

Измерения с высоким разрешением с помощью осциллографов R&S

Указания по применению

Изделия:

- ┆ Цифровые осциллографы R&S® RTO
- ┆ Цифровые осциллографы R&S® RTE
- ┆ Опция высокой четкости R&S® RTO-K17
- ┆ Опция высокой четкости R&S® RTE-K17

С помощью опций высокой четкости RTO-K17/RTE-K17 пользователи получают возможность изучения дополнительных подробностей сигнала с вертикальным разрешением до 16 бит.

С учетом превосходного аналогового входного каскада осциллографов RTO и RTE, пользователь получает в свое распоряжение универсальный прибор для анализа сигналов в самом широком диапазоне применений – от импульсных источников питания до радиолокационных сигналов – для анализа достаточно одного осциллографа R&S.

Содержание

1	Введение	3
2	Справочная информация	4
2.1	Терминология в области измерений.....	4
2.2	Связь отношения сигнал-шум и эффективной разрядности (ENOB).....	5
2.3	Снижение уровня шума с помощью фильтрации	6
2.4	Фильтр для снижения уровня шума.....	7
2.5	Ограничения при снижении уровня шума	9
3	Повышение разрешения с помощью осциллографов RTO и RTE	11
3.1	Повышение разрешения с помощью различных методов снижения уровня шума	11
3.1.1	Опция высокой четкости с поддержкой 16 бит (HD-режим).....	11
3.1.2	Прореживание в режиме высокого разрешения ("High res")	12
3.1.3	Усреднение осциллограммы.....	13
3.2	Сравнение HD-режима и режима "High res"	13
3.3	Преимущества HD-режима в части системы запуска.....	14
4	Примеры измерений в HD-режиме.....	17
4.1	Визуализация повышения вертикального разрешения	17
4.2	Обнаружение слабых сигналов	18
4.3	Повышение чувствительности по запуску.....	20
5	Заключение	23
6	Библиография	24
7	Информация для заказа.....	25

1 Введение

Появление осциллографов высокого разрешения обусловлено возросшей потребностью в проведении более детального анализа сигналов, в частности, в областях аналого-цифровых устройств, автотранспорта, медицины и приложений для анализа мощности, где присутствует необходимость в детальном отображении сигналов больших и малых напряжений. Одним из примеров является задача определения характеристик импульсных источников питания (SMPS). Чтобы проводить достоверные измерения мощности осциллограф для одного и того же сигнала должен определять напряжение как в пределах импульса, так и в рамках межимпульсного интервала. Для этого требуется более широкий динамический диапазон, чем способно обеспечить стандартное 8-битное разрешение, поскольку разность напряжений может достигать нескольких сотен вольт. Другим примером может служить анализ амплитудно-модулированных радиосигналов с небольшим коэффициентом модуляции, используемых в радиолокации.

При определении характеристик осциллографа, требуемого для таких приложений, особое внимание наряду с такими стандартными параметрами, как полоса пропускания, частота дискретизации и глубина памяти следует уделять вертикальному разрешению. Оно отвечает за прецизионность отображения подробностей сигнала на экране осциллографа и точность их измерения и анализа.

Ключевым компонентом цифрового осциллографа с точки зрения вертикального разрешения является аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Он служит для преобразования аналогового сигнала во входном канале осциллографа в дискретные отчеты времени и напряжения, которые могут быть обработаны и сохранены в памяти прибора. Разрешение по времени между отчетами задается частотой дискретизации АЦП. Разрядность АЦП определяет номинальное вертикальное разрешение.

В цифровых осциллографах, как правило, используются 8-битные АЦП. Тем не менее, разрешение по вертикали некоторых моделей специализированных осциллографов превышает 8 бит. Такое разрешение достигается, например, за счет использования АЦП, разрядность которых превышает 8 бит. Другим способом является применение алгоритмов цифровой обработки сигналов в тракте сбора данных, что также позволяет получить повышенное разрешение.

В обоих случаях необходимо учитывать, что разрядность АЦП является теоретическим значением. Разрешающая способность АЦП, называемая также эффективным числом битов или эффективной разрядностью (ENOB), будет ниже номинального значения из-за наличия таких источников ошибок, как шум, нелинейность и искажения. Кроме того, при расчете динамических характеристик осциллографа наряду с АЦП необходимо учитывать влияние других компонентов ВЧ-тракта, таких как усилитель, фильтр и пассивные элементы антенны.

В настоящих указаниях по применению приводится описание опций высокой четкости R&S® RTO-K17 и R&S® RTE-K17 для цифровых осциллографов R&S® RTO и R&S® RTE. Они позволяют увеличить вертикальное разрешение и чувствительность по запуску для осциллографов обоих семейств до 16 бит благодаря применению алгоритмов цифровой фильтрации к сигналу в тракте сбора данных. Оснащение приборов RTO и RTE этой опцией выполняется по запросу с помощью программного кода ключа, что обеспечивает дополнительную гибкость.

В разделе 2 настоящих указаний по применению приводятся теоретические сведения, и рассматривается используемый способ фильтрации. В разделе 3 приводится сравнение различных методов постобработки, нацеленных на увеличение разрешения, и описываются преимущества опции высокой четкости. Наконец, в разделе 4 приводятся несколько примеров измерения.

В настоящих указаниях по применению используются следующие сокращения:

- RTO для цифрового осциллографа R&S® RTO, RTE для R&S® RTE
- Режим высокой четкости (HD-режим) для опции R&S® RTO-K17/R&S® RTE-K17

2 Справочная информация

Увеличение разрешения не всегда отражается в более высокой точности. Прежде чем приступить к изучению режима высокой четкости, обсудим понятия, широко используемые в контексте измерительных систем.

В стандарте ISO (1) определяется большинство этих понятий, однако в настоящем документе они используются с небольшими изменениями, характерными для осциллографов. Это обусловлено тем, что в стандарте не учитывается оцифровка данных при измерении, что недопустимо в случае режима высокой четкости. Как следствие, в настоящем документе используется понятие "разрешение" (resolution), в то время как в стандарте приводится понятие "прецизионность" (precision). Понятие "прецизионность" используется применительно к цифровой величине, что характерно для областей информатики и цифровой обработки сигналов. Понятия "точность" (accuracy) и "систематическая погрешность" (bias) используются так же, как и в стандарте ISO.

2.1 Терминология в области измерений

- 1 Точность/погрешность (accuracy): определяет отклонение результатов нескольких измерений от фактического значения. Точность зависит от разрешения, прецизионности и систематической погрешности.
- 1 Систематическая погрешность (bias): неслучайный фактор, приводящий к появлению разности между средним значением результатов измерений и фактическим значением.
- 1 Разрешение (resolution): случайный разброс измеренных значений в окрестности среднего измеренного значения. Среднее измеренное значение не обязательно должно совпадать с фактическим значением и может иметь систематическую погрешность. Следовательно, высокая прецизионность не всегда говорит о высокой точности.
- 1 Прецизионность (precision): мера того, насколько подробно представлена числовая величина.

На рисунке 2-1 понятия "точность", "прецизионность" и "разрешение" проиллюстрированы с помощью четырех мишеней с одинаковыми шаблонами из девяти точек с наличием разброса и систематической погрешности. Может показаться, что этот рисунок достаточно тривиален, однако значения концентрических окружностей в данном случае несколько различаются.

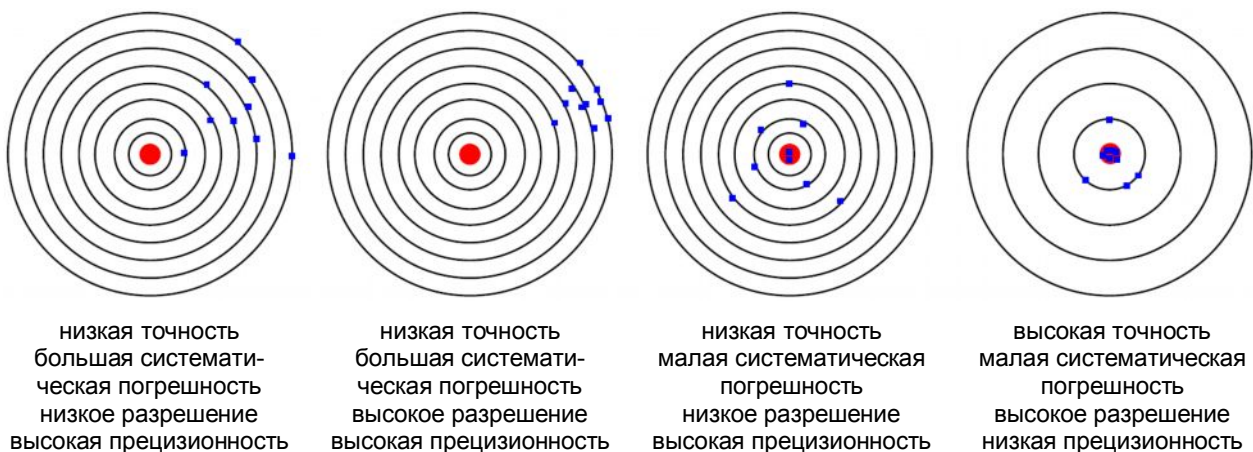


Рисунок 2-1 – Сравнение понятий "точность", "систематическая погрешность", "разрешение" и "прецизионность"

Концентрические окружности представляют собой прецизионность; чем больше окружностей, тем выше прецизионность и тем более подробными будут результаты измерения. На окружности располагаются измерения, обозначенные синей точкой. Центр мишени, обозначенный красной точкой, соответствует фактическому значению. Три мишени слева имеют высокую прецизионность, правая мишень – низкую.

Самая левая мишень обладает низким разрешением, большой систематической погрешностью и низкой точностью. Вторая слева мишень обладает высоким разрешением, но из-за большой систематической погрешности имеет низкую точность. Следующая мишень обладает высокой точностью, но низким разрешением. Последняя мишень обладает высокими точностью и разрешением, даже несмотря на низкую прецизионность. Этот пример наглядно демонстрирует, что выполненное с высокой прецизионностью измерение не всегда будет более точным, чем измерение, проведенное с низкой прецизионностью. Более того, пример показывает, что измерение с низкой прецизионностью может быть более точным.

От таких приборов, как осциллограф, пользователи ожидают высокой точности при измерении всех характеристик сигнала, однако в технических данных обычно приводится только погрешность измерений по постоянному току; погрешность измерений по переменному току при этом не оговаривается. Вместе этого в технических данных, как правило, приводится прецизионность или номинальное вертикальное разрешение АЦП. Из приведенного выше рисунка 2-1 становится понятно, что нельзя судить о точности/погрешности на основании одной лишь номинальной прецизионности.

Номинальная прецизионность осциллографа определяется архитектурой аппаратного обеспечения. Систематические погрешности аппаратной реализации, в частности, шум и динамическая нелинейность, определяют разрешение и величину случайной погрешности системы, подобно тому, как смещение и статическая нелинейность характеризуют систематическую погрешность. Некоторый вклад в эти погрешности вносит не только АЦП, но и различные компоненты системы.

Как правило, в осциллографах используются АЦП с 8 битами числовой прецизионности; некоторые специализированные осциллографы используют АЦП с 10-12 битами или с большим номинальным разрешением и прецизионностью. Лишь в том случае, если осциллограф показывает приемлемую точность и имеет высокое разрешение, увеличение прецизионности приведет к повышению разрешения и, как следствие, точности измерения благодаря улучшению вертикальной детализации.

В следующих разделах будут показаны способы повышения разрешения и прецизионности с помощью алгоритмов цифровой обработки сигналов.

2.2 Связь отношения сигнал-шум и эффективной разрядности (ENOB)

В технических данных на осциллограф не приводится информация о погрешности измерения и разрешении для сигналов переменного тока. Различные погрешности АЦП накладывают ограничения на погрешность измерения осциллографа, поэтому важно понимать, каким образом связаны разрешение осциллографа и прецизионность, выраженная в битах.

Номинальная прецизионность АЦП не равна эффективному разрешению осциллографа. Для определения эффективного разрешения осциллографа необходимо измерить отношение сигнал-шум (SNR) (2). С помощью SNR можно получить значение ENOB в качестве меры эффективного разрешения.

Для идеального АЦП связь между вычисленным значением SNR ($SNR_{дБ}$) и разрешением определена в нескольких источниках (3) и представлена уравнением (2-1).

$$SNR_{дБ} = 6,02 \cdot N + 1,76 \quad (2-1)$$

Осциллограф с реальным АЦП вносит ухудшения, обусловленные вышеупомянутыми шумом, нелинейностью и искажениями. Для определения связи реального АЦП с идеальным АЦП среднеквадратическое значение (СКЗ) погрешности квантования идеального АЦП задается равным СКЗ шума (и искажений) осциллографа. С помощью измеренного значения SNR ($SNR_{изм}$) можно вычислить эффективное разрешение в битах. Результат приведен в уравнении (2-2). Значение разрешения, выраженное в битах идеального АЦП и не всегда являющееся целым числом, называется эффективным числом битов или эффективной разрядностью (ENOB).

$$ENOB = \frac{SNR_{изм} - 1,76}{6,02} \quad (2-2)$$

Для осциллографов с реальными АЦП значение ENOB будет ниже, чем прецизионность, выраженная в количестве битов, что обусловлено наличием шума и искажений. Осциллографы RTO и RTE обладают непревзойденными шумовыми характеристиками аналогового входного каскада. АЦП в рабочем состоянии обладает численным разрешением 8 бит и ENOB более 7 бит на частотах до 4 ГГц.

2.3 Снижение уровня шума с помощью фильтрации

В предыдущем разделе показана связь между понятиями "прецизионность", "систематическая погрешность", "разрешение" и "отношение сигнал-шум" (SNR). В этом разделе изучаются спектральные свойства сигнала и шума, а также рассматривается вопрос повышения разрешения при использовании фильтра. В рамках этого обсуждения не учитываются эффекты искажений, что вполне допустимо благодаря линейности аналогового входного каскада приборов RTO и RTE.

Тенденции в области разработки АЦП (4) показывают, что частота дискретизации в новых моделях АЦП неизменно увеличивается, в то время как разрешение таких АЦП остается относительно постоянным. С учетом этих тенденций были разработаны технические решения, позволяющие повысить разрешение АЦП в цифровой области; одно из таких решений рассматривается в данном разделе. В этих технических решениях частота дискретизации заменяется вертикальным разрешением для сигналов с избыточной дискретизацией (сверхдискретизацией). Типичным примером является 1-битный сигма-дельта АЦП в 24-битных аудиоприложениях.

Шум идеального АЦП, как и эквивалентного высококачественного реального АЦП, может рассматриваться как чистый белый шум (3). Спектральные составляющие белого шума распределены равномерно, то есть спектральная плотность шума $p_N(f)$ в интервале $[-f_a/2 \leq f \leq f_a/2]$ остается неизменной. Амплитуда спектральной плотности шума в этом случае равняется СКЗ суммарной мощности шума P_N , поделенному на частоту дискретизации f_a .

В случае сверхдискретизации, когда полоса частот сигнала $S(f)$ значительно меньше частоты дискретизации f_a , полоса частот дискретизированного сигнала может быть уменьшена с помощью фильтра без изменения сигнала $S(f)$. Для упрощения допустим, что используется фильтр с прямоугольной характеристикой $X(f)$ и частотой среза f_B . Этот случай показан на рисунке 2-2, из которого очевидно, что суммарная мощность шума уменьшается на значение, равное отношению частоты дискретизации f_a к частоте среза f_B . Значение в децибелах выражается уравнением (2-4)

$$p_N(f) = \frac{P_N}{f_a} \quad (2-3)$$

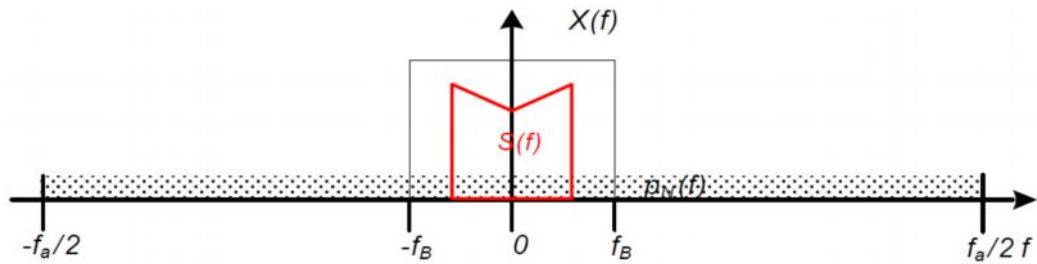


Рисунок 2-2 – Снижение мощности шума с помощью фильтрации

$$SNR_{\text{увел}} = 10 \log \left(\frac{f_a}{2 \cdot f_B} \right) \quad (2-4)$$

В работе Дж. Проаксиса (3) показано, что удвоение частоты дискретизации f_a при сохранении полосы пропускания фильтра неизменной приводит к снижению мощности шума и, следовательно, увеличению SNR в $\sqrt{2}$ раз или на 3 дБ, что составляет $\frac{1}{2}$ бита. Этот результат справедлив для любого АЦП. Если частота дискретизации увеличивается в 4 раза или на 6 дБ, повышение разрешения составит 1 бит, согласно уравнению (2-2).

2.4 Фильтр для снижения уровня шума

В предыдущих разделах показана зависимость между точностью и разрешением и описано, как повысить разрешение с помощью фильтра нижних частот (ФНЧ). В данном разделе демонстрируется, как с помощью фильтра ограничить полосу частот и повысить прецизионность таким образом, чтобы повышение разрешения отобразилось с достаточной прецизионностью.

Для ограничения полосы частот могут быть использованы различные типы ФНЧ, однако в данном разделе для простоты будет рассмотрен фильтр скользящего среднего (ФСС). ФСС выполняет расчет среднего арифметического для каждого выходного значения y_n из последних M отсчетов $x_n \dots x_{n-M+1}$. В этом случае параметр M называется длиной фильтра. Математическое определение среднего арифметического значения подразумевает деление на длину фильтра M , что обеспечивает соответствие средней мощности сигнала на выходе фильтра исходному входному сигналу. Точное определение задается уравнением (2-5). В простейшем примере, приведенном в следующем абзаце, полагается, что длина фильтра равна 2, и используется входная последовательность x_n с целыми числами со знаком и 8 битами прецизионности.

При принятых выше допущениях ФСС суммирует два последних отчета и делит их на два, $y_n = (x_n + x_{n-1})/2$. Результат суммирования $(x_n + x_{n-1})$ для этого примера с 8 битами находится в диапазоне $-256 \dots 254$, поскольку диапазон входных значений составляет $-128 \dots 127$. При использовании арифметических операций с фиксированной запятой результат суммирования требует 9 битов прецизионности ($\cong \lg(511)$) для отображения 511 возможных выходных значений. Таким образом, происходит повышение прецизионности на 1 бит по сравнению с 8-битными входными значениями. В случае арифметики с фиксированной запятой это повышение может быть сохранено также и при последующем делении (в этом примере на 2).

Приведенный пример может быть обобщен для любой длины фильтра M с помощью арифметических операций с фиксированной запятой, если M является положительным целым числом. Для произвольной длины фильтра повышение прецизионности определяется как логарифм по основанию 2 от длины фильтра для ФСС. Если

длина фильтра представляет собой степень двух (2,4,8,16,...), прецизионность повышается на целое число (1,2,3,4...). Для всех других длин фильтра повышение прецизионности будет дробным числом; при использовании арифметических операций с фиксированной запятой результат будет усечен в соответствии с аппаратной прецизионностью. В случае приборов RTO и RTE аппаратная прецизионность составляет 16 бит. Внесенной при усечении погрешностью можно пренебречь.

$$y_n = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} x_{n-i} \quad (2-5)$$

Причина использования длины фильтра, отличной от степени двух, становится очевидной, если рассматривается соответствующая полоса пропускания фильтра. В приведенном выше разделе 2.3 был рассмотрен вопрос снижения уровня шума в зависимости от полосы пропускания применяемого фильтра. В этом разделе была изучена задача повышения прецизионности. Теперь следует установить связь между прецизионностью, полосой пропускания фильтра и, наконец, разрешением.

Импульсная характеристика y_n фильтра скользящего среднего представляет собой дискретную прямоугольную функцию (см. рисунок 2-3). Передаточная функция $H(f)$ этого фильтра в частотной области является дискретным преобразованием Фурье этой импульсной характеристики.

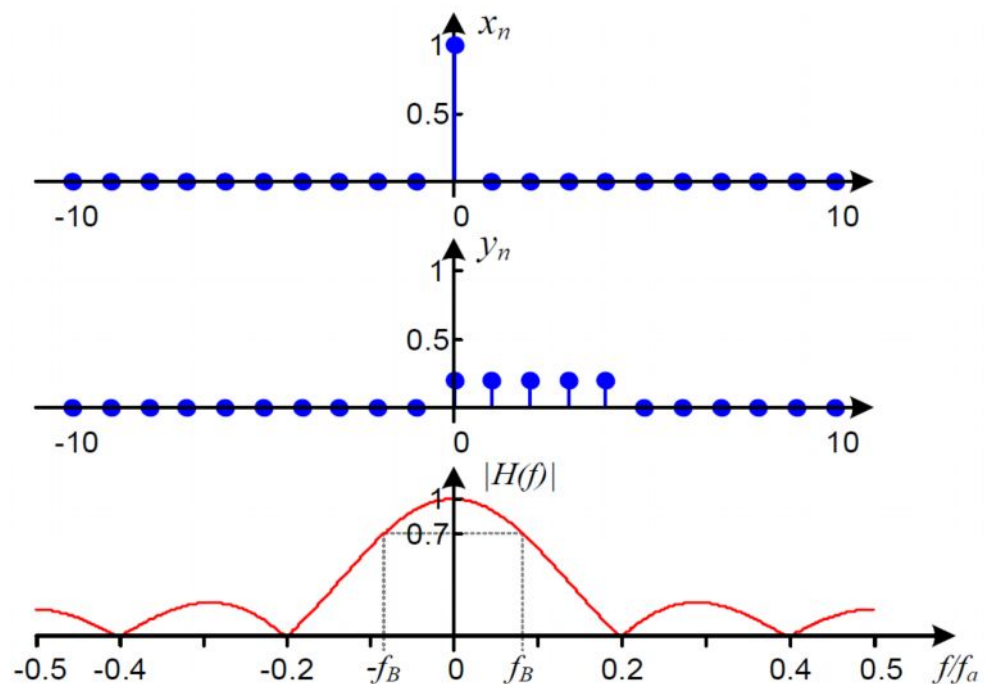


Рисунок 2-3 – Импульсная характеристика и полоса пропускания ФСС при длине фильтра $M=8$

С помощью импульсной характеристики и уравнения (2-6) можно вычислить модуль передаточной функции $|H(f)|$ в частотной области для ФСС. В работе Дж. Проаксиса (3) приводится более подробная информация о вычислении передаточной функции. Частота f приведена в соответствие частоте дискретизации f_a и представлена в диапазоне $-0,5 \dots 0,5$. Частота среза фильтра f_B , на которой сигнал ослабляется на 3 дБ или в 0,7 раз относительно полосы пропускания, зависит от длины фильтра M . Частота среза не может быть выведена в аналитическом виде.

$$|H(f)| = \frac{\sin(\pi \cdot M \cdot f)}{M \cdot \sin(\pi \cdot f)} \quad (2-6)$$

В примере ФСС с длиной фильтра $M=5$ граница полосы пропускания по уровню -3 дБ находится на частоте $0,09 \cdot f_a$, повышение прецизионности составляет $2,3 \approx \lg(5)$, а значение SNR увеличено на 7,4 дБ согласно уравнению (2-4).

2.5 Ограничения при снижении уровня шума

При использовании данного метода имеются ограничения, которые обязательно должны быть учтены. Наиболее значимым является наличие искажений, которые вызваны погрешностями линеаризации в АЦП и аналоговом входном каскаде и не могут быть уменьшены. Анализ этих погрешностей с помощью синусоидального колебания позволяет получить динамический диапазон без паразитных составляющих (SFDR) в качестве меры искажений (5). Ширина диапазона SFDR измеряется в дБ, и чем он шире, тем слабее будут искажения. В предыдущих разделах эти искажения не учитывались, поскольку используемый АЦП считался идеальным, однако на практике диапазон SFDR накладывает ограничения на увеличение разрешения при малой полосе пропускания фильтра.

В соответствующем стандарте IEEE (5) проводятся различия между шумом и искажениями и, как следствие, вводится понятие "отношение сигнала к шуму и искажениям" (SINAD). В случае широкой полосы пропускания в отношении SINAD, как правило, преобладает шум. При снижении уровня шума с помощью фильтрации искажения становятся более значимыми и начинают преобладать в отношении SINAD.

Сравнивая измеренные диапазоны SFDR 4 ГГц прибора RTO с 8-битным АЦП и специального осциллографа высокого разрешения, точность АЦП которого превышает 8 бит, можно сделать вывод, что минимальные значения SFDR сопоставимы (см. рисунок 2-4). Кроме того, для так называемого осциллографа высокого разрешения ширина диапазона SFDR с минимальным значением 46 дБ является ограничивающим фактором.

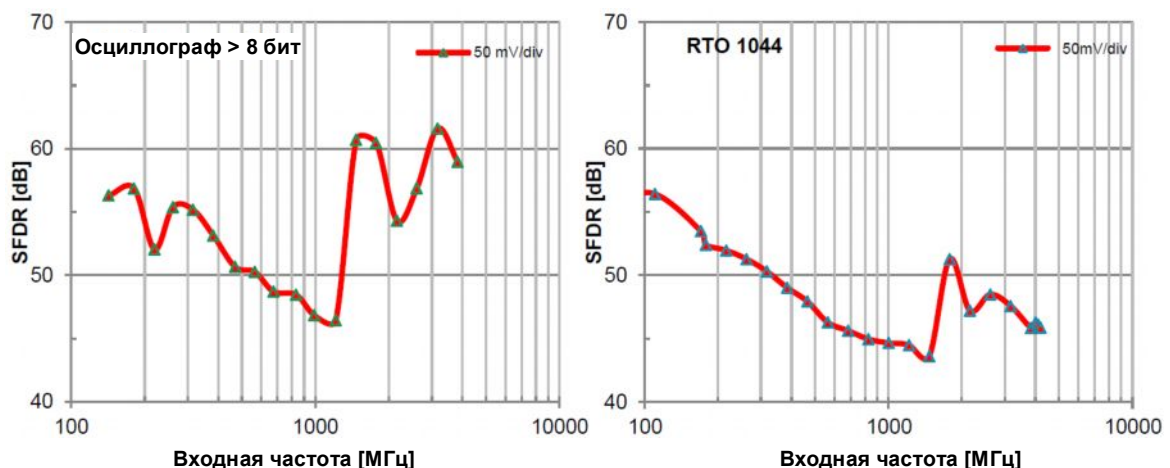


Рисунок 2-4 – Диапазон SFDR осциллографа высокого разрешения и прибора RTO1044

Другим ограничением является ширина канала передачи данных для обработки отсчетов. Аппаратная точность должна быть достаточной для отражения повышенного разрешения. Для приборов RTO и RTE ширина тракта передачи данных в HD-режиме составляет 16 бит, что является отличительной чертой этих осциллографов.

Наконец, в приведенных выше разделах принималось допущение о том, что шум имеет равномерное распределение. И хотя это довольно корректное допущение, оно может не соответствовать действительности при высоком значении отношения частоты дискретизации к частоте среза цифрового фильтра. В этом случае больше нельзя пренебрегать влиянием "розового" ($1/f$) шума, поэтому уравнение (2-4) становится недействительным. Это приводит к уменьшению ожидаемого повышения значения SNR.

3 Повышение разрешения с помощью осциллографов RTO и RTE

Осциллографы RTO и RTE поддерживают несколько способов снижения уровня шума с помощью фильтрации. В разделе 2.3 уже были изучены теоретические основы, поэтому в этом разделе рассмотрим лишь преимущества отдельных методов фильтрации.

3.1 Повышение разрешения с помощью различных методов снижения уровня шума

3.1.1 Опция высокой четкости с поддержкой 16 бит (HD-режим)

Режим высокой четкости (HD-режим) предполагает использование цифрового фильтра в тракте сбора данных осциллографа, см. рисунок 3-4. Особенности архитектуры фильтра подразумевают линейность ФЧХ, а также отсутствие низкочастотных помех и помех дискретизации, что обеспечивает высокий уровень точности сигнала при любых параметрах фильтра. Если в сигнале содержатся частотные составляющие, частота которых превышает частоту среза фильтра, эти составляющие будут подавлены фильтром. Прибор RTO, например, дискретизирует сигнал с постоянной частотой дискретизации 5 млрд отсчетов/сек. Дополнительное прореживание (децимация) обеспечивается выбором пониженной частоты дискретизации. В отличие от режима "высокого разрешения", прореживание выполняется в неявном виде. В случае HD-режима последующее прореживание обеспечивает экономичность использования памяти для собранных данных.

В таблице 1 представлены значения прецизионности или вертикального разрешения в зависимости от полосы пропускания фильтра в HD-режиме. Граница полосы пропускания соответствует частоте среза ФНЧ. В зависимости от модели осциллографа полоса пропускания фильтра может начинаться с 1 ГГц и опускаться до 10 кГц.

Таблица 1 – Связь вертикального разрешения с полосой пропускания

Полоса пропускания [МГц]	Разрешение [бит]		Полоса пропускания [МГц]	Разрешение [бит]	
	RTE	RTO		RTE	RTO
0,1	16	16	20	16	16
0,2	16	16	30	16	16
0,3	16	16	50	14	16
0,5	16	16	100	13	14
1	16	16	200	12	13
2	16	16	300	11 ¹	12
3	16	16	500	10 ²	12
5	16	16	1000	--	10 ³
10	16	16			

¹ За исключением прибора RTE102x

² За исключением приборов RTE102x и RTE103x

³ За исключением прибора RTO100x

Преимуществом представленной функции снижения уровня шума с точки зрения пользователя является улучшение разрешения сигнала и повышение чувствительности по запуску, что будет продемонстрировано в разделе 3.3. Использование HD-режима обеспечивает осциллографам RTO и RTE дополнительную функциональную гибкость. В зависимости от области применения пользователь может принять решение об использовании одного из этих приборов в качестве осциллографа среднего разрешения с широкой полосой пропускания или осциллографа высокого разрешения с узкой полосой пропускания. На рисунке 4-2 показано диалоговое окно конфигурации полосы пропускания.

3.1.2 Прореживание в режиме высокого разрешения ("High res")

Прореживатель (дециматор) высокого разрешения "High res" – это блок обработки в тракте сбора данных осциллографа. Он состоит из ФСС с последующим прореживателем, поэтому длина фильтра соответствует коэффициенту прореживания (N) прореживателя (см. рисунок 3-1). Коэффициент прореживания – это отношение частоты дискретизации АЦП 10 млрд отсчетов/сек (RTO) к сконфигурированной частоте дискретизации.



Рисунок 3-1 – Функциональные блоки прореживателя "High res"

В разделе 2.4 уже был рассмотрен ФСС, позволяющий ограничить полосу пропускания и увеличить прецизионность. Однако следует заметить, что относительно плоская форма АЧХ фильтра в окрестности граничной частоты (см. рисунок 2-3) в сочетании с последующим прореживанием оказывают влияние на четкость сигнала. Более подробное описание приводится в следующем разделе.

Согласно теореме Котельникова сигнал может быть полностью восстановлен с помощью отсчетов, если он ограничен по полосе частот таким образом, что максимальная частота f_s не превышает половины частоты дискретизации $fa/2$. Этот дискретизированный сигнал имеет спектр, который повторяет спектр исходного сигнала благодаря гармоникам ($m = [-\infty, \infty]$) частоты дискретизации $m \cdot fa$. Прореживание с коэффициентом N изменяет характер восстановления спектра исходного сигнала: $fa \cdot mN$ (3).

На рисунке 3-2 показан спектр $|H(f)|$ до (верхний график) и после (нижний график) прореживания с коэффициентом 5. Использование такого шага прореживания позволяет получить в пять раз больше копий, которые отображены на рисунке с различными оттенками синего. На графике прореженного спектра наблюдается наложение исходного спектра, отмеченное заштрихованным треугольником. Такое наложение спектров оказывает негативное влияние на четкость сигнала, делая невозможным достоверное восстановление исходного сигнала. В разделе 3.2 приводится сравнение опции высокого разрешения ("High res") и режима высокой четкости (HD), а также рассматривается реальный пример.

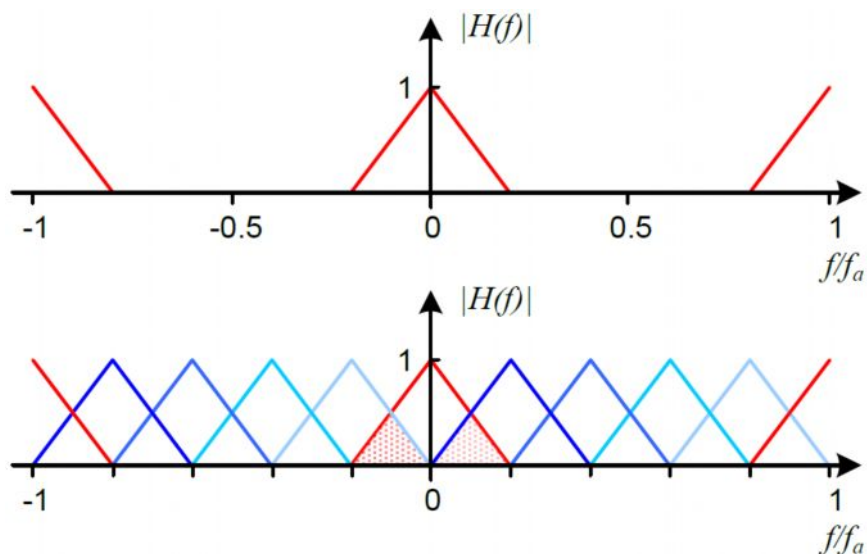


Рисунок 3-2 – Спектр в режиме "High res" без прореживания и с прореживанием

3.1.3 Усреднение осциллограммы

Усреднение осциллограммы сигнала позволяет снизить уровень шума путем усреднения каждого отчета последовательных выборок. Это общепринятый метод снижения уровня шума, позволяющий получить математическое ожидание по заданному количеству выборок. Этот метод имеет ряд ограничений. Во-первых, он применим только для периодических сигналов, таких как синусоидальные или тактовые сигналы, что ограничивает спектр применений этого метода.

Во-вторых, получение среднего значения по нескольким осциллограммам требует применения алгоритмов цифровой обработки сигналов для данных в памяти, что обычно реализуется с помощью ПО, тогда как приборы RTO и RTE поддерживают это в аппаратном виде. Процедура накопления ограничивает производительность в части скорости сбора данных, поскольку получение стабильного результата возможно лишь после полного завершения процедуры.

3.2 Сравнение HD-режима и режима "High res"

Чтобы показать различия в четкости сигнала при прореживании в режиме "High res" и работе в HD-режиме, описание которых приведено в предыдущих разделах, проведем анализ цифрового тактового сигнала с частотой 10 МГц. Это позволит наглядно продемонстрировать преимущества HD-режима.

На рисунке 3-3 отображены три осциллограммы, полученные из одного и того же тактового сигнала, который был захвачен с помощью 2 ГГц прибора RTO и 3 ГГц активного пробника (RT-ZS30). Такой полосы пропускания более чем достаточно для этого сигнала с относительно низким периодом 100 нс и временем нарастания порядка 800 пс.

Синяя осциллограмма представляет собой прореженную в режиме "High res" выборку, полученную из тактового сигнала при значении коэффициента прореживания 1:10. Красная осциллограмма – это исходная осциллограмма без применения алгоритмов цифровой обработки сигналов и с 8-битным вертикальным разрешением, на которой виден значительный уровень шума. Зеленая осциллограмма – это исходная осциллограмма с применением алгоритмов цифровой обработки сигналов в HD-режиме и шумовой полосой (500 МГц), сопоставимой с полосой в режиме "High res".

На верхнем графике отображены все три осциллограммы, которые в значительной степени совпадают. Содержимое окна масштабирования, отмеченного на рисунке 3-3 как "1", отображено на втором графике. На основании масштабированного графика можно сделать несколько важных выводов. Оба метода – прореживание в режиме "High res" (синяя) и HD-режим (зеленая) – позволяют значительно снизить уровень шума исходной осциллограммы (красная), что наблюдается в левой части масштабированного графика.

Различие между прореживанием в режиме "High res" и HD-режимом становится очевидным, если посмотреть на область "2" на рисунке 3-3. Здесь наблюдается значительный уровень низкочастотных помех на прореженной осциллограмме, полученной в режиме "High res", чего не наблюдается на исходной осциллограмме и осциллограмме, полученной в HD-режиме. Наличие этих артефактов выявляет существенный недостаток прореживания в режиме "High res", что уже обсуждалось в разделе 3.1.2.

Примененная функция масштабирования интерполирует осциллограмму при допущении отсутствия помех дискретизации в сигнале. Однако это не соответствует действительности при прореживании в режиме "High res". На участках сигнала с высокочастотными составляющими, таких как спадающий фронт в тактовых сигналах, наличие помех дискретизации в сигнале, прореженном в режиме "High res", приводит к возникновению низкочастотных помех и, как следствие, потерям в четкости сигнала. В HD-режиме этого не наблюдается, что является его несомненным преимуществом.



Рисунок 3-3 – Сравнение методов снижения уровня шума (зеленая: HD-режим; синяя: режим "High res"; красная: исходная осциллограмма)

3.3 Преимущества HD-режима в части системы запуска

В ходе обсуждения осциллографов высокого разрешения до сих пор не был упомянут тот важный факт, что повышение разрешения отображаемой осциллограммы также требует улучшения системы запуска для обеспечения эффективного и достоверного анализа.

Мерой прецизионности запуска является чувствительность по запуску, которая отражает изменение сигнала по вертикали, требуемое для запуска процедуры

сбора данных. Как правило, в технических данных чувствительность по запуску измеряется в делениях по вертикали. В большинстве осциллографов высокого разрешения увеличения чувствительности по запуску недостаточно, чтобы справиться с повышением разрешения.

В результате АЦП захватывает больше подробностей сигнала, но осциллограф не может обеспечить их устойчивого отображения вследствие недостаточной чувствительности по запуску. В разделе 4.3 будет приведен пример такой ситуации.

Чтобы разобраться в данном вопросе, подробно рассмотрим систему осциллографа. На рисунке 3-4 показано схематическое изображение осциллографа с аналоговым входным каскадом, АЦП, устройством сбора данных и памятью. Прецизионность тракта сбора данных указана на схеме между функциональными блоками. Помимо этих блоков в системе представлен блок (пост) обработки для математических и измерительных функций, а также блок отображения для проведения анализа осциллограмм.

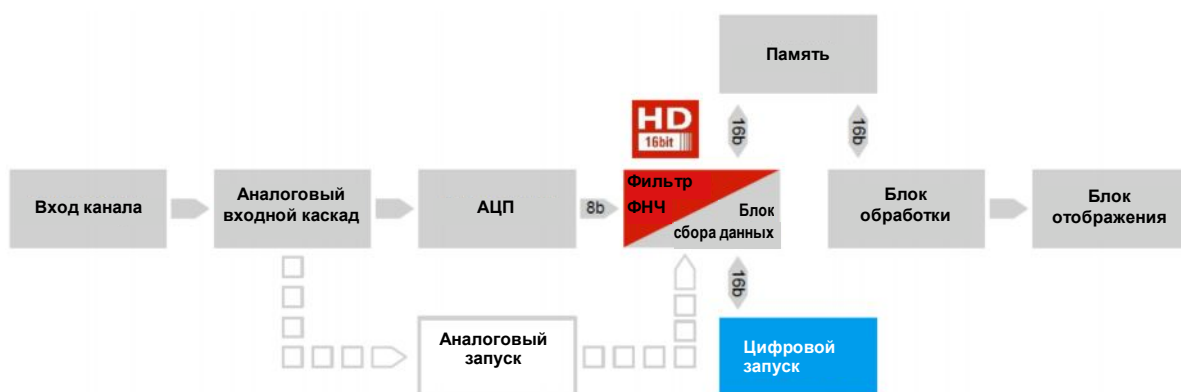


Рисунок 3-4 – Концептуальное представление системы осциллографа

В обычных осциллографах функция запуска реализована посредством аналогового запуска, что отмечено на рисунке 3-4 с помощью контурного прямоугольника. Этот тип запуска использует тот же входной сигнал, что и АЦП, но задействует другой сигнальный тракт параллельно АЦП. Различие между трактами не может быть компенсировано для всех режимов и условий работы, что приводит к повышению уровня дрожания сигнала запуска (джиттера) и отражается в рассогласовании между отображаемой осциллограммой и точкой запуска. При этом повышение разрешения АЦП не приводит к улучшениям в части блока аналогового запуска и не повышает чувствительность запуска.

В приборах RTO и RTE не используется концепция аналогового запуска; вместо этого в них реализована функция цифрового запуска (б), которая идентифицирует события запуска на основании отсчетов АЦП без применения постобработки, что отмечено на рисунке 3-4 с помощью синего прямоугольника. Снижение уровня шума при работе в HD-режиме осуществляется в блоке сбора данных, что позволяет в полной мере воспользоваться преимуществами цифрового запуска в HD-режиме в части снижения уровня шума и обеспечения исключительной чувствительностью по запуску. Кроме того, это улучшение применимо не только для простого запуска по фронту, но и для полного набора типов запуска, поддерживаемых в приборах RTO и RTE.

В таблице 2 приводится сравнение чувствительности по запуску для осциллографов традиционных архитектур при различных разрешениях и для осциллографов RTO и RTE с цифровым запуском. Здесь представлены характеристики осциллографов в части полосы частот канала и номинального разрешения, а также полосы частот запуска и чувствительности по запуску. Чтобы установить связь между чувствительностью по запуску и номинальным разрешением, в нижней строке таблицы выполнен расчет чувствительности по запуску в единицах LSB (младший разряд) вместо делений.

Таблица 2 – Чувствительность по запуску				
	RTO/RTE	Осциллографы традиционных архитектур		
Номинальное разрешение [бит]	8	8	10	12
Полоса частот канала [ГГц]	4,0/2,0	4,0	6,0	1,0
Полоса частот запуска [ГГц]	4,0/2,0	4,0	3,0	1,0
Чувствительность [дел] в полосе канала	0,04	1,0	0,4	2,0
Чувствительность [LSB]	1 ⁴	32	51 ⁵	512

Таблица наглядно демонстрирует преимущества цифрового запуска, поскольку осциллографы с соответствующей архитектурой имеют чувствительность всего 1 младший разряд (1 LSB), тогда как осциллографы с традиционной архитектурой демонстрируют значительно меньшую чувствительность по запуску. Осциллографы высокого разрешения некорректно пересчитывают чувствительность в зависимости от разрешения, что приводит к снижению чувствительности или ограничению полосы частот запуска.

Важное замечание: в отличие от HD-режима, работа в режиме "High res" не приводит к повышению чувствительности по запуску.

⁴ Справедливо для чувствительности по запуску без использования HD-режима

⁵ Полоса пропускания тракта запуска сильно ограничена по сравнению с полосой частот канала

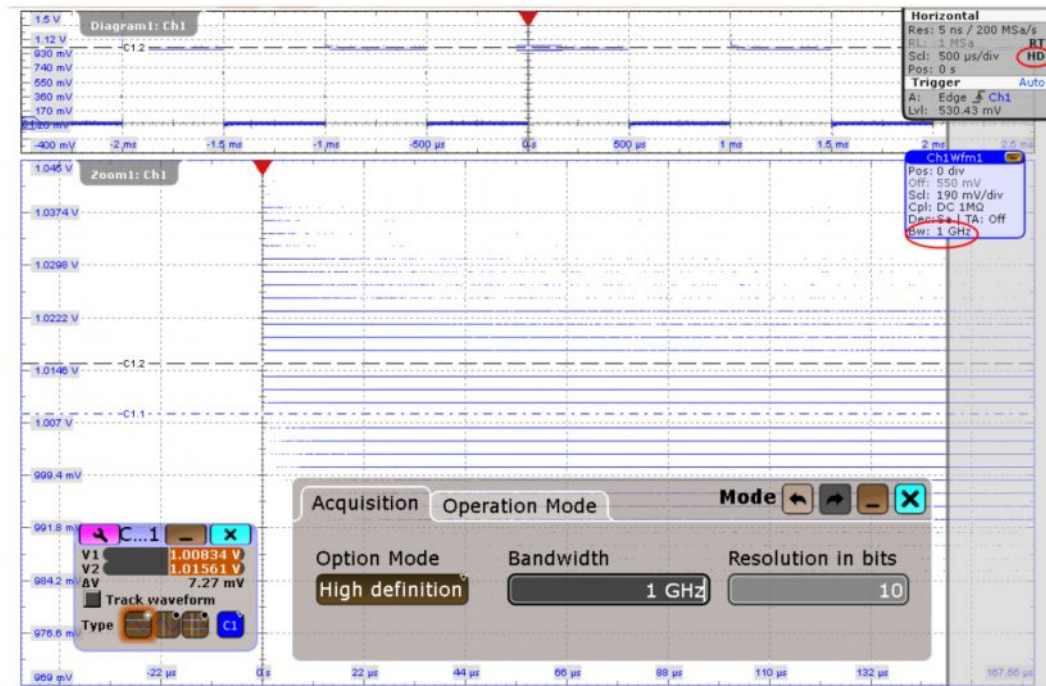


Рисунок 4-2 – Уровни квантования в режиме "HD" (высокая четкость)

4.2 Обнаружение слабых сигналов

В предыдущем разделе был рассмотрен конкретный пример, демонстрирующий повышение вертикального разрешения. Более реальным сценарием является проведение анализа сильного сигнала со слабыми помехами. Это тот самый случай, когда высокое разрешение становится особенно важным, поскольку уменьшение масштаба по вертикальной оси для проведения анализа помехи не сработает. Наличие сильного сигнала приведет к выходу осциллографа за пределы допустимого диапазона и переведет его в режим перегрузки, что сделает измерение недействительным.

На рисунке 4-3 отображен синусоидальный сигнал с частотой 5 кГц и амплитудой 1 В, и показан масштабированный график его максимума. При взгляде на снимок экрана создается впечатление, что к сигналу добавлено много шума, но сама помеха при этом видна расплывчато. В лучшем случае можно измерить уровни квантования с помощью курсора, получив значение 5,1 мВ.

В этой ситуации использование HD-режима позволяет пользователю увидеть больше подробностей сигнала (см. рисунок 4-4). Данный режим может быть выбран в меню режимов, при этом значение в поле полосы пропускания будет пошагово уменьшаться, если на графике отмечаются улучшения. При достижении полосы пропускания значения порядка 30 МГц на масштабированном графике отчетливо проявятся помехи.

Таким образом, HD-режим позволяет не только обнаруживать, но и анализировать слабые синусоидальные помехи. С помощью курсора пользователь может измерить частоту и амплитуду помехи, получив значения 1,02 МГц и 4,9 мВ, соответственно. Оба значения вполне соответствуют параметрам, используемым для формирования этого сложного сигнала. Измеренная амплитуда при этом даже меньше значения младшего разряда 5,08 мВ ($130 \text{ мВ/дел} \cdot 10 \text{ дел} / 2^8$) для номинального разрешения АЦП 8 бит!

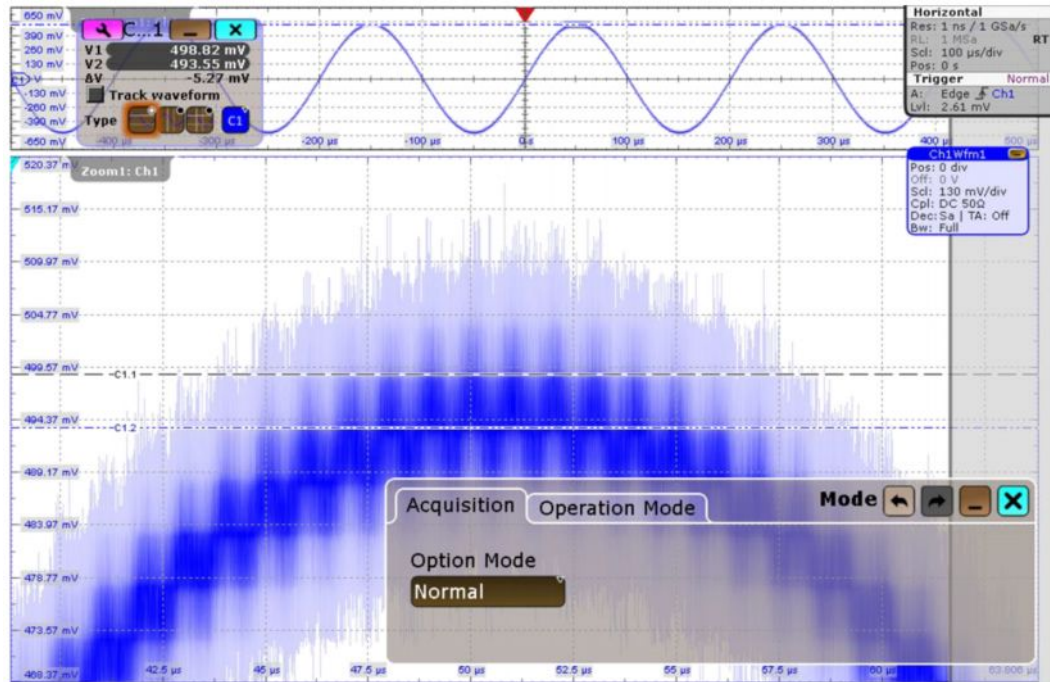


Рисунок 4-3 – Анализ сигналов с вертикальным разрешением 8 бит

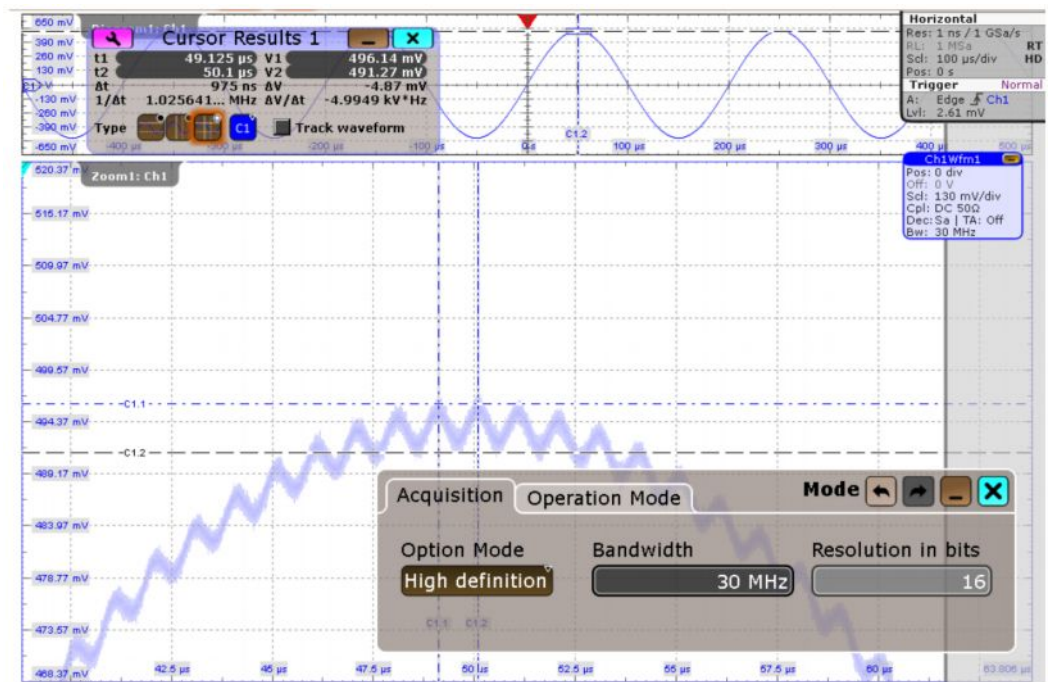


Рисунок 4-4 – Анализ сигналов в HD-режиме

4.3 Повышение чувствительности по запуску

В разделе 3.3 было отмечено повышение чувствительности по запуску при работе в HD-режиме. В этом разделе рассматривается пример, подчеркивающий эту характерную особенность HD-режима для осциллографов RTO и RTE.

На верхнем графике рисунка 4-5 показан тактовый сигнал с частотой 250 кГц, амплитудой 500 мВ и сравнительно большим временем нарастания 500 нс. На большом графике снимка экрана показано масштабированное отображение осциллограммы в области высокого уровня в окрестности точки запуска. Вертикальный диапазон окна масштабирования очень мал, поэтому возможные помехи умещаются в нем не полностью.

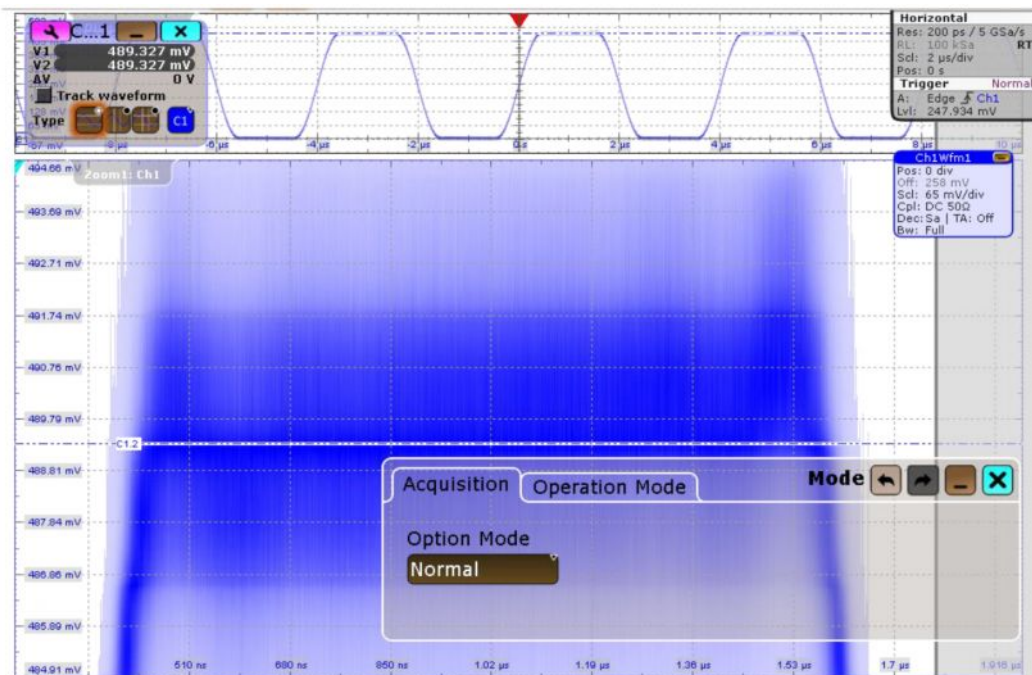


Рисунок 4-5 – Анализ тактового сигнала с частотой 250 кГц

И вновь использование HD-режима позволяет получить больше подробностей сигнала. HD-режим может быть выбран в меню режимов с сохранением настроек отображения. Выброс в верхней области высокого уровня тактового сигнала проявляется при постепенном уменьшении ширины полосы пропускания.

На рисунке 4-6 на панели сигнала показан выбранный HD-режим с заданной полосой пропускания 30 МГц. Несмотря на то, что осциллограмма на верхнем графике ничем не отличается от осциллограммы, показанной на предыдущем снимке экрана, в окне масштабирования можно увидеть измеренный курсором выброс 2 мВ в верхней области высокого уровня.

Получается, что этот выброс появляется не систематически, поскольку в окне масштабирования в режиме послесвечения можно увидеть наложение битов с выбросами и без выбросов. Вплоть до этого момента осциллограф высокого разрешения способен показывать аналогичные результаты.

При этом для изучения временных характеристик этого выброса необходимо выделить его на временной оси, выполнив запуск по соответствующему событию сигнала. Проблема заключается в том, что требуемое для этого значение чувствительности должно быть чрезвычайно низким. Оно определяется разностью между максимальным значением высокого уровня бита без выброса и минимальным пиковым значением выброса. Измеренная амплитуда 2 мВ меньше значения младшего разряда 2,5 мВ 8-битового АЦП ($65 \text{ мВ/дел} \cdot 10 \text{ дел} / 2^8$).

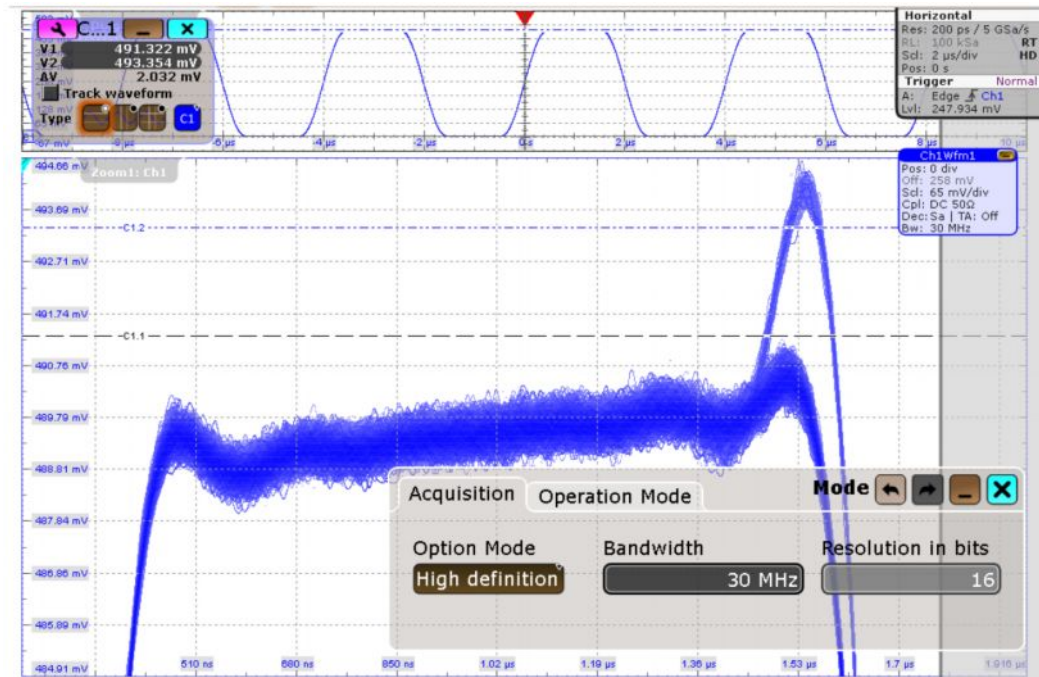


Рисунок 4-6 – Анализ тактового сигнала с частотой 250 кГц в HD-режиме

Использование функции цифрового запуска осциллографов RTO и RTE позволяет повысить разрешение в HD-режиме, что недостижимо при работе с традиционными осциллографами высокого разрешения. В случае рассматриваемого тактового сигнала функция цифрового запуска осциллографов RTO и RTE позволяет выделить выброс на фоне остальных битов и отобразить осциллограмму без наложения различных битов.

Для отдельного отображения выброса (глитча) уровень запуска, который до этого находился посередине сигнала на значении 248 мВ, был смещен на значение 492 мВ, то есть прямо в середину выброса между двумя курсорами (см. красную пунктирную линию на рисунке 4-7). Кроме того, гистерезис запуска был снижен до нуля для обеспечения надежного запуска по выбросу. Обе эти меры – произвольное конфигурирование гистерезиса запуска и чувствительность ниже одного младшего разряда АЦП – могут быть предприняты только при использовании цифрового запуска и являются отличительной чертой осциллографов RTO и RTE.

На рисунке 4-7 показан полученный результат. Благодаря выдающейся чувствительности осциллографы RTO и RTE обеспечивают надежность запуска даже по слабым выбросам. Однако в примере с выбросом в области высокого уровня на -85 нс это приведет к появлению искаженной наложенной осциллограммы на верхнем графике. Таким образом, осциллограф не пропустит ни одной осциллограммы, так как частота обновления осциллограммы находится в том же диапазоне, что и при предыдущих настройках с уровнем запуска 248 мВ.

При использовании режима архивирования или второго окна масштабирования (см. рисунок 4-8) пользователь может наблюдать эти помехи лишь на каждом 17-м импульсе. Период появления выбросов отмечен красной стрелкой на рисунке 4-8. На основании этих сведений может быть выполнен более подробный анализ для прослеживания связи такого поведения с другими компонентами цепи.

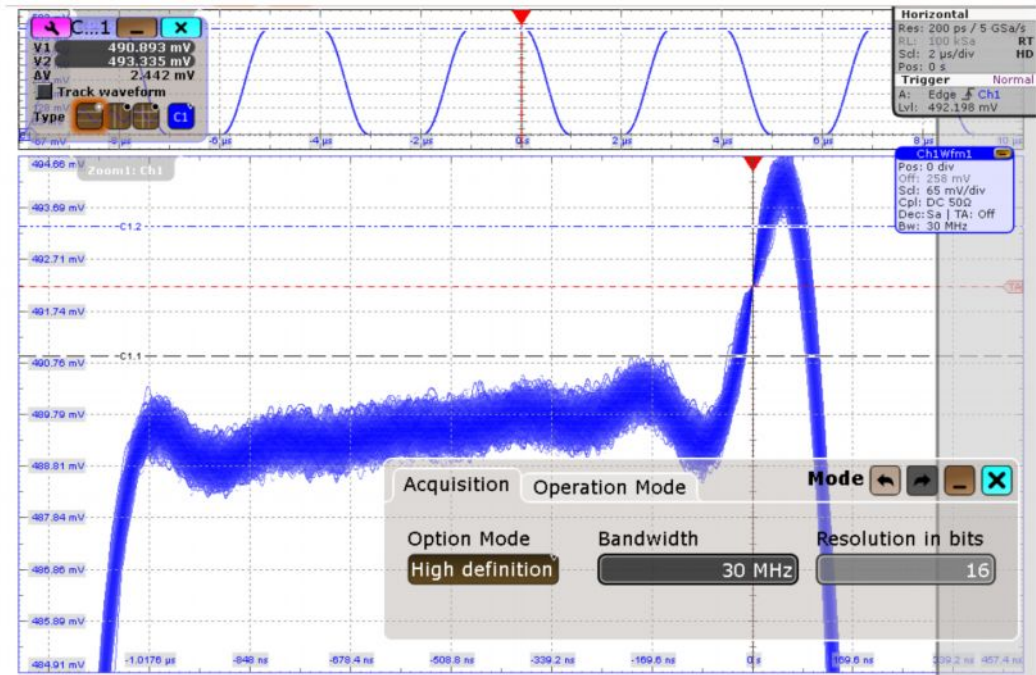


Рисунок 4-7 – Анализ сигналов с запуском по событию сигнала

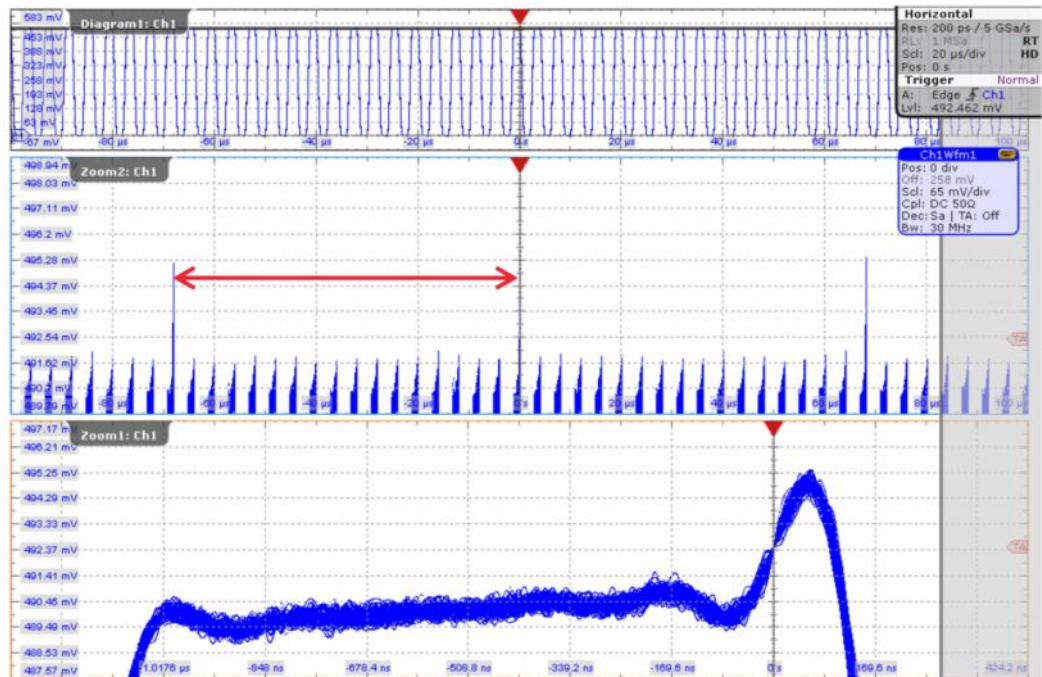


Рисунок 4-8 – Анализ сигналов с отображением повторяющейся помехи

5 Заключение

Опция высокой четкости K17 для приборов RTO и RTE – это прекрасный инструмент для повышения вертикального разрешения осциллографов до 16 бит. С помощью этой опции пользователь может проводить анализ, например, импульсных источников питания (7) и амплитудно-модулированных радиосигналов, а также выполнять анализ джиттера. Такие варианты применения требуют использования быстродействующих осциллографов среднего разрешения (как в случае анализа джиттера), а также осциллографов высокого разрешения и среднего быстродействия. Теперь все эти виды анализа могут быть проведены с помощью одного осциллографа.

Повышенное разрешение, полученное в результате применения алгоритмов цифровой обработки сигналов, требует использования высокопроизводительного аналогового входного каскада в сочетании с АЦП, эффективная разрядность (ENOB) которого близка к номинальному разрешению. Осциллографы RTO и RTE в полной мере соответствуют этим требованиям. Это действительно важно, поскольку повышение разрешения влечет за собой увеличение разрядности ENOB, а не номинального разрешения АЦП.

Преимущества использования HD-режима не ограничиваются лишь повышением вертикального разрешения. Благодаря функции цифрового запуска приборы RTO и RTE позволяют воспользоваться всеми преимуществами повышенного разрешения и стабильности запуска даже по незначительным событиям сигналов, что недостижимо при работе с осциллографами традиционной архитектуры. Более того, эта опция позволяет достичь более высокой частоты дискретизации, демонстрирует отсутствие помех дискретизации, не препятствует выполнению прореживания для обеспечения экономичности использования памяти собранных данных и оптимизирует длительность сбора данных.

Благодаря универсальности и поддержке широкого спектра приложений осциллографы RTO и RTE в сочетании с опцией высокой четкости K17 могут оказаться более подходящим решением, чем традиционные осциллографы высокого разрешения.

6 Библиография

1. *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results -- Part 1: General principles and definitions*. Geneva, Switzerland : ISO, 1994. 5725-1.
2. **Society, IEEE Instrumentation and Measurement**. *IEEE Standard for Digitizing Waveform Recorders*. NY : IEEE Instrumentation & Measurement Society, 2001. IEEE Std 1057.
3. **John G. Proakis, Dimitris G. Manolakis**. *Digital Signal Processing*. Upper Saddle River, New Jersey 07458 : Prentice-Hall, Inc., 2007.
4. *Analog-to-Digital Converter Survey and Analysis*. **Walden, Robert H.** 4, New York : IEEE, 1999, IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, Bd. 17.
5. **Society, IEEE Instrumentation & Measurement**. *IEEE Standard for Terminology and Test Methods for Analog-to-Digital Converters*. NY : IEEE Instrumentation & Measurement Society, 2011. IEEE Std 1241™-2010.
6. **Guido Schulze, Dr. Markus Freidhof**. *Benefits of the R&S® RTO Oscilloscope's Digital Trigger*. Munich : Rohde & Schwarz Application Note, 2012. 1ER04_0e.
7. **Barry Rowland**. *Initial Evaluation of a DC/DC Switch Mode Power Supply*. Munich : Rohde & Schwarz Application Note, 2013. 1TD04_0e.

7 Информация для заказа

Наименование	Тип устройства	Код заказа
Цифровые осциллографы		
600 МГц, 2 канала 10 млрд отсч./с, 20/40 млн отсч.	R&S®RTO1002	1316.1000.02
600 МГц, 4 канала 10 млрд отсч./с, 20/40 млн отсч.	R&S®RTO1004	1316.1000.04
1 ГГц, 2 канала 10 млрд отсч./с, 20/40 млн отсч.	R&S®RTO1012	1316.1000.12
1 ГГц, 4 канала 10 млрд отсч./с, 20/80 млн отсч.	R&S®RTO1014	1316.1000.14
2 ГГц, 2 канала 10 млрд отсч./с, 20/40 млн отсч.	R&S®RTO1022	1316.1000.22
2 ГГц, 4 канала 10 млрд отсч./с, 20/80 млн отсч.	R&S®RTO1024	1316.1000.24
4 ГГц, 4 канала 20 млрд отсч./с, 20/80 млн отсч.	R&S®RTO1044	1316.1000.44
200 МГц, 2 канала 5 млрд отсч./с, 10/20 млн отсч.	R&S®RTE1022	1326.2000.22
200 МГц, 4 канала 5 млрд отсч./с, 10/40 млн отсч.	R&S®RTE1024	1326.2000.24
350 МГц, 2 канала 5 млрд отсч./с, 10/20 млн отсч.	R&S®RTE1032	1326.2000.32
350 МГц, 4 канала 5 млрд отсч./с, 10/40 млн отсч.	R&S®RTE1034	1326.2000.34
500 МГц, 2 канала 5 млрд отсч./с, 10/20 млн отсч.	R&S®RTE1052	1326.2000.52
500 МГц, 4 канала 5 млрд отсч./с, 10/40 млн отсч.	R&S®RTE1054	1326.2000.54
1 ГГц, 2 канала 5 млрд отсч./с, 10/20 млн отсч.	R&S®RTE1102	1326.2000.52
1 ГГц, 4 канала 5 млрд отсч./с, 10/40 млн отсч.	R&S®RTE1104	1326.2000.64
1.5 ГГц, 2 канала 5 млрд отсч./с, 10/20 млн отсч.	R&S®RTE1152	1326.2000.72
1.5 ГГц, 4 канала 5 млрд отсч./с, 10/40 млн отсч.	R&S®RTE1154	1326.2000.74
2 ГГц, 2 канала 5 млрд отсч./с, 10/20 млн отсч.	R&S®RTE1202	1326.2000.82
2 ГГц, 4 канала 5 млрд отсч./с, 10/40 млн отсч.	R&S®RTE1204	1326.2000.84
Программные опции		
Опция высокой четкости	R&S®RTO-K17	1326.0536.02
Опция высокой четкости	R&S®RTE-K17	1326.0542.02

О компании Rohde & Schwarz

Rohde & Schwarz представляет собой независимую группу компаний, специализирующуюся на производстве электронного оборудования. Rohde & Schwarz является ведущим поставщиком контрольно-измерительных систем и приборов, оборудования для теле- и радиовещания, систем радиомониторинга и радиопеленгации, а также систем профессиональной радиосвязи специального назначения. Rohde & Schwarz успешно работает уже 75 лет, представительства и сервисные центры компании находятся в более чем 70 странах. Головной офис компании расположен в Мюнхене, Германия.

Представительство в Москве:

115093 Москва, ул. Павловская, 7, стр.1, этаж 5
тел. +7 (495) 981 35 60, факс +7 (495) 981 35 65
info.russia@rohde-schwarz.com
www.rohde-schwarz.ru

Контакты в регионах

Европа, Африка, Ближний Восток
+49 89 4129 12345

customersupport@rohde-schwarz.com

Северная Америка
1-888-TEST-RSA (1-888-837-8772)
customer.support@rsa.rohde-schwarz.com

Латинская Америка
+1-410-910-7988
customersupport.la@rohde-schwarz.com

Азия/Тихий океан
+65 65 13 04 88
customersupport.asia@rohde-schwarz.com

Китай
+86-800-810-8228 / +86-400-650-5896
customersupport.china@rohde-schwarz.com

Обязательства по охране окружающей среды

- Энергосберегающие изделия
- Постоянное улучшение экологической устойчивости
- Сертифицированная система экологического менеджмента ISO 14001



Данный документ и поставляемые программы могут применяться только при соблюдении условий, изложенных в области загрузки веб-сайта Rohde & Schwarz.

R&S® является зарегистрированным товарным знаком компании Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG. Товарные знаки и торговые марки принадлежат соответствующим владельцам.

Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG

Mühlendorfstraße 15 | D - 81671 München

Тел. + 49 89 4129 - 0 | Факс + 49 89 4129 - 13777

www.rohde-schwarz.com