

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРОГРАММНОГО I/Q-ИНТЕРФЕЙСА ОСЦИЛЛОГРАФА R&S® RTO В ПАКЕТЕ MATLAB®

HOW TO UTILIZE THE I/Q SOFTWARE INTERFACE OF THE R&S® RTO OSCILLOSCOPE WITH MATLAB®

Рафаэль Руйц (Rafael Ruiz), Матиас Хельвиг (Mathias Hellwig)

В данной статье рассматривается опция программного I/Q-интерфейса R&S® RTO-K11 цифрового осциллографа R&S® RTO с точки зрения его использования в среде MathWorks MATLAB®. При этом пакет MATLAB дистанционно получает доступ и управляет программным I/Q-интерфейсом R&S® RTO-K11, а также может извлекать собранные данные для анализа сигналов с квадратурной модуляцией.

В дальнейшем, цифровой осциллограф R&S® RTO для простоты изложения будет обозначаться как RTO.

Квадратурная модуляция (I/Q-модуляция) — это широко используемый тип модуляции для аналоговых и цифровых сигналов [1]. Существует множество сфер применений, в которых используются цифровые модулированные сигналы, например, NFC, WCDMA, LTE, DVB-T.

При активации I/Q-интерфейса на осциллографе RTO, последний начинает захватывать цифровые модулированные сигналы и выдавать соответствующие I/Q-данные с заданной пользователем частотой дискретизации. Эти I/Q-данные затем могут быть экспортированы во внешние программные пакеты для демодуляции и анализа. Существует три способа использования программного I/Q-интерфейса.

Пользователь может вручную настроить осциллограф RTO и начать захват I/Q-данных. При таком подходе полученные I/Q-данные для дальнейшего анализа можно сохранить в различных форматах на USB-носителе или на внутреннем жестком диске.

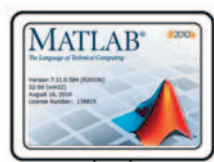
Другой вариант — дистанционное управление осциллографом RTO. Нескольких простых команд SCPI будет достаточно для запуска программного I/Q-интерфейса и передачи полученных I/Q-данных в программу для анализа. Для данной цели можно использовать различные языки программирования. Также удобным в использовании является пакет MATLAB®, так как он содержит большой набор функций для анализа и его можно использовать для дистанционного управления.

В качестве третьей альтернативы фирма Rohde & Schwarz предлагает готовые решения для проведения специ-

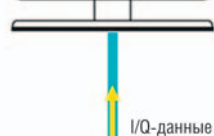


RONDE & SCHWARZ

фического анализа, например, программные пакеты для анализа сигналов LTE — R&S® FS-K10xPC [2], NFC — R&S® FS-K112PC [3] или векторных сигналов OFDM — R&S® FS-K96PC [4]. Данные пакеты полностью совместимы с осциллографом RTO с установленной опцией программного I/Q-интерфейса.



ПК дистанционного управления



I/Q-данные



R&S RTO
Цифровой осциллограф

Программный I/Q-интерфейс обладает следующими основными преимуществами:

Первое — это широкая рабочая полоса частот вплоть до 4 ГГц (RTO1044) для захвата сигналов с квадратурной модуляцией. Это важное преимущество для таких областей применения, как широкополосные радиолокаторы, импульсные ВЧ-сигналы, спутниковое соединение с высокой скоростью передачи данных и связь со скачкообразной перестройкой частоты, для которых требуется широкая полоса частот.

Вторым преимуществом является функция многоканального измерения осциллографа RTO. Если задача требует многоканальных измерений, как например сигналы LTE MIMO [5], осциллограф RTO синхронно собирает данные в 4-х каналах и сохраняет временные соотношения между всеми каналами. В случае сигналов LTE MIMO син-

хронный сбор во всех каналах является обязательным условием.

Еще одним преимуществом является возможность захвата длинных последовательностей I/Q-данных, благодаря эффективному использованию памяти. Благодаря аппаратной цифровой обработке в тракте сбора данных (перенос частоты, фильтрация, повторная выборка), итоговое время захвата по сравнению со сбором без вышеупомянутой цифровой обработки увеличивается.

Кроме того, уменьшение полосы частот I/Q-сигнала ведет к увеличению разрешения, так что пользователю будет доступен более точный анализ сигнала. Фильтрация и повторная выборка обеспечивают уменьшение данной полосы частот и подавление спектральных компонент шума за пределами полосы пропускания фильтра. Это приводит к увеличению отношения сигнал/шум (с/ш) и улучшению разрешения.

Осциллограф RTO обладает хорошей аппаратной производительностью. Он оснащен высокоточным одноядерным АЦП со значением ENOB большим 7, что в сочетании с высокочувствительным, широкополосным, малошумящим входным каскадом приводит к очень хорошим результатам анализа сигналов, например модулю вектора ошибок (EVM). В качестве примера приведем результаты анализа сигнала IEEE802.11ac с полосой канала 80 МГц. Сигнал IEEE802.11ac, перенесенный на частоту несущей, принимается осциллографом RTO и анализируется с помощью пакета векторного анализа сигналов FS-K96 OFDM Vector Signal Analysis. Полученное значение EVM составляет -42 дБ [6], что очень близко к значению EVM, которое можно получить с помощью анализатора спектра среднего диапазона.

Осциллограф RTO на текущий момент является единственным осциллографом на рынке, который может обрабатывать сигналы с квадратурной модуляцией таким образом. По сравнению с аналогами, пользователю не нужно выполнять перенос частоты, фильтрацию и повторную выборку с помощью внешних инструментов. Проведение же данных операций программными средствами является медленным и подверженным ошибкам процессом. При исполь-

зовании осциллографа RTO, выполняющего данные операции, пользователь может сразу приступить к анализу сигналов во квадратурной модуляции.

Чтобы обеспечить четкое понимание возможностей описываемой опции, используется простой пример, позволяющий сконцентрироваться на особенностях программного I/Q-интерфейса.

На рисунке 1 показан стандартный I/Q-приемник, который рассматривается в качестве испытываемого устройства (ИУ). Приемник передает ВЧ-сигнал с квадратурной модуляцией, принимаемый антенной, на входной усилитель. На следующем этапе сигнал разделяется и затем умножается на два ортогональных синусоидальных сигнала, генерируемых одним источником с несущей частотой f_c . Для программного I/Q-интерфейса не имеет значения, переносится ли сигнал на промежуточную частоту или сразу на I/Q составляющие, так как осциллограф RTO поддерживает работу в обоих этих режимах. Обычный приемник оцифровывает перенесенный на более низкую частоту I/Q-сигнал, подготавливая его для дальнейшей цифровой обработки.

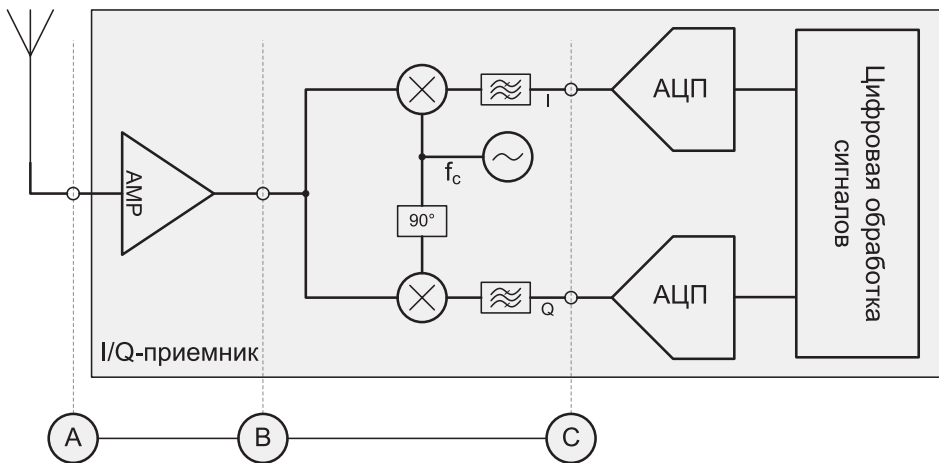


Рис. 1. Стандартный I/Q-приемник с точками измерения А, В, С

В описываемом примере осциллограф RTO может перехватить сигнал частотой до 4 ГГц на различных стадиях прохождения: либо непосредственно на антенне, либо после первого усилительного каскада, либо когда I/Q-сигнал с уже пониженной частотой пройдет полосовой фильтр. На рисунке 1 буквами А, В, С отмечены соответствующие точки измерения. Исходя из этих точек (А, В, С) нужно выбрать соответствующий режим работы опции RTO-K11. В каждом режиме показана блок-схема (см. рисунки 3, 6 и 8) для облегчения настройки осциллографа RTO.

Осциллограф RTO может захватывать сигналы с квадратурной модуляцией для проведения тестирования. В зависимости от выбранного режима в программном I/Q-интерфейсе выполняется перенос частоты в реальном времени в тракте сбора данных осциллографа RTO. Он достигается цифровым

умножением оцифрованного сигнала на комплексное число ($e^{j2\pi f_c t}$), выдаваемое генератором NCO. Далее сигнал проходит через фильтр нижних частот, который предотвращает ошибки дискретизации на последующих этапах. Аппаратная повторная дискретизация сигнала снижает скорость передачи данных, тем самым увеличивая время захвата, при условии ограниченного размера памяти выборки.

Повторная дискретизация (перевыборка) и фильтр нижних частот также повышают отношение с/ш полученного сигнала, или, другими словами, улучшают разрешение благодаря снижению полосы частот и соответствующей фильтрации шума. Рисунок 2 демонстрирует данный эффект. Сигнал с ограниченной полосой $S(f+f_c)$ расположен в полосе фильтра после переноса с частоты f_c . Ширина спектра сигнала меньше, чем $2 \cdot f_b$. Кроме того, присутствует шумовой сигнал $N(f)$ в диапазоне от $-f_s/2$ до $f_s/2$, где f_s — это частота дискретизации АЦП. Плотность мощности шума имеет равномерное распределение. Мощности сигнала и шума определяются отношением с/ш. Фильтр ниж-

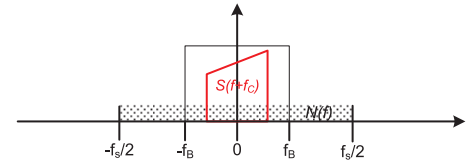


Рис. 2. Улучшение отношения с/ш за счет сужения полосы пропускания

ны для дистанционной загрузки. Чтобы уменьшить затраты на вычисления и передачу, рекомендуется передаваемые I/Q-данные хранить в двоичном формате чисел с плавающей запятой.

Наиболее простой способ подключения ВЧ-сигнала с квадратурной модуляцией к осциллографу RTO показан на рисунке 3. При этом используется только один канал. Исходя из примера на рисунке 1, осциллограф RTO в данном случае следует подключать к точкам измерения А или В. Осциллограф RTO захватывает ВЧ-сигнал, выполняя аналого-цифровое преобразование и аппаратный перенос частоты. Полученные комплексные данные проходят через фильтр нижних частот, а затем проводится повторная дискретизация с заданной частотой.

В зависимости от числа каналов, которое имеет осциллограф, можно параллельно собирать данные, максимум, с четырех каналов. На рисунке 3 показана блок-схема и связанные с ней настраиваемые параметры.



Рис. 3. ВЧ-сигналы

них частот подавляет спектральные составляющие, лежащие за частотой среза f_b , что влияет только на шумовой сигнал $N(f)$. Это приводит к улучшению отношения с/ш и, соответственно, к улучшению разрешающей способности.

Аппаратные средства обеспечивают достаточную точность, так что после повторной дискретизации в памяти хранятся более точные данные, чем начальная 8-битная выборка. Преимущества для пользователя при анализе сигнала состоят в улучшении разрешения и более высокой точности.

Различные блоки программного I/Q-интерфейса подключаются в зависимости от выбранной конфигурации. Влияние данных функциональных блоков на I/Q-сигналы показано на соответствующих рисунках (см. рисунки 4, 7) в конкретных подразделах.

После обработки и сохранения I/Q-данных в памяти выборки, они доступ-

Соответствующее влияние на сигнал в частотной области показано на рисунке 4 для каждой из двух настроек боковой полосы. Исходный ВЧ-сигнал с квадратурной модуляцией с ограниченным спектром показан сплошными черными линиями. Из-за переноса (понижения) частоты, выполняемого умножением на число $e^{\pm j2\pi f_c t}$, спектр смещается. Направление смещения определяется знаком под экспонентой, и оно управляется настройкой боковой полосы. Итоговый спектр показан сплошными красными линиями. Фильтр нижних частот, который подавляет нежелательную часть спектра на частоте $\pm 2f_c$, обозначен пунктирными черными линиями.

Обратившись к примеру стандартного I/Q-приемника, показанного на рисунке 1, можно увидеть, что осциллограф RTO также способен проводить измерения комплексных сигналов с квадратурной модуляцией в нижнем ПЧ диапазоне. При необхо-

димости анализа корректности схемы осциллограф RTO может перехватывать такой сигнал в точке измерений С (рисунок 1). Осциллограф RTO захватывает сигналы (I и Q) в данной точке измерения и выполняет перенос (понижение) частоты. Целью измерительная установка показана на рисунке 5, где слева I/Q-приемник из примера подключен аналоговым входным каскадом к точке С, отмеченной красной пунктирной линией. Осциллограф RTO подключается к данной точке справа, используя для тестирования цифровой выходной каскад.

Низкая промежуточная частота f_{IF} обычно используется, если I/Q-приемник

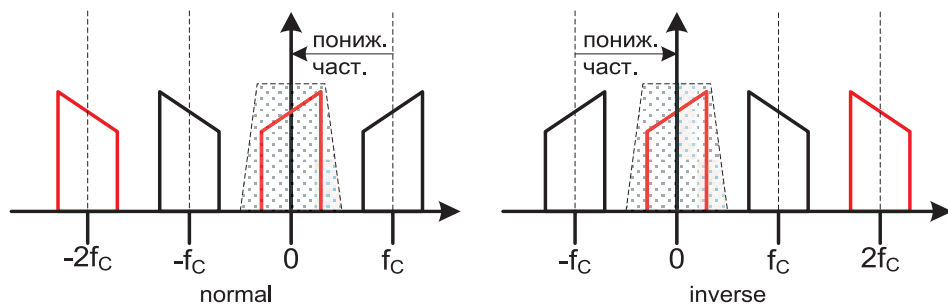


Рис. 4. ВЧ-сигналы: настройки боковой полосы

чувствителен к сдвигу постоянной составляющей и шуму элементов $1/f$ в сигнальном тракте. Например, АЦП имеет тенденцию вносить сдвиг постоянной составляющей, что вызывает проблемы с сигналом и ухудшение отношения с/ш. Поэтому I/Q-приемник в данном примере не переносит сигнал сразу на I/Q составляющие, наоборот, он сначала переносит ВЧ-сигнал с квадратурной модуляцией на ненулевую низкую промежуточную частоту f_{IF} . Далее выходной цифровой каскад приемника с низкой ПЧ оцифровывает сигнал и переносит его с промежуточной частоты в полосу модуляции. На последнем этапе он просто отфильтровывает нежелательные спектральные составляющие. В примере на рисунке 5 осциллограф RTO, который перехватывает I/Q-сигнал в точке измерения С, делает то же самое, что и выходной цифровой каскад приемника из примера.

Влияние на сигнал в частотной области показано на рисунке 5 в точках измерения В, С, D, E. Исходный ВЧ-сигнал с квадратурной модуляцией (В), переносится на промежуточную частоту аналоговым входным каскадом I/Q-приемника (С) (на рисунке обозначен как «1-й» перенос). Итоговая промежуточная частота f_{IF} обычно равна всего нескольким МГц. После дискретизации сигнала к спектру добавляются непреднамеренно внесенный сдвиг постоянной составляющей и шум типа $1/f$ (D). Для простоты показан только сдвиг постоянной составляющей. Сдвиг и шум можно затем легко убрать с помощью цифрового фильтра нижних частот (ФНЧ) после заключительного цифрового переноса частоты, обозначенного как «2-й», так как эти спек-

тральные составляющие выходят из-под полосы модуляции (Е) из-за второго переноса частоты.

Такие приемники с низкой ПЧ сейчас широко используются в небольших FM-приемниках, встроенных в MP3-плееры и мобильные телефоны; и они начинают встречаться и в аналоговых, и в цифровых ТВ-приемниках.

Цифровой выходной каскад приемника с низкой ПЧ можно эмулировать подключением отдельных сигналов I и Q к каналам 1 и 2 или 3 и 4 осциллографа RTO, как показано на рисунке 6. Осциллограф RTO принимает ПЧ сигнал, оцифровывает его, затем выполня-

ет аппаратный перенос частоты с ПЧ в полосу модуляции. Итоговые комплексные данные проходят через фильтр нижних частот и повторную дискретизацию с заданной частотой.

Соответствующее влияние на сигнал в частотной области показано на рисунке 7 для всех имеющихся настроек боковой полосы. Исходный ПЧ сигнал с ограниченным спектром, расположенным вокруг несущей частоты f_c показан сплошными черными линиями. С точки зрения осциллографа RTO f_c — это несущая частота, хотя на самом деле это промежуточная частота f_{IF} . В дальнейшем будет использоваться только термин несущая частота f_c вместо термина промежуточная частота f_{IF} . Возможны четыре настройки боковой полосы. Сначала перенос частоты смещает спектр умножением на число $e^{-j2\pi f_c t}$. Направление смещения зависит от знака под экспонентой, и оно управляется настройкой боковой полосы. Кроме того, спектр в полосе модуляции должен быть в нормальном положении. В зависимости от положения, спектр необходимо зеркально отобразить после переноса частоты. Зеркальное отображение выполняется с помощью комплексного сопря-

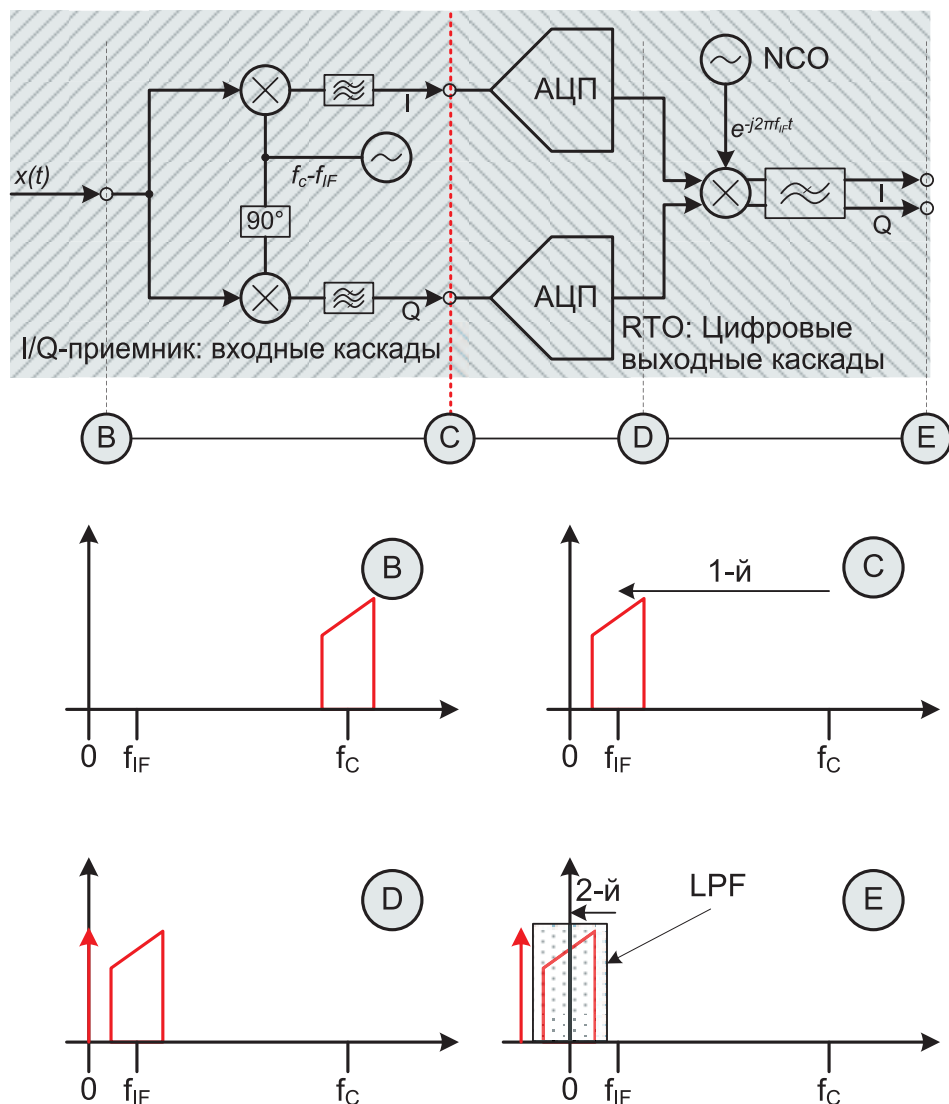


Рис. 5. Комплексные сигналы с квадратурной модуляцией в нижнем ПЧ диапазоне

жения, которое управляется настройкой боковой полосы Normal/Inverse. Итоговый спектр показан сплошными красными линиями. Фильтр нижних частот, который подавляет нежелательную часть исходного спектра, обозначен пунктирными черными линиями.

В данной конфигурации, можно принимать либо один I/Q-сигнал с помощью 2-канального осциллографа RTO, либо два I/Q-сигнала с помощью 4-канального.

Комплексные модулирующие I/Q-сигналы — это последний из трех используемых режимов, он показан на рисунке 8. Обратившись к примеру приемника на рисунке 1, увидим, что в данном режиме осциллограф RTO перехватывает сигналы в точке измерения C, в которой уже присутствуют модулирующие I/Q-сигналы. В этом случае несущая частота f_c ВЧ-сигнала с квадратурной модуляцией совпадает с частотой гетеродина. Поэтому преобразования с понижением частоты (переноса частот) не требуется. Выполняется только низкочастотная фильтрация и повторная дискретизация с заданной частотой.

В данном случае можно принимать либо один I/Q-сигнал с помощью 2-канального осциллографа RTO, либо два I/Q-сигнала с помощью 4-канального. Данный режим не оказывает влияния на сигнал в частотной области.



Рис. 6. Комплексные сигналы с квадратурной модуляцией в нижнем ПЧ диапазоне

Некоторые параметры тракта сбора I/Q-данных являются общими для всех рассматриваемых режимов (ВЧ-сигналы с квадратурной модуляцией, комплексные сигналы с квадратурной модуляцией в нижнем ПЧ диапазоне, комплексные модулирующие I/Q-сигналы). Данными параметрами являются длина записи, частота дискретизации и полоса пропускания фильтра, которая задается в зависимости от частоты дискретизации (под частотой дискретизации понимается частота, с которой отсчеты сохраняются в памяти выборки). На рисунке 9 изображено меню, в котором можно настроить данные параметры.

Как уже обсуждалось, фильтр нижних частот обеспечивает подавление нежелательных спектральных составляющих, чтобы выполнить требования теоремы Найквиста (Котельникова) [7], а также улучшает отношение с/ш I/Q-сигнала. Связь между частотой дискретизации (f_s) и полосой пропускания фильтра (f_B) показана на рисунке 10. Внутри данной по-

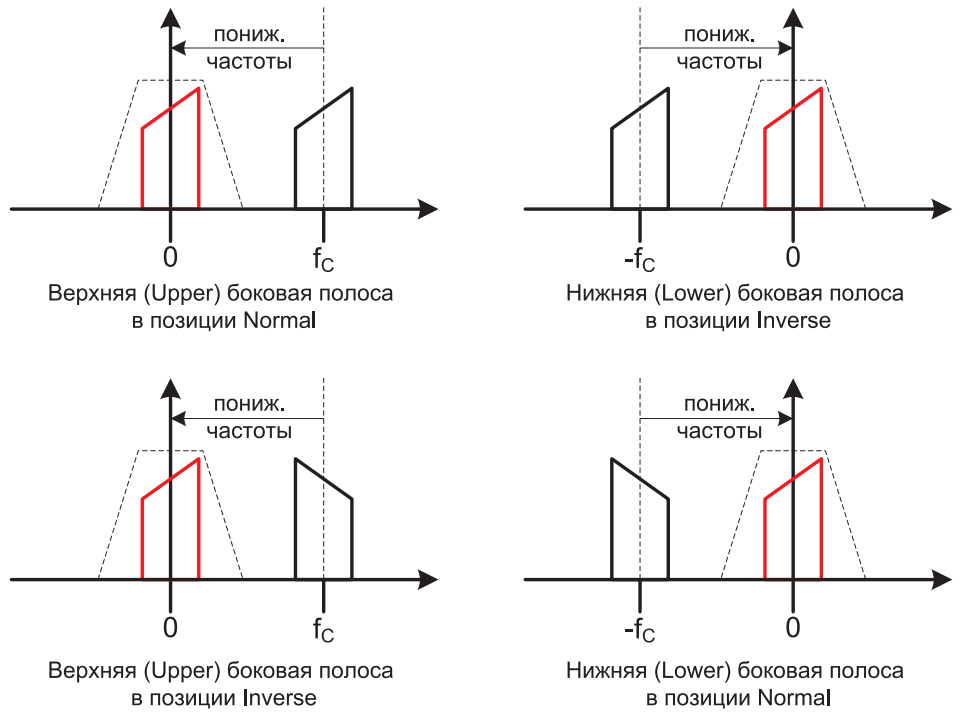


Рис. 7. Комплексные модулированные сигналы в нижнем ПЧ диапазоне: настройки боковой полосы

лосы фильтр имеет плоскую АЧХ (полоса не по уровню -3 дБ).

После повторной дискретизации данные записываются в память выборки. Длина записи определяет количество последовательных отсчетов. Максимальная длина записи составляет 10 млн. отсчетов при использовании одного или двух активных каналов и 6 млн. отсчетов при использовании трех или четырех каналов. Длина записи, деленная на частоту дискретизации, неявно задает время захвата.

Наиболее простым способом анализа I/Q-данных является изображение либо модулирующих синфазного и квадратурного сигналов на XY-диаграмме (см. рисунок 13, верхняя кривая), либо осциллограммы ВЧ-сигнала с квадратурной модуляцией (см. рисунок 13, желтая кривая

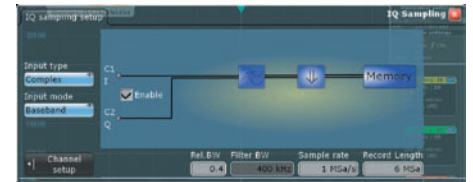


Рис. 8. Комплексные модулирующие I/Q-сигналы

в центре). Однако такой результат не дает полной информации. Более полную информацию о результатах измерений может предоставить, например, восстановленная диаграмма сигнального созвездия ВЧ-сигнала с квадратурной модуляцией, что будет являться неплохим примером возможностей программного I/Q-интерфейса осциллографа RTO.

Генератор сигналов R&S® SMBV100A [10] создает ВЧ-сигнал с квадратурной

- DVB-T** — Digital Video Broadcasting Terrestrial (стандарт цифрового наземного ТВ вещания)
- ENOB** — Effective Number Of Bits (эффективное число битов)
- EVM** — Error Vector Magnitude (модуль вектора ошибок)
- I/Q** — In-phase / Quadrature-Procedure (синфазная/квадратурная процедура)
- NCO** — Numerically Controlled Oscillator (программируемый генератор)
- NFC** — Near Field Communication (связь в ближней зоне)
- OFDM** — Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов)
- PRBS** — Pseudo Random Bit Sequence (псевдослучайная битовая последовательность)
- QAM** — Quadrature Amplitude Modulation (квадратурная амплитудная модуляция)
- RADAR** — RADIo Detection And Ranging (радиолокатор)
- RTO** — Real-Time oscilloscope (осциллограф реального времени)
- SCPI** — Standard Commands for Programmable Instruments (стандартные команды для программируемых приборов)
- WCDMA** — Wideband Code Division Multiple Access (широкополосный множественный доступ с кодовым разделением каналов)
- XML** — eXtended Mark-up Language (расширенный язык разметки)
- ВЧ** — Высокая частота
- ИУ** — Испытуемое устройство
- С/Ш** — Отношение сигнал/шум

модуляцией для последующего анализа. Генератор сигналов подключается к осциллографу, выдавая сигнал с несущей частотой, равной 400 МГц и амплитудой -10 дБмВт. Модулирующим I/Q-сигналом является сигнал PRBS-9 с частотой следования символов 500 ксим/с, тип модуляции — 16-QAM [1], с фильтром типа rise cos с полосой 500 кГц (рисунок 12) и коэффициентом сжатия 0,75.

НОВОСТИ на www.kipis.ru

КОМПАНИЯ **ROHDE&SCHWARZ** АНОНСИРОВАЛА СКОРЫЙ ВЫПУСК ПОРТАТИВНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ СПЕКТРА R&S FSH13/20

Компания **Rohde&Schwarz** анонсировала скорое расширение линейки портативных анализаторов спектра. В ближайшее время серия FSH будет пополнена 2-мя приборами с диапазонами частот до 13,6 ГГц и до 20 ГГц.



ROHDE & SCHWARZ

Анализаторы спектра *FSH13/20* являются микроволновыми моделями, зарекомендовавших себя анализаторов R&S FSH4 и FSH8. Улучшенные характеристики анализаторов спектра FSH13/20: низкий уровень собственных шумов (без предусилителя -141 дБм, с предусилителем -161 дБм), максимальная полоса демодуляции 20 МГц, низкая погрешность измерения (<1,5 дБ на частоте 20 ГГц), наличие автоматической функции измерения R&S FSH WIZARD, прочный корпус и надежность, обеспечат эффективное выполнение поставленных задач.

Все имеющиеся опциональные возможности анализаторов спектра R&S FSH4/8 (включая следящий генератор и встроенный КСВ мост), также будут доступны и для анализаторов R&S FSH13/20 в течение этого года.

www.rohde-schwarz.ru

ВЧ-тактирование сигнала осуществляется от внутреннего тактового генератора (REF_CLK, рисунок 11) для упрощения постобработки в пакете MATLAB. Для этого на осциллографе RTO должна быть установлена опция RTO-B4. Тактирование от внутреннего генератора осциллографа RTO позволяет избежать сложного программного

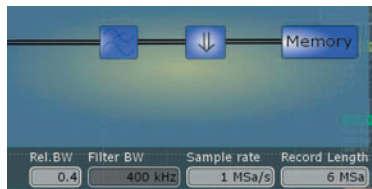
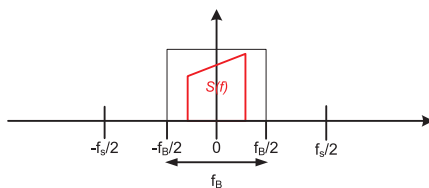


Рис. 9. Общие параметры для I/Q-сигналов

кода в пакете MATLAB, который был бы нужен для оценки частоты ВЧ-сигнала и частоты следования символов I/Q-данных. Таким образом, данная установка не подходит для реальных применений, например, для сигналов DVB-T или WCDMA, она предназначена для демонстрации возможностей программного I/Q-интерфейса в пакете MATLAB.



'полоса фильтра f_B ' = 'отн. полоса' * 'частота дискретизации'

Рис. 10. Связь полосы фильтра и частоты дискретизации

Подключение приборов показано на рисунке 11. Канал 1 осциллографа RTO подключен к ВЧ выходу генератора сигналов SMBV, а каналы 3 и 4 — к модулирующему I/Q-сигналу. На задней панели вывод опорного тактового сигнала осциллографа RTO подключен к опорному входу генератора сигналов SMBV100A.

Перед обработкой сигнала в пакете MATLAB была проведена небольшая проверка на осциллографе RTO (рисунок 13). Модулирующий I/Q-сигнал по-

казан в виде XY-диаграммы (розовый), а диаграмма сигнального созвездия 16-QAM видна в верхней части экрана. Желтая кривая в центре является осциллограммой ВЧ-сигнала во временной области.

Нижний график представляет собой результат быстрого преобразования Фурье осциллограммы ВЧ-сигнала. Четко видна центральная частота, равная 400 МГц, и полоса приблиз. 500 кГц.

Небольшой численный пример, основанный на описанном ВЧ-сигнале с квадратурной модуляцией, должен продемонстрировать способность опции RTO-K11 сохранять длинные последовательности данных. Ниже приведено сравнение максимально возможного времени захвата сигнала со сбором данных того же сигнала с помощью опции программного I/Q-интерфейса.

Для анализа сигнала без опции RTO-K11, осциллограф RTO должен работать с частотой дискретизации 2,5 млрд. отсчетов/с, так как в спектре сигнала присутствуют ярко выраженные вторая и третья гармоники. При использовании самой большой памяти выборки 20 млн. отсчетов, максимальное время захвата без обработки I/Q-сигнала составляет 8 мс.

Для того чтобы результаты анализа сигналов можно было сравнивать при использовании опции RTO-K11, настройки захвата данных осциллографа RTO не менялись. Для опции программного I/Q-интерфейса максимальная память выборки равна 10 млн. отсчетов. При частоте следования символов 500 ксим/с и типичного множителя передискретизации 4, частота дискретизации I/Q-сигнала осциллографа RTO равна 2 млн. отсчетов/с. Поэтому максимальное время захвата составляет 5 с, что в 625 раз больше, чем время захвата необработанного сигнала.

Используя возможности MATLAB и режим дистанционного управления осциллографом RTO, возможно написать скрипт для MATLAB. Данный

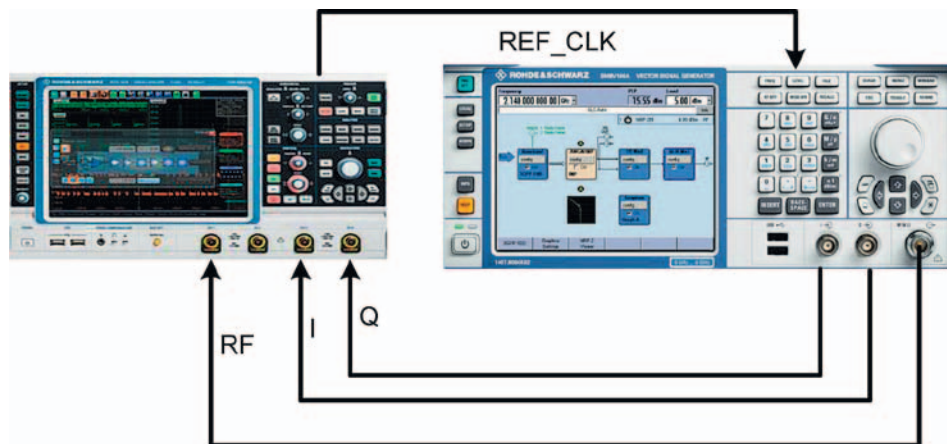


Рис. 11. Измерительная установка с осциллографом RTO (слева) и генератором сигналов SMBV100A (справа)

скрипт будет управлять осциллографом, производя необходимые настройки; передавать полученные данные на ПК и анализировать их.

Полученные для данного примера отсчеты из-за не скомпенсированной начальной фазы генератора развернуты под углом относительно ожидаемой диаграммы сигнальных созвездий (см. рисунок 14 левая часть).

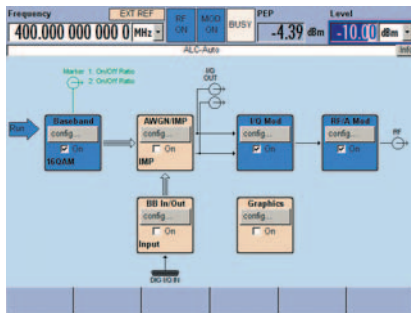


Рис. 12. Конфигурация генератора сигналов SMBV100A

Поэтому необходимо выполнить следующие действия, чтобы восстановить сигнал PRBS-9 с модуляцией типа 16-QAM из захваченных данных. Первое, обнаружить оптимальную фазу и второе, развернуть диаграмму сигнальных созвездий для модуляции типа 16-QAM. Для этого может потребоваться цифровая система ФАПЧ, что в настоящей статье не рассматривается, поэтому проводилась простая ручная коррекция.

Для нахождения оптимальной фазы для корректного отображения графика отсчетов, была произведена передискретизация I/Q-сигнала с множителем 80 и в цикле были нарисованы все возможные фазы. Фаза с наименьшим отклонением отсчетов от сетки символов была принята за оптимальную.

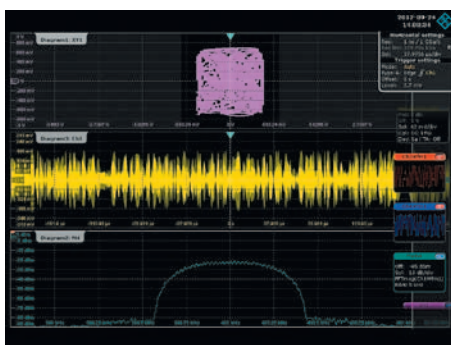


Рис. 13. Измерения I/Q-сигнала осциллографом RTO

Данная фаза дискретизации далее была использована для оценки начальной фазы генератора, исходя из того, что для равномерного распределения данных, как в PRBS-последовательности, среднее значение фазы равно нулю. Для устранения наклона, данные умножались на отрицательную комплексную оценку фазы. При этом получается хорошая восстановленная диаграмма сигнального созвездия для модуляции типа 16-QAM (рисунок 14, правая часть).

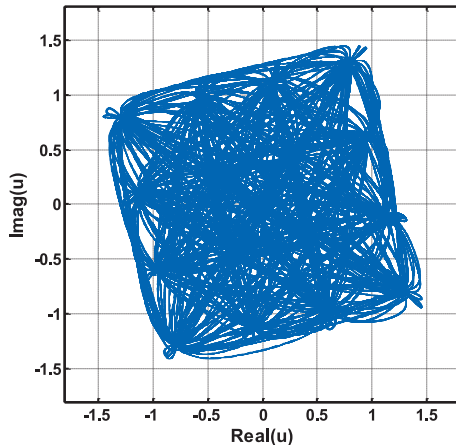


Рис. 14. XY-диаграмма собранных I/Q-данных

Представить комплексные I/Q-данные можно с помощью расцветки (см. рисунок 15). При использовании температурной цветовой палитры, частота появления I/Q-данных также показывает диаграмму сигнального созвездия.

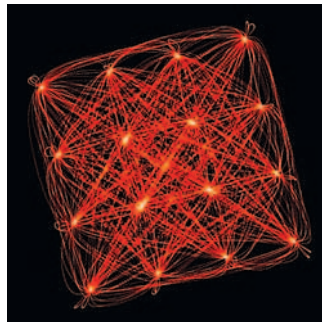


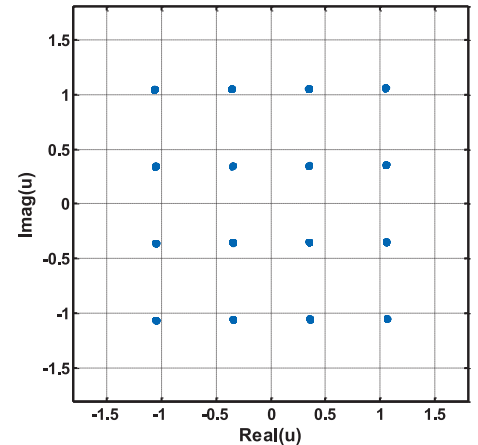
Рис. 15. Расцветченные I/Q-данные

Таким образом, опция программного I/Q-интерфейса (RTO-K11) предоставляет исчерпывающий набор средств анализа для современных протоколов связи на основе сигналов с квадратурной модуляцией, спутниковой связи с высокой скоростью передачи данных, широкополосных радаров и т.п. Данные приложения используют современные схемы модуляции и демодуляции, что делает опцию программного I/Q-интерфейса очень полезной для их разработки и тестирования.

Использование осциллографа RTO для сбора I/Q-данных улучшает захват данных и ускоряет процесс по сравнению со стандартными контрольно-измерительными установками на основе ПК. С опцией программного I/Q-интерфейса легко работать и она идеально интегрируется в пакет MATLAB®, что делает данную опцию удобным интерфейсом для инструментов анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. G. Proakis. Digital Communications. Mcgraw-Hill Higher Education, 2008.
2. FS-K101PC/-K103PC/-K105PC EUTRA/LTE Uplink Specifications. Rohde & Schwarz, June 2012. [Online]. Available: http://www.rohde-schwarz.de/file_18344/FS-K101-103-105PC_FSx-K101-103-105_dat-sw_en.pdf.



3. FS-K112PC NFC Measurement Software Specifications. Rohde & Schwarz, July 2012. [Online]. Available: http://www.rohde-schwarz.de/file_18584/FS-K112-PC_dat-sw_en.pdf.
4. FS-K96 OFDM Vector Signal Analysis Software Specifications. Rohde & Schwarz, February 2012. [Online]. Available: http://www.rohde-schwarz.de/file_17782/FS-K96_dat-sw_en.pdf.
5. Schindler, Schulz. Introduction to MIMO — Application Note. July 2009. [Online]. Available: http://www2.rohde-schwarz.com/file_12364/IMA142_0e.pdf.
6. Sylvia Reitz. R&S®RTO oscilloscope with state-of-the-art signal analysis software. NEWS 206, pp. 23-25, July 2012.
7. Harry Nyquist. Certain Topics in Telegraph Transmission Theory in Winter Convention of the A. i. E. E., New York, 1928.
8. Test & Measurement, RTO Digital Oscilloscope — User Manual, Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, 2012.
9. Jurgen Engelbrecht. How to Use Rohde & Schwarz Instruments in MATLAB® — Application Note. Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, 16 March 2012. [Online]. Available: http://www2.rohde-schwarz.com/file_13938/IMA171_5e.pdf.
10. R&S® SMBV100A Vector Signal Generator — Operating Manual, Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, 2012.
11. MathWorks®, Digital Video Broadcasting — Terrestrial, 2012. [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/help/comm/examples/digital-video-broadcasting-terrestrial.html>.

This article presents the I/Q Software Interface (R&S® K11 option) of the R&S®RTO in the context of remote applications. It demonstrates the basic operation, application examples, and an analysis in MATLAB®.