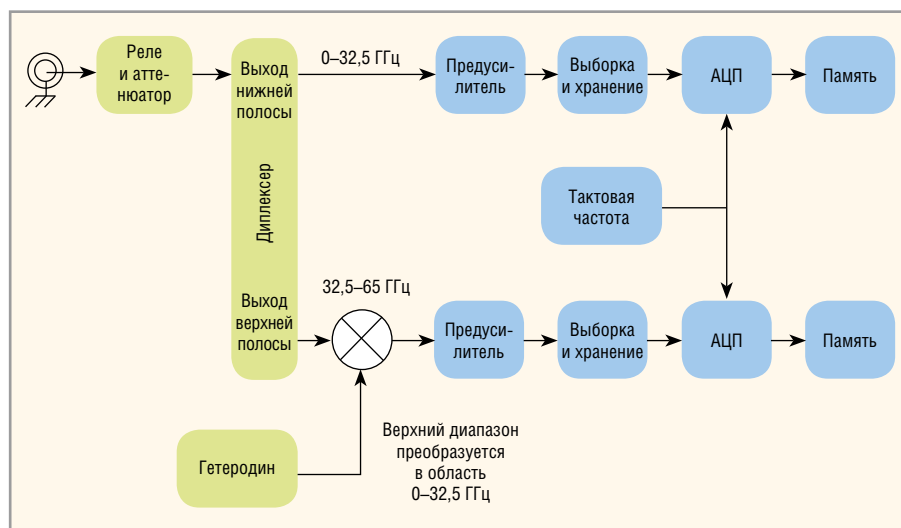


Рис. 5. Пример канала со смесителем

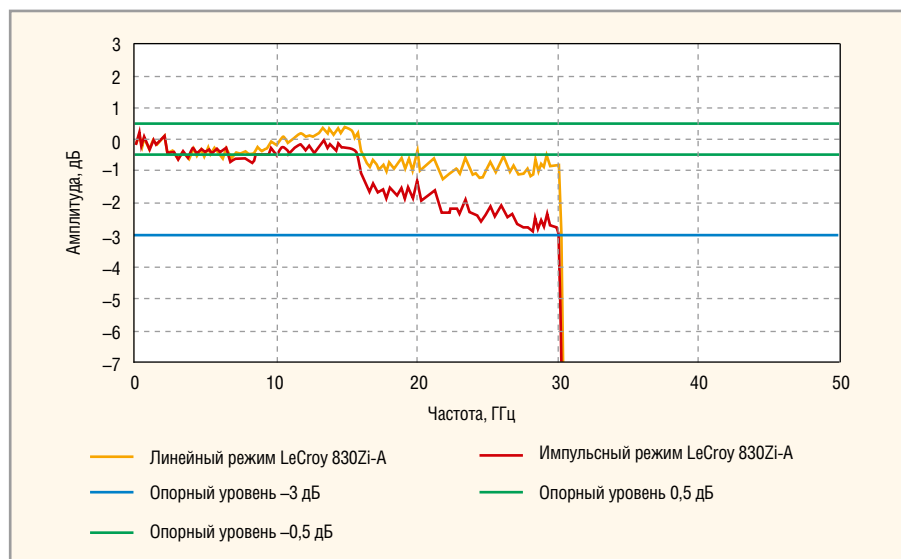


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика осциллографа LeCroy 830Zi-A 100 мВ/дел., 80 Гвыб./с, 30 ГГц

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 была описана вначале (используется тот же фильтр для ограничения полосы пропускания осциллографа), то общий эффект будет заключаться в снижении уровня шума. Практическая реализация этого метода демонстрирует снижение шума на 15–20%.

Каналы с частотным уплотнением и понижающие преобразователи частоты

Понижающие преобразователи частоты используются в приёмниках

и других РЧ-устройствах уже более ста лет. 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 далее работать с ней.

В осциллографах понижающие преобразователи частоты тоже применяются достаточно давно. Раньше понижающий преобразователь был внешним блоком, и его согласование и калибровка представлялись весьма непростыми задачами. Позже понижающие преобразователи стали встраиваться непосредственно в осциллографы. Если частоту гетеродина осциллографического канала установить равной половине полосы пропуска-

ния аналогового интерфейса, то это позволит захватить сигналы верхней половины полосы осциллографа с помощью одного АЦП, а сигналы нижней половины – с помощью другого АЦП. Схема канала со смесителем представлена на рисунке 5. Реконструкция сигнала путём «склейки» верхней и нижней половин спектра выполняется в современных цифровых осциллографах реального времени цифровым сигнальным процессором.

Первый 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. Объединить две половины спектра и реконструировать сигнал достаточно сложно. 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.

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

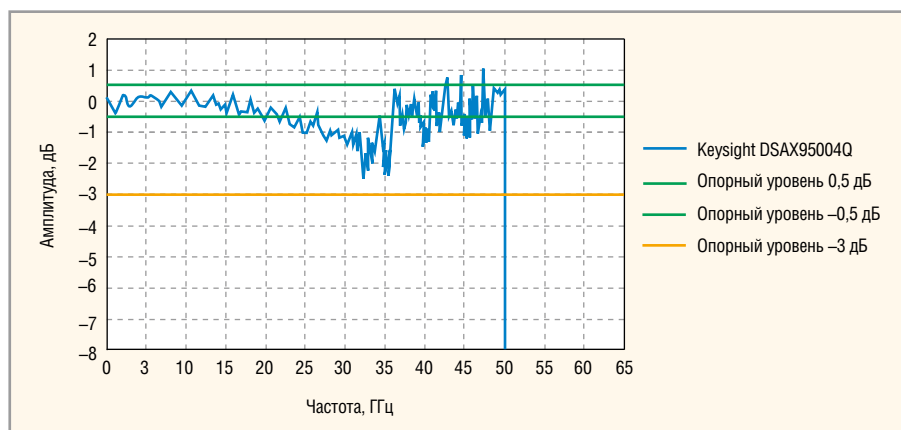


Рис. 7. Амплитудно-частотная характеристика осциллографа Keysight DSAX95004Q
Амплитуда, 50 мВ/дел, 160 Гвыб./с, 50 ГГц

значение амплитуды на той же частоте 22 ГГц будет меньше на 20%.

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

В результате Keysight лучше справляется с выравниванием АЧХ по сравнению с LeCroy. Но обратите внимание на часть графика выше 32 ГГц. Осцил-

лограф 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, а не 25 ГГц. Отклонение амплитуды в этой области на два и более децибела означает, что измерения амплитуды на этих частотах дают погрешность более 20%.

Возвращаясь к вопросу шума (см. рис. 8), будет полезно узнать,

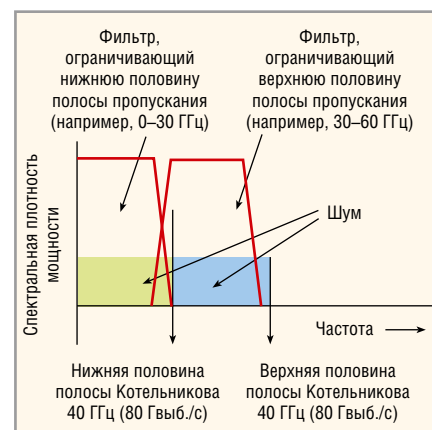
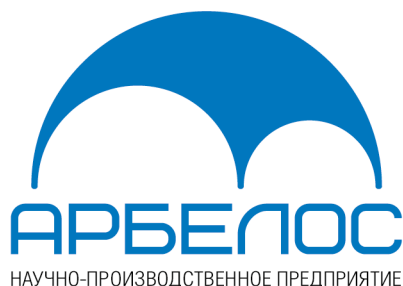


Рис. 8. Спектральная плотность мощности шума в полосе Котельникова

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



РОССИЙСКИЙ РАЗРАБОТЧИК И ПРОИЗВОДИТЕЛЬ

- Разработка герметичных DC/DC-преобразователей для ответственных применений
- Разработка и производство мощных источников питания для авиационной аппаратуры
- Разработка заказных силовых и ВЧ/СВЧ-модулей
- Производство дискретных силовых компонентов в керамических корпусах
- Разработка и проведение испытаний изделий и компонентов силовой электроники

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР НПП «АРБЕЛОС»

ProCHIP
POWERED BY ProSOFT

Активный компонент вашего бизнеса

ТЕЛ.: (495) 232-2522 / ФАКС: (495) 234-0640 / INFO@PROCHIP.RU / WWW.PROCHIP.RU

Реклама

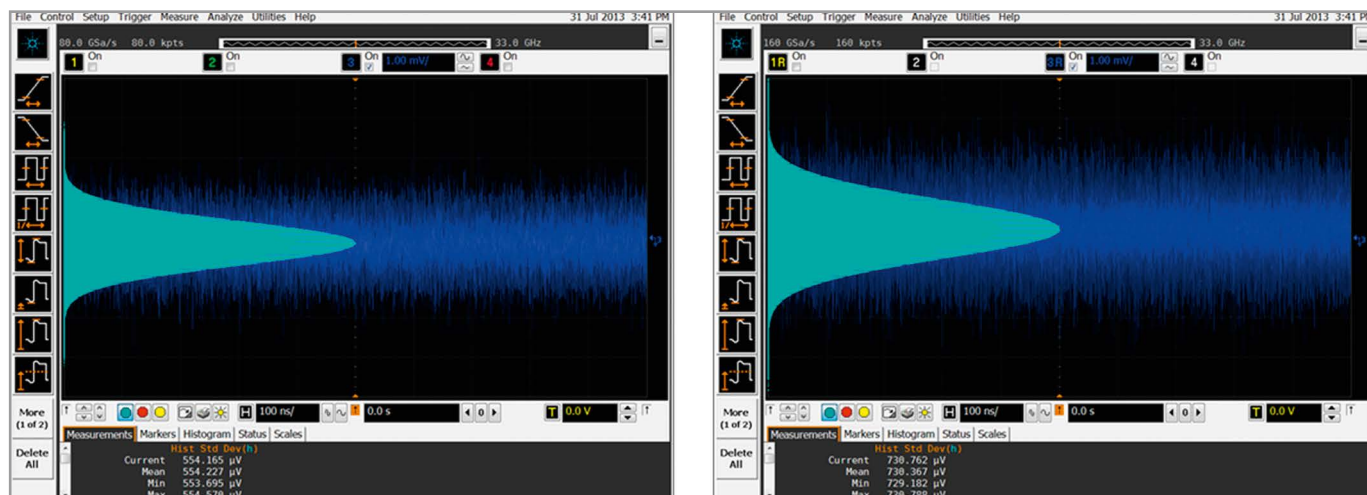


Рис. 9. Сравнение шума входных каналов осциллографа Keysight DSAX95004Q (стандартный режим и режим «RealEdge»)

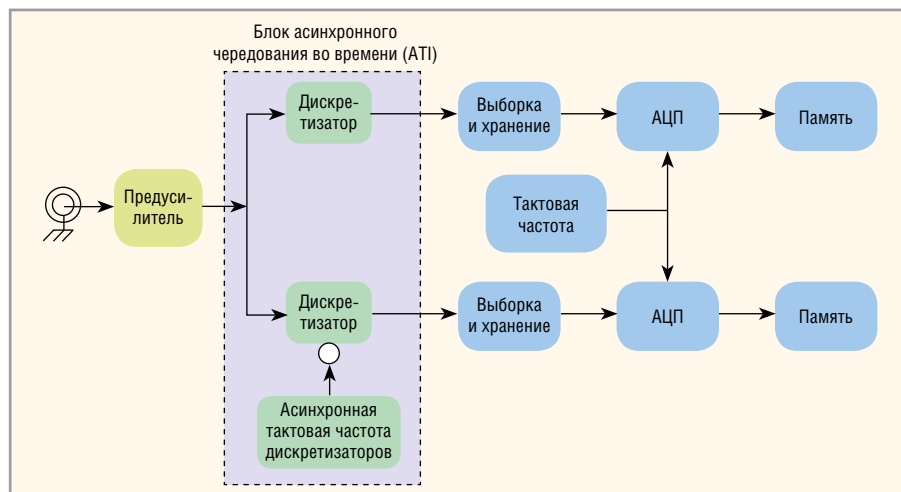


Рис. 10. Структурная схема асинхронного чередования во времени

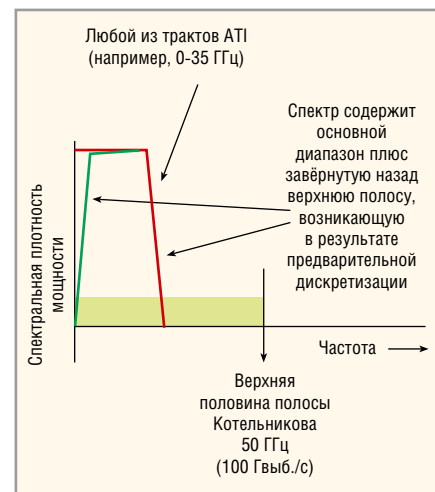


Рис. 11. Сигнал в каждом тракте канала ATI

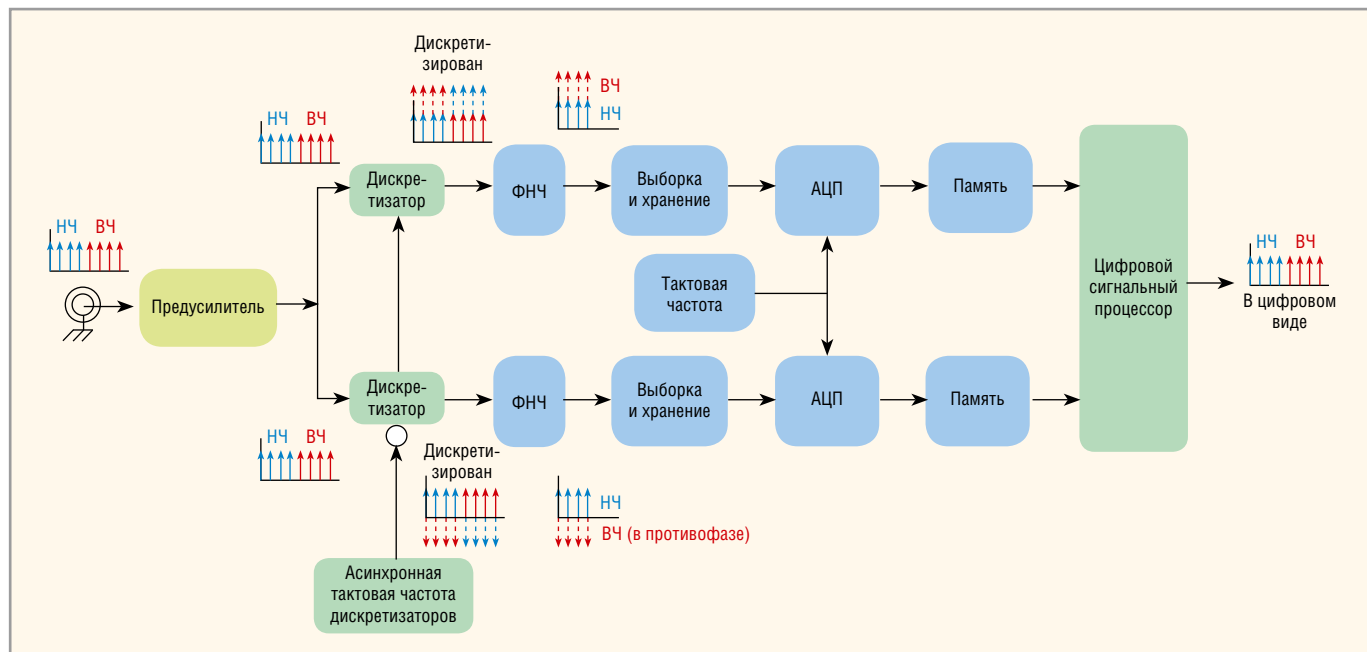


Рис. 12. Структурная схема канала ATI

же полосы пропускания). На самом деле, при использовании частотного уплотнения шум даже возрастает. На рисунке 9 показаны два снимка экрана, демонстрирующие это явление в осцил-

лографе Keysight DSAX95004Q путём сравнения шума стандартного канала с полосой 33 ГГц (слева) с шумом канала «RealEdge» с той же полосой 33 ГГц (справа).

Измеренный уровень собственного шума осциллографа Keysight имеет среднеквадратическое значение 554 мкВ в стандартном канале и 731 мкВ в канале «RealEdge» в оди-

наковой для обоих режимов полосе 33 ГГц. Шум канала «RealEdge» превышает шум стандартного канала примерно на 32%.

ТЕХНОЛОГИЯ АСИНХРОННОГО ЧЕРЕДОВАНИЯ ВО ВРЕМЕНИ

Учитывая технические проблемы, связанные с частотным уплотнением, применяемым до сегодняшнего дня в осциллографах гигагерцевого диапазона, компания Tektronix предложила новый подход, который позволяет обойти некоторые недостатки DBI и достичь при этом той же расширенной полосы, но 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 рисунке 10.

Первое, что отметит специалист, 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 два раза превышает частоту дискретизации каждого АЦП. В результате общий шум в полосе пропускания получается ниже, чем в аналогичной архитектуре DBI.

Поскольку гармоническое смешение и дискретизация по времени, в сущности, являются одним и тем же, смеситель, показанный на структурной схеме АТИ (см. 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-гигагерцевую систему можно получить с помощью асинхронной тактовой частоты 75 ГГц. В результате верхняя половина сигнала 70 ГГц завернётся назад в диапазон от 0 до 37,5 ГГц. Затем результирующие данные от предварительного дискретизатора оцифровываются АЦП с частотой, независимой от частоты предва-



Рис. 13. Внешний вид осциллографа Tektronix DPO77002SX 70 ГГц АТИ

рительной дискретизации, например, с частотой 100 Гвыб./с. Обратите внимание, что предварительный дискретизатор работает асинхронно с тактовой частотой АЦП. На рисунке 11 показан сигнал в каждом тракте канала АТИ.

На рисунке 12 показана более полная структурная схема канала с асинхронным чередованием во времени, а также 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, завернутый 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 завернутый 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 смещения сигнала с помощью методов цифровой обработки. Здесь, 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.

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 АТИ (см. рис. 13) является первой серийной моделью, использующей технологию АТИ. Он предоставляет один канал с полосой пропускания 70 ГГц и частотой дискретизации 200 Гвыб./с с технологией АТИ, или два канала с полосой пропускания 33 ГГц и частотой дискретизации 100 Гвыб./с с обычным захватом в режиме реального времени.

В итоге метод АТИ 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 ($c Ft = 300$ ГГц) позволяет получить характеристики сигнального тракта, обеспечивающие целевую полосу пропускания 70 ГГц для осциллографов следующего поколения.

