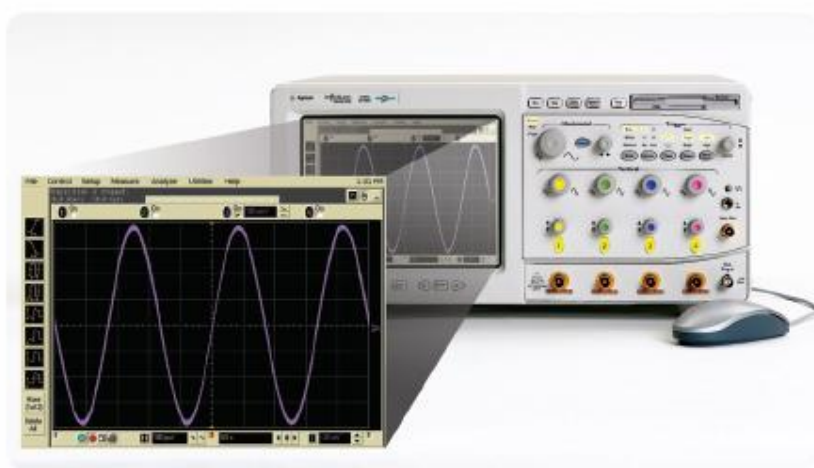


**Об искажениях в СВЧ осциллографах.  
Сравнение высокоскоростных осциллографов от  
Agilent и Tektronix.**



Статья по применению №1493.

**Перевод с английского Бельчиков С.А. к.т.н.  
ЗАО ПФ «ЭЛВИРА»**



**Введение.**

При обработке высокоскоростных сигналов осциллографы, работающие в реальном времени, могут вносить в форму сигнала искажения. Искажения обычно имеют место, когда осциллограф работает в полосе частот, близкой к максимальной заявленной полосе пропускания. Потенциальными источниками ошибки обычно являются: нелинейность входного усилителя, порог шумов прибора, рассогласование чередуемых АЦП, а также нелинейность АЦП. Эта статья показывает, как можно охарактеризовать искажения, используя различные измерительные операции. Кроме того, данная статья документирует результаты измерения искажений двух осциллографов-конкурентов с частотой дискретизации 20ГГц – Agilent 54855A и Tektronix TDS6604.

## **Критерии оценки искажений.**

Первая сложность в оценке искажений, вносимых высокоскоростным осциллографом, это – правильный выбор сигнала для испытаний. Хотя осциллографы с полосой 6ГГц призваны работать, в первую очередь, с высокоскоростными цифровыми сигналами, цифровые сигналы как раз не являются самым лучшим вариантом для проведения тестов по оценке вносимых искажений. Форма импульсов, формируемых даже самыми лучшими современными импульсными генераторами, часто непредсказуема. Кроме того, частотный спектр цифрового сигнала часто очень сложен. Поэтому для оценки искажений лучше использовать обыкновенный синусоидальный сигнал, генерируемый хорошим СВЧ синтезатором. Синусоидальный сигнал имеет предсказуемую форму и теоретически известные временные характеристики – известные времена нарастания и спада фронтов. Частотный спектр чистого синусоидального сигнала также прост и понятен: он представляет собой несущую частоту и гармоники, подавленные на 40-50дБ. Таким образом, использование синусоидального сигнала упрощает поиск и оценку искажений во временной области.

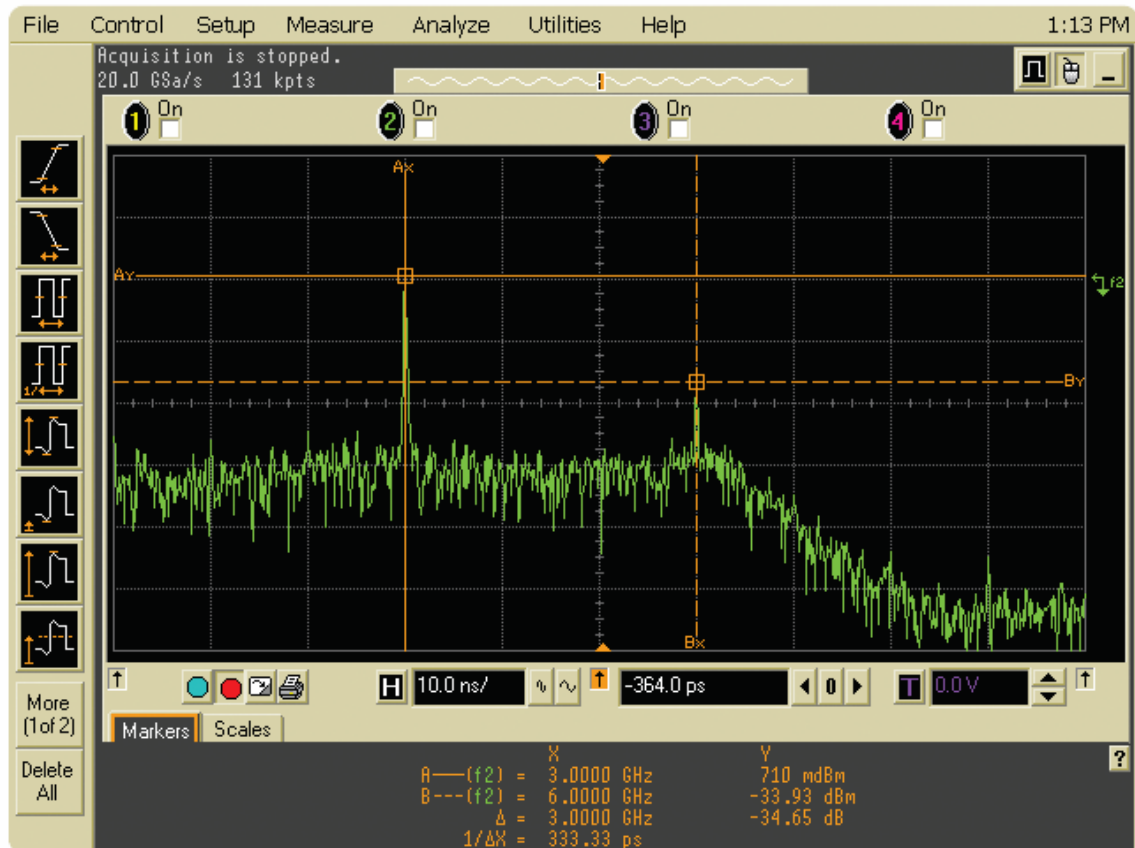
Кроме типа сигнала, мы также должны выбрать его частоту и амплитуду. При наличии большого количества времени и энтузиазма можно исследовать очень большое количество сигналов с разными амплитудно-частотными параметрами при самых разнообразных настройках осциллографа. Однако в анализе, который приводится в данной статье, мы решили исследовать синусоидальный сигнал с частотой 3ГГц, поданный на третий канал. Мы выбрали третий канал, поскольку он отличался наиболее высоким уровнем искажений на обоих осциллографах. Частота 3ГГц была также выбрана не случайно. Она достаточно высока, чтобы входные каскады осциллографа работали в напряженном режиме и, с другой стороны, она достаточно низкая, чтобы обнаружить потенциальные искажения по второй гармонике, вносимые нелинейностью входного усилителя. Мы выбрали амплитуды в диапазоне от 0,8В (разность пиков) до 1,6В (разность пиков), потому что это - приблизительный диапазон дифференциальных сигналов с низким напряжением, исследование которых является одним из ключевых видов применения данного класса осциллографов. Кроме того, данные амплитуды сигналов позволят нам заставить осциллографы работать на пределе динамических возможностей, ведь при масштабах 100мВ/деление и 200мВ/деление мы получим вертикальную развертку на весь экран.

Для оценки искажений осциллографов Agilent и Tektronix, мы решили провести следующие четыре испытания как в частотной, так и во временной области:

1. Анализ с применением БПФ с подсчетом общей величины вносимых искажений.
2. Измерение фронтов.
3. Измерение межпиковых амплитудных значений.
4. Тест по визуальной оценке искажений.

## **Анализ с применением БПФ.**

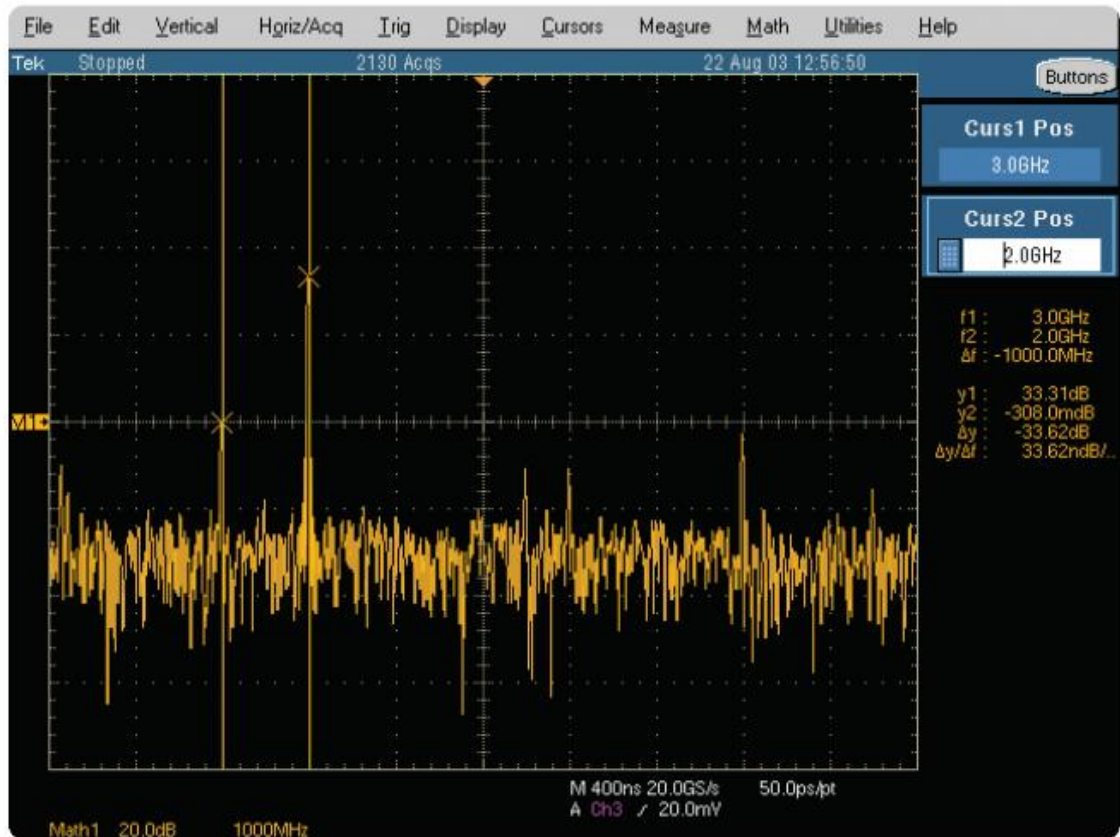
Для того чтобы удостовериться, что наш входной сигнал с частотой 3ГГц представляет собой чистую синусоиду, мы сначала подали сигнал с генератора на анализатор спектра. Анализатор спектра показал несущую точно на частоте 3ГГц с очень низким порогом шумов и уровнем гармоник ниже -50дБн. После выполнения всех необходимых процедур калибровки с передней панели осциллографов, мы запустили процесс сбора сигнала на третьем канале на обоих приборах при максимальной частоте дискретизации в 20ГГц и с памятью, необходимой алгоритму БПФ для полного выявления всех искажений в частотной области, включая порог собственных шумов.



**Рисунок 1. Анализ с применением БПФ на осциллографе Agilent 54855A**

Рисунки 1 и 2 показывают результаты анализа с применением БПФ на Agilent 54855A Tektronix и TDS6604 соответственно. В режиме БПФ в качестве центральной частоты была выбрана частота 5 ГГц при полосе обзора 10 ГГц (1 ГГц на деление). Глядя на полученное изображение на Agilent 54855, мы четко видим несущую на частоте 3 ГГц плюс искажение по второй гармоник на частоте 6 ГГц с уровнем примерно -35 дБн. Усреднение позволило также выявить два паразитных отклика с уровнем -53 дБн, лежащие на удалении 500 МГц с обеих сторон от несущей. Эти искажения являются продуктами субгармонических искажений в доли пикосекунды в блоке АЦП. Меняя частоту, мы заметим, что данные отклики также перемещаются с несущей, сохраняя свою отстройку. Следует, правда, сказать, что данные компоненты не являются значительными и фактически погребены под шумами прибора.

Единственное значительное искажение – это отклик по второй гармонике, который попадает в полосу пропускания осциллографа. Этот отклик порожден нелинейностью во входном усилителе. Моделирование показывает, что чем этот отклик выше по амплитуде, то тем больше во временной области нарушается симметрия фронтов (времени нарастания и спада).



**Рисунок 2. Анализ с применением БПФ на осциллографе Tektronix TDS6604**

Рисунок 2 показывает уровень искажений на осциллографе Tektronix. Хотя уровень искажений по второй гармонике очень низок (-46дБн), TDS6604 генерирует два больших паразитных отклика в -34дБн на частотах 2ГГц и 8ГГц и имеет значительно более высокий порог собственных шумов. Отклик на частоте 8ГГц ровно на 5ГГц выше частоты несущей, а отклик 2ГГц на 5ГГц ниже несущей и возвращен в положительную частотную область (по абсолютному значению  $2\text{ГГц} = [3\text{ГГц} - 5\text{ГГц}]$ ). Меняя частоту входного сигнала, мы наблюдаем, что эти паразитные «спуры» всегда появляются на частоте  $\pm 5\text{ГГц}$  от несущей. Самые большие искажения мы имеем, когда несущая установлена в районе 3ГГц.

Причиной этих искажений служит рассогласование между чередуемыми АЦП осциллографа Tektronix TDS6604. В TDS6604 четыре АЦП с частотой дискретизации 5ГГц объединяются, чтобы достичь частоту выборки в 20ГГц одновременно на двух каналах. Осциллографы Agilent используют монолитный АЦП с частотой дискретизации 20ГГц на одном чипе для каждого канала, что обуславливает более тесную интеграцию чередуемых АЦП и уменьшает рассогласование.

При входном сигнале на частоте 3ГГц найденные искажения осциллографа Tektronix должны в частотной области проявиться как паразитная девиация (низкочастотное биение). Это означает, что как временные, так и амплитудные измерения могут отличаться значительным разбросом результатов от измерения к измерению в реальном времени. Кроме того, более высокий порог шумов осциллографа Tektronix (приблизительно на 30% выше, чем у Agilent) также будет способствовать разбросу результатов во времени.

Далее мы подсчитали общий уровень искажений, вызванный всеми паразитными элементами, на Agilent 54855A и Tektronix TDS6604. Проинтегрировав все паразитные

отклики (несущая, разумеется, не учитывается) мы легко можем найти процентное соотношение искажений при захвате синусоиды 3ГГц. Чтобы избавиться от эффекта собственных шумов, мы исключили все паразитные отклики, лежащие ниже уровня -45дБн, которые, на самом деле, несущественны. Таблица 1 показывает результаты измерений и подсчет уровня искажений при двух значениях уровня входного сигнала и двух установках вертикальной шкалы приборов, которые типичны для дифференциальных сигналов с малым напряжением.

**Таблица 1.**

Осциллограф	Уровень сигнала на входе	Чувствительность по вертикали прибора	Процент искажений
Agilent 54855A	2,5дБм (300мВ СКЗ)	100мВ/деление	1,98%
Agilent 54855A	8,0дБм (560мВ СКЗ)	200мВ/деление	2,05%
Tektronix TDS6604	2,5дБм (300мВ СКЗ)	100мВ/деление	2,47%
Tektronix TDS6604	8,0дБм (560мВ СКЗ)	200мВ/деление	2,47%

При входном сигнале на частоте 3ГГц осциллограф Tektronix генерирует примерно на 25% больше искажений, чем Agilent. Уровень входного сигнала и чувствительность не имеют серьезного эффекта. Однако, варьируя частоту входного сигнала, мы нашли несколько явных зон оптимального отображения сигнала как у Agilent, так и у Tektronix. Причем в некоторых случаях, общий уровень искажений на TDS6604 может быть меньше, чем у 54855A при специфических настройках. С другой стороны тщательное тестирование при ряде установок частоты показало, что уровень искажений у Agilent в худшем (на частоте 2,037ГГц) был все же ниже, чем уровень искажений у Tektronix в худшем случае (на частоте 3,082ГГц).

Давайте теперь обратим внимание на измерения во временной области и посмотрим, как частотные искажения проявляются при временных и амплитудных измерениях, что и составляет основную сферу применения осциллографа.

### **Измерение фронтов.**

Имея на входе чистый синусоидальный сигнал, теоретические временные параметры легко предсказуемы. Синусоида с частотой 3ГГц будет иметь скорость нарастания и спада фронтов ровно в 98,4псек по уровням 10%-90%. На рисунке 3 показан результат 100 измерений в реальном времени, выполненных на Agilent 54855A.

Как мы и предсказывали, искажения по второй гармонике в -35дБн во временной области нашли отражение в асимметричных скоростях нарастания и спада фронтов. После 100 измерений среднее время нарастания фронта оказалась на 3,9псек быстрее теоретических 98,4псек, а время спада – на 3,0псек медленнее. Однако отметим, что для исследований однократных сигналов в реальном времени, для чего обычно и покупаются высокоскоростные осциллографы, правильное измерение среднего значения, являющееся результатом многих разверток, имеет меньшее значение. Основной заботой инженера должен быть разброс результатов от измерения к измерению.

В нашей серии измерений, состоящей из 100 запусков, мы находим при помощи статистики с экрана осциллографа, что измерение времени нарастания в худшем случае имело ошибку в -7,1псек, а измерение времени спада фронта в худшем случае – ошибку в +7,2псек относительно теоретического значения в 98,4псек для синусоиды 3ГГц. Если проводить дальнейшие измерения (более 100) на обоих осциллографах величина ошибки в худшем случае будет возрастать, но вот стандартная девиация в 1.5псек для нарастающего фронта и 1,3псек для падающего фронта на осциллографе Agilent будет стабильной. Давайте теперь сравним результаты, полученные во время измерений на Tektronix TDS6604.

**Рисунок 3. Измерение фронтов на осциллографе Agilent 54855A.**

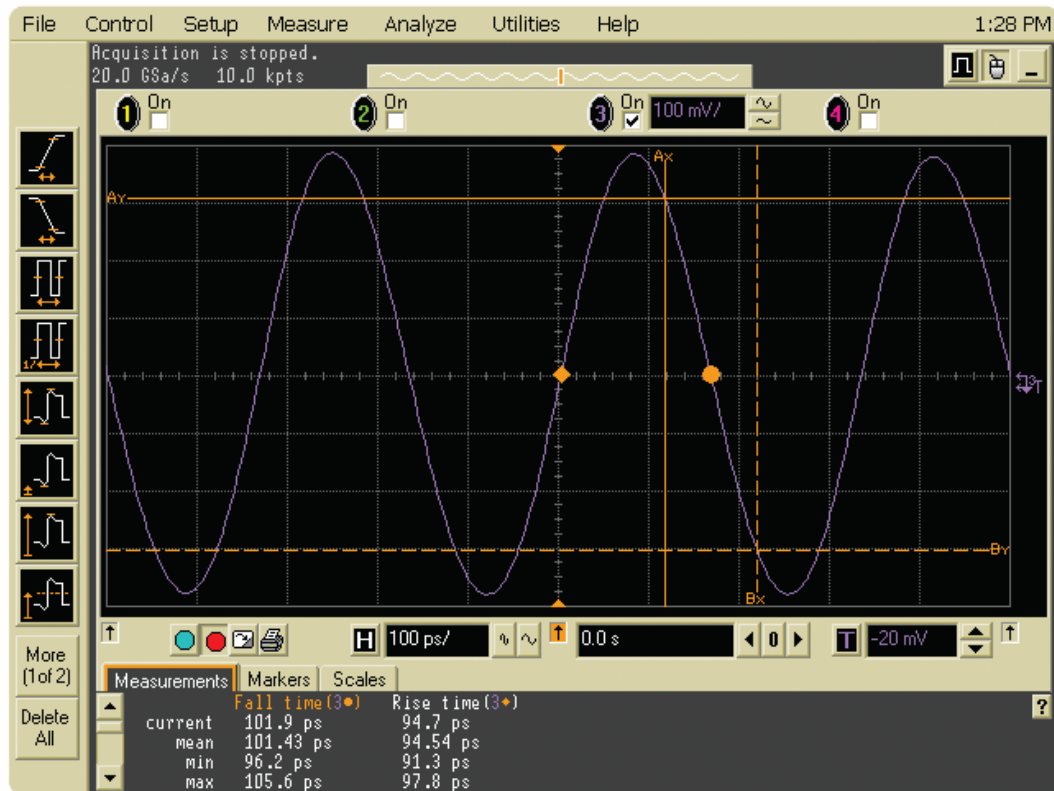
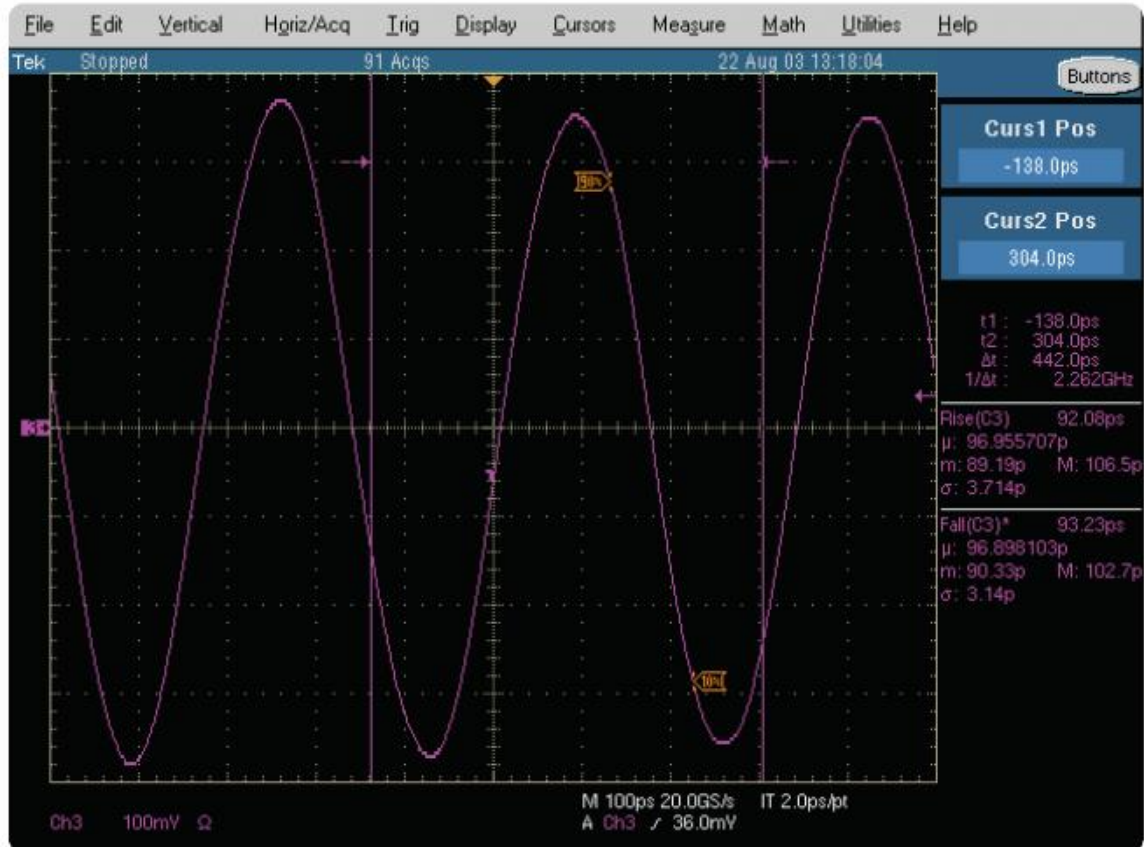


Рисунок 4. Измерение фронтов на осциллографе Tektronix TDS6604



Как показывает рисунок 4, осциллограф Tektronix продемонстрировал более точное, по сравнению с Agilent, измерение среднего значения скорости фронтов, но в то же время – значительно худший разброс результатов. Измеренное среднее время как для нарастающего, так и для падающего фронта имело погрешность приблизительно в -1,4псек при 100 последовательных измерениях. Однако, как мы уже отмечали ранее, для высокоскоростного осциллографа в реальном времени главной заботой является повторяемость результатов, а не измерения с усреднением. Как мы и предполагали во время анализа в частотной области, паразитный отклик на частоте 2ГГц вместе с более высоким порогом собственных шумов вносит в измерения большую изменчивость во времени. Измерение времени нарастания имело в худшем случае ошибку в -9,2псек, а измерение времени спада – ошибку в -8,1псек. При этом стандартная девиация была свыше 3псек для измерения обоих фронтов, что почти в два раза больше, чем у Agilent 54855A.

Какой же из осциллографов показал лучшие результаты измерения фронтов? Если вы проводите в основном исследования периодических процессов с усреднением, тогда лучше выглядел Tektronix. Однако, если вы используете осциллограф для измерения однократных сигналов, то тогда Agilent произвел более достоверные измерения с лучшей повторяемостью результатов и значительно меньшей стандартной девиацией. Давайте теперь перейдем к амплитудным измерениям.

#### **Измерение межпикового напряжения.**

В качестве следующего теста на искажения во временной области мы провели измерение межпикового значения амплитуды входного сигнала и исследовали разброс результатов измерений во времени. На рисунке 5 показан разброс результатов измерения амплитуды на Agilent 54855A после 100 последовательных измерений. Амплитуда входного сигнала составляла 700мВ (разность пиков). Осциллограф Agilent показал разброс результатов в 16мВ (межпиковое значение) при стандартной девиации в 3,2мВ (межпиковое значение). Сравним приведенные данные с результатами Tektronix TDS6604.

На рисунке 6 видно, что TDS6604 показал разброс результатов в 63мВ (межпиковое значение) при стандартной девиации в 13,8мВ (межпиковое значение). Разброс Tektronix в 4 раза выше по сравнению с Agilent. Повторим, что разброс результатов у TDS6604 связан, в первую очередь, с биением на частоте 2ГГц, в свою очередь, вызванным рассогласованием чередуемых АЦП. Кроме того, разбросу результатов способствует более высокий порог собственных шумов осциллографа (на 30% выше, чем у Agilent). На самом деле разброс измерений на экране TDS6604 можно заметить визуально. Если приглядеться к рисунку 6, то мы увидим небольшие вариации в амплитуде сигнала, если сравним несколько соседних периодов синуса 3ГГц.

#### **Рисунок 5. Измерение межпикового напряжения на осциллографе Agilent 54855A**

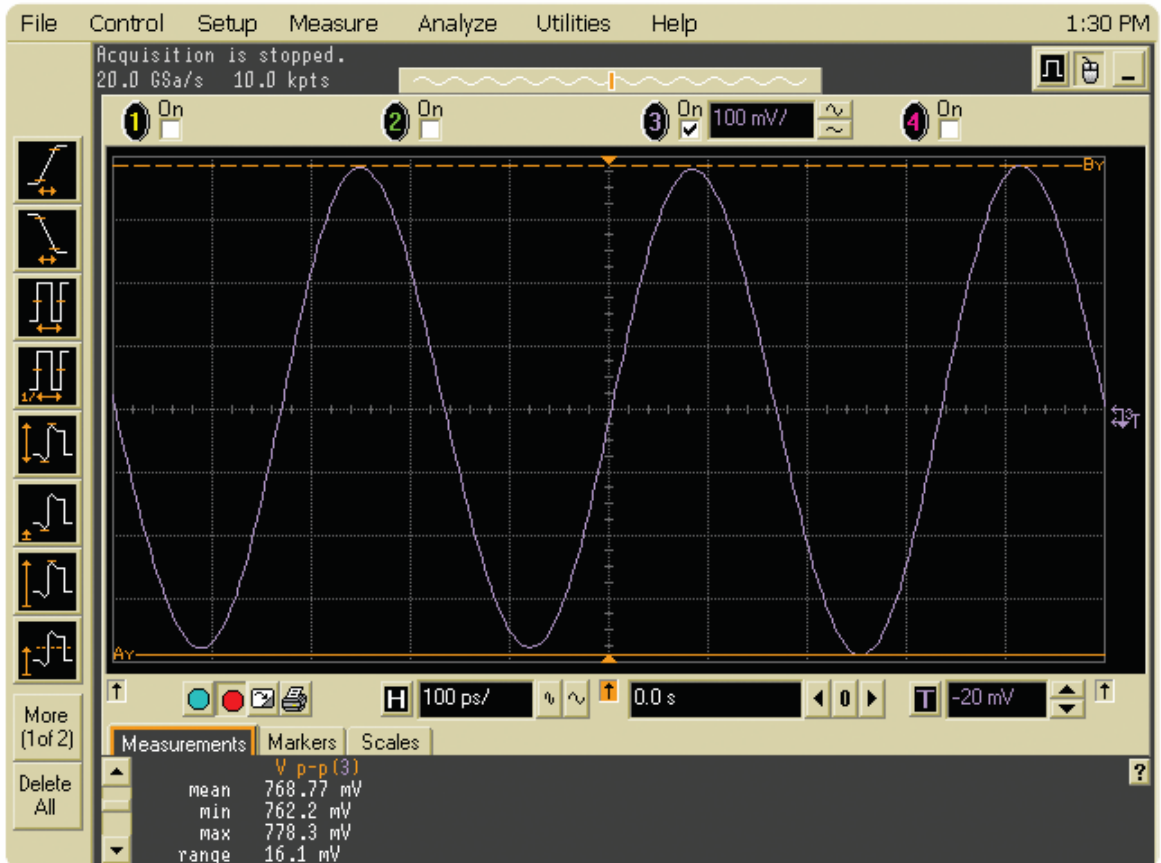
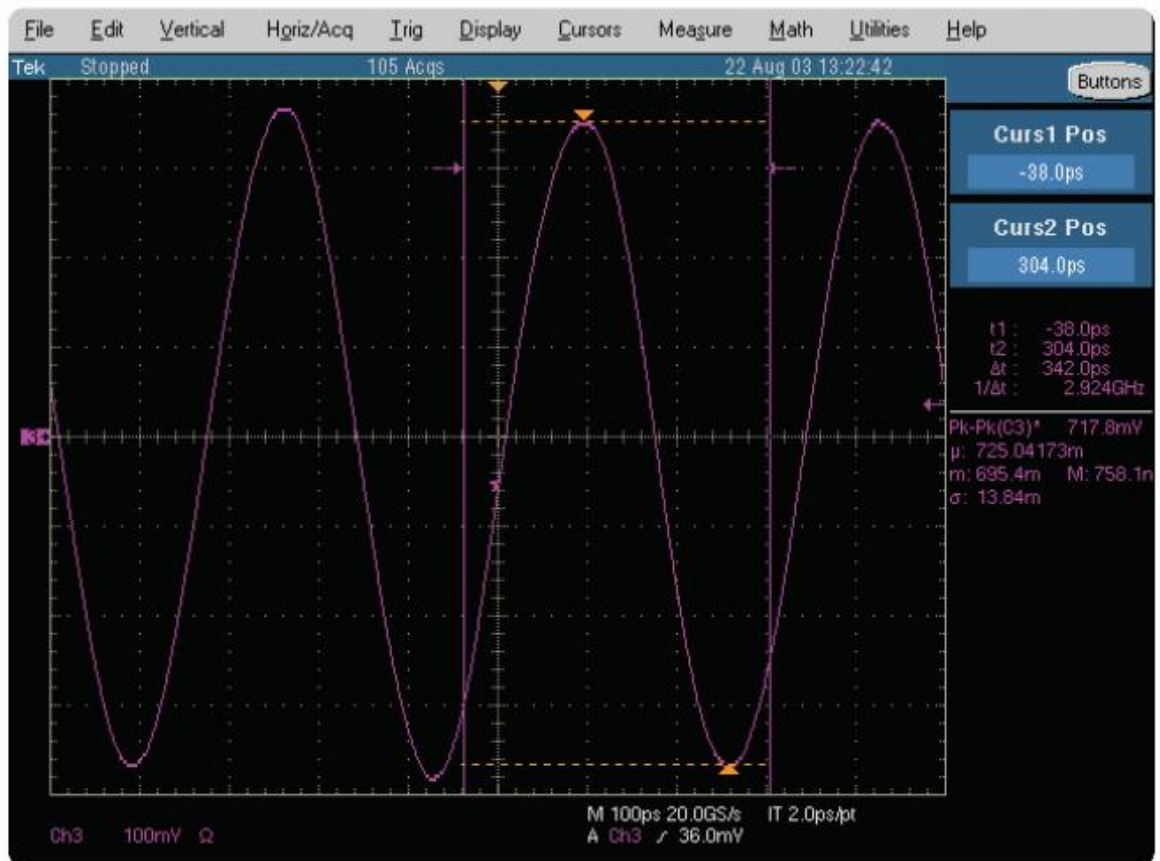


Рисунок 6. Измерение межпикового напряжения на осциллографе Tektronix TDS6604





## Визуальная оценка искажений в режиме послесвечения

В нашем последнем тесте мы хотели обратить ваше внимание на возможность визуальной оценки разброса результатов измерений полученных осциллограмм, что часто помогает интуитивно понять, вносит ли наш осциллограф значительные искажения или нет. К сожалению, показать разброс результатов на дисплее, который обновляется в реальном времени, в статье невозможно.

Рисунок 7 показывает худший случай вариаций изображения, который можно увидеть, если включить режим аналогового послесвечения. Режим аналогового послесвечения накапливает отсчеты, взятые во время большого количества последовательных разверток, и показывает тем самым изменчивость результатов во времени. В этом конкретном тесте мы накопили результаты 100 последовательных разверток. Как можно заметить, в сигнале, захваченном и отображенном осциллографом Agilent 54855A в режиме аналогового послесвечения, присутствуют лишь незначительные временные и амплитудные вариации. Хотя визуально различить разброс в скорости фронтов здесь очень сложно, мы, тем не менее, можем заметить вариации в межпиковых амплитудах. Временные же вариации от периода к периоду очень стабильны. Это объясняется очень низким уровнем джиттера в системе синхронизации осциллографа Agilent, который составляет менее 1псек (СКЗ). Обратите внимание, что точка синхронизации для обоих осциллографов находится в центре экрана.

**Рисунок 7. Визуальная оценка искажений в режиме послесвечения на осциллографе Agilent 54855A**

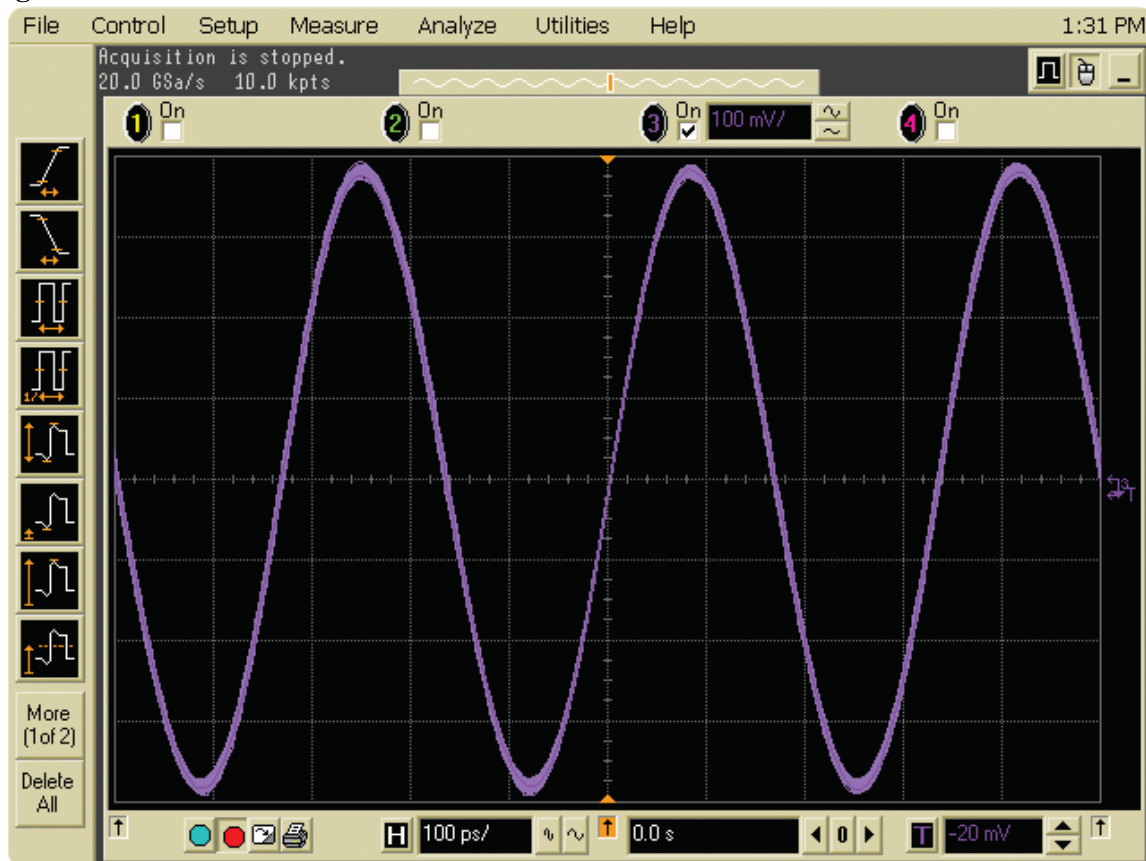
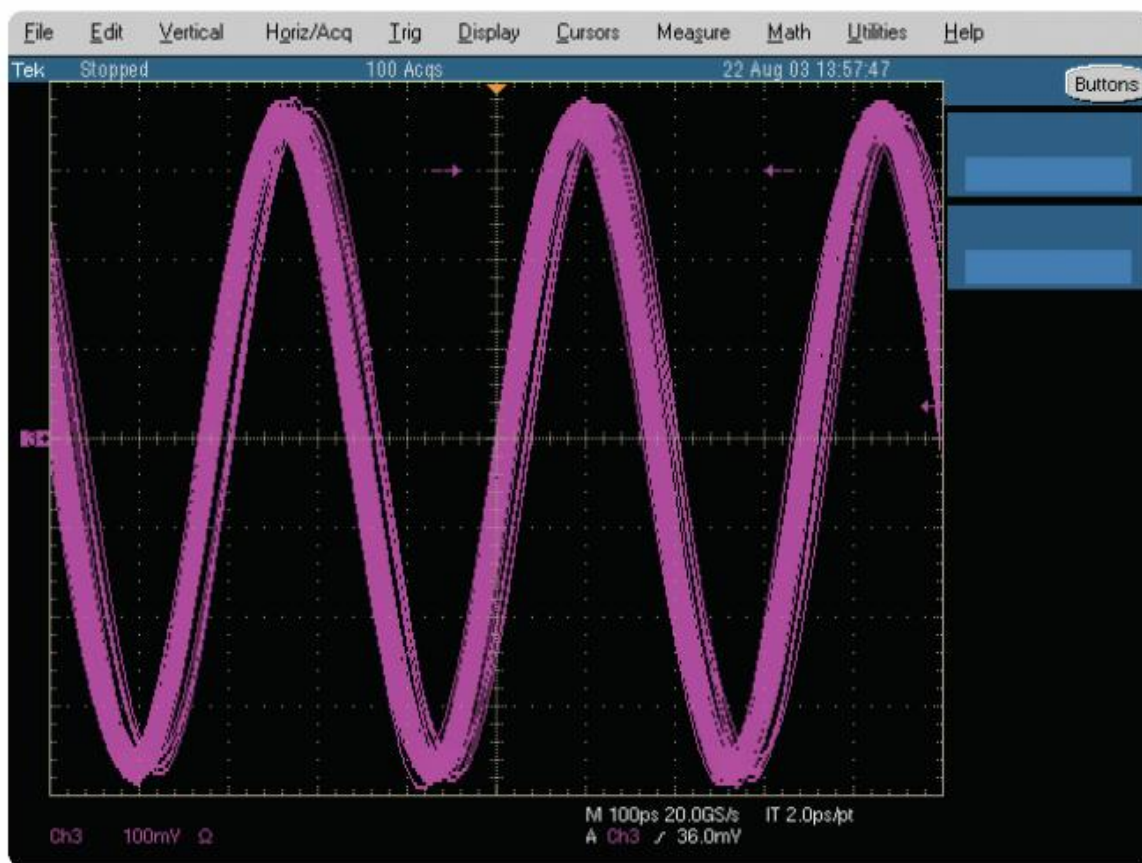


Рисунок 8 показывает те же самые 100 последовательных разверток в режиме аналогового послесвечения на осциллографе Tektronix TDS6604. Полученные на экране осциллограммы «дергаются» как по вертикали, так и по горизонтали, свидетельством чего являются размытые линии на дисплее.

Разброс результатов по временной оси обусловлен, в первую очередь, более высоким уровнем джиттера в системе синхронизации Tektronix TDS6604, который номинируется на уровне 7псек (СКЗ). Эта величина легко трансформируется в более чем 40псек временного джиттера, показанного на рисунке 8. При исследовании формы высокоскоростных сигналов при больших скоростях развертки (например, 100псек/деление) у вас есть выбор между очень стабильным отображением сигнала, которое обеспечивает осциллограф Agilent 54855A, и изображением, которое выдает Tektronix TDS6604, которое размыто по вертикали и горизонтали из-за более высокого уровня искажений и джиттера в системе синхронизации.

**Рисунок 8. Визуальная оценка искажений в режиме послесвечения на осциллографе Tektronix TDS6604**



### **Заключение.**

Испытания для оценки уровня искажений, описываемые в данной статье, не были подтасованы таким образом, чтобы показать лучшие результаты для Agilent и худшие для Tektronix. Как отмечалось в данной статье, синусоидальный сигнал 3ГГц, используемый в качестве тестового, имел частоту достаточно высокую, чтобы входные каскады осциллографов работали в напряженном режиме, и одновременно достаточно низкую, чтобы обнаружить искажения по второй гармонике (что мы и увидели в примере с Agilent). С другой стороны, частоты в районе 3ГГц – это, как правило, основные спектральные составляющие в большинстве высокоскоростных цифровых сигналов, для анализа которых и используются современные осциллографы в реальном времени. Синусоида была выбрана как сигнал, наиболее предсказуемый с точки зрения спектрального наполнения, формы волны и временных параметров. И наконец,

амплитуды сигналов, использовавшихся в испытаниях, были подобраны таким образом, чтобы имитировать высокоскоростные дифференциальные сигналы с малым напряжением. В то же время масштаб был выбран таким образом, чтобы получить вертикальное отображение на весь экран и заставить осциллографы работать на пределе своих динамических возможностей.

Искажения на осциллографах Agilent и Tektronix обусловлены разными причинами. Искажения Agilent вызваны, в первую очередь, гармоническими искажениями во входном усилителе, что представляет собой детерминированный систематический источник ошибки. Этот тип ошибки имеет следствием менее точные результаты усредненных временных измерений. Искажения у Tektronix вызваны причинами стохастического характера: рассогласованием в системе АЦП и повышенным уровнем шумов системы. Этот тип ошибки имеет следствием гораздо более высокую стандартную девиацию измерений, как времени, так и амплитуды. Для высокоскоростных цифровых сигналов подобная девиация трансформируется в более высокий уровень джиттера системы, на что нельзя не обратить внимание, поскольку измерения джиттера являются ключевым видом использования обоих осциллографов.

В процессе испытаний было проверено только 2 осциллографа. Осциллограф Agilent представляет все осциллографы, выпущенные позднее 1 Августа 2003 года. Осциллограф Tektronix был приобретен у американской лизинговой компании. Возможно, при тестировании других приборов мы получили бы слегка иные результаты, однако мы полагаем, что характеристики этих приборов сходны и у всех остальных. Этого, однако, мы не можем утверждать, не протестировав большого количества осциллографов от обоих производителей. Но даже если результаты испытаний с дополнительным количеством приборов отличались бы от полученных на 10-15%, по вносимым искажениям осциллографы Agilent все равно превзошли бы осциллографы Tektronix.