

Частотомер SR620. Измерения.

Для того, чтобы в полной мере реализовать потенциал универсального измерителя временных интервалов и частоты SR620, целесообразно сделать краткий обзор его режимов работы и применения. Для пользователя важно понимать технические характеристики SR620, чтобы сделать обоснованные выводы из экспериментальных данных. Насколько точным является конкретное измерение? Какие ошибки можно ожидать? Это примечание по применению подробно описывает технические характеристики и терминологию для каждого режима работы. Эта информация позволит пользователю в полной мере понять возможности и ограничения прибора.

В первом разделе данного примечания по применению описываются типы измерений, которые может выполнить SR620 и даются некоторые примеры применения. Это даст возможность оценить широкий спектр применений, в которых может использоваться универсальный измеритель временных интервалов и частот SR620.

Во втором разделе (Руководство по спецификации SR620) подробно рассматриваются технические характеристики SR620. Для каждого режима работы дается четкое определение точности измерений (разрешение и погрешность), а также пояснения технической терминологии.

Применения SR620

Универсальный измеритель временных интервалов и частот SR620 использовался для измерения всего, начиная от задержек распространения интегральных схем и заканчивая расстоянием до Луны. Универсальность и доступная цена мгновенно сделали SR620 успешным на инженерных и научных рынках. SR620 может быть использован для измерения временного интервала, частоты, периода, длительности импульса, фазы, времени нарастания и спада, а также для подсчета событий. Статистические расчеты, в том числе среднее, стандартное отклонение, дисперсия Аллана, минимальное и максимальное, выполняются на миллионе выборок во всех режимах работы. Помимо отображения статистических данных на 16-значном светодиодном дисплее, графики распределения данных в формате гистограммы и ленточных диаграмм могут отображаться на осциллографе в режиме X-Y. Ниже обсуждаются примеры использования SR620.

Измерения времени

SR620 измеряет временной интервал между двумя независимыми сигналами, А и В. Примером использования этого режима работы является измерение электрической длины кабеля. Кабель может быть сконфигурирован как сквозной или несимметричный, с удаленным концом, замкнутым на землю или открытым. Используя встроенный опорный сигнал 1 кГц в качестве стимула, можно измерить задержку распространения от одного конца кабеля к другому или между падающим и отраженным нарастающим фронтом импульса. Зная, что электричество движется со скоростью примерно один фут в 1,5 наносекунды, можно легко рассчитать длину кабеля.

Другим применением временного интервала является измерение задержек распространения интегральных схем. Опять же, опорный источник 1 кГц может быть использован в качестве сигнала возбуждения в эксперименте и может быть измерена временная задержка между входом

и выходом интегральной схемы.

Измерение ширины импульса

Данные магнитных и оптических дисков памяти хранятся с использованием различных схем модуляции для минимизации дискового пространства и максимального соотношения сигнал-шум. Например, компактные дисковые проигрыватели используют модуляцию 3-11 для получения очень высокой плотности записи диска. Эта схема создает шаблоны данных с девятью различными значениями ширины импульса (соответствующие 3, 4, 5, ... 11 последовательным нулям). SR620 может быть использован для измерения ширины этих импульсов и их вариаций, а также отображать их графически в виде гистограммы на осциллографе в режиме X-Y.

Измерение времени нарастания и спада

При анализе времени перехода, необходимого для изменения младшего значащего бита в ЦАП (цифро-аналоговый преобразователь), имеет значение величина времени перехода от 10% до 90%. После установления времени нарастания можно рассчитать малосигнальную частотную характеристику ЦАП (полоса пропускания=0,35/время нарастания). SR620 позволяет пользователю устанавливать пороги начального и конечного напряжения при измерениях времени нарастания и спада, чтобы можно было проанализировать любую часть перехода.

Измерение частоты и периода

При измерении качества источника опорной частоты часто имеет значение джиттер (стандартное отклонение или дисперсия Аллана). SR620 проанализирует источник в течение установленного времени стробирования, а затем отобразит кривую распределения данных, показывающую среднюю частоту, минимальную и максимальную частоты и джиттер, показывающий качество источника. Частота измеряется как $N/(\Delta t)$, а период-как $(\Delta t)/N$, где N-число циклов, а Δt -время, затраченное на завершение N циклов.

Измерение фазы

При характеристике операционных усилителей полезно знать соотношение фаз и частот. SR620 может измерять разность фаз между входом и выходом на разных частотах, так что можно построить график Боде.

Подсчет событий

Используемый совместно с дискриминатором, SR620 может функционировать как счетчик фотонов, который подсчитывает электрические импульсы от PMT (фотоумножительной трубки). Он может считать со скоростью до 200 МГц. В другом применении SR620 оказался экономически эффективным способом подсчета консервов, перемещающихся по конвейерной ленте, когда они проходят контрольный пункт.

Эти примеры представляют собой лишь некоторые из многих возможных применений SR620. Полное описание выполнения этих и других видов измерений приведено в руководстве по эксплуатации и техническому обслуживанию SR620.

Руководство по спецификации SR620

В этом разделе дается объяснение технических характеристик SR620 и их влияния на точность и разрешающую способность измерений.

Статистические функции

SR620 может отображать статистическую информацию об измерении N выборок. SR620 вычисляет и сообщает среднее, стандартное отклонение или дисперсию корня Аллана, минимальные и максимальные значения, наблюдаемые во время измерения. Уравнение для статистических функций задается формулой:

$$\text{среднее} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\text{стандартное отклонение} = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n(n-1)}}$$

$$\text{корень из дисперсии Аллана} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{i+1} - x_i)^2}{2(n-1)}}$$

Наименьшая значимая цифра (LSD)

LSD - это наименьшее отображаемое приращение измерения. SR620 имеет однократный LSD 4 пс, и, таким образом, наименьшее значение, на которое могут отличаться два однократных измерения интервала времени, составляет 4 пс.

Разрешение

Разрешение - это наименьшая разница в измерении, которую может различить SR620. То есть это наименьшее статистически значимое изменение, которое может быть измерено с помощью SR620. Разрешение представляет перво-степенный интерес при сравнении показаний одного и того же прибора. Разрешение прибора ограничено многими факторами, включая кратковременную стабильность временной базы, внутренний шум, триггерный шум и т. д. Поскольку эти процессы являются случайными по своей природе, разрешение задается как среднееквадратичное значение, а не пиковое значение. Это среднееквадратичное значение (скз) представляет собой стандартное отклонение измеренного значения. Разрешение однократного измерения SR620 составляет обычно 25 пс скз. Это число может быть улучшено путем усреднения по многим измерениям или, в случае измерений частоты и периода, увеличением времени строба. LSD при однократном измерении всегда меньше, чем разрешение при таком же однократном измерении.

Ошибка

Ошибка определяется как разница между измеренным значением и фактическим значением измеряемого сигнала. Ошибка в измерении имеет первостепенное значение, когда абсолютное значение

измеряемого параметра имеет важное значение. Погрешность состоит из случайных факторов, упомянутых выше, и систематических неопределенностей в измерении. Систематические неопределенности включают в себя старение временной базы, ошибку уровня триггера, задержку вставки и т. д. Систематические ошибки всегда могут быть измерены и вычтены из последующих измерений, чтобы уменьшить эту ошибку. Абсолютная погрешность SR620 обычно составляет менее 0,5 нс для измерений с временным интервалом менее 1 мс.

Дифференциальная нелинейность

Абсолютная погрешность представляет интерес при определении того, насколько далеко значение находится от фактического значения. Часто важна только относительная точность (разница между двумя измерениями). Дифференциальная нелинейность представляет собой измерение относительной точности измерения и определяется как максимальная временная ошибка для любого данного относительного измерения. Дифференциальная нелинейность SR620 обычно составляет ± 50 пс. Это означает, что если временной интервал будет изменен на какую-то величину, SR620 сообщит об этом корректном изменении в пределах ± 50 пс. Графики 1 и 2 показывают типичную дифференциальную нелинейность SR620 как функцию временного интервала. График 1 показывает нелинейность во временном диапазоне от 0 до 11 нс. Эти отклонения обусловлены остаточной нелинейностью преобразователей время-амплитуда, используемых для интерполяции доли одного такта 90 МГц. Эта кривая повторяется каждые 11,11 нс. График 2 показывает нелинейность во временном диапазоне от 0 до 11 мс. Для времен, превышающих 11 мс, нелинейность доминирует над ошибкой временной базы.

Дифференциальная нелинейность в зависимости от времени (t = 0 - 11 нс)

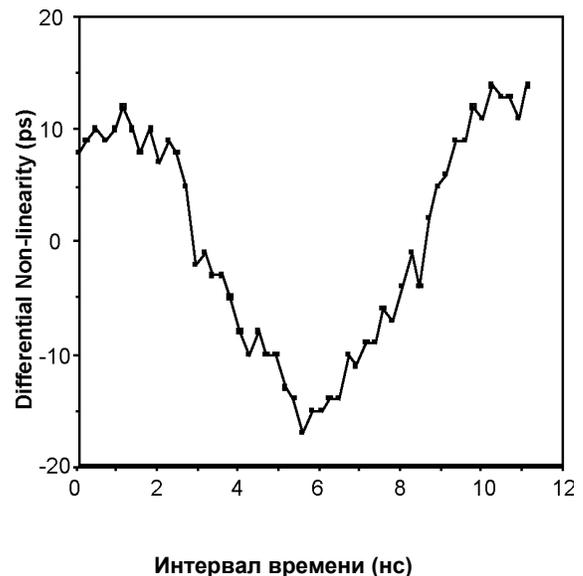


График 1: Дифференциальная нелинейность для временных разностей от 0 до 11 нс. График показывает остаточную нелинейность преобразователей времени в амплитуду.

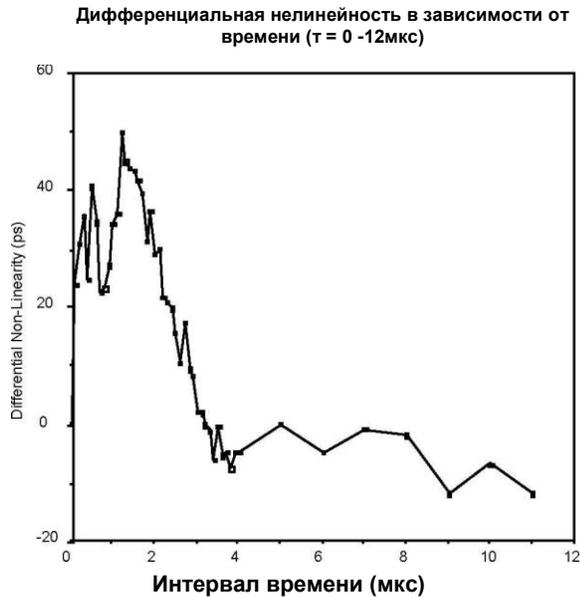


График 2: Дифференциальная нелинейность для временных разностей от 0 до 11 мкс

Технические характеристики временной базы

Технические характеристики временной базы влияют как на разрешение, так и на погрешность измерений, выполняемых с помощью SR620. Временная база может быть определена двумя параметрами: ее краткосрочной стабильностью и долгосрочной стабильностью.

Краткосрочная стабильность

Кратковременная стабильность осциллятора - это мера изменения выходной частоты осциллятора на коротком временном масштабе (секунды или меньше). Эти изменения частоты обычно носят случайный характер и обусловлены внутренним шумом генератора, модуляцией выходного уровня и т. д. Эти случайные изменения частоты влияют на разрешение измерения, как и другие внутренние шумы. Краткосрочная стабильность осциллятора обычно характеризуется определением либо его дисперсией Аллана, либо его фазового шума. Краткосрочная стабильность временной базы SR620 определяется его дисперсией Аллана. Типичные значения для нескольких интервалов строба:

| | стандартный генератор | термостатированный генератор |
|-----------------------|-----------------------|------------------------------|
| 1,0 с строб | $1,2 \times 10^{-10}$ | $2,3 \times 10^{-11}$ |
| 10 с строб | $1,2 \times 10^{-10}$ | $2,3 \times 10^{-11}$ |
| 100 с строб | $1,25 \times 10^{-9}$ | $4,2 \times 10^{-11}$ |
| предел специф. на 1 с | $2,0 \times 10^{-10}$ | $5,0 \times 10^{-11}$ |

Разрешение SR620 определяется как:

$$\text{разрешение (скз)} = [(25 \text{ пс})^2 + (\Delta t \times \text{кратковременную стабильность})^2]^{1/2}$$

Где Δt интервал времени. Для временных интервалов более 125 мс (стандартный генератор) или 500 мс (термостатированный генератор) краткосрочная стабильность временной базы будет доминировать над пределом разрешения SR620.

Долгосрочная стабильность

Долгосрочная стабильность осциллятора - это мера изменения частоты в течение длительных временных интервалов (часов, дней, месяцев или лет). Именно долгосрочная стабильность временной базы в конечном счете ограничивает абсолютную точность SR620 и определяет интервал калибровки, необходимый для поддержания желаемого предела погрешности. Долгосрочная стабильность состоит из двух компонентов: старения генератора и температурной реакции генератора. Старение генератора - это изменение частоты во времени из-за физических изменений компонентов (обычно кристалла), и обычно определяется как дробное изменение частоты в течение некоторого периода измерения. Температурная реакция обусловлена изменением характеристик генератора в зависимости от температуры окружающей среды и определяется как дробное изменение частоты в некотором температурном диапазоне. Временная база для SR620 специфицируется следующим образом:

| | стандартный генератор | термостатированный генератор |
|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Старение | $1,0 \times 10^{-6}$ / год | $5,0 \times 10^{-10}$ / день |
| Температ. зависимость | $1,0 \times 10^{-6}$ (0-50 °C) | $5,0 \times 10^{-9}$ (0-50 °C) |

Например, через 30 дней после калибровки термостатированный генератор может иметь дрейф не более чем $30 \times (5 \times 10^{-10}) \times 10 \text{ МГц} = 0,15 \text{ Гц}$. Кроме того, при оценке погрешности в наихудшем случае необходимо принять наихудшее изменение температуры. Дополнительный осциллятор, как должно предполагаться, в худшем случае имеет ошибку в 5 ppb, потому что условия, когда SR620 был откалиброван неизвестны. Эта ошибка наихудшего случая не является хорошей оценкой фактического дрейфа осциллятора при большинстве условий.

Внешние временные базы

SR620 имеет вход на задней панели, который будет принимать либо 5 МГц, либо 10 МГц сигнал от внешней временной базы. ФАПЧ SR620 синхронизирует свою внутреннюю временную базу с внешней. Контур фазовой автоподстройки частоты имеет полосу пропускания около 20 Гц, и, таким образом, характеристики часов SR620, в течение времени измерения более 50 мс, становятся характеристиками внешнего источника. Для более коротких времен измерения характеристики часов не важны по сравнению с внутренним джиттером (25 пс скз) SR620. Таким образом, если сигнал от цезиевых часов вводится в SR620 со стандартным генератором TCXO, то краткосрочная и долгосрочная стабильность SR620 станет равна стабильности цезиевых часов. Это показано на графике 3.

Зависимость ошибки от временного интервала

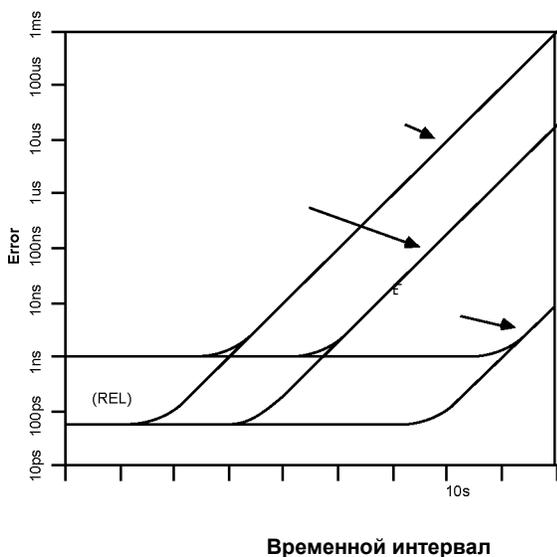


График 3: Ошибка в зависимости от и временного интер-

Технические характеристики триггерного входа

Существует два способа, с помощью которых входные данные могут влиять на разрешение и точность измерений. Первый называется триггерным джиттером и обусловлен случайным шумом на входных сигналах А и В и буферах входа триггера. Этот случайный шум заставляет входной сигнал срабатывать в другое время, чем это было бы при отсутствии шума. Поскольку это случайный процесс, он влияет на разрешение точно так же, как и другие источники случайного шума. Джиттер времени запуска может быть уменьшен тщательным заземлением и экранированием входного сигнала, а также максимизацией скорости нарастания входного сигнала. Обратите внимание, однако, что скорость нарастания ограничена временем нарастания входного сигнала SR620 на 1 нс. Джиттер времени срабатывания триггера может быть описан уравнением:

$$\text{джиттер триггера} = \frac{\sqrt{(E_{\text{внутр}})^2 + (E_{\text{сигнал}})^2}}{\text{скорость нарастания входного сигнала}}$$

где

$E_{\text{внутр}}$ = внутренний шум на входе (350 мкВскз тип.)

$E_{\text{сигнал}}$ = шум входного сигнала

Если уровень триггера установлен на значение, отличное от заданного, то измеренный интервал времени будет иметь ошибку. Эта ошибка (ошибка синхронизации уровня триггера) является систематической ошибкой, которая влияет только на погрешность измерения, а не на его разрешение. Пороги срабатывания SR620 устанавливаются с точностью до 15 мВ + 0,5 % от значения. Эффект, который это оказывает на измерение, определяется следующим образом:

$$\text{ошибка по времени триггера} = \frac{15 \text{ мВ} + 0,5 \% \text{ от установки}}{\text{скорость нарастания входного сигнала}}$$

Графики 4 и 5 показывают влияние джиттера синхронизации триггера и ошибки уровня синхронизации триггера на разрешение и ошибку. Эти графики применимы ко всем измерениям, а не только к временным интервалам.

Джиттер триггера (скз) в зависимости от входного шума

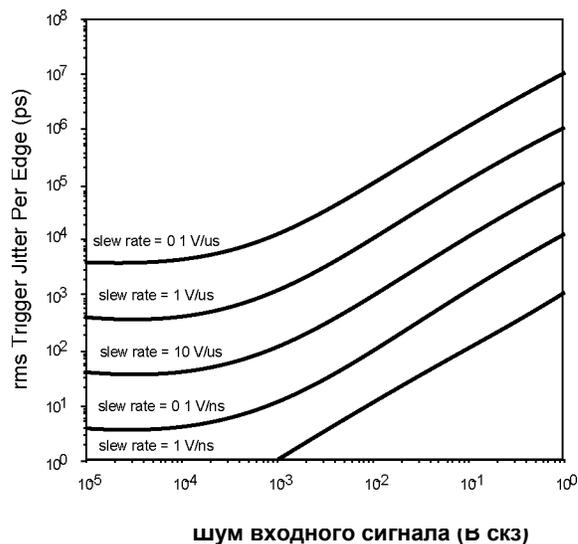


График 4: Влияние входного шума на разрешение измерений, показывающее снижение уровня шума за счет усреднения

Ошибка синхронизации триггера в зависимости от скорости нарастания входного сигнала

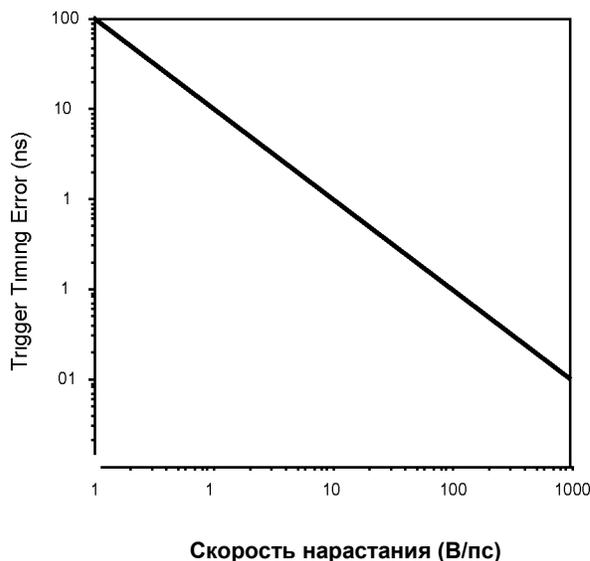


График 5: Влияние скорости нарастания входного сигнала на погрешность измерения

Точность измерения

Следующие уравнения позволяют рассчитать разрешающую способность и погрешность SR620 в различных режимах измерения. Типичные технические характеристики SR620 используются в следующих уравнениях. Для наилучших границ случая просто замените типичные числа наилучшими.

Примечание: величины, добавленные для расчета разрешения SR620, являются независимыми среднеквадратичными величинами и должны быть добавлены в квадратуре, как показано в следующем уравнении:

$$\text{итог} = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + \dots}$$

Примечание: временная погрешность относится к сумме эффектов старения и температуры.

Временной интервал, ширина, режимы времени нарастания/спада

В режимах измерения времени, разрешение измерений и ошибка определяется по формуле:

$$\text{разрешение} = \pm \sqrt{\frac{(25 \text{ пс})^2 + (\text{кратк. стаб.} \times \text{время строба})^2 + (\text{джиттер триг. старт})^2 + (\text{джиттер триг. стоп})^2}{N}}$$

$$\text{ошибка} = \pm \left[\text{разрешение} + (\text{ошибка временной базы} \times \text{интервал}) + \text{ошибка джит. триг. старт} + \text{ошибка джит. триг. стоп} + 0,5 \text{ нс} \right]$$

N – количество усредненных выборок

Частотный режим

В частотном режиме разрешение и погрешность измерения задаются:

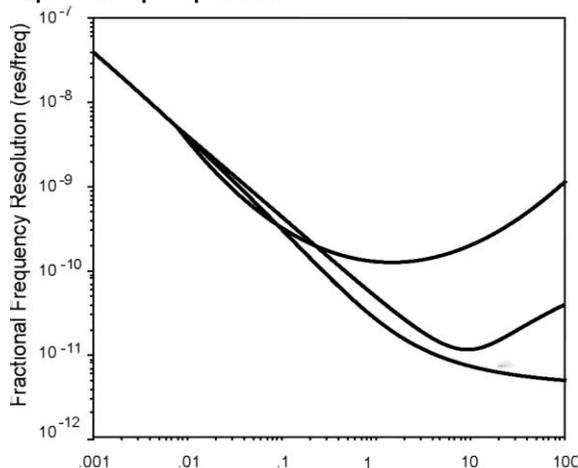
$$\text{разрешение} = \pm \frac{\text{частота}}{\text{время строба}} \sqrt{\frac{(25 \text{ пс})^2 + (\text{кратк. стаб.} \times \text{время строба})^2 + 2 \times (\text{джиттер триг.})^2}{N}}$$

$$\text{ошибка} = \pm \left[\text{разрешение} + (\text{ошибка временной базы} \times \text{частота}) + \frac{100 \text{ пс}}{\text{время строба}} \times \text{частота} \right]$$

N – количество усредненных выборок

Типичное разрешение частоты при однократном измерении SR620 в зависимости от времени строба показано на графике 6. Кривые представляют собой стандартный генератор, опциональный термостатированный генератор и внешний эталон высокой стабильности. Шум входного сигнала считается пренебрежимо малым.

Типичное разрешение по частоте в зависимости от времени стробирования



Время строба (с)

График 6: Разрешение по частоте в зависимости от времени стробирования для трех вариантов задающего генератора в SR620

Режим периода

В режиме периода разрешение и погрешность измерения задаются следующим образом:

$$\text{разрешение} = \pm \frac{\text{период}}{\text{время строба}} \sqrt{\frac{(25 \text{ пс})^2 + (\text{кратк. стаб.} \times \text{время строба})^2}{N}}$$

$$\text{ошибка} = \pm \left[\text{разрешение} + (\text{ошибка временной базы} \times \text{период}) + \frac{100 \text{ пс}}{\text{время строба}} \times \text{период} \right]$$

N – количество усредненных выборок

Фазовый режим

в фазовом режиме разрешение и погрешность измерения выражаются:

$$\text{разрешение} = \pm \left[0,001^\circ + 360 \sqrt{\frac{(25 \text{ пс})^2 + (\text{кратк. стаб.} \times \text{время строба})^2 + 2 \times (\text{джит. триг.})^2}{\text{период}^2 \times N}} \sqrt{\left(1 + \left(\frac{\text{фаза} \times \text{период}}{360 \times \text{время строба}} \right)^2 \right)} \right]$$

$$\text{ошибка} = \pm \left[\text{разрешение} + \frac{(\text{ошибка временной базы} \times \text{интервал}) + \text{ошибка джит. триг. старт} + \text{ошибка джит. триг. стоп} + 0,5 \text{ нс}}{\text{ошибка временной базы} \times \text{период} + 1 \times 10^{-8} \times \text{период}} \times 360^\circ \right]$$

N – количество усредненных выборок, время строба 10 мс

На графике 7 показано однократное разрешение фазы SR620 в зависимости от частоты. Разрешение может быть увеличено путем усреднения.

Однократное разрешение фазы в зависимости от частоты

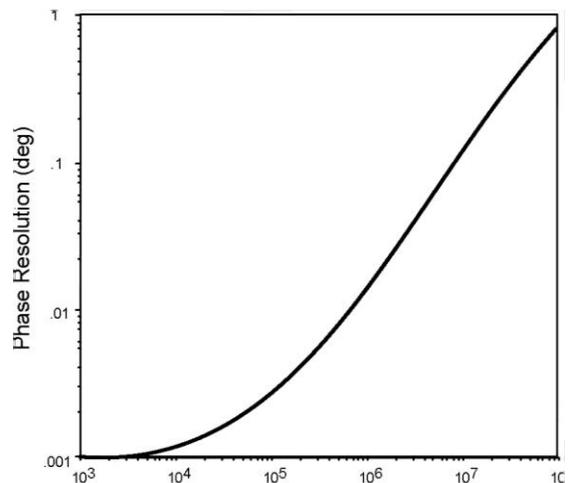


График 7: Однократное разрешение фазы в зависимости от частоты

Режим подсчета

Разрешение и ошибка для режима подсчета:

Разрешение = ± 1 отсчет

погрешность отсчета = ± 1 отсчет

Заключение

Универсальный измеритель временных интервалов и частот SR620 имеет множество практических применений в технике и науке. Он может быть использован для измерения задержек распространения интегральных схем, качества источника опорной частоты или любой другой временной или частотной величины. Его способность выполнять статистические вычисления (среднее, минимальное, максимальное, стандартное отклонение и дисперсия Аллана) делает SR620 применимым практически к любой системе, связанной с частотой или временем.

Разрешение, наименьшее заметное различие в измерении, представляет первостепенный интерес при проведении сравнительных измерений. Стабильность временной базы, триггерный шум, внутренний шум и т. д., все они способствуют ограничению разрешения. SR620 обеспечивает пользователю самые лучшие характеристики с 4-пс наименее значимой цифрой при однократном измерении и 25-пс однократным разрешением. Возможность работы с внутренними и внешними временными базами обеспечивает гибкость, необходимую во многих приложениях.

Погрешность, то есть разница между измеренным и фактическим значением, представляет интерес, когда важна абсолютная величина измерения. Ошибка состоит из разрешения, старения временной базы, задержек распространения, ошибок уровня триггера и т. д. Абсолютная погрешность SR620 обычно составляет 500 пс.