

# ПРОГРАММНЫЙ I/Q-ИНТЕРФЕЙС ОСЦИЛЛОГРАФА R&S RTO – ШИРОКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ АНАЛИЗА СИГНАЛОВ

Р.Руиз, М.Хеллвиг

Квадратурная модуляция (I/Q-модуляция) – распространенный тип модуляции аналоговых и цифровых сигналов [1]. Такие сигналы используются во многих приложениях, например, NFC, WCDMA, LTE, DVB-T. Эффективные средства для анализа I/Q-данных предоставляет осциллограф RTO компании Rohde & Schwarz (R&S). У него есть специальная опция RTO-K11 – программный I/Q-интерфейс, через который пользователи могут захватывать и анализировать сигналы с квадратурной модуляцией, в том числе в среде MathWorks MATLAB.

**П**ри активации I/Q-интерфейса осциллограф R&S RTO (в дальнейшем RTO) начинает захватывать цифровые модулированные сигналы и выдавать соответствующие I/Q-данные с заданной пользователем частотой дискретизации. Эти данные затем могут быть экспортированы во внешние программные пакеты для демодуляции и анализа. Существует три способа использования программного I/Q-интерфейса.

Первый способ – пользователь может вручную настроить осциллограф RTO и начать захват I/Q-данных. Для дальнейшего анализа их можно сохранить в различных форматах на USB-носителе или на внутреннем жестком диске.

Второй способ – дистанционное управление осциллографом. Несколько простых команд SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments – стандартные команды для программируемых приборов) будет достаточно, чтобы запустить программный I/Q-интерфейс и передать полученные I/Q-данные в программу для анализа. Для этого можно использовать различные языки программирования, а также пакет MATLAB, так как он содержит большой набор функций для анализа и его можно применять для дистанционного управления.

Третий способ – готовые решения для проведения специфического 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]. Эти пакеты полностью совместимы с осциллографом RTO с установленной опцией RTO-K11.

Программный I/Q-интерфейс дает несколько преимуществ.

Одно из них – широкая рабочая полоса частот вплоть до 4 ГГц (модель RTO1044) для захвата сигналов с квадратурной модуляцией. Это важно для таких областей применения, как широкополосные радиолокаторы, импульсные ВЧ-сигналы, спутниковое соединение с высокой скоростью передачи данных и связь со скачкообразной перестройкой частоты, где требуется широкая полоса частот.

Второе преимущество – функция многоканального измерения осциллографа RTO. Если требуются многоканальные измерения, как, например, при анализе сигналов LTE MIMO [5], осциллограф RTO синхронно собирает данные в четырех каналах и сохраняет временные соотношения между каналами (в случае сигналов LTE MIMO синхронный сбор во всех каналах – обязательное условие).

И еще одно преимущество – возможность захвата длинных последовательностей I/Q-данных благодаря эффективному использованию памяти. В тракте сбора данных осциллографа выполняется цифровая обработка (перенос частоты, фильтрация, повторная выборка), что позволяет увеличить время захвата.

Осциллограф RTO обладает высокой аппаратной производительностью. Он оснащен высокоточным одноядерным АЦП со значением ENOB (Effective Number Of Bits – эффективное число битов), большим 7, что в сочетании с высокочувствительным, широкополосным, малому шумным входным каскадом приводит к очень хорошим результатам анализа сигналов, например, малому модулю вектора ошибок (EVM). В качестве примера приведем результаты анализа сигнала IEEE802.11ac с полосой канала 80 МГц. Этот сигнал, перенесенный на частоту несущей, принимался осциллографом RTO и анализировался с помощью пакета векторного анализа сигналов FS-K96 OFDM Vector Signal Analysis. Значение EVM составило -42 дБ [6], что очень близко к значению, которое можно получить с помощью анализатора спектра среднего диапазона.

RTO сегодня – единственный осциллограф на рынке, который может обрабатывать сигналы с квадратурной модуляцией таким образом. Пользователю не нужно выполнять перенос частоты, фильтрацию и повторную выборку с помощью внешних инструментов (как это происходит при работе на аналогичных приборах). Проведение же данных операций программными средствами – медленный и подверженный ошибкам процесс. При использовании осциллографа RTO пользователь может сразу приступить к анализу сигналов с квадратурной модуляцией.

Для иллюстрации возможностей опции программного I/Q-интерфейса возьмем стандартный I/Q-приемник (рис.1). Он 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.

В этом примере осциллограф RTO может перехватить сигнал частотой до 4 ГГц на различных стадиях прохождения: непосредственно на

антенне, после первого усилительного каскада либо когда I/Q-сигнал с уже пониженной частотой пройдет полосовой фильтр. На рис.1 буквами А, В, С отмечены соответствующие точки измерения. Исходя из этих точек нужно выбрать соответствующий режим работы опции RTO-K11.

В зависимости от выбранного режима в программном I/Q-интерфейсе выполняется тот или иной перенос частоты в реальном времени. Он достигается умножением оцифрованного сигнала на комплексное число ( $e^{j2\pi f_{\text{ct}}t}$ ), выдаваемое NCO (Numerically Controlled Oscillator – программируемый генератор). Далее сигнал проходит через фильтр нижних частот (ФНЧ), который предотвращает ошибки дискретизации на последующих этапах. Аппаратная повторная дискретизация сигнала снижает скорость передачи данных, тем самым увеличивая время захвата.

Повторная дискретизация (перевыборка) и ФНЧ также повышают отношение сигнал/шум полученного сигнала, или, другими словами, улучшают разрешение благодаря сужению полосы частот и соответствующей фильтрации шума. Проиллюстрируем этот эффект (рис.2). Сигнал с ограниченной полосой  $S(f+f_c)$  расположен в полосе фильтра после переноса с частоты  $f_c$ . Ширина спектра сигнала меньше, чем  $2f_B$  ( $f_B$  – частота среза ФНЧ). Кроме того, присутствует шумовой сигнал  $N(f)$  в диапазоне от  $-f_s/2$  до  $f_s/2$ , где  $f_s$  – частота дискретизации АЦП. Плотность мощности шума имеет равномерное распределение. Мощности сигнала и шума определяются отношением сигнал/шум. Фильтр нижних частот подавляет спектральные составляющие, лежащие за частотой среза  $f_B$ , что влияет только на шумовой сигнал  $N(f)$ . Это приводит к увеличению отношения сигнал/

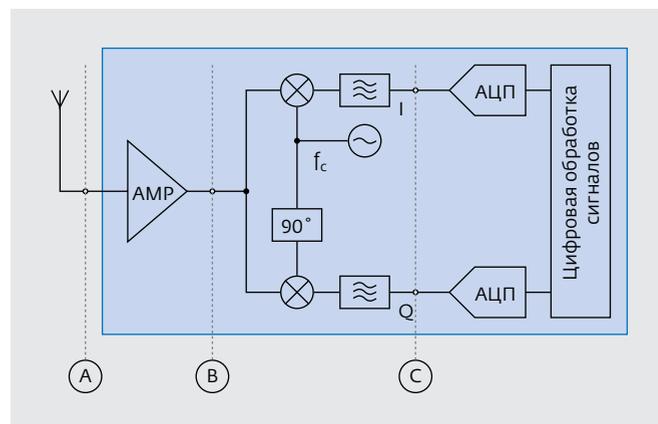
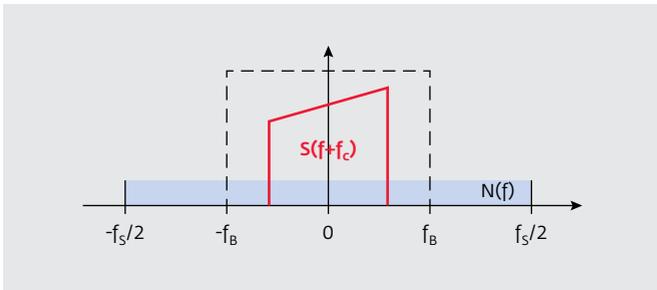


Рис.1. Стандартный I/Q-приемник с точками измерения А, В, С

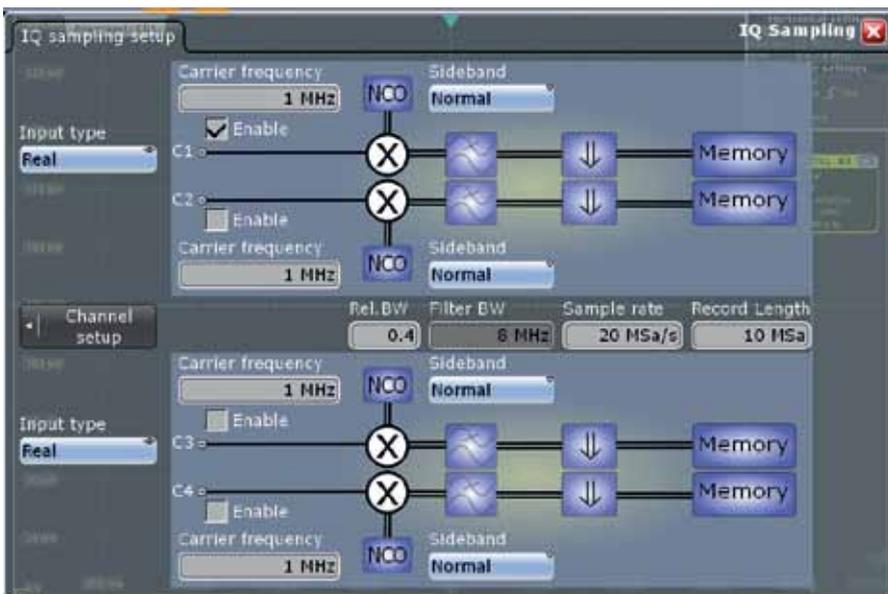


**Рис.2.** Улучшение отношения сигнал/шум за счет сужения полосы пропускания

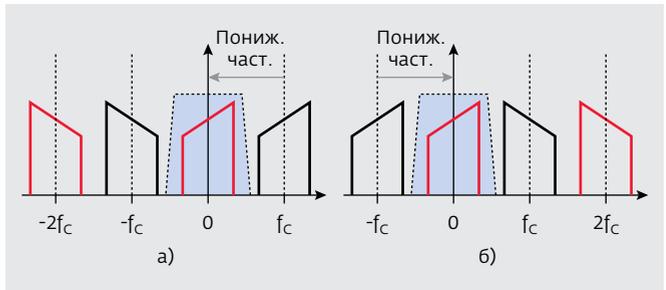
шум и, соответственно, к улучшению разрешающей способности.

После обработки и сохранения I/Q-данных в памяти выборки они доступны для дистанционной загрузки. Чтобы уменьшить затраты на вычисления и передачу, рекомендуется эти данные хранить в двоичном формате чисел с плавающей запятой.

Наиболее простой способ подключения ВЧ-сигнала с квадратурной модуляцией к осциллографу RTO – в точках измерения А или В (см. рис.1). Осциллограф захватывает ВЧ-сигнал, выполняет аналого-цифровое преобразование и аппаратный перенос частоты. Полученные комплексные данные проходят через ФНЧ, а затем проводится повторная дискретизация с заданной частотой. В зависимости от числа каналов, которое имеет осциллограф, можно параллельно собирать данные, максимум – с четырех каналов (рис.3).



**Рис.3.** Интерфейс осциллографа RTO при захвате ВЧ-сигналов



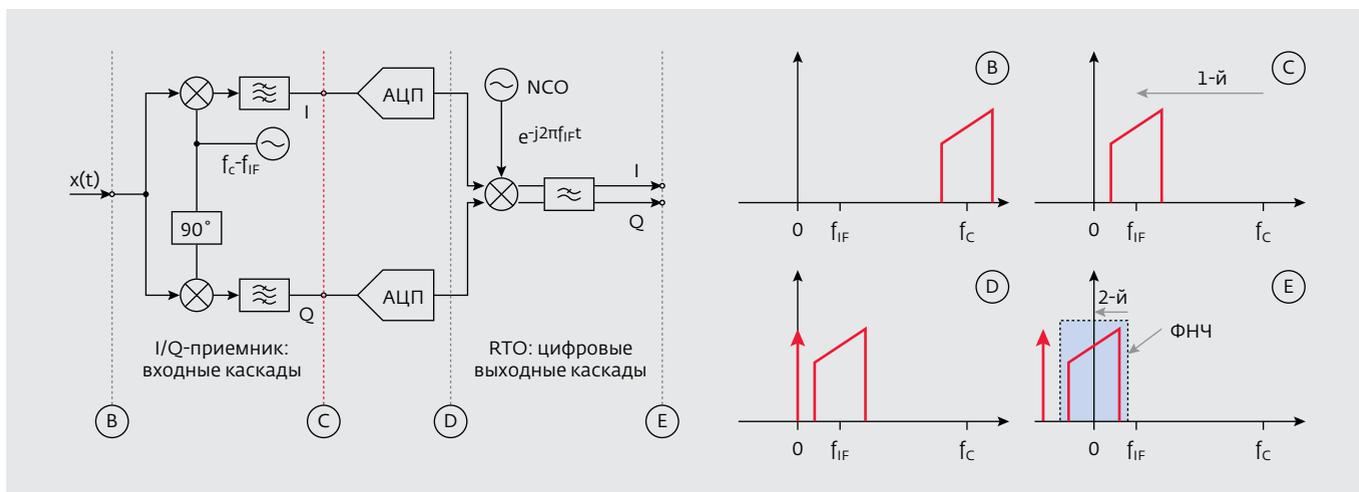
**Рис.4.** ВЧ-сигналы при настройках боковой полосы Normal (а) и Inverse (б)

Рассмотрим влияние на сигнал в частотной области для этого случая (рис.4). Исходный ВЧ-сигнал с квадратурной модуляцией с ограниченным спектром обозначен 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 управляется настройкой боковой полосы (см. рис.3). Итоговый спектр обозначен сплошными красными линиями. Фильтр нижних частот, который подавляет нежелательную часть спектра на частоте  $\pm 2f_c$ , обозначен пунктирными черными линиями.

Осциллограф RTO также способен проводить измерения комплексных сигналов с квадратурной модуляцией в нижнем диапазоне промежуточной частоты (ПЧ). Он перехватывает такие сигналы (I и Q) в точке измерений С (см. рис.1) и выполняет перенос (понижение) частоты.

Для реализации такого подключения используется специальная измерительная установка. На ней I/Q-приемник подключен слева аналоговым входным каскадом к точке С, отмеченной красной пунктирной линией (рис.5). Осциллограф подключается к этой точке справа, используя для тестирования цифровой выходной каскад.

Низкая промежуточная частота  $f_{IF}$  обычно используется, если I/Q-приемник чувствителен к сдвигу постоянной составляющей и шуму элементов  $1/f$  в сигнальном тракте. Например, АЦП имеет тенденцию вносить сдвиг постоянной составляющей, что приводит к ухудшению отношения сигнал/шум.

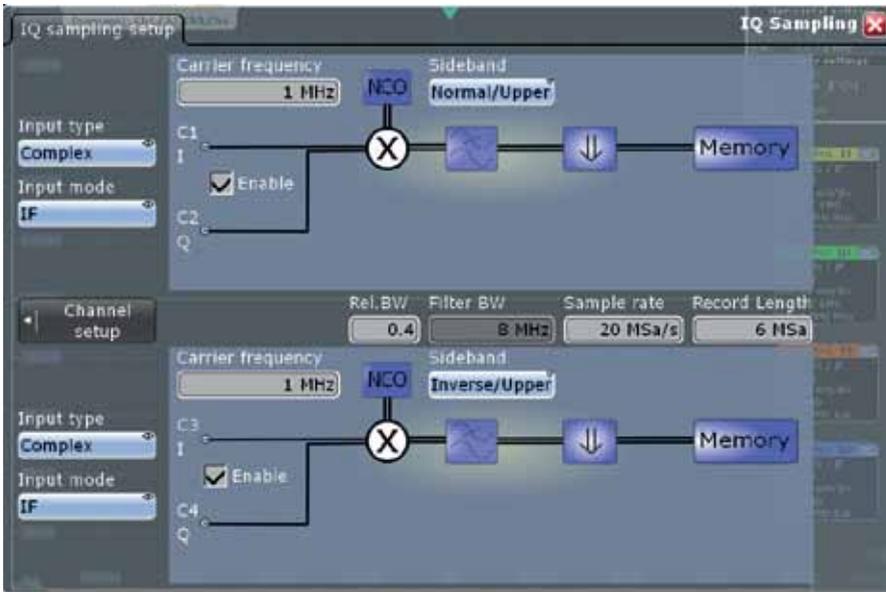


**Рис.5.** Прием и обработка комплексных сигналов с квадратурной модуляцией в нижнем ПЧ-диапазоне

Поэтому в данном примере приемник не переносит сигнал сразу на I/Q-составляющие, а 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

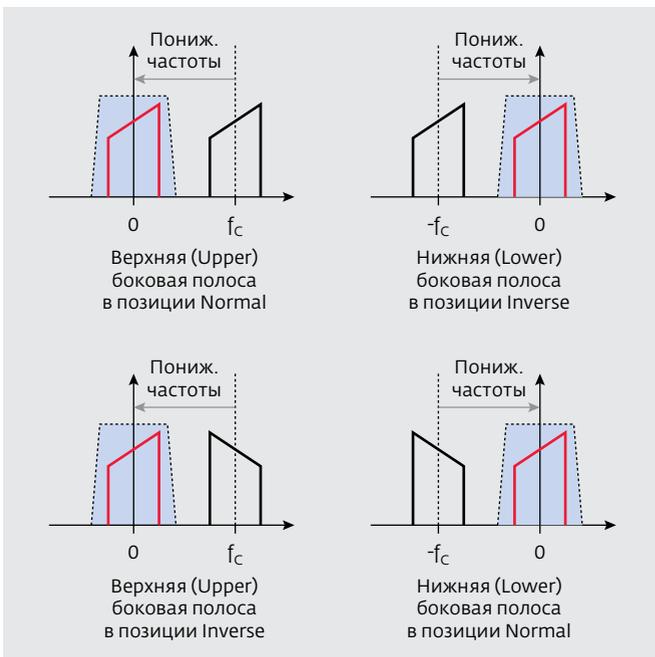
нежелательные спектральные составляющие. Осциллограф RTO, который перехватывает I/Q-сигнал в точке измерения С, делает то же самое, что и выходной цифровой каскад приемника.

Посмотрим, что происходит с сигналом в схеме, приведенной на рис.5. Исходный ВЧ-сигнал с квадратурной модуляцией (В) переносится на промежуточную частоту аналоговым входным



**Рис.6.** Эмуляция цифрового выходного каскада приемника с низкой ПЧ на осциллографе RTO

каскадом I/Q-приемника (С) (на рис.5 – 1-й перенос). Итоговая промежуточная частота  $f_{IF}$  обычно равна всего нескольким мегагерцам. После дискретизации сигнала к спектру добавляются непреднамеренно внесенный сдвиг постоянной составляющей и шум типа  $1/f$  (D). Для простоты показан



**Рис.7.** Преобразование сигналов в нижнем ПЧ-диапазоне при различных настройках боковых полос

только сдвиг постоянной составляющей. Сдвиг и шум можно затем легко убрать с помощью цифрового ФНЧ после заключительного цифрового переноса частоты (на рис.5 – 2-й), так как эти спектральные составляющие выходят из-под полосы модуляции (E). Такие приемники с низкой ПЧ широко используются в небольших FM-приемниках, встроенных в MP3-плееры и мобильные телефоны; они начинают также 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 (рис.6). Осциллограф

принимает ПЧ-сигнал, оцифровывает его, затем выполняет аппаратный перенос частоты с ПЧ в полосу модуляции. Итоговые комплексные данные проходят через ФНЧ и повторную дискретизацию с заданной частотой.

Рассмотрим влияние на сигнал в частотной области для этого случая (рис.7). Исходный ПЧ-сигнал с ограниченным спектром, расположенным вокруг несущей частоты  $f_c$ , обозначен сплошными черными линиями. В осциллографе RTO  $f_c$  – это несущая частота, хотя на самом деле это промежуточная частота  $f_{IF}$  (в дальнейшем будем использовать только термин "несущая частота"  $f_c$  вместо термина "промежуточная частота"  $f_{IF}$ ). Сначала выполняется перенос частоты. Затем, если спектр в полосе модуляции находится в положении Inverse, он зеркально отображается. Это делается с помощью комплексного сопряжения, которое управляется настройкой боковой полосы Normal/Inverse (см. рис.6). Итоговый спектр обозначен сплошными красными линиями, ФНЧ, который подавляет нежелательную часть исходного спектра, – пунктирными черными линиями. В данной конфигурации можно принимать либо один I/Q-сигнал с помощью двухканального осциллографа RTO, либо два I/Q-сигнала с помощью четырехканального.

Комплексные модулирующие I/Q-сигналы – последний из трех используемых режимов (рис.8). В этом режиме осциллограф RTO перехватывает сигналы в точке измерения С (см. рис.1), в которой

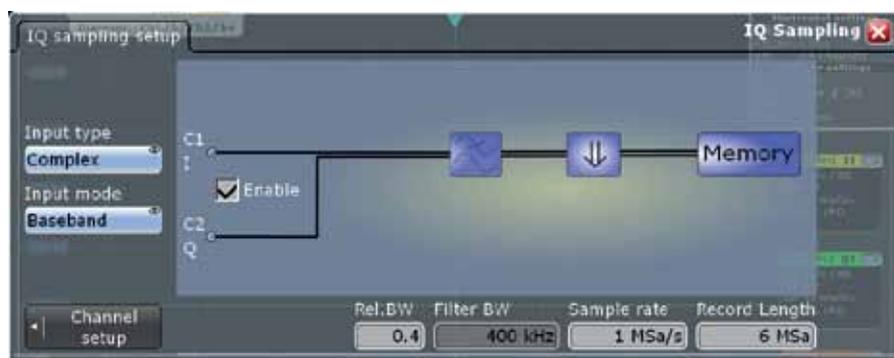


Рис.8. Интерфейс осциллографа RTO при работе с комплексными модулирующими I/Q-сигналами

(ВЧ-сигналы с квадратурной модуляцией, комплексные сигналы с квадратурной модуляцией в нижнем ПЧ-диапазоне, комплексные модулирующие I/Q-сигналы). Это – 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

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. Этот режим не оказывает влияния на сигнал в частотной области.

Некоторые параметры тракта сбора I/Q-данных – общие для всех рассматриваемых режимов

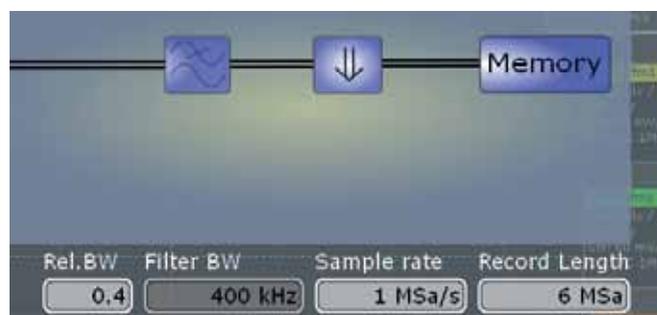


Рис.9. Общие параметры для I/Q-сигналов

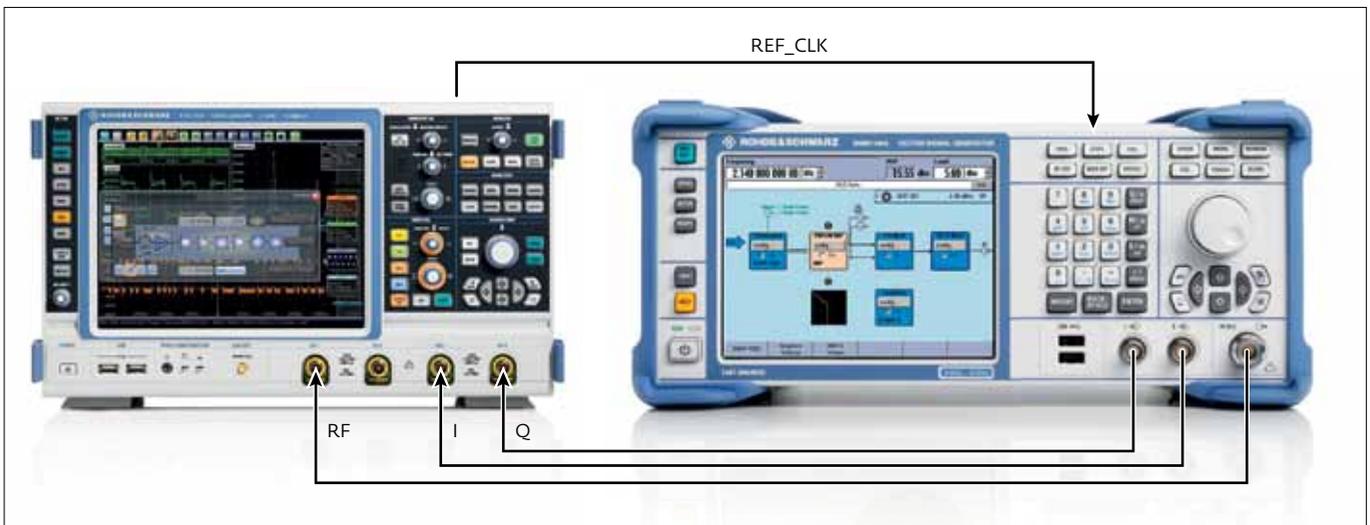


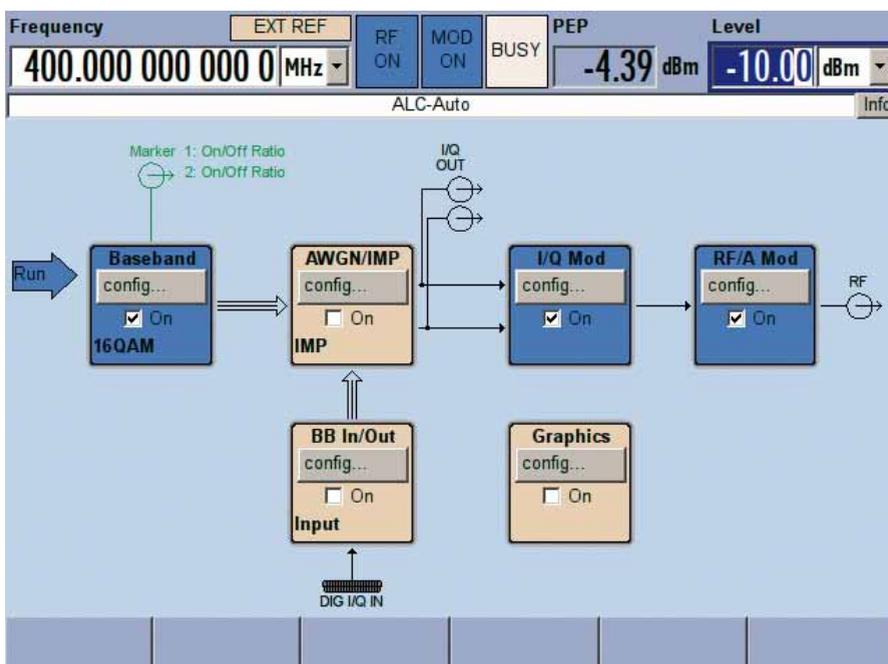
Рис.10. Измерительная установка с осциллографом RTO (слева) и генератором сигналов SMBV100A (справа)

выборки). Настроить эти параметры можно в специальном меню (рис.9).

Полученные I/Q-данные нужно проанализировать. Лучше всего использовать для этого диаграмму сигнального созвездия ВЧ-сигнала с квадратурной модуляцией. Ее можно получить с помощью программного I/Q-интерфейса осциллографа RTO.

Для этого использовалась измерительная установка, в состав которой входят генератор сигналов R&S SMBV100A [7] и осциллограф RTO (рис.10).

Канал 1 осциллографа подключен к ВЧ-выходу (RF) генератора SMBV, а каналы 3 и 4 – к модулирующему I/Q-сигналу. На задней панели вывод опорного тактового сигнала осциллографа подключен ко входу генератора SMBV100A. Генератор выдает сигнал с несущей частотой, равной 400 МГц, и амплитудой -10 дБмВт (рис.11). Модулирующим I/Q-сигналом является сигнал PRBS-9 с частотой следования символов 500 ксим/с, типом модуляции – 16-QAM [1], фильтром типа rise cos с полосой 500 кГц и коэффициентом сжатия 0,75.



Рису.11. Конфигурация генератора сигналов SMBV100A

ВЧ-тактирование сигнала выполняется от внутреннего тактового генератора (REF\_CLK, см. рис.10) для упрощения постобработки в пакете MATLAB. Для этого на осциллографе RTO должна быть установлена опция RTO-B4. Тактирование от внутреннего генератора осциллографа позволяет избежать сложного программного кода в пакете MATLAB, который был бы нужен для оценки частоты ВЧ-сигнала и частоты следования символов I/Q-данных. Таким образом, эта 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.



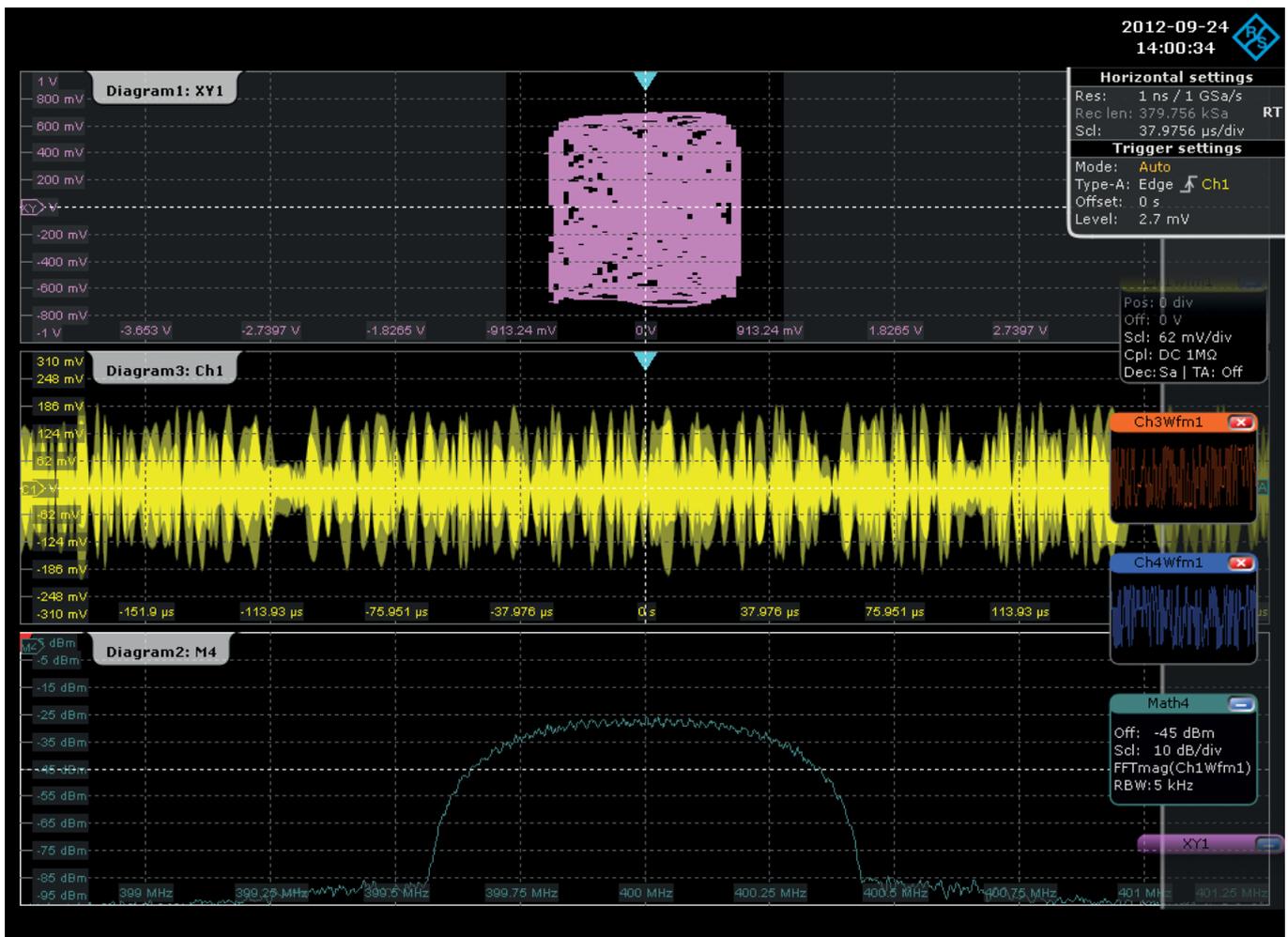


Рис.12. Измерения I/Q-сигнала осциллографом RTO

Перед обработкой сигнала в пакете MATLAB была проведена его проверка на осциллографе RTO (рис.12). Модулирующий I/Q-сигнал показан в виде XY-диаграммы (розовый цвет). Желтая кривая в центре – осциллограмма ВЧ-сигнала во временной области. Нижний график – результат быстрого преобразования Фурье осциллограммы ВЧ-сигнала. Четко видна центральная частота, равная 400 МГц, и полоса – приблизительно 500 кГц.

Небольшой численный пример, основанный на приведенном ВЧ-сигнале с квадратурной модуляцией, демонстрирует способность опции RTO-K11 сохранять длинные последовательности данных. 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.

При использовании опции RTO-K11 настройки захвата данных осциллографа не менялись. Для опции программного I/Q-интерфейса максимальная память выборки равна 10 млн. отсчетов. При частоте следования символов 500 ксим/с и типичном множителе 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.

Для дистанционного управления осциллографом RTO можно написать скрипт для MATLAB. Он будет производить необходимые настройки, передавать данные на ПК и анализировать их.

Полученные для рассматриваемого примера отсчеты из-за нескомпенсированной начальной фазы генератора оказались развернуты под углом относительно ожидаемой диаграммы сигнальных созвездий (рис.13а). Поэтому необходимо



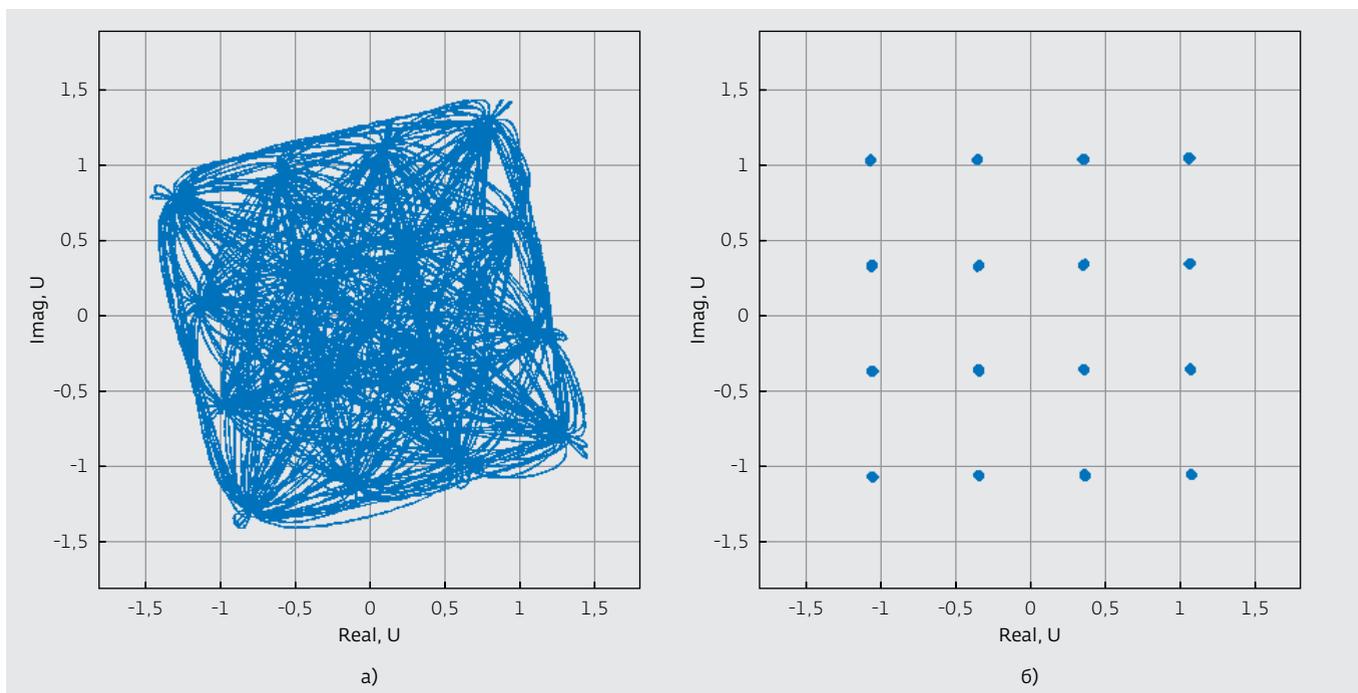


Рис.13. XY-диаграмма I/Q-данных до (а) и после (б) восстановления

восстановить сигнал PRBS-9 с модуляцией типа 16-QAM из захваченных данных. Для этого нужно, во-первых, обнаружить оптимальную фазу и, во-вторых, развернуть диаграмму сигнальных созвездий для модуляции типа 16-QAM.

Для нахождения оптимальной фазы была проведена передискретизация I/Q-сигнала с множителем 80 и в цикле были нарисованы все возможные фазы. Фаза с наименьшим отклонением отсчетов от сетки символов принята за оптимальную. Далее она 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 получалась хорошая восстановленная диаграмма сигнального созвездия для модуляции типа 16-QAM (рис.13б).

Таким образом, опция программного I/Q-интерфейса (RTO-K11) предоставляет исчерпывающий набор средств анализа для современных протоколов связи на основе сигналов с квадратурной модуляцией, применяемых в спутниковой связи с высокой скоростью передачи данных, широкополосных радарх и др.

Использование осциллографа RTO для сбора I/Q-данных улучшает захват данных и ускоряет

процесс по сравнению с обычными контрольно-измерительными установками на основе ПК. С опцией программного I/Q-интерфейса легко работать и она идеально интегрируется в пакет MATLAB, что делает ее удобным интерфейсом для инструментов анализа.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Proakis J. G.** Digital Communications. – Mcgraw-Hill Higher Education, 2008.
2. FS-K101PC/-K103PC/-K105PC EUTRA/LTE Uplink Specifications. – Rohde & Schwarz, June 2012. [Online]. Available: [www.rohde-schwarz.de/file\\_18344/FS-K101-103-105PC\\_FSx-K101-103-105\\_dat-sw\\_en.pdf](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: [www.rohde-schwarz.de/file\\_18584/FS\\_K112-PC\\_dat-sw\\_en.pdf](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: [www.rohde-schwarz.de/file\\_17782/FS-K96\\_dat-sw\\_en.pdf](http://www.rohde-schwarz.de/file_17782/FS-K96_dat-sw_en.pdf)
5. **Schindler S.** Introduction to MIMO – Application Note. July 2009. [Online]. Available: [www2.rohde-schwarz.com/file\\_12364/1MA142\\_0e.pdf](http://www2.rohde-schwarz.com/file_12364/1MA142_0e.pdf)
6. **Reitz S.** R&S RTO oscilloscope with state-of-the-art signal analysis software. – NEWS 206, July 2012, p.23-25.
7. R&S SMBV100A Vector Signal Generator, Operating Manual. – München, 2012.