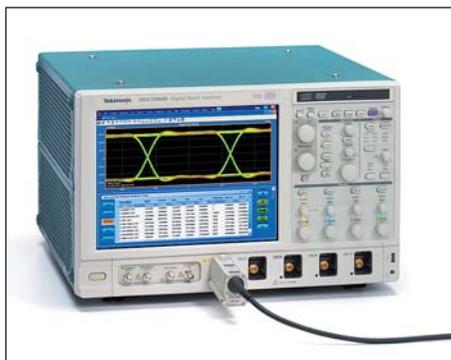


Связь между полосой пропускания осциллографа, временем нарастания и точностью измерения

Тревор СМИТ (Trevor SMITH)
Роман КЕРНАСОВСКИЙ
lem@pribor.ru

При выборе осциллографа для проведения сложных измерений обычно руководствуются тремя основными характеристиками. Это полоса пропускания, частота дискретизации, объем памяти на канал. Из них полоса пропускания обычно считается ключевой. Является ли более широкая полоса залогом лучших характеристик? Необязательно. В этой статье мы укажем на подводные камни, которых необходимо избегать при выборе осциллографа.



Полоса пропускания — о чем говорит эта характеристика?

Аналоговая полоса пропускания — это характеристика измерительной системы, определяющая частоту, на которой измеренная амплитуда синусоидального сигнала на 3 дБ ниже, чем реальная. На рис. 1 представлен график, который дает представление о теоретическом поведении амплитудной ошибки по мере приближения частоты синусои-

дального сигнала к величине, равной значению полосы пропускания измерительного устройства, ведущего себя как фильтр первого порядка (однозвенный Гауссов). На частоте, равной ширине полосы, ошибка измерения достигает 30%!

Если необходимо измерять синусоидальный сигнал с ошибкой в 3%, необходим осциллограф с полосой, по крайней мере, в три раза большей, чем частота измеряемого сигнала. Поскольку большинство сигналов имеют более сложную форму, чем синусоидальный, основное эмпирическое правило — использовать осциллограф с полосой, в пять раз большей частоты измеряемого сигнала.

О чем не может сказать полоса пропускания?

Аналоговая полоса пропускания — это, по определению, характеристика, относящаяся к частотной области. Сложные сигналы содержат в спектре много составляющих, что показано на рис. 2.

Чтобы полностью охарактеризовать эти составляющие, мы должны знать как их амплитуду, так и фазу. Полоса пропускания сама по себе ничего не говорит о том, как измерительное устройство фиксирует характеристики.

Кроме характеристик, относящихся к спектральному анализу сигналов, большинство инженеров заинтересовано в таких измерениях, как время нарастания и спада прямоугольных импульсов. Для оценки времени нарастания осциллографа, используя характеристику его полосы пропускания, можно воспользоваться следующим выражением:

$$t_{нар} = 0,35/F_{полосы}$$

Значение 0,35 в числителе основано на простой однополюсной модели для времени нарастания от 10 до 90%. Используя эту простую формулу, легко вычислить время нарастания.

В таблице приведены желательные характеристики измерительных систем при работе с современными сигналами наиболее распространенных стандартов.

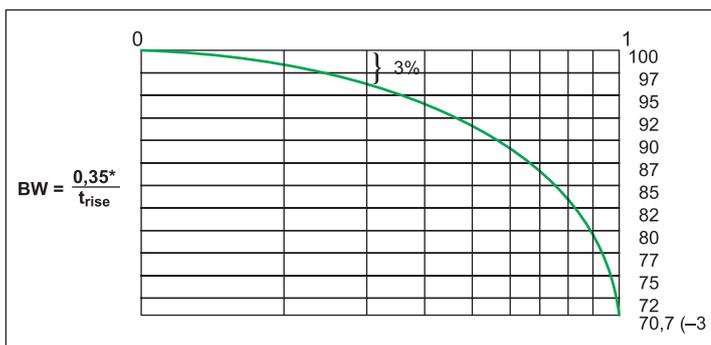


Рис. 1. Полоса пропускания осциллографа в зависимости от частоты

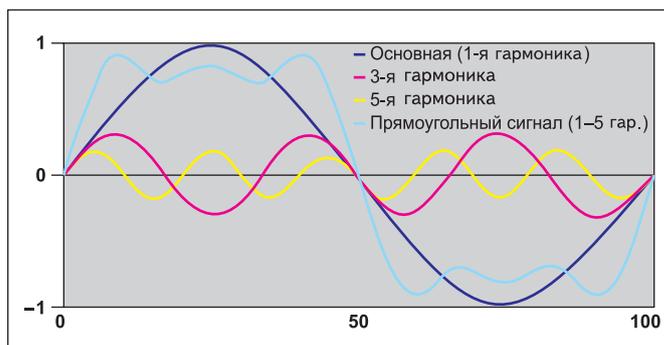


Рис. 2. Прямоугольный цифровой сигнал как сумма нечетных гармоник

Таблица. Требуемые характеристики измерительных устройств для работы с сигналами различных стандартов

Стандарт	Скорость передачи данных	Время нарастания (t _р)	Ширина полосы (BW) исходя из (0,35/t _{нар})	Ширина полосы (BW) для получения ошибки, меньшей 3%
SHD	155 Мбит/с	2,0 нс	175 МГц	525 МГц
1394	100 Мбит/с	3,2 нс	109 МГц	328 МГц
	200 Мбит/с	2,2 нс	159 МГц	477 МГц
	400 Мбит/с	1,2 нс	292 МГц	875 МГц
DDR2	400 Мбит/с	150 пс	2,3 ГГц	7 ГГц
DDR3	1333 Мбит/с	75 пс	4,7 ГГц	14 ГГц
PCIe	2,5 Гбит/с	50 пс	7,0 ГГц	21 ГГц
	5,0 Гбит/с	30 пс	11,7 ГГц	35 ГГц
IBTA	2,5 Гбит/с	30 пс	11,7 ГГц	35 ГГц

При составлении таблицы было сделано допущение, что как объект измерения, так и осциллограф имеют спад частотной характеристики, как фильтр низких частот первого порядка. В реальности, с современными высокоскоростными сигналами это допущение не совсем корректно. Для максимально равномерной задержки отклика произведение ширины полосы на время нарастания осциллографа может приближаться к 0,45.

Два осциллографа, имеющие равные полосы, могут иметь сильно отличающиеся времена нарастания, амплитудный и фазовый отклик. Так что одно только значение полосы пропускания осциллографа не скажет нам о его способности к точному отображению сложных сигналов, таких как высокоскоростные последовательные потоки данных.

Переходная характеристика

Пользователям необходим осциллограф с хорошей переходной характеристикой (реакцией на ступенчатое возбуждение). Для проверки переходной характеристики необходим очень «чистый» генератор прямоугольных импульсов. Отклонения картины, отображаемой осциллографом, от прямоугольного вида называются абберациями (рис. 3, 4).

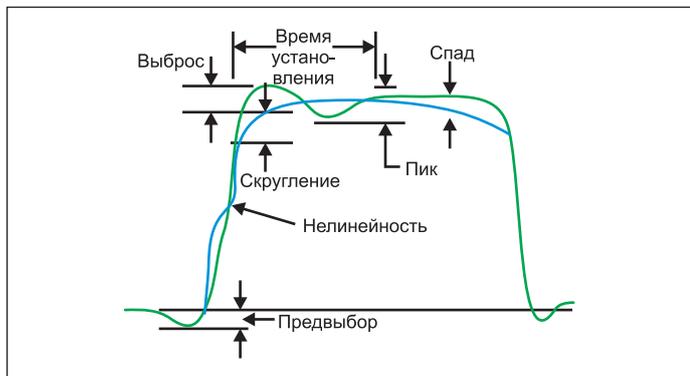


Рис. 3. Абберации переходной характеристики

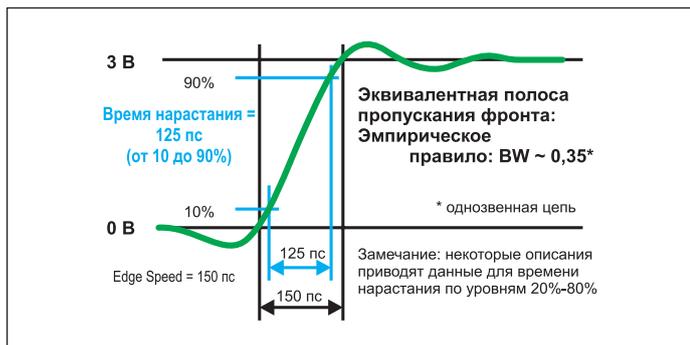


Рис. 4. Время нарастания переходной характеристики

Факторы, вносящие вклад в отклонения, включают в себя:

- аналоговые характеристики осциллографа;
- влияние пробников.

Факторы, определяющие аналоговые характеристики осциллографа

Реальные аналоговые характеристики определяются входным трактом осциллографа, ведущим к аналого-цифровому преобразователю (АЦП).

Входной тракт включает attenuаторы вертикального ослабления, усилители, схемы контроля положения и схемы запуска.

При детальном исследовании осциллограммы, вам, возможно, потребуется отобразить часть сигнала, далекую от уровня «земли» (рис. 5, 6). Типичные ±12 делений вертикальной развертки ограничивают размер изображения.

Если вы хотите увеличить определенную область осциллограммы, расположенную не на уровне «земли», вы пользуетесь сдвигом, как показано на рис. 7.

Вертикальный сдвиг позволяет переопределить отображаемую точку отсчета. Например, если вы хотите рассмотреть детали на вершине импульса амплитудой 5 В, установите ручку сдвига на 5 В. Затем измените масштаб по вертикали до необходимой чувствительности. Сдвиг вызывает огромное увеличение аналогового динамического диапазона. Недостатком «зума» деталей осциллограммы является насыщение усилителя. Когда вы перетаскиваете часть картины за экран для того, чтобы рассмотреть некоторые частные детали, система отклонения по вертикали будет нуждаться в восстановлении после

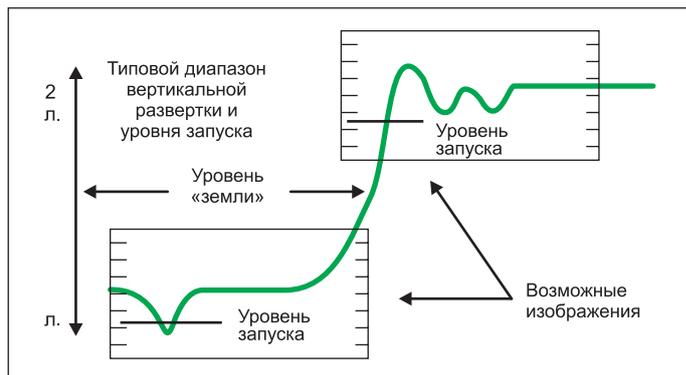


Рис. 5. Динамический диапазон вертикальной развертки и уровня запуска

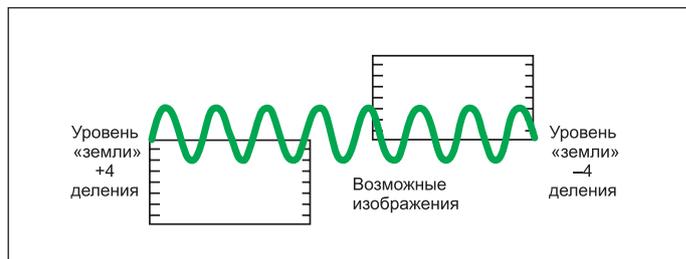


Рис. 6. Положение по вертикали перемещает нулевую точку отсчета вертикального масштаба

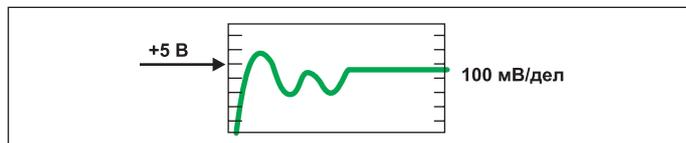


Рис. 7. Вертикальный сдвиг меняет точку отсчета от нуля к некоторому уровню напряжения

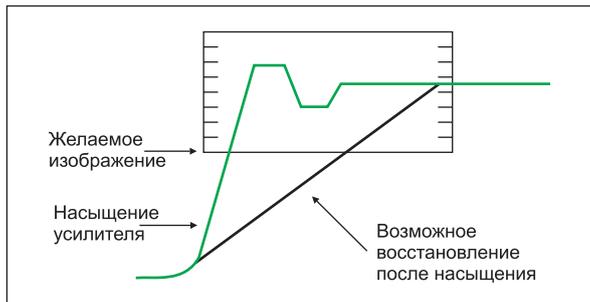


Рис. 8. Характеристики восстановления после насыщения могут привести к пропаданию высокочастотных деталей сигнала

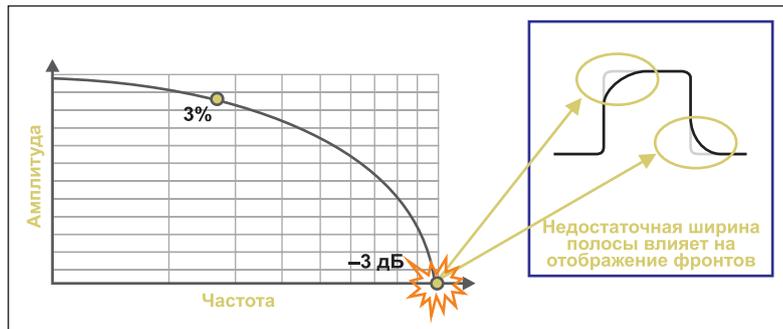


Рис. 9. График зависимости амплитуды от частоты (АЧХ) пробников

насыщения (рис. 8). Типовая характеристика восстановления может быть «90% восстановления за 1 нс». В высококачественных осциллографах восстановление может занимать 100 пс на 15 делений насыщения.

Влияние пробников на полосу пропускания и время нарастания

Каждый пробник для осциллографа имеет определенную емкость и сопротивление, а значит, воздействует на сигнал в точке измерения. Данный факт очевиден и не нуждается в объяснении, вопросом остается только, насколько сильно это воздействие.

Щупы должны иметь достаточную полосу пропускания, широкий динамический диапазон и давать минимальную нагрузку на исследуемый сигнал. Необходимо учитывать воздействие щупа на время нарастания и переходную характеристику.

Полоса пропускания пробников и время нарастания

Полоса пропускания

Производители пробников допускают, что на максимальной рабочей частоте пропускание щупа снижается на 3 дБ. На частотах, превышающих полосу пропускания пробника, результаты измерений могут быть непредсказуемы.

Рассмотрим типовую АЧХ на рис. 9. По мере повышения частоты пропускание падает. При падении на 3 дБ обнаруживаются значительные изменения на переднем и заднем фронтах прямоугольного сигнала, углы скручиваются, так как высокочастотные составляющие сигнала ослабевают. Выбирая щуп, который от 3 до 5 раз по полосе превосходит исследуемый сигнал, можно уменьшить амплитудную ошибку с 30% (3 дБ) до 3%.

Время нарастания

Полоса пропускания не определяет полную картину того, как пробник и осциллограф передают сложную форму сигнала. Для этого необходимо знать переходную характеристику.

Короткие выводы и выбор правильных аксессуаров

При снятии сигнала с исследуемой системы подключенный пробник является дополнительной нагрузкой. Индуктивность его может изменяться в зависимости от добавления различных аксессуаров и изменения длины проводов для подключения сигнального и «земляного» выводов.

Подключение к контрольной точке системы может вызвать возбуждение. Как показано на рис. 10, удлинение сигнальных проводов влияет на результат измерения. Левый график получен с более короткими проводами.

Осциллографические пробники, как правило, комплектуются некоторым числом наконечников. Пользователь должен сознавать, что различные наконечники могут привести к различным результатам измерений. Для более удобного контакта щупа с исследуемой системой одни выводы делают со специальными клипсами, другие — длиннее, есть и такие выводы, которые имеют прямоугольные соединители. Некоторые щупы имеют сигнальный и заземляющий выводы длиной 1 дюйм. Такие длинные выводы обладают большой индуктивностью и могут вызвать различные эффекты, такие как звон, искажения и выбросы.

Выводы

Полоса пропускания, как основная характеристика, может сказать о том, как осциллограф будет воспроизводить реальную форму сигнала, но это далеко не все. Переходная характеристика, времена нарастания и спада, искажения, монотонность внутри полосы, фазовый отклик скажут гораздо больше о действительной точности измерительной системы. Если вы хотите исследовать детали сигнала, необходимо помнить, что вертикальный сдвиг вместе с хорошей способностью к восстановлению после насыщения позволит рассмотреть эти детали. Не забывайте про эффекты, связанные с пробниками, особенно с наконечниками для сигнальных и заземляющих выводов.

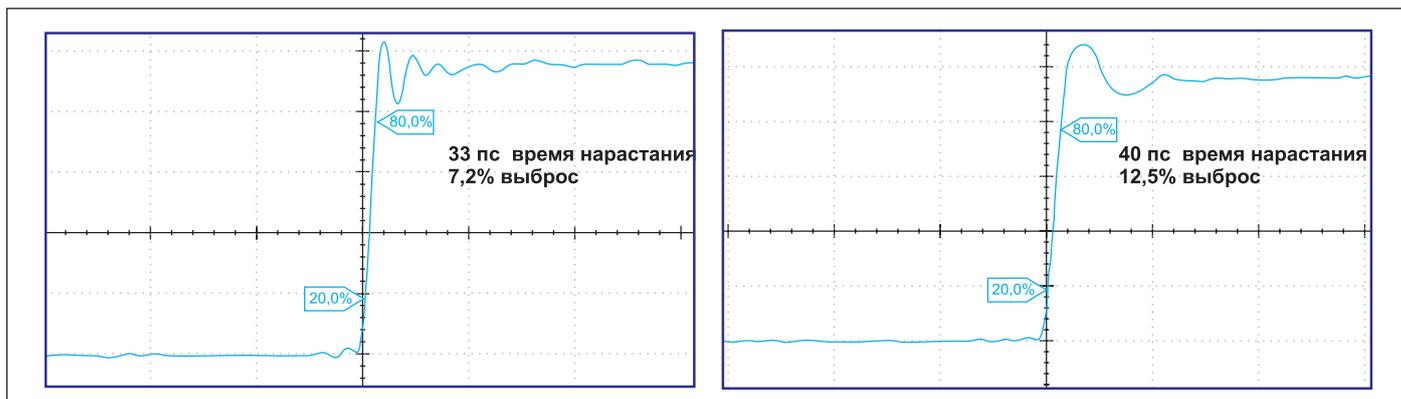


Рис. 10. Сигнальные выводы должны быть как можно короче