

Почему сигнал на экране цифрового осциллографа выглядит таким широким?

Прочитав эту статью, вы получите полезную информацию, которая в один прекрасный момент заставит вас задуматься о достоверности измерений, выполняемых с помощью осциллографа. Вы должны быть абсолютно уверены, что контрольно-измерительное оборудование точно отображает сигналы, снимаемые с разных точек разрабатываемого устройства. Чтобы правильно выбрать измерительную схему, необходимо учитывать множество разных аспектов. В частности, надо исключить электромагнитные помехи в среде тестирования, правильно выбрать средства калибровки и пробники, использовать контрольно-измерительное оборудование с характеристиками, соответствующими решаемым задачам.

Майкл ХОФФМАН (Michael HOFFMAN)
Tmo_russia@keysight.com

В статье особое внимание уделено шуму, который является одной из главных проблем при работе с цифровыми осциллографами. Рассмотрим основные факторы, влияющие на достоверность результатов выполняемых измерений.

Шум — один из главных врагов каждого инженера, занимающегося электроникой. Независимо от среды тестирования важно учитывать, что каждое разрабатываемое устройство обладает некоторым измеряемым собственным шумом и от него нельзя избавиться. Таким же свойством обладают и осциллографы. Соединив осциллограф с разрабатываемым устройством и измерив отображаемый уровень шума, невозможно различить собственный шум осциллографа и шум разрабатываемого устройства. Дополнительные сложности связаны с тем, что шум некоторых осциллографов больше, чем других, даже если в технических описаниях осциллографов указаны одинаковые полосы пропускания и уровни собственных шумов. В статье сделана попытка не только объяснить, как правильно выбрать измерительную схему, но и развеять мифы о том, что шумы цифровых осциллографов больше шумов аналоговых осциллографов.

Развенчание мифа о больших шумах цифровых осциллографов

За последние десятилетия в контрольно-измерительном оборудовании стали широко использоваться цифровые запоминающие осциллографы (DSO). Несмотря на то, что аналоговые осциллографы с точки зрения технологии устарели, некоторые разработчики полагают, что именно аналоговые осциллографы имеют меньший собственный шум и позволяют лучше визуализировать сигнал. Достижения современной технологии осциллографии опровергают такие утверждения. Чтобы разобраться в этой ситуации, нужно принять во внимание две инновационные особенности цифровых запоминающих осциллографов — градации яркости дисплея и скорость обновления сигналов на экране. Без четкого представления об их влиянии на работу осциллографа инженер может ошибочно связывать с ними возникновение нежелательного собственного шума.

Градации яркости дисплея

Отображение с различными градациями яркости — это технология, появление которой связано с желанием работать с цифровыми

осциллографами, как с аналоговыми. На заре развития цифровой осциллографии одним из преимуществ аналоговых осциллографов было наличие третьего измерения (яркости) при просмотре сигналов на экране, что обусловлено принципом действия электронно-лучевых трубок, в которых яркость свечения люминофора увеличивается при повторном прохождении электронного луча по одной и той же траектории. Периодические сигналы отображаются на экране аналогового осциллографа в виде четкой и яркой осциллограммы, а шум и редкие аномалии видны менее ярко, а порой и вовсе незаметны. Первые модели цифровых осциллографов не могли похвастаться такими возможностями — изображение на их экране формировалось из дискретных пикселей, и каждый пиксель мог быть только включен или выключен (рис. 1, 2).

Достижения в области осциллографических технологий позволили производителям цифровым способом получать изображения, подобные изображениям в аналоговых осциллографах. На рис. 1, 2 представлены развертки, выведенные на экран осциллографа смешанных сигналов MSO-X 4154A компании Keysight. Изображение на рис. 1

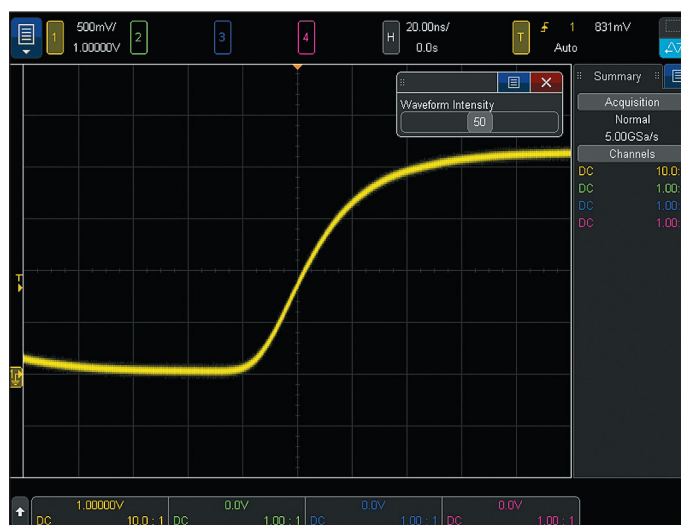


Рис. 1. Отображение сигнала при уровне яркости 50%. Благодаря видимой градации яркости выражена динамика сигнала

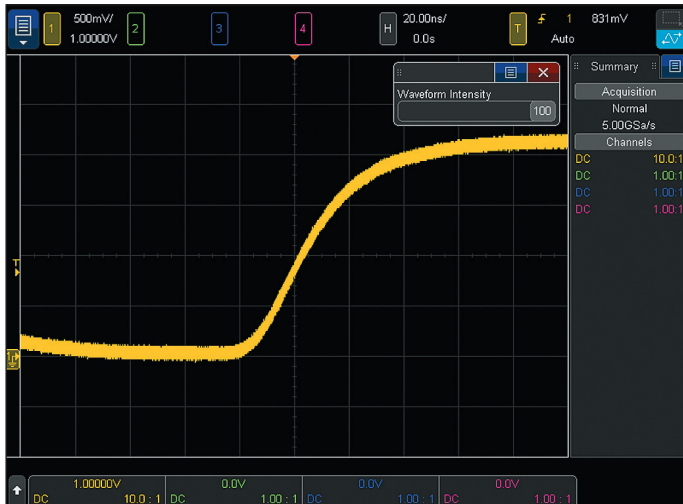


Рис. 2. Отображение сигнала при уровне яркости 100%. Динамика сигнала отсутствует. Редкие и частые события отображаются одинаково ярко. В данном режиме хорошо видны редкие события

соответствует стандартной яркости 50%, на рис. 2 — яркости 100%. Преимуществом работы с высокой яркостью является повышение вероятности регистрации редко появляющихся событий, но при этом создается впечатление об увеличении шума из-за его визуального усиления на экране. Конечно, это заблуждение, так как при любой яркости среднеквадратические значения шума одинаковы, а визуально различаются только полные размахи напряжения шума.

Каждый производитель разрабатывает собственные технологии, но, как правило, частота запуска цифрового осциллографа значительно выше частоты обновления экрана. При этом остается достаточно времени для сбора данных сигнала перед его выводом на экран, например, 33,3 мс при частоте обновления 30 Гц. За это время осциллограф может собрать несколько тысяч осциллограмм. Яркость пикселей тем больше, чем чаще они включаются в течение данного времени.

В первых моделях цифровых осциллографов яркость не регулировалась и всегда была равна 100%. На том этапе разработчики не были готовы решать проблемы повышения качества визуализации сигналов. В результате сигналы на экране такого осциллографа выглядели значительно хуже, чем на экране обычного аналогового осциллографа!

Скорость обновления сигналов на экране

От скорости обновления сигналов на экране зависит, насколько быстро осциллограф сможет выполнить повторный запуск после оцифровки и отображения текущего сигнала на экране. Рассмотрим пример: если вы наблюдаете на экране тактовый сигнал с частотой 500 кГц, то в вашем распоряжении имеется 500 000 положительных перепадов для срабатывания системы запуска. Но реально ли захватывать и отображать каждый перепад на экране? Для такого захвата и отображения осциллограф должен запускаться 500 000 раз в секунду. На самом деле большинство осциллографов запускается гораздо реже. Если ваш осциллограф обладает стандартным временем задержки запуска 100 мкс, то запуск происходит 10 000 раз в секунду и на экране можно отобразить всего лишь 2% сигнала. При времени задержки запуска 1 мкс можно захватывать 1 000 000 осциллограмм в секунду, то есть с вероятностью 100% захватывать все перепады тактового сигнала (если скорость свипирования достаточно велика). Следует учитывать, что шум может иметь не только гауссово, но и неограниченное распределение по амплитуде. По мере приближения к полному захвату сигнала в течение определенного времени появляется возможность захвата маловероятных событий на краях гауссова распределения.

Иначе говоря, более высокая скорость обновления сигналов на экране приводит к повышению вероятности захвата по краям гауссова распределения шума в заданном временном интервале. Попробуйте провести этот простой эксперимент.

В следующем примере был использован осциллограф смешанных сигналов Keysight MSO X-3104T с пассивным пробником 10:1. На его экране показан перепад сигнала тактовой частоты 3,5 МГц при скорости развертки 20 нс/дел. Данный осциллограф имеет настройку системы запуска (Holdoff), позволяющую задерживать повторный запуск. Если вы пользуетесь осциллографом Agilent/Keysight серии X, то эту настройку можно найти в меню Mode/Coupling. При работе с другой моделью осциллографа данная настройка может быть задана в меню Trigger settings (см. Руководство пользователя). Мы смоделируем уменьшение скорости обновления, для чего увеличим интервалы между запусками.

Для того чтобы лучше видеть полный размах напряжения шума, установим яркость на 100%. При стандартном времени задержки, равном минимальному значению (40 нс), скорость обновления сигналов достигает 1 000 000 осцилл./с. При этом сигнал получается широким (рис. 3).

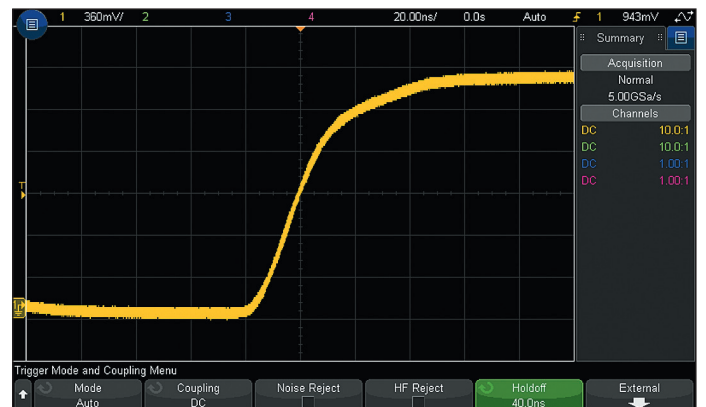


Рис. 3. Отображение сигнала с максимальной скоростью обновления 1 000 000 осцилл./с. Скорость срабатывания системы запуска, не ограниченная настройкой задержки триггера

Рассмотрим другой крайний случай. Многие современные осциллографы работают со скоростями обновления 1000 осцилл./с. Установим время задержки запуска 10 мс, чтобы получить скорость обновления 100 осцилл./с (рис. 4).

Обратите внимание на то, как резко изменилось представление сигнала на экране. Это связано с тем, что осциллограф запускается в тысячу раз реже, то есть вы получаете в тысячу раз меньше информации, чем при максимальной скорости обновления. Это означает, что в сред-

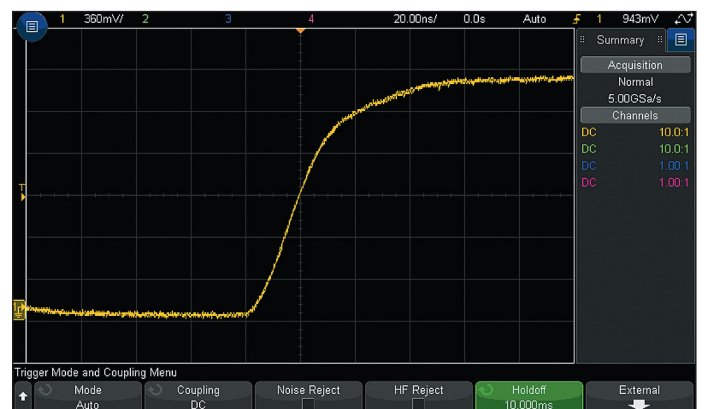


Рис. 4. Отображение сигнала с искусственно ограниченной скоростью обновления 100 осцилл./с. Ограничение скорости осуществляется с помощью задержки срабатывания триггера, в данном случае 10 мс

нем вам потребуется в тысячу раз больший интервал времени для регистрации того же максимального размаха напряжения шума.

Итак, при высокой скорости обновления повышается вероятность захвата редких событий, таких как шум с полным размахом, в течение заданного периода времени. Это приводит к ложному представлению об увеличении шума. Следует помнить, что из-за случайной природы шума необходимо измерять среднеквадратическое значение его амплитуды, а амплитуда полного размаха не дает информации об истинных уровнях шума в системе.

Измерения

При проверке разрабатываемого устройства осциллограф и пробник электрически соединяются с ним и рассматриваются как часть измерительной системы. В идеальном случае контрольно-измерительный прибор не должен влиять на устройство при подключении пробника к контрольной точке, но, к сожалению, на практике это невозможно. Именно поэтому так важно использовать высокоомные пробники при работе с относительно низкочастотными сигналами — высокий импеданс обеспечивает надежную развязку между измерительным прибором и исследуемым устройством. Однако сигнал может быть искажен или изменен при прохождении от контрольной точки до входного каскада осциллографа.

При оценке шума следует учитывать влияние коэффициента ослабления и провода заземления. Пассивный пробник 10:1, поставляемый в комплекте с большинством современных осциллографов, с помощью резистивного делителя уменьшает измеряемый сигнал в 10 раз перед его подачей на входной каскад осциллографа. Шум не ослабляется, поэтому отношение сигнал/шум непосредственно связано с коэффициентом ослабления пробника следующим образом:

$$C/\text{Ш} = V_{\text{вх.}} / (\text{Ослабление}) \times V_{\text{шум.}}$$

$$\text{SNR} = V_{\text{IN}} / (\text{Attenuation}) \times V_{\text{NOISE}}$$

Значение $V_{\text{шум.}}$ указывается в техническом описании осциллографа и зависит от чувствительности по вертикали. Для увеличения отношения сигнал/шум рекомендуется применять пробник с минимальным ослаблением, удовлетворяющим требованиям измерений.

Рассмотрим влияние провода заземления на измерение. При использовании длинного провода увеличивается индуктивность кабеля пробника, что приводит к появлению паразитных затухающих колебаний в цепи экрана кабеля — «звона». Провод заземления большой длины вызывает «звон» на низких частотах. Уменьшение длины провода увеличивает частоту «звона» и позволяет вывести его из диапазона частот, в котором выполняется измерение. Резонансная частота классического LC -контура вычисляется по формуле:

$$\omega_0 = 1 / (2\pi\sqrt{LC}).$$

Входная емкость выбранного пробника указана в техническом описании; уменьшение емкости пробника приводит к увеличению его полосы пропускания, но сказывается на стоимости. Индуктивность, также указанная в техническом описании, снижается при правильном заземлении.

Следует учитывать, что длинный провод заземления может образовать паразитный контур, улавливающий коммутационные помехи.

Контрольно-измерительное оборудование

Каждый осциллограф обладает собственным шумом. Значение шума указывается в техническом описании осциллографа, а представление шума на экране зависит

от чувствительности по вертикали. Чем выше полоса пропускания осциллографа, тем больше полный размах амплитуды шума на его экране, поскольку шум на высоких частотах изменяется быстрее и больше, чем на низких частотах. Для изготовления широкополосных осциллографов необходимо использовать высококачественные компоненты, предъявлять более жесткие требования к проектированию, применять АЦП с меньшим шумом дискретизации и выполнять фильтрацию с цифровой обработкой сигналов для уменьшения шума в соответствии с требованиями пользователя.

Часто инженеры заблуждаются, пытаются определить качество прибора по числу разрядов АЦП осциллографа. Утверждение, что при 10-разрядном АЦП разрешение по вертикали в 4 раза больше, чем при 8-разрядном АЦП, несправедливо, если уровень шума превышает разрешение АЦП. В связи с этим специалисты рекомендуют рассматривать другой параметр — эффективное число разрядов (ENOB). Он более точно характеризует качество представления сигнала на экране осциллографа. Дополнительную информацию об эффективном числе разрядов можно получить, зайдя по следующим ссылкам: www.literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-3020EN.pdf; www.youtube.com/watch?v=15Cts5nPpCA; www.literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-2003EN.pdf.

Подводя итоги, отметим, что существует много путей уменьшения шума в измерительной системе — от устранения электромагнитных помех в среде тестирования до соответствующего выбора средств и методов измерения. Особое внимание обратим на то, что успехи современной технологии могут создать у инженеров неправильное представление об уровнях шума в исследуемом устройстве из-за визуального увеличения размаха шума на экране или наличия скрытой информации вследствие слишком медленного обновления. ■