

ЭФФЕКТИВНОЕ ЧИСЛО БИТОВ (ENOB) ЦИФРОВОГО ОСЦИЛЛОГРАФА R&S

THE EFFECTIVE NUMBER OF BITS (ENOB) OF R&S DIGITAL OSCILLOSCOPE

Доктор Эндрю Шефер (Dr Andrew Schaefer)

Параметр эффективное число битов (ENOB — effective number of bits) служит для измерения качества аналого-цифрового преобразования. Чем выше значение ENOB, тем более точно воспроизводятся уровни напряжения, зарегистрированные при аналого-цифровом преобразовании.

В осциллографе параметр ENOB определяется не только качеством аналого-цифрового преобразования, но и прибором в целом. В настоящей статье описан способ измерения ENOB осциллографа и показаны результаты такого измерения для осциллографа R&S® RTO при различных настройках.

АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И ENOB ИДЕАЛЬНЫЙ АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Простейшая схема идеального аналого-цифрового преобразователя (АЦП) показана на рисунке 1.

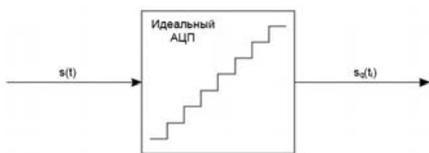


Рис. 1. Схема идеального аналого-цифрового преобразователя

Идеальный аналого-цифровой преобразователь обладает идеальной линейной характеристикой и просто квантует входящий сигнал. Процесс квантования порождает шум квантования. Используя мощность сигнала и мощность шума, можно получить отношение сигнал-шум (SNR — signal to noise ratio) для сигнала после аналого-цифрового преобразования. Если на входе используется синусоид с предельным для АЦП значением амплитуды, то отношение SNR можно записать как

$$\text{SNR} = 1,5 \times 2^{2B} \quad (\text{Уравнение 1}).$$

Здесь B обозначает число битов АЦП.

Выражая уравнение в дБ, получаем,

$$\text{SNR}_{\text{дБ}} \approx 1,76 + 6,02B \text{ дБ} \quad (\text{Уравнение 2}).$$

Перепирав уравнение для B , получим

$$B \approx (\text{SNR}_{\text{дБ}} - 1,76)/6,02 \quad (\text{Уравнение 3}).$$

Уравнения 1–3 показывают, как из отношения сигнал-шум может быть получено число битов B , и служат основой для вычисления пара-



RONDE & SCHWARZ

метра ENOB. В случае идеальных АЦП результатом для B всегда будет положительная целая величина. В случае неидеальных АЦП, которые будут рассмотрены далее, B может быть любым положительным действительным числом.

НЕИДЕАЛЬНЫЕ АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Идеальных АЦП не существует. Каждый АЦП вносит искажения во входной сигнал. Типичные искажения — это шум, нелинейная входная характеристика, а так же погрешности усиления и смещения. Модель нелинейного АЦП показана на рисунке 2.

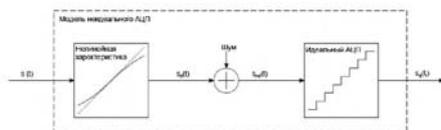


Рис. 2. Модель неидеального аналого-цифрового преобразователя

Шум напрямую вносит вклад в ухудшение отношения SNR для АЦП. Нелинейность входной характеристики приводит к появлению гармоник, которые так же понижают достигнутое отношение SNR. Так, 12-битный АЦП может характеризоваться параметром ENOB, равным 10,5. Это означает, что хотя выходная разрядность АЦП и равна 12, достигаемое отношение SNR соответствует идеальному АЦП с разрядностью 10,5 бит.

В зависимости от конструкции АЦП, параметр ENOB также может зависеть от входной частоты. Высокие частоты могут приводить к большей нелинейности в цепи, что ухудшает ENOB. Таким образом, подробное техническое описание АЦП обычно включает зависимость параметра ENOB от входной частоты.

ВХОДНОЙ КАСКАД

В осциллографе, для достижения наилучшего режима его использования, требуются дополнительные элементы на входе АЦП. Эти элементы схематично показаны на рисунке 3. Первым идет усилитель с переменным коэффициентом усиления (VGA), ко-

торый масштабирует входной сигнал для оптимального использования динамического диапазона АЦП. Вторым идет сглаживающий фильтр низких частот. Оба компонента вносят дополнительные искажения во входные сигналы. VGA состоит из активных компонентов и вносит в сигнал нелинейные компоненты, а также обладает частотной зависимостью. Влияние аналогового фильтра менее критично, но он также обладает неидеальной частотной характеристикой. Хорошая конструкция входного каскада минимизирует отрицательные воздействия на входной сигнал.

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРА ENOB

Терминология и методы испытания АЦП определены институтом IEEE в стандарте [1]. Стандарт содержит следующее определение параметра ENOB $\text{ENOB} = 0,5 \log_2(\text{SINAD}) - 0,5 \log_2(1,5) - \log_2(A/V)$ (Уравнение 4).

Применяются следующие определения: V — предельный диапазон для испытываемого устройства (ИУ); A — размах гармонического сигнала с учетом выхода; SINAD — отношение сигнала к шуму и искажениям.

В данном документе отношение SINAD определяется как

$$\text{SINAD} = P_s / P_{\text{NAD}} \quad (\text{Уравнение 5}).$$

Применяются следующие определения: P_s — мощность сигнала; мощность бина БПФ в соответствии с входной частотой; P_{NAD} — мощность шума и искажений; сумма мощностей во всех остальных частотных бинах, исключая нулевой частотный бин, вплоть до (включая) бина с частотой Найквиста.

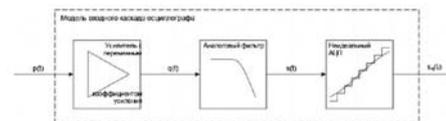


Рис. 3. Упрощенная модель входного каскада осциллографа

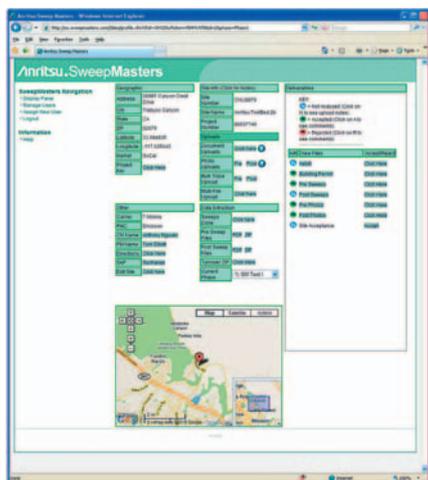
Здесь стоит заметить, что SNR и SINAD, согласно определению в [1], являются отношениями среднеквадратических величин, а не отношениями значений мощности, которое, например, типично для техники связи. В данном документе для измерений обеих величин единообразно используются отношения значений мощности.

НОВОСТИ на www.kipis.ru

КОМПАНИЯ ANRITSU ВНЕДРЯЕТ ВЕБ-ИНТЕРФЕЙС ДЛЯ ПОРТАТИВНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ

Компания Anritsu представила Sweep Master — программное приложение с веб-интерфейсом, предназначенное для повышения эффективности и качества при развертывании, установке и обслуживании беспроводных сетей. Приложение предназначено для работы с анализаторами кабелей и антенн серии Site Master™, портативными анализаторами спектра Spectrum Master™ и анализаторами базовых станций BTS Master™.

Измерения, которые могут быть отслежены с помощью Sweep Master, включают обратные потери, потери в кабеле, расстояние до места повреждения (DTF), пассивную интермодуляцию (PIM) и расстояние до PIM.



Sweep Master имеет уникальную систему массовой загрузки (Bulk Upload), которая позволяет пользователям загружать и обрабатывать целые папки результатов отслеживания. В результате, около 190 отдельных результатов могут быть обработаны и доступны для онлайн просмотра менее чем за одну минуту.

Sweep Master поставляется в двух версиях. Sweep Master Pro позволяет полевым инженерам отслеживать параметры кабелей, антенн и PIM через защищенный паролем веб-сайт. Sweep Master Pro автоматически расставляет маркеры и предельные линии, а также помечает результаты тестирования маркером прошел / не прошел. Подобная маркировка включает в себя простановку красного/зеленого флажка для ускорения работы с проектом. Sweep Master Pro+ имеет все возможности версии Pro и добавляет инструменты управления документооборотом и отчетностью. Pro+ упрощает управление проектом, сокращает время его развертывания, а также значительно облегчает ведение отчетности.

www.anritsu.com

В [1] определены методы для вычисления SINAD с помощью анализа во временной или частотной области. Для простоты, в данной статье сделан упор на анализе в частотной области. Правильный выбор частоты измерения описан в следующем разделе. Затем, для вычисления значений P_s и P_{NAD} , согласно их определению, используется быстрое преобразование Фурье (БПФ).

ВЫБОР АМПЛИТУДЫ

В стандарте IEEE входная амплитуда для измерения параметра ENOB точно не определена. Согласно [1] может быть использована любая входная амплитуда, так как в определении ENOB учитывается разница между предельной амплитудой и фактической амплитудой измерения (см. последнее слагаемое уравнения 4).

Существует две возможности учета амплитуды.

1. Параметр ENOB определен для отдельной входной амплитуды. По общим техническим условиям ENOB измеряется при 90% или 95% от предельного входного значения. При использовании определения из уравнения 4, ENOB становится лучше с уменьшением входной амплитуды, потому что на измерение, в действительности, влияют только нелинейности вплоть до амплитуды измерения.

2. Нормирование амплитуды в уравнении 4 опускается, и измерение параметра ENOB основывается только на отношении SINAD. При использовании данного метода оптимальная рабочая точка испытываемой системы может быть найдена как наилучший компромисс между входной мощностью и искажением из-за нелинейностей. Т.к. данное определение не соответствует официальному определению ENOB, в разделе результатов оно обозначается как ENOB*.

Следует отметить, что параметр ENOB* более практичен при разработке и испытании измерительной системы. Параметр напрямую соответствует наблюдаемому в измерительном устройстве качеству сигнала.

Мера ENOB служит основой для сравнения различных систем, а также является единственным полезным эталоном в их совместном анализе и указании входной амплитуды, при которой проводилось измерение.

ВЫБОР ЧАСТОТЫ

Входная частота должна быть выбрана так, чтобы точно заполнять частотный бин БПФ. Это эквивалентно высказыванию, что дискретная последовательность должна включать в себя только полные периоды измерительного сигнала. Такое требование важно в целях исключения любых оконных эффектов, которые сделают измерение излишне сложным.

Далее, для получения надежных результатов, должно быть дискретизировано как можно большее количество фаз входного сигнала, и должны быть задействованы все выходные коды АЦП. С использованием обозначений из раздела 5.4.1 [1] оптимальные частоты измерения задаются как

$$f_{opt} = f_s \cdot J / M \text{ (Уравнение 6)},$$

где: f_{opt} — полезная частота измерения для вычисления ENOB; f_s — частота дискретизации ИУ; M — число отсчетов в тестовой последовательности; J — число периодов входного сигнала в тестовой последовательности. Оно должно быть целым взаимно простым к M .

Быть взаимно простым числом означает не иметь общих множителей. Например, 100 (множители 2 и 5) взаимно простое к 9 (множитель 3), но не к 15 (множители 3 и 5). В следующих измерениях используются только частоты, которые могут быть получены из уравнения 6.

ВЫБОР ЧИСЛА ОТСЧЕТОВ

В [1] определена минимальная длина последовательности

$$M = \pi \cdot 2^B \text{ (Уравнение 7)}.$$

Для следующих измерений было использовано круглое число 10000, которое удовлетворяет данному условию. Данное условие гарантирует высокую плотность дискретизированных фаз измерительного сигнала, и, таким образом, обеспечивает надежные результаты.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В осциллографах R&S RTO используется 8-битный АЦП, спроектированный для достижения большого динамического диапазона, то есть больших значений ENOB. Как показано в [2], параметр ENOB данного АЦП выше 7 для диапазона входных частот вплоть до 4 ГГц. Итоговая динамическая характеристика осциллографа к тому же зависит от конструкции аналогового входного каскада. В данной главе описана процедура измерения, а также обсуждаются ее результаты.

Схема соединения измерительного оборудования показана на рисунке 4.



Рис. 4. Схема соединения измерительного оборудования

Для генерации измерительного сигнала используется генератор сигналов R&S®SMA100A. Генератор R&S®SMA100A предназначен для гармоник с уровнем менее 30 дБн. Для снижения влияния данных гармоник на измерения параметра ENOB выход

R&S®SMA фильтруется переключаемым аналоговым ФНЧ.

Следующий прибор в цепи измерения — испытываемое устройство (ИУ). В качестве примера испытываются цифровые осциллографы R&S®RTO1024 (2 ГГц, 4 канала) и R&S®RTO1012 (1 ГГц, 2 канала). Осциллограф R&S®RTO1024 снабжен опцией ОСХО (кварцевый генератор с термостабилизацией) R&S®RTO-B4. Данная опция содержит порт для входного опорного сигнала, который подается с генератора R&S®SMA100A. Осциллограф R&S®RTO1012 был испытан без внешнего источника опорной частоты.

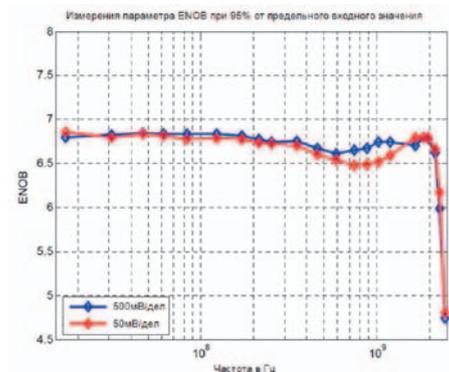


Рис. 5. Результаты измерения параметра ENOB при 95% от предельного входного значения и при чувствительности 500 и 50 мВ/дел (R&S®RTO1024)

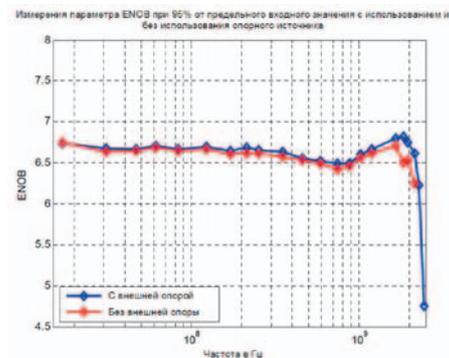


Рис. 6. Результаты измерения параметра ENOB при 95% от предельного входного значения и при чувствительности 50 мВ/дел с использованием и без использования источника опорной частоты R&S®ОСХО (R&S®RTO1024)

Для передачи сигналов между устройствами были использованы высококачественные кабели. В противном случае линии передачи также могли стать источником искажений.

Наконец, для дистанционного управления приборами, а также для чтения и оценки полученных данных от R&S®RTO используется ПК с установленным ПО MATLAB.

НАСТРОЙКИ ОСЦИЛЛОГРАФА R&S®RTO

В осциллографе R&S®RTO установлена частота дискретизации 10 млрд. отсчетов/с (интерполяция и децимация отсутствуют), соответствующая разрешению 100 пс. В дальней-

шем используется длина записи в 10000 отсчетов, достаточная для проведения точных измерений.

ДИСТАНЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ MATLAB

Поддержка дистанционного управления (ДУ) — очень полезная функция осциллографа R&S®RTO. С ее помощью можно проводить измерения с высокой степенью автоматизации.

Например, для ENOB при 95% от предельного значения, следует провести измерение в отдельном диапазоне частот. Точный выходной уровень генератора R&S®SMA100A зависит от выходной частоты. К тому же, переключаемый ФНЧ не свободен от пульсаций, а осциллограф R&S®RTO имеет свою собственную частотную характеристику. Используя ДУ через сценарий MATLAB, выходная амплитуда генератора R&S®SMA подстраивается до 95% от предельного значения входного сигнала на каждой частоте измерения.

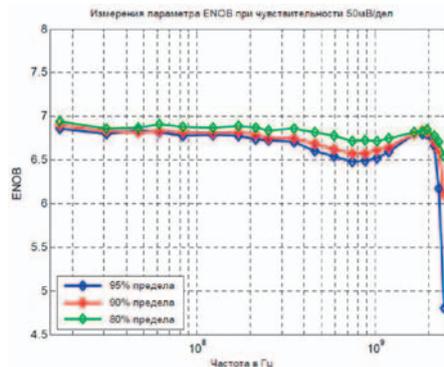


Рис. 7. Результаты измерения ENOB при чувствительности 50 мВ/дел и при различных предельных входных значениях. Разницы амплитуд компенсируются при вычислении ENOB, что приводит к лучшим результатам для низких входных амплитуд. Это происходит из-за того, что на входной сигнал влияет меньше нелинейностей системы (R&S®RTO1024)

Для получения дополнительной информации о дистанционном управлении прибором R&S®RTO см. [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Если не указано иное, все результаты были получены с использованием опции ОСХО для частотной синхронизации осциллографа R&S®RTO с генератором R&S®SMA.

На рисунке 7 показаны измерения параметра ENOB для различных предельных входных значений. Как и ожидалось, результаты, вычисленные с помощью уравнения 4, дают лучшие значения ENOB для более низких входных амплитуд. Это происходит из-за того, что ввиду низких входных амплитуд в системе измеряется меньшее количество нелинейностей.

Пропуская нормирование, получают результаты для ENOB*, показанные

на рисунке 8. Данные результаты напрямую зависят от значения SINAD.

Измерения для осциллографа R&S®RTO1012 были проведены при 95% от предельного входного значения без опции R&S®ОСХО. Следует отметить, что ширина полосы R&S®RTO1012 составляет 1 ГГц и у него 2 входных канала.

БЫСТРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НЕПОСРЕДСТВЕННО НА R&S®RTO

Приблизительные результаты измерения параметра ENOB могут быть также получены непосредственно на осциллографе R&S®RTO с помощью функции БПФ.

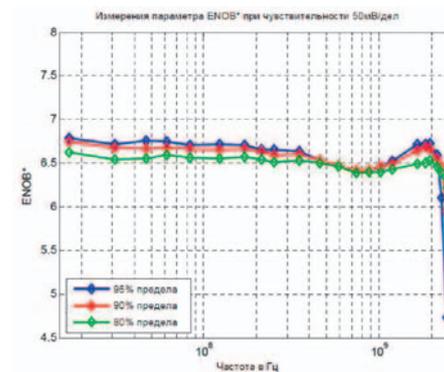


Рис. 8. Результаты измерения параметра ENOB* при чувствительности 50 мВ/дел и при различных предельных входных значениях. Значение ENOB* не компенсирует разницу входных амплитуд и зависит только от отношения SINAD

В следующем примере была использована частота измерений 107 МГц, частота дискретизации 10 млрд. отсчетов/с, длительность записи 10000 отсчетов.

На снимке экрана, показанном на рисунке 10, можно видеть следующее:

На диаграмме 1 показан захваченный сигнал.

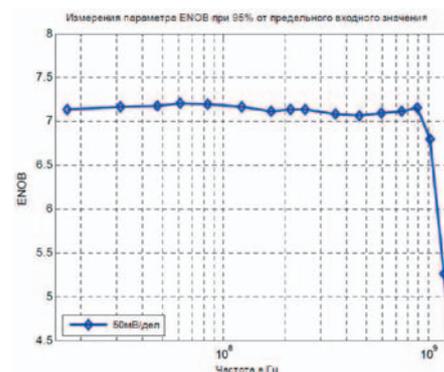


Рис. 9. Результаты измерения ENOB при чувствительности 50 мВ/дел для R&S®RTO1012 (полоса 1 ГГц, 2 канала)

Измерение Measurement 1 подтверждает, что входной сигнал чуть больше 95% от предельного входного значения. В данном случае предельное значение равно 500 мВ, а 95% от предельного значения составляет 475 мВ.

На диаграмме 2 показано БПФ входного сигнала в диапазоне частот от 0 Гц до 5 ГГц.

Измерение Measurement 2 показывает мощность сигнала в пределах диапазона от 120 МГц до 5 ГГц, что приблизительно равно -45,4 дБмВт.

Измерение Measurement 3 показывает мощность сигнала в диапазоне частот от 90 МГц до 120 МГц, что приблизительно равно -2,45 дБмВт.

Используя уравнение 4, получаем:

$$\text{ENOB} = 0,5 \log_2(10^{(-2,45 - (-45,4))/10}) - 0,5 \log_2(1,5) - \log_2(0,95) = 7,13 - 0,29 - (-0,074),$$

что дает значение ENOB приблизительно равное 6,9.

Хотя данные результаты соответствуют измерениям, сделанным с использованием MATLAB, следует быть осторожными по следующим причинам.

Во-первых, наиболее точные результаты измерения ENOB получаются, когда длина БПФ в точности равна длине записи, что легче всего делается в среде MATLAB. В данной схеме измерения, непосредственно на R&S®RTO, это не так. Это происходит из-за того, что функция БПФ R&S®RTO оптимизируется по скорости, а не по произвольной настройке длины БПФ. Это также объясняет, почему мощность сигнала была измерена в диапазоне частот от 90 до 120 МГц, соответствующем основному лепестку сигнала.



Рис. 10. Снимок экрана при измерении значения ENOB непосредственно на RTO

Во-вторых, поскольку упор был сделан на быстрое получение результатов, было пропущено измерение мощности шума в диапазоне от 0 до 90 МГц. Включение данного измерения могло бы привести к кардинальному ухудшению значения ENOB.

На рисунках 11 и 12 показаны экраны с настройками для получения результатов измерения мощности Measurement 2 и Measurement 3.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты измерений показывают, что для осциллографа R&S®RTO1024 величина ENOB значительно превышает 6,4 во всей 2 ГГц полосе прибора. Для осциллографа R&S®RTO1012 во всей 1 ГГц полосе прибора значение ENOB превышает 6,7, а до частот приблизительно 900 МГц значение ENOB достигает 7,1. Данные эксперименты

продемонстрировали несколько интересных эффектов, которые следует объяснить.

В ЧЕМ ПРИЧИНА ПРОСЕДАНИЯ ENOB В ДИАПАЗОНЕ 400 МГц ... 1 ГГц?

В каждом измерении на вышеприведенных рисунках существует провал в значениях ENOB на частотах от 400 МГц до 1 ГГц. Причина этого в том, что VGA порождает более сильные гармоники с более высокими входными частотами. ENOB возрастает вновь для входных сигналов выше 1 ГГц, потому что гармоники данных сигналов ослаблены в ФНЧ входного каскада R&S®RTO. Таким образом, ENOB снова улучшается.

ЧТО ПРОИСХОДИТ С ENOB ПОСЛЕ НОМИНАЛЬНОЙ ПОЛОСЫ ЧАСТОТ?

Номинальная полоса пропускания осциллографа R&S®RTO1024 менее 2 ГГц, а осциллографа R&S®RTO1012 менее 1 ГГц. Выше



Рис. 11. Экран настройки стробируемого измерения шума и мощности искажения (Measurement 2)

определенной частоты входные сигналы ослабляются НЧ-фильтрами входного каскада. Достижение 95% от предельного входного значения на экране осциллографа означает перегрузку VGA входным сигналом, что приводит к появлению чрезвычайно значительных гармонических составляющих, ввиду чего значение ENOB ухудшается.

ДЕЙСТВИТЕЛЬНО ЛИ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПЦИИ R&S®ОСХО НЕОБХОДИМО?

Для получения наиболее надежных результатов необходимо использовать внешний источник опорной частоты опции R&S®ОСХО. Тем не менее, хорошие приблизительные результаты могут быть получены и без нее, см. рисунок 6 (разница всего в 0,05 бита).

ВЛИЯНИЕ АМПЛИТУДЫ ВХОДНОГО СИГНАЛА

На рисунке 5 показано, что провал ENOB между 400 МГц и 1 ГГц для вертикальной шкалы в 500 мВ/дел меньше, чем для 50 мВ/дел. Это происходит из-за того, что VGA приходится усиливать меньше для большего входного сигнала. В результате образуется меньшее число гармоник,

а, значит, обеспечивается лучшее значение ENOB.

ENOB БОЛЕЕ 7 ДЛЯ R&S®RTO1012!

На рисунке 9 показано, что для осциллографа R&S®RTO1012 (с номинальной полосой до 1 ГГц) значение ENOB приблизительно равно 7,1 вплоть до частоты около 900 МГц.



Рис. 12. Экран настройки стробируемого измерения мощности сигнала (Measurement 3)

Оно слегка проседает до 6,75 на частоте 1 ГГц. Почему данный результат лучше, чем результат для R&S®RTO1024? В обоих устройствах дискретизация производится со скоростью 10 млрд. отсчетов/с, разница заключается в полосе пропускания прибора. Осциллограф R&S®RTO1012 в своей небольшой полосе пропускания 1 ГГц (полоса пропускания R&S®RTO1024 составляет 2 ГГц) эффективно дискретизирует меньше шума и гармоник, что приводит к лучшему значению ENOB.

ЛИТЕРАТУРА

1. IEEE Standard for Terminology and Test Methods for Analog-to-Digital Converters, IEEE Standard 1241-2010;
2. Цифровые запоминающие осциллографы R&S®RTO, Вершина искусства, брошюра изделия;
3. Цифровые запоминающие осциллографы R&S®RTO, Справочник команд дистанционного управления. ☑

The effective number of bits (ENOB) is a way of quantifying the quality of an analog to digital conversion. A higher ENOB means that voltage levels recorded in an analog to digital conversion are more accurate. In an oscilloscope the ENOB is not just determined by the quality of the analog to digital converter but by the instrument as a whole. This article explains how to measure the oscilloscope ENOB and shows results for the R&S®RTO for different settings.