

# Повышение разрешения по вертикали осциллографов с цифровым люминофором Tektronix

## Техническое резюме

При измерениях формы волны низковольтного сигнала с высоким разрешением многие пользователи осциллографов извлекут для себя пользу, ближе ознакомившись с рабочими режимами осциллографа и эксплуатационными характеристиками пробников и осциллографов. Настоящее техническое резюме приводит основные принципы измерения

и обработки сигналов, реализованные в осциллографах Tektronix для захвата формы волны сигнала с высоким разрешением. Знание в данной области существенно облегчат выбор и работу с осциллографами и пробниками Tektronix.

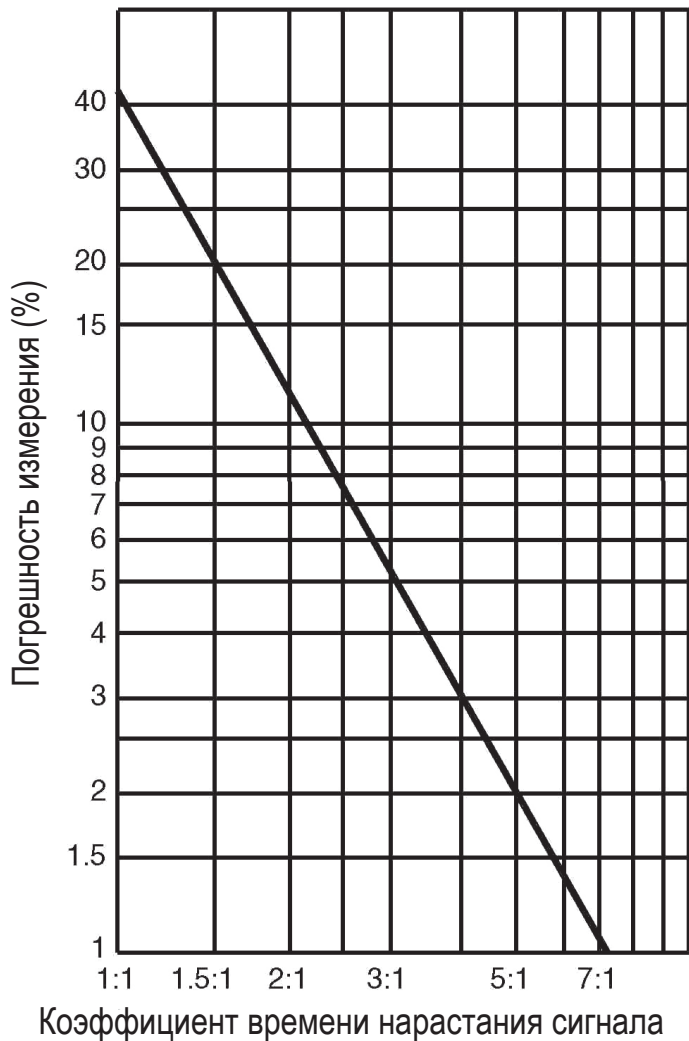


Рис. 1. Погрешности измерения времени нарастания сигнала

## Полоса пропускания измерительной системы

Первым шагом в выполнении качественных измерений является выбор правильной измерительной системы. Полоса пропускания аналоговых сигналов измерительной системы, включая осциллографы и пробники, должна обеспечивать захват сигнала максимальной частоты, включая гармонические составляющие. Основным правилом является использование измерительной системы с полосой пропускания не менее чем в 5 раз превышающей полосу частот исследуемых сигналов. Так, для измерения уровня тактового сигнала цифровой системы с частотой 100 МГц потребуются пробник и осциллограф, способные обеспечить полосу пропускания не менее 500 МГц. Это позволяет захватывать наиболее значимые гармоники и ограничивает погрешности измерения амплитуды и фазы, возникающие на границе полосы пропускания.

При выполнении измерений низковольтных сигналов убедитесь, что вы работаете с необходимой полосой пропускания и в соответствующем диапазоне чувствительности. Так, пробник с переключаемым ослаблением (например, 1X/10X) может иметь очень широкую полосу в режиме 10X, но очень узкую в режиме 1X. Аналогично, осциллограф может иметь полосу пропускания с ухудшенными номинальными характеристиками, обеспечивая чувствительность 1 мВ/дел или менее (или просто обеспечивать масштабирование чувствительности по вертикали).

При измерении формы несинусоидальных сигналов одним из основных показателей измерительной системы может являться время нарастания сигнала. Для измерительной системы этот параметр вычисляется как квадратный корень из суммы квадратов времени нарастания сигнала, не менее чем в 5 раз превышающим время нарастания измеряемых сигналов. Это обеспечит точность измерения временных параметров в пределах 2 %, как показано на Рис. 1.

Несмотря на то, что для обеспечения надлежащего качества отображения сигнала требуется соответствующая полоса пропускания, использование более широких полос не является определяющим параметром для обеспечения более точных измерений. Увеличение полосы пропускания также способствует захвату вместе с сигналом большего объема шума.

## Частота дискретизации осциллографа

Частота дискретизации показывает, с какой частотой осциллограф проводит оцифровку входного сигнала. Чтобы произвести точное восстановление сигнала и избежать искажения данных, используется теорема Найквиста, утверждающая, что частота дискретизации должна быть, по крайней мере, вдвое выше максимальной частоты входного сигнала или его гармонических составляющих. Точное восстановление сигнала зависит от частоты дискретизации и метода интерполяции, используемого для восстановления. С интерполяцией  $\sin(x)/x$  рекомендуется использовать частоту дискретизации, в 5 раз превышающую полосу пропускания системы. При захвате однократных и непериодических событий более низкая частота дискретизации ограничит полосу пропускания осциллографа.

## Выбор оптимального пробника

Выбор пробника может казаться простой процедурой, но для достижения оптимальных результатов необходимо учесть множество критических моментов, особенно для измерений низковольтных сигналов. Пассивный пробник, поставляемый с осциллографом, может оказаться не лучшим решением для данной области применения.

При измерении формы низковольтных сигналов очень важно максимизировать амплитуду сигнала, одновременно минимизируя уровень шума. Выбор пробника является первым критическим шагом. Пробники напряжения обычно способствуют затуханию входного сигнала, формируя делитель напряжения с входным сопротивлением осциллографа. Это способствует повышению входного сопротивления измерительной системы, но понижает уровень сигнала на входе осциллографа. Осциллографы компенсируют данное затухание, усиливая сигнал, но, к сожалению, усиливая и любые помехи. С точки зрения отношения «сигнал-шум» оптимальный пробник обеспечивает незначительное затухание или его полное отсутствие. Например, рассмотрим пассивный пробник с высоким сопротивлением TRP0502 с полосой пропускания 500 МГц с затуханием 2X.

Для минимизации влияния нагрузки на сигнал вы захотите выбрать пробник с очень высоким входным сопротивлением и очень низкой входной емкостью (минимизация входной емкости повышает резонансную частоту, вызываемую индуктивностью провода заземления, или, наоборот, позволяет использовать более длинные провода заземления без снижения качества сигнала). Минимального уровня нагрузки, вероятно, можно достичь, используя активный пробник, хотя при этом придется проиграть в стоимости, помехах и динамическом диапазоне.

Все измерения напряжения производятся относительно опорного напряжения, часто относительно «земли». Точность измерений, особенно измерений низковольтных сигналов, критически зависит от низкого сопротивления соединения с опорным напряжением. Для минимизации искажений сигнала и шума необходимо использовать максимально короткие выводы для заземления. Несмотря на то, что длинный провод заземления стандартного пассивного пробника удобен при исследовании различных электронных схем, его индуктивность вместе с входной емкостью пробника образуют колебательный контур, вызывающий "звон" при исследовании коротких фронтов сигнала. Петля, сформированная наконечником пробника и проводом заземления, вызывает добавление индуктивно связанного шума в сигнал. Также непосредственная близость индуктивного резистивного сопротивления провода заземления и источников помех, например коммутирующих устройств, обеспечивает электростатическое влияние помех на сигнал. Наилучшим решением является минимизация длины провода заземления и подключение его к контрольной точке максимально близко к сигнальному соединению.

Для получения дополнительной технической информации по пробникам осциллографов обратитесь к руководству Tektronix для начинающих «Tektronix ABCs of Probes Primer 60W-6053-XX» на [www.tektronix.com](http://www.tektronix.com).

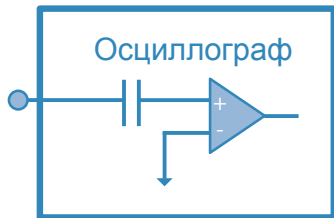


Рис. 2. Связь по переменному току на входном усилителе осциллографа

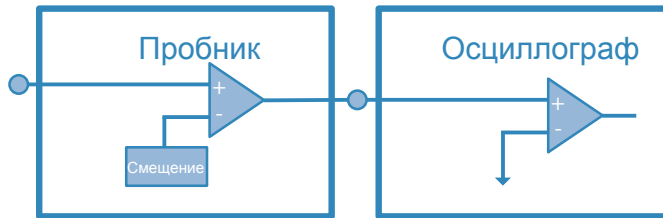


Рис. 3. Добавление смещения постоянной составляющей в усилитель пробника

## Работа с большими смещениями постоянной составляющей

*Примечание: Каждый раз при работе с высокими напряжениями, в целях обеспечения личной безопасности, а также безопасной работы оборудования, необходимо убедиться, что максимальные напряжения находятся в пределах «абсолютных» или «неразрушающих» максимальных входных напряжений измерительной системы. Кроме того, для обеспечения точности измерений необходимо, чтобы сигналы оставались в пределах номинальных рабочих диапазонов (например, в пределах линейного или динамического диапазона пробника).*

Измерения низковольтных сигналов переменного тока, зависящих от больших смещений постоянной составляющей, являются гораздо более сложными, чем измерения сигналов постоянного тока с малым перепадом амплитуды.

Самый простой метод – полностью захватить сигнал пробником с гальванической развязкой от земли и затем попытаться измерить переменную составляющую. Данный метод не позволяет при измерениях сигналов переменного тока полностью использовать динамический диапазон измерительной системы измерительной системы, и коэффициент «сигнал-шум» будет низким. Тем не менее, существуют еще несколько методов обработки сигналов, рассматриваемых далее в настоящем документе, позволяющих немного повысить разрешающую способность измерительной системы.

Другим методом является использование связи по переменному току (или «удаление постоянной составляющей») на входе осциллографа. Последовательно подключив емкость к цепи входного сигнала, мы получим эффективное функционирование связи по переменному току, что обеспечит удаление постоянных составляющих из входного сигнала вплоть до момента его искажения, например при использовании активного пробника за пределами его максимального диапазона. Несмотря на то что емкость заблокирует постоянные составляющие, интенсивность низкочастотного сигнала будет всего лишь немного ослаблена. В конечном итоге, связь по переменному току может отсутствовать при всех настройках входного сопротивления осциллографа, как показано на Рис. 2.

Наиболее оптимальным методом является добавление фиксированного компенсирующего напряжения смещения постоянного тока на усилителе для компенсации смещения постоянной составляющей входного сигнала. Смещение может быть добавлено в усилитель активного пробника, см. Рис. 3.

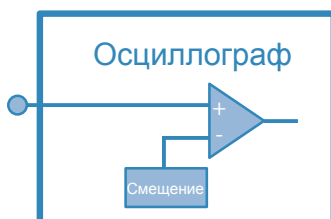


Рис. 4. Добавление смещения постоянной составляющей во входной усилитель осциллографа

Возможно также добавление смещения во входной усилитель осциллографа. Аналогично, данная схема эффективно работает для удаления постоянных составляющих из входного сигнала вплоть до момента его искажения (Рис. 4).

Во всех предыдущих примерах использовались только несимметричные пробники или пробники с гальванической развязкой от земли. Если измерение базируется исключительно на переменной составляющей сигнала, лучшим выбором может быть использование дифференциального активного пробника, содержащего дифференциальный усилитель, реагирующий только на разность напряжений между двумя его входами.

В данном случае продолжают применяться все указания относительно технических характеристик пробника, включая пределы максимальных напряжений. Кроме того, коэффициент ослабления синфазного сигнала является критическим (CMRR), так как служит показателем способности пробника подавлять или игнорировать постоянную составляющую сигнала (или любой сигнал, являющийся синфазным для двух входов), см. Рис. 5.

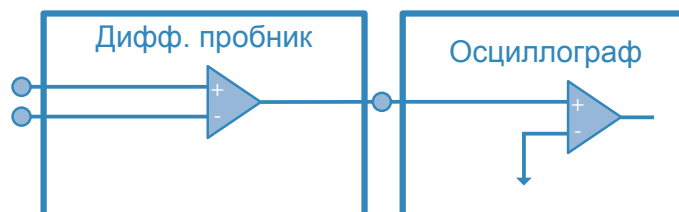


Рис. 5. Дифференциальный пробник подает только сигналы переменного тока на входной усилитель осциллографа

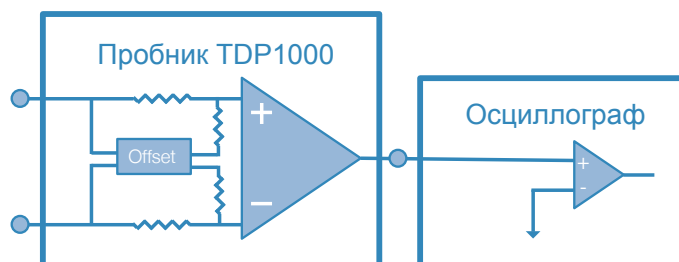


Рис. 6. Автоматическая компенсация смещения постоянной составляющей на дифференциальном пробнике TDP1000

Некоторые пробники, такие как дифференциальные пробники TDP1000 Tektronix, разработаны с учетом преимуществ дифференциальных измерений посредством усовершенствования метода смещения режимом подавления постоянной составляющей. Функция подавления постоянной составляющей автоматизирует процесс смещения посредством измерения формы входного сигнала и генерации внутреннего смещения, ослабляющего постоянную составляющую сигнала. В силу того что входной сигнал всегда имеет непосредственную связь с усилителем, режим подавления постоянной составляющей не увеличивает динамические диапазоны синфазного и дифференциального режимов для постоянных составляющих.

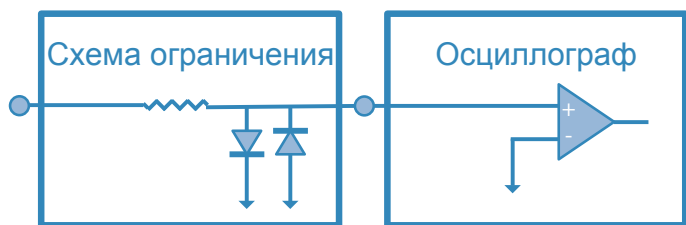


Рис. 7. Упрощенная схема ограничения входного динамического диапазона

## Ограничение динамического диапазона входных сигналов

Перед тем как вернуться к вопросу нормального режима работы осциллографа, необходимо рассмотреть еще одну альтернативу точного измерения слабых сигналов, включенных в сильные сигналы. Усилители в активных пробниках и на входах осциллографов предназначены для работы в своем линейном диапазоне. За пределами линейного диапазона возможно искажение входных сигналов (линейный динамический диапазон активных пробников обычно указан в техническом описании; линейный диапазон для осциллографа охватывает приблизительно весь экран при выбранной вертикальной шкале). Если уровни сигналов выходят за пределы линейного диапазона, происходит перегрузка усилителей, и для их восстановления может потребоваться значительное количество времени.

Решением является внешнее ограничение динамического диапазона сигнала при помощи одной из множества стандартных схем ограничения сигнала, предлагаемых в учебниках и технической литературе. В качестве примера на Рис. 7 показана простая диодная схема ограничения, которая ограничивает сигнал по амплитуде на входе осциллографа, позволяя производить измерения высокого разрешения рядом с землей даже в случаях, когда пиковые амплитуды сигнала выходят за пределы линейного диапазона осциллографа.

## Ограничение полосы пропускания аппаратного обеспечения

Большинство осциллографов и некоторые усовершенствованные пробники оснащены схемами, ограничивающими полосу пропускания измерительной системы. Ограничение полосы пропускания позволяет снизить уровень шума в сигнале, в результате чего мы получим более четкое отображение сигнала и более стабильные результаты измерений. Уровень шума приблизительно вычисляется как квадратный корень из ширины полосы пропускания. Побочным эффектом является то, что при снижении уровня шума ограничение полосы пропускания также может полностью или частично убрать контент высокочастотного сигнала.

Ограничение полосы пропускания также может быть реализовано в программном обеспечении, часто в комбинации с фильтрацией полосы пропускания аппаратного обеспечения в целях предотвращения искажения данных. Программно-реализованные фильтры ограничения полосы пропускания могут предоставить больший выбор ширины полосы пропускания, обеспечить лучший контроль частотных и фазовых характеристик, а также более качественный уровень фильтрации сигналов. Как показано на рисунке нижеприведенного раздела, программная фильтрация может также существенно увеличить разрешение по вертикали.

## Разрешение по вертикали

Разрешение по вертикали в основном рассматривается как способ определения уровня точности, с которой аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) может преобразовывать входные напряжения в цифровые значения. Выражаясь более корректно, назовем данную точность степенью детализации процесса преобразования, измеряемой в битах. Например, подавляющее большинство осциллографов основаны на АЦП с 8-битным разрешением, представляющих выборку входных сигналов как одного из 28 или 256 дискретных уровней квантования, или оцифровки.

Точность отражает уровень воспроизводимости, или непротиворечивости, при измерении амплитуды сигнала. В идеале N-битное разрешение АЦП ограничивает возможность измерительной системы распознавать и представлять слабый сигнал. Данная способность может быть выражена как соотношение «сигнал-шум» (SNR):

$$\text{SNR} = 6.08 * N + 1.8$$

где: SNR – отношение «сигнал-шум» в дБ

N – количество бит в АЦП

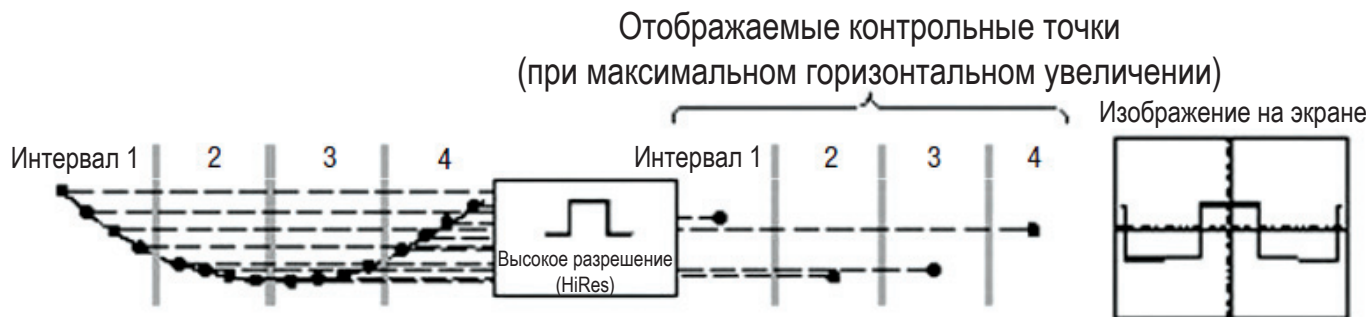


Рис. 8. Режим выборки сохраняет одну контрольную точку для каждого интервала выборки

## Точность по вертикали

Перед тем как вернуться к вопросу разрешения по вертикали, очень важно понять разницу между разрешением по вертикали и точностью по вертикали. Точность по вертикали отражает близость измеренного значения амплитуды к фактической амплитуде сигнала.

Были разработаны несколько цифровых осциллографов с АЦП с более высоким разрешением. Хотя и предполагается, что данные продукты являются более точными, чем 8-битные, это не обязательно так. Сочетание с доступными методами измерения с использованием пробников и методами обработки сигналов не делает характеристики измерительной системы однозначно превосходящими характеристики системы с 8-битным разрешением.

Еще одной общей характеристикой осциллографов является точность измерения постоянной составляющей, которая просто является точностью, с которой прибор может измерять значение постоянного тока. В результате может оказаться, что прибор с более высокой точностью измерения постоянной составляющей будет более точным при измерении сигналов постоянного тока, но это также не обязательно. Множество других характеристик осциллографов и пробников также вносят вклад в общую точность.

Последней и гораздо более сложной характеристикой является эффективная разрядность (ENOB), которая является показателем способности прибора обеспечивать точное отображение сигналов на различных частотах. ENOB определяется Стандартом IEEE на записывающие устройства оцифровки волновых форм (Стандарт IEEE 1057). Подобно производству коэффициента усиления на ширину полосы пропускания или диаграммам Боде, ENOB изменяется в зависимости от частоты (как правило уменьшается с понижением частоты).

Данное ухудшение эксплуатационных характеристик АЦП может быть описано как увеличение уровня случайного или псевдослучайного шума в сигнале. Источники данных ошибок включают смещение постоянной составляющей, отклонение коэффициента усиления от идеального значения, аналоговую нелинейность, немонотонность преобразователя и утраченные участки кодов, джиттер запуска, неустойчивость апертуры (джиттер времени выборки) и случайный шум. Вопрос эффективных битов является достаточно сложным и не охватывается настоящим документом. Более подробную информацию можно получить в примечании по применению эффективных битов «Effective Bits Application Note 4HW-19448-XX» на [www.tektronix.com](http://www.tektronix.com).

## Режимы сбора данных осциллографа

В осциллографах Tektronix термин «режимы сбора данных» относится к первоначальному представлению данных о форме сигнала, обычно в 8- или 16-битном разрешении. Все последующие операции обработки (отображение, автоматические измерения, курсоры, математические символы и приложения) базируются на представлении сигнала, определенном режимом сбора данных.

Режимом сбора данных большинства осциллографов по умолчанию является режим выборки. Это самый простой режим сбора данных, в котором стандартный осциллограф представляет каждую точку кривой формы сигнала в виде 8-битного значения амплитуды с выбранной частотой выборки, вплоть до максимальной, см. Рис. 8.

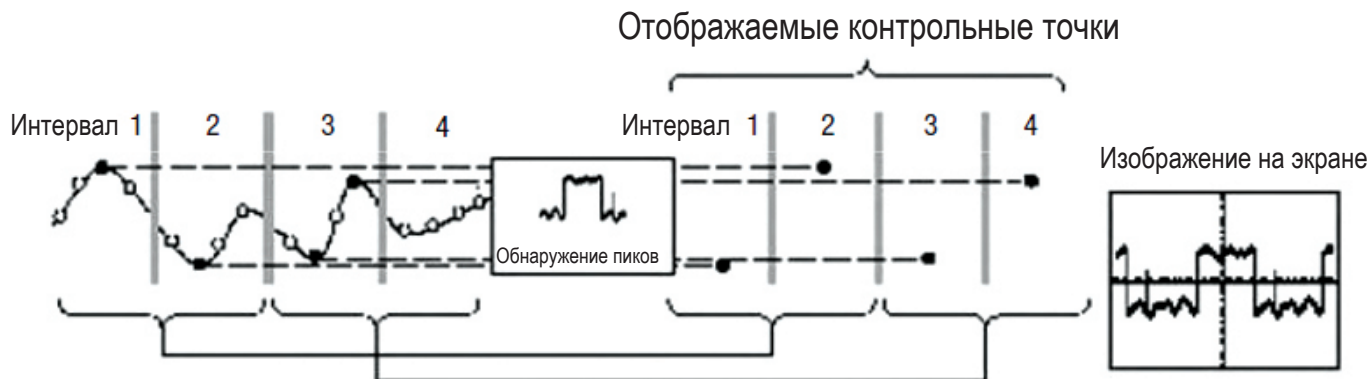


Рис. 9. Режим обнаружения пиков регистрирует максимальные и минимальные значения, содержащиеся в двух последовательных интервалах выборки

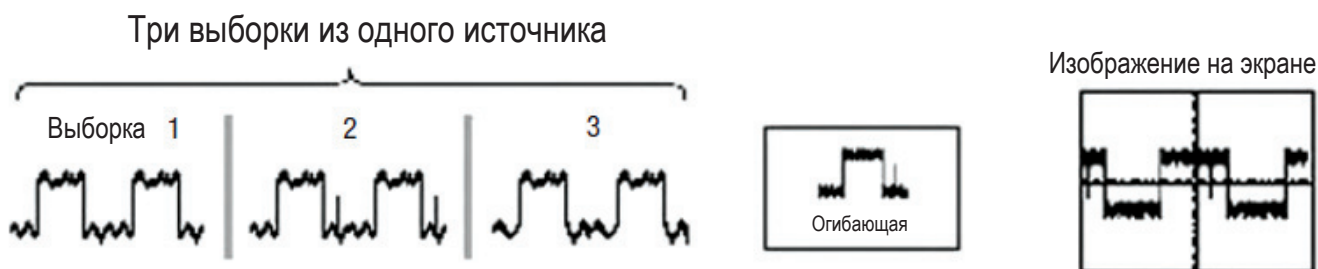


Рис. 10. Режим огибающей производит регистрацию максимальных и минимальных значений за множество выборок

В режиме обнаружения пиков осциллограф представляет каждую точку кривой формы сигнала в виде пары 8-битных значений амплитуды, представляющих максимальное и минимальное значения формы волны сигнала за выбранную пару интервалов выборки. Цифровые осциллографы с режимом обнаружения пиков обычно захватывают сигнал на максимальной частоте выборки даже при очень медленных настройках горизонтальной развертки и поэтому могут захватывать события быстрых изменений сигнала, возникающих между точками, с выбранной частотой выборки. В данном случае режим обнаружения пиков особенно полезен для просмотра кратковременных импульсов, разбросанных во времени, таких как глитчи в низкочастотном сигнале, см. Рис. 9.

Режим огибающей аналогичен режиму обнаружения пиков за исключением того, что данный режим производит сбор пар максимальных и минимальных точек кривой формы сигнала за множество выборок для создания формы волны сигнала, отображающей временную зависимость накопления минимальных/максимальных значений. Режим обнаружения пиков может быть использован для сбора значений, комбинация которых формирует огибающую, см. Рис. 10.

Для измерений низковольтных сигналов имеются также другие режимы сбора данных, которые подлежат рассмотрению. Ниже приводится описание двух наиболее оптимальных методов: усреднение и высокое разрешение (для получения дополнительной технической информации по осциллографам обратитесь к руководству Tektronix для начинающих «Tektronix XYZs of Oscilloscopes Primer 03W-8605-XX» на [www.tektronix.com](http://www.tektronix.com)).



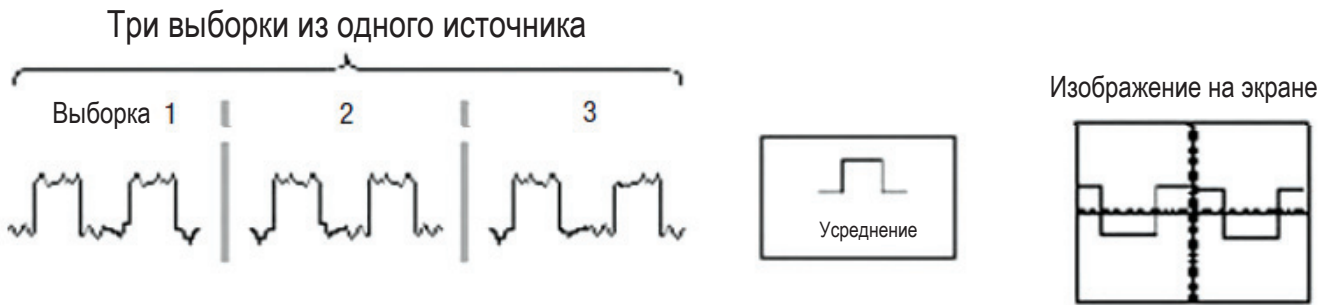


Рис.11. Режим усреднения рассчитывает среднее значение для каждой контрольной точки за множество выборок

## Усреднение

Режим усреднения является одним из основных методов обработки сигналов с целью подавления шума системы сбора данных осциллографа. Он базируется на множестве выборок повторяющегося сигнала. На основании данных, полученных за две или более выборок, данный режим последовательно усредняет соответствующие контрольные точки за данный период выборок и формирует форму волны выходного сигнала. Режим усреднения понижает коэффициент «сигнал-шум», подавляет шум, некоррелированный по пусковому сигналу, повышает разрешение по вертикали и упрощает просмотр повторяющихся сигналов, см. Рис. 11.

Данный стандартный метод вычисления средней формы волны сигнала основан на сложении всех значений выборок и последующем делении полученной суммы на число выборок. Тем не менее, перед отображением усредненной осциллограммы необходимо подождать, пока будут захвачены все N форм сигналов. Данная временная задержка является неприемлемой для большинства пользователей, и объем собранных данных быстро переполняет объем памяти осциллографа.

$$A_N = (1 / N) * (x_0 + x_1 + x_2 + \dots + x_{n-1})$$

где:  $A_N$  – точка на усредненной осциллограмме  
 $N$  – общее требуемое количество усредняемых осциллограмм  
 $x_n$  – точка на осциллограмме  $n$   
 $n$  – представляет количество осциллограмм

Стандартный алгоритм усреднения может быть изменен с целью отображения промежуточных результатов каждый раз при захвате формы сигнала, что решает вопрос задержки вывода усредненной осциллограммы. Тем не менее, вопрос быстрого переполнения памяти остается открытым. Устойчивый алгоритм усреднения:

$$a_n = (1 / n) * (x_0 + x_1 + x_2 + \dots + x_{n-1})$$

где:  $a_n$  – точка на текущей усредненной осциллограмме

$x_n$  – точка на новой осциллограмме  $n$

$n$  – представляет количество осциллограмм

Чтобы получить сумму значений N, переведите осциллограф в режим однократного запуска. В данном режиме, когда n достигает N, сбор данных прекращается и усредненная осциллограмма будет содержать N захваченных форм сигналов.

Осциллографы Tektronix используют экспоненциальный алгоритм усреднения, позволяющий обновлять промежуточные результаты на экране после каждой выборки и существенно сокращающий требуемый объем памяти. Экспоненциальный процесс усреднения использует следующую формулу для создания только что усредненной осциллограммы  $a_n$  на основании данных новой выборки  $x_n$  и предыдущей усредненной осциллограммы  $a_{n-1}$ :

$$a_n = a_{n-1} + (1/p) * (x_n - a_{n-1}) = a_{n-1} * ((p - 1) / p) + (x_n / p)$$

где:  $n$  – представляет количество осциллограмм  
 $N$  – общее требуемое количество усредняемых осциллограмм  
 $a_n$  – новая точка на усредненной осциллограмме  
 $a_{n-1}$  – точка на предыдущей усредненной осциллограмме  
 $x_n$  – точка на новой осциллограмме  
 $p$  – весовой коэффициент  
 Если ( $n < N$ ), то  $p = n$ , иначе  $p = N$

Результирующая усредненная осциллограмма является аналогичной, независимо от того, какой из данных алгоритмов усреднения использовался. Необходимо проанализировать, насколько эффективен экспоненциальный алгоритм усреднения для вычисления и сохранения захваченных и усредненных осциллограмм.

В некоторых осциллографах комбинируются два рассмотренных ранее метода вычисления среднего значения (усреднения). Отображается первая осциллограмма, для следующих  $N-1$  осциллограмм используется устойчивый алгоритм усреднения, а экспоненциальный алгоритм усреднения используется после генерации  $N$  осциллограмм.

Оба алгоритма легко отображают влияние последовательных трендов в форме волны сигнала. Вы можете увидеть это на осциллограмме медленного сигнала. Если сигнал устойчивый, вы увидите успешное подавление шума в ходе генерации первых  $N$  осциллограмм. После  $N$  захватов сигнал будет продолжать изменяться, но подавление шума будет происходить не так успешно или повышение разрешения по вертикали будет не столь очевидным.

Усреднение повышает разрешение сигнала по вертикали. Данное повышение разрешения, измеренное в битах, является функцией общего количества усреднений:

$$\text{Повышенное разрешение} = 0.5 \log_2(N)$$

где:  $N$  – общее требуемое количество усреднений

Таблица 1 отображает идеальное повышение разрешения, которого можно добиться при усреднении формы сигнала.

Количество усреднений	Повышенное разрешение (биты)	Общее разрешение по вертикали (биты)
1	0.0	8.0
2	0.5	8.5
4	1.0	9.0
8	1.5	9.5
16	2.0	10.0
32	2.5	10.5
64	3.0	11.0
128	3.5	11.5
256	4.0	12.0
512	4.5	12.5
1024	5.0	13.0
2048	5.5	13.5
4096	6.0	14.0
8192	6.5	14.5
10000	6.64	14.64

Таблица 1. Повышение разрешения по вертикали посредством усреднения

Итак, значения, приведенные в Таблице 1, являются идеальными. Во многих осциллографах Tektronix алгоритм усреднения реализован на основе математического метода с фиксированной запятой. Максимальное количество усреднений составляет 10 000, что ограничивает общее количество битов разрешения до идеального максимального значения 14,64. На практике математический метод с фиксированной запятой, шум и ошибки джиттера немного понижают максимальное разрешение.

В идеале усреднение формы сигнала поддерживает полную аналоговую полосу пропускания сигналов, что является существенным преимуществом перед другими методами обработки сигналов. Тем не менее данные, собранные в режиме выборки, не могут быть полностью освобождены от дрожаний. То есть распределение по времени выборок форм сигналов не согласовывается с системой запусков. Фактически, относительные положения (что является определением джиттера) могут быть смещены на 1 интервал выборки. Когда частота равна половине частоты выборки, это индицирует сдвиг фазы на  $180^\circ$ . Среднее пиковое значение такого сигнала составляет 0,637 от амплитуды сигнала, или -3,9 дБ. Амплитудная погрешность вследствие джиттера может быть минимизирована посредством избыточной дискретизации сигнала.

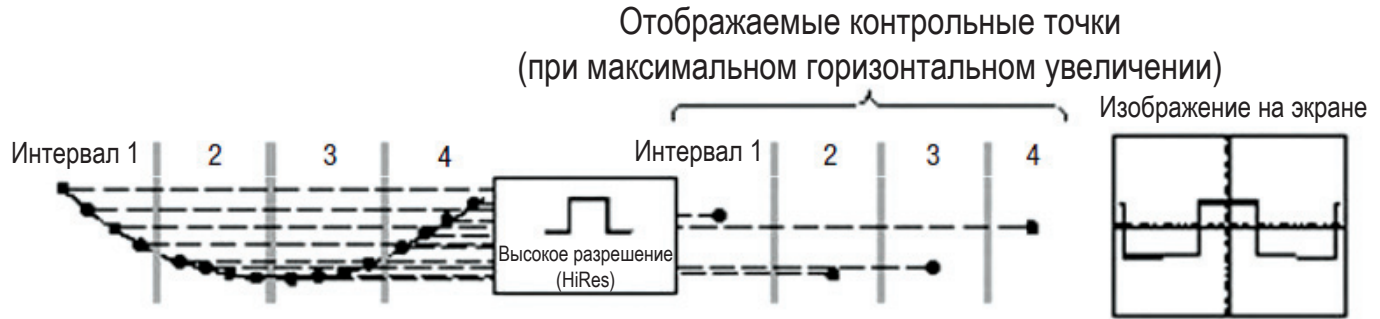


Рис. 12. Режим HiRes вычисляет среднее значение всех выборок для каждого интервала выборки

## Режим высокого разрешения (HiRes)

Режим высокого разрешения (HiRes) является запатентованным Tektronix процессом сбора данных, вычисляющим и отображающим среднее всех значений последовательных выборок в каждом интервале выборки. Как и режим обнаружения пиков, режим HiRes предлагает метод поступления избыточной дискретизации для получения дополнительной информации по форме волны сигнала. В режиме HiRes нам приходится поступиться дополнительной информацией выборки по горизонтали для обеспечения большего разрешения по вертикали и уменьшения полосы пропускания и шума. Одним ключевым преимуществом режима HiRes перед режимом усреднения является то, что режим HiRes может использоваться в режиме однократного запуска.

Ограничение полосы пропускания и повышение разрешения по вертикали вследствие использования режима HiRes изменяются с изменением максимальной частоты выборки и фактической (выбранной) частоты выборки прибора. Фактическая частота выборки обычно отображается в нижней части экрана, а максимальная частота выборки приведена в техническом описании. Повышение разрешения по вертикали в битах:

$$0.5 \log_2 * (D)$$

где:  $D$  – коэффициент прореживания, или максимальная частота выборки / фактическая частота выборки

Результирующая полоса пропускания -3 дБ (за исключением дополнительных случаев ограничения аналоговой полосой пропускания измерительной системы):

$$0.44 * SR$$

где:  $SR$  – фактическая частота выборки

Частота выборки	Количество усреднений	Общее разрешение по вертикали (биты)	Полоса пропускания -3 дБ*
10 Гвыб/с	1	8,0 бит	4,4 ГГц
5 Гвыб/с	2	8,5 бит	2,2 ГГц
2,5 Гвыб/с	4	9,0 бит	1,1 ГГц
1 Гвыб/с	10	9,7 бит	440 МГц
250 Мвыб/с	40	10,7 бит	110 МГц
50 Мвыб/с	200	11,8 бит	22 МГц
10 Мвыб/с	1000	13,0 бит	4,4 МГц
2,5 Мвыб/с	4000	14,0 бит	1,1 МГц
1 Мвыб/с	10,000	14,6 бит	440 кГц
250 квыб/с	40,000	15,6 бит	110 кГц
25 квыб/с	400,000	16 бит	11 кГц
250 выб/с	4,000,000	16 бит	110 Гц
25 выб/с	40,000,000	16 бит	11 Гц
2,5 выб/с	400,000,000	16 бит	1,1 Гц

\* \* Максимальная полоса пропускания в режиме HiRes может быть в дальнейшем ограничена аналоговой полосой пропускания. .

**Таблица 2.** Повышенное разрешение по вертикали в режиме HiRes с осциллографом, осуществляющим выборку с частотой 10 Гвыб/с

Для осциллографа с максимальной частотой выборки 10 Гвыб/с режим HiRes обеспечивает следующие характеристики (см. Таблицу 2).

Для осциллографа с максимальной частотой выборки 5 Гвыб/с режим HiRes обеспечивает следующие характеристики (см. Таблицу 3).

Частота выборки	Количество усреднений	Общее разрешение по вертикали (биты)	Полоса пропускания -3 дБ*
5 Гвыб/с	1	8,0 бит	2,2 ГГц
2,5 Гвыб/с	2	8,5 бит	1,1 ГГц
1 Гвыб/с	5	9,2 бит	440 МГц
250 Мвыб/с	20	10,2 бит	110 МГц
50 Мвыб/с	100	11,3 бит	22 МГц
10 Мвыб/с	500	12,5 бит	4,4 МГц
2,5 Мвыб/с	2000	13,5 бит	1,1 МГц
1 Мвыб/с	5000	14,1 бит	440 кГц
250 квыб/с	20,000	15,1 бит	110 кГц
25 квыб/с	200,000	16 бит	11 кГц
250 выб/с	2,000,000	16 бит	110 Гц
25 выб/с	20,000,000	16 бит	11 Гц
2,5 выб/с	200,000,000	16 бит	1,1 Гц

\*\* Максимальная полоса пропускания в режиме HiRes может быть в дальнейшем ограничена аналоговой полосой пропускания.

**Таблица 3.** Повышенное разрешение по вертикали в режиме HiRes с осциллографом, осуществляющим выборку с частотой 5 Гвыб/с

Как и в случае усреднения, значения в Таблицах 2 и 3 являются идеальными. Во многих осциллографах Tektronix алгоритм усреднения реализован на основе математического метода с фиксированной запятой, что обеспечивает в результате значение максимального разрешения в 16 бит. Наблюдаемое повышение разрешения может быть немного ниже и изменяться в зависимости от области применения, но данный метод обработки сигналов может быть крайне ценным для целого ряда применений.

Примеры на следующих страницах демонстрируют данный метод.

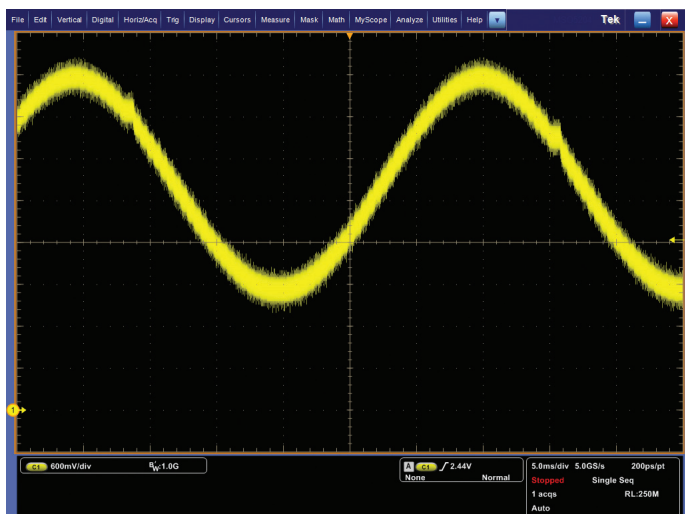


Рис. 13. Режим выборки отображает синусоидальную волну выходного сигнала ЦАП со случайным шумом и некоррелированным скачком сигнала

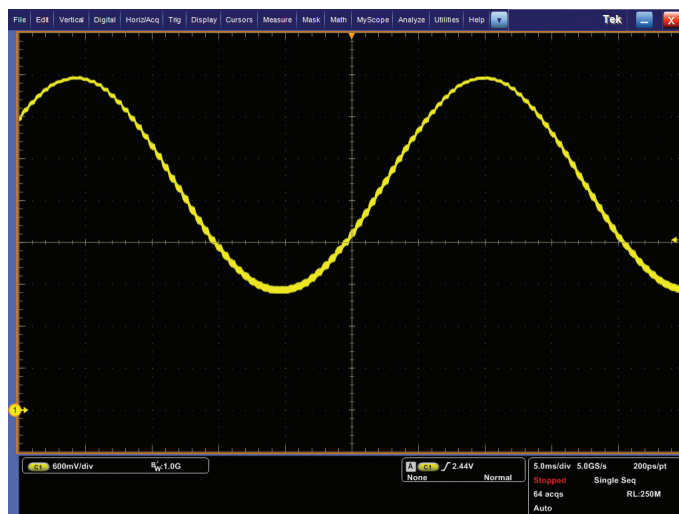


Рис. 14. Режим усреднения с 64 осциллограммами эффективно ослабляет случайный шум и некоррелированный скачок сигнала

## Проверка выходных сигналов ЦАП

Первое применение – это проверка качества управляющих сигналов на выходе цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). Как показано на Рис. 13, на синусоидальную волну низкочастотного сигнала накладывается высокочастотный случайный шум, а также ступенчатый сигнал. Особенно хорошо это видно на дисплее реального времени, но частота ступенчатого сигнала не совпадает с частотой синусоидального сигнала.

В силу того что ЦАП не оснащен низкочастотным восстанавливающим фильтром на выходе, предполагается, что сигнал продемонстрирует дискретные скачки напряжения. Тем не менее данные скачки перекрываются шумом, наложенным на сигнал.

Рис. 14 отображает результаты усреднения с 64 осциллограммами, достаточно длительного процесса с продолжительной регистрацией. Как и предполагалось, случайный шум значительно ослаблен и дискретные скачки напряжения ЦАП становятся видимыми. И, вследствие чрезвычайно высокой частоты выборки, ширина полосы пропускания измерительной системы остается прежней. Но, вследствие того что ступенчатый сигнал не скоррелирован с сигналом запуска, режим усреднения также удаляет ступенчатый сигнал с экрана результатов усреднения.

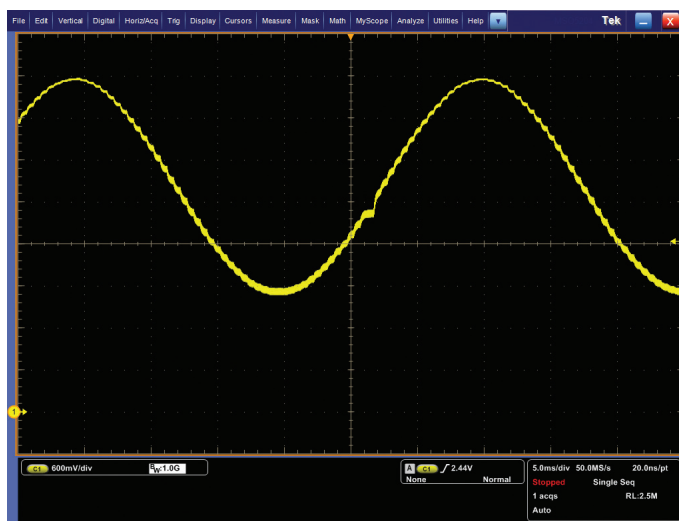


Рис. 15. Режим однократного запуска HiRes также эффективно ослабляет случайный шум, но сохраняет скачок сигнала.

Рис. 15 отображает аналогичные результаты ослабления шума в режиме однократного запуска HiRes. Тем не менее, в силу того что это метод однократной обработки, низкочастотный ступенчатый сигнал сохраняется. И, при использовании режима HiRes, разрешение по вертикали также повышается приблизительно на 12 бит, и ширина полосы пропускания измерительной системы уменьшается приблизительно на 22 МГц.

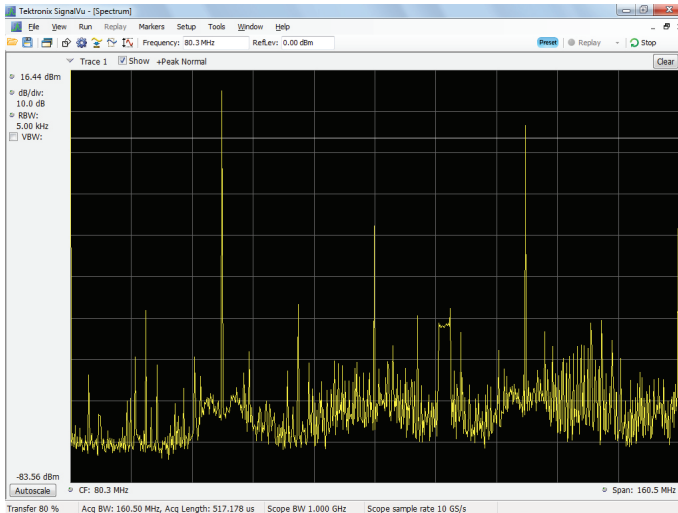


Рис. 16. Спектр тактовых импульсов 40 МГц в режиме выборки, где случайный флукуационный шум и другие сигналы ухудшают отображение формы сигнала

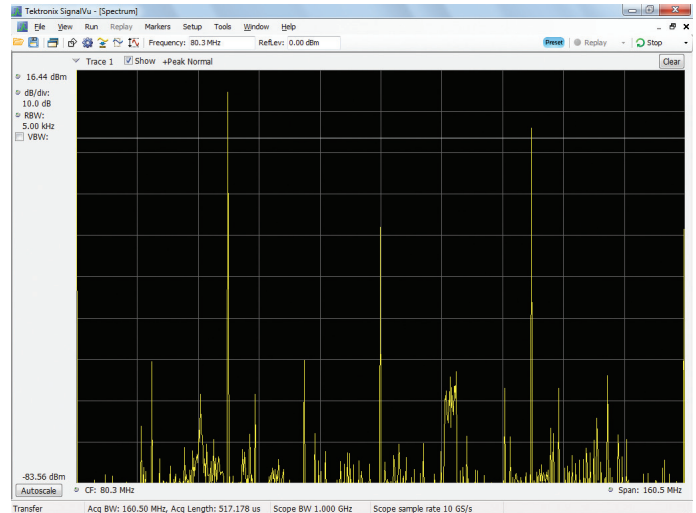


Рис. 17. Спектр тактовых импульсов 40 МГц в режиме усреднения с 64 осциллограммами, максимально четко отображающий гармоники

## Измерение спектра тактовых импульсов 40 МГц

Вторая область применения – это спектральный анализ тактовых импульсов 40 МГц. Цифровые сигналы передают большую часть информации скорее за счет размещения фронтов сигнала во времени (измерения производятся в точках пересечения с пороговыми значениями), чем за счет изменения амплитуды сигнала. Усреднение осциллограмм является очень эффективным методом при удалении случайного шума из непрерывных сигналов.

Спектральный анализ, вследствие доступности в логарифмическом вертикальном масштабе, обеспечивает высокоточное измерение ослабления шума, вызванного усреднением. Необходимо отметить, что вертикальные масштабы на Рис. 16 и 17 составляют 10 дБ/дел.

На Рис. 17 можно увидеть, что амплитуды основных и нечетных гармоник остаются постоянными, но усреднение понижает уровень флукуационного шума на 10–20 дБ, а также уровень множества других компонентов, упрощая тем самым идентификацию гармоник тактовых импульсов и других сигналов помех.

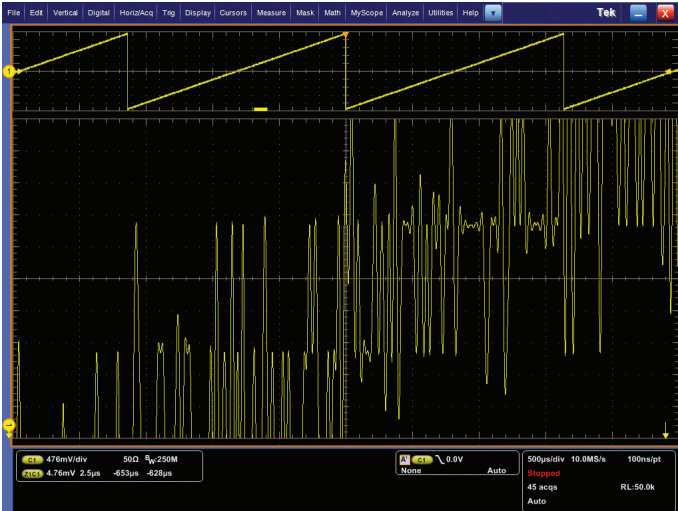


Рис. 18. Увеличенное отображение цифрового линейного сигнала высокого разрешения, отображающего оцифрованный шум вследствие ограниченного разрешения 8-битного АЦП



Рис. 19. Увеличенное отображение того же цифрового линейного сигнала высокого разрешения, измеренного на основе большого количества усреднений, отображающего значительно повышенное разрешение по вертикали

## Проверка разрешения ЦАП

Третьим примером является метод, иллюстрирующий фактическое повышение разрешения по вертикали посредством использования ЦАП, или, в данном случае, генератора сигналов произвольной формы с высоким разрешением AWG7000. Рис. 18 приводит увеличенное отображение формы линейного сигнала с разрешением по вертикали 10 бит. Несмотря на то что в нижней части экрана можно видеть дискретные 8-битные скачки, на сигнал накладывается шум достаточного уровня, чтобы вызвать случайные цифровые ошибки  $\pm 1$  бит. При разрешении в 8 бит данные ошибки являются гораздо более значительными, чем 10-битные скачки на линейном сигнале.

Рис. 19 отображает резкое повышение разрешения, которое обеспечивает усреднение осциллограмм. В данном случае отдельные 10-битные скачки явно вызваны оцифрованным шумом, что демонстрирует способность 8-битного АЦП обеспечивать не менее 10 бит разрешения по вертикали посредством обработки сигнала, как, например, при усреднении осциллограмм.

## Выводы

Настоящее техническое резюме приводит описание некоторых основных методов измерения и обработки сигналов, используемых для захвата форм сигналов высокого разрешения в цифровых осциллографах Tektronix, а также перечисляет преимущества, демонстрируя несколько простых примеров. Знание преимуществ и альтернатив данной технологии облегчит пользователю выбор и позволит успешно применять осциллографы и пробники Tektronix для выполнения оптимальных измерений высокого разрешения.

Контактные телефоны компании Tektronix:  
Ассоциация государств Юго-Восточной Азии / Австралия (65) 6356 3900  
Австрия\* 00800 2255 4835  
Балканы, Израиль, Южная Африка и другие страны ISE +41 52 675 3777  
Бельгия\* 00800 2255 4835  
Бразилия +55 (11) 3759 7627  
Канада 1 (800) 833-9200  
Центральная Восточная Европа и Прибалтика +41 52 675 3777  
Центральная Европа и Греция +41 52 675 3777  
Дания +45 80 88 1401  
Финляндия +41 52 675 3777  
Франция\* 00800 2255 4835  
Германия\* 00800 2255 4835  
Гонконг 400-820-5835  
Индия 000-800-650-1835  
Италия\* 00800 2255 4835  
Япония 81 (3) 6714-3010  
Люксембург +41 52 675 3777  
Мексика, Центральная/Южная Америка и страны Карибского региона 52 (55) 56 04 50 90  
Средний Восток, Азия и Северная Африка +41 52 675 3777  
Нидерланды\* 00800 2255 4835  
Норвегия 800 16098  
Китайская Народная Республика 400-820-5835  
Польша +41 52 675 3777  
Португалия 80 08 12370  
Республика Корея 001-800-8255-2835  
Россия и СНГ +7 (495) 7484900  
Южная Африка +27 11 206 8360  
Испания\* 00800 2255 4835  
Швеция\* 00800 2255 4835  
Швейцария\* 00800 2255 4835  
Тайвань 886 (2) 2722-9622  
Великобритания и Ирландия\* 00800 2255 4835  
США 1 (800) 833-9200

\* Если европейский номер телефона недоступен,  
позвоните по номеру +41 52 675 3777

Список контактов обновлен 10 февраля 2011 г.

#### Дополнительная информация:

Компания Tektronix может предложить вам богатую, постоянно пополняемую библиотеку указаний по применению, технических описаний и других документов, адресованных инженерам, разрабатывающим высокотехнологичное оборудование. Посетите сайт [www.tektronix.com](http://www.tektronix.com)



Авторское право © 2012, Tektronix. Все права защищены. Продукты Tektronix защищены патентами США и иностранными патентами, как действующими, так и находящимися на рассмотрении. Информация, приведенная в этой публикации, заменяет информацию, приведенную во всех ранее опубликованных материалах. Компания оставляет за собой право изменения цены и технических характеристик. TEKTRONIX и TEK являются зарегистрированными товарными знаками компании Tektronix, Inc. Все другие упомянутые торговые наименования являются знаками обслуживания, товарными знаками или зарегистрированными товарными знаками соответствующих компаний.

01/12 EA/FCA-POD

48W-27802-0

**Tektronix**<sup>®</sup>

