

# Об использовании программного I/Q-интерфейса осциллографа R&S® RTO в пакете MATLAB®

## Указания по применению

### Изделия:

I R&S® RTO-K11	I R&S® RTO1014
I R&S® RTO1002	I R&S® RTO1022
I R&S® RTO1004	I R&S® RTO1024
I R&S® RTO1012	I R&S® RTO1044

В данном документе приведено описание программного I/Q-интерфейса (опция R&S® K11) осциллографа R&S® RTO с точки зрения его использования в режиме дистанционного управления. Рассматриваются основные операции, приводятся примеры работы и анализа в пакете MATLAB®.

# Содержание

<b>1</b>	<b>Введение .....</b>	<b>3</b>
1.1	Преимущества программного I/Q-интерфейса .....	4
<b>2</b>	<b>Функциональные возможности программного I/Q-интерфейса..</b>	<b>5</b>
2.1	ВЧ-сигналы с квадратурной модуляцией .....	7
2.2	Комплексные сигналы с квадратурной модуляцией в нижнем ПЧ диапазоне.	9
2.3	Комплексные модулирующие I/Q-сигналы .....	13
2.4	Общие параметры .....	14
<b>3</b>	<b>Анализ I/Q-данных осциллографа RTO в пакете MATLAB® .....</b>	<b>15</b>
3.1	Измерительная установка .....	16
3.2	Основные настройки осциллографа RTO .....	19
3.3	Настройка программного I/Q-интерфейса осциллографа RTO .....	20
3.4	Получение I/Q-данных .....	20
3.5	Анализ I/Q-данных.....	22
<b>4</b>	<b>Заключение .....</b>	<b>24</b>
<b>5</b>	<b>Литература .....</b>	<b>25</b>
<b>6</b>	<b>Информация для заказа.....</b>	<b>26</b>
<b>7</b>	<b>Предметный указатель .....</b>	<b>26</b>

# 1 Введение

В данных указаниях по применению рассматривается опция программного I/Q-интерфейса R&S® RTO-K11 цифрового осциллографа R&S® RTO с точки зрения его использования в среде MathWorks MATLAB®. 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], часто обозначаемый как квадратурная амплитудная модуляция (QAM).

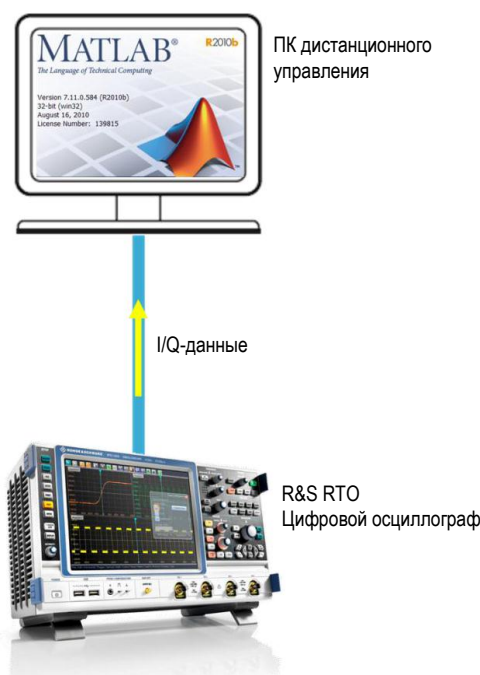
Существует множество сфер применений, в которых используются цифровые модулированные сигналы, начиная, например, с NFC, WCDMA, LTE, DVB-T.

После включения программного I/Q-интерфейса осциллограф RTO 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. Несколько 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. Однако наиболее удобным является пакет MATLAB®, так как он содержит большой набор функций для анализа и его удобно использовать для дистанционного управления.



В качестве третьей альтернативы фирма Rohde & Schwarz предлагает готовые решения для проведения специфического анализа, например, программные пакеты для анализа сигналов LTE – R&S®FS-K10хPC [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.

Вначале в данных указаниях по применению описаны преимущества и возможности программного I/Q-интерфейса осциллографа RTO. Затем описаны связанные с пакетом MATLAB® команды SCPI. Данные команды позволяют пакету MATLAB® подключаться к осциллографу RTO, настраивать программный I/Q-интерфейс, запускать захват данных, загружать I/Q-данные с осциллографа RTO и импортировать их в пакет MATLAB® для дальнейшей обработки.

## 1.1 Преимущества программного I/Q-интерфейса

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 синхронный сбор во всех каналах является обязательным условием.

Еще одним преимуществом является возможность захвата длинных последовательностей I/Q-данных, благодаря эффективному использованию памяти выборки. Благодаря аппаратной цифровой обработке в тракте сбора данных (перенос частоты, фильтрация, повторная выборка – см. главу 2), итоговое время захвата по сравнению со сбором без вышеупомянутой цифровой обработки увеличивается. В главе 3.1 данное преимущество более подробно рассмотрено на конкретном примере.

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, малозумящим 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 промежуточную частоту или на частоту модуляции, принимается осциллографом RTO и анализируется с помощью пакета векторного анализа сигналов FS-K96 OFDM Vector Signal Analysis. Полученное значение EVM выходит на -42 дБ [6], что очень близко к наилучшему 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. 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 использовании осциллографа RTO, выполняющего данные операции, пользователь может сразу приступить к анализу сигналов с квадратурной модуляцией.

## 2 Функциональные возможности программного I/Q-интерфейса

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 в данном разделе 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 на частоту модуляции, 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.

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.

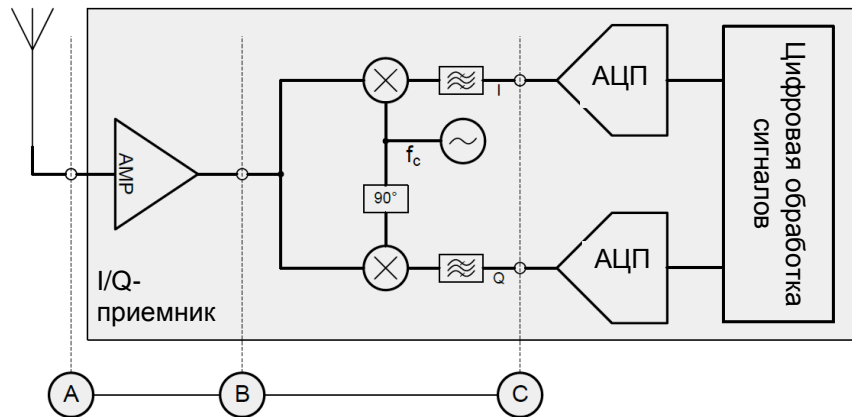


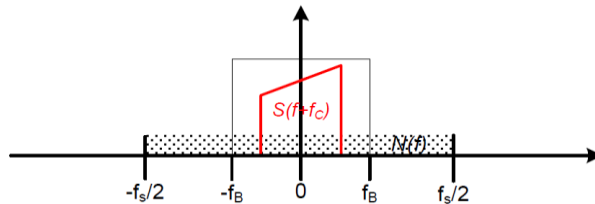
Рисунок 1 – Стандартный I/Q-приемник с точками измерения А, В, С

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 нижних 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 изначальная 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.



**Рисунок 2 – Улучшение отношения с/ш за счет сужения полосы пропускания**

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

## 2.1 ВЧ-сигналы с квадратурной модуляцией

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, выполняет 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. В таблице 1 в конце данного раздела дано описание параметров, характерных для данного режима (несущая частота, настройки боковой полосы, тип входа). В таблице 4 в главе 2.4 обсуждаются общие настройки (полоса пропускания, частота дискретизации, длина записи).

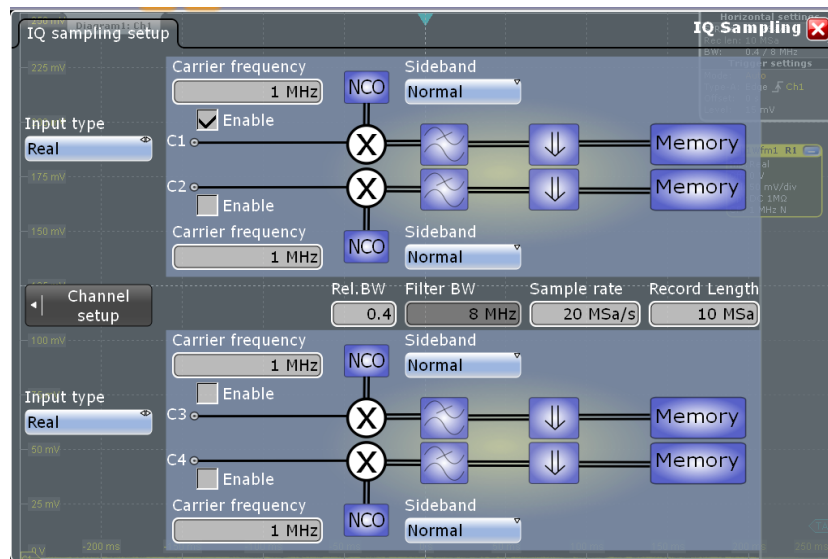


Рисунок 3 – ВЧ-сигналы

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.

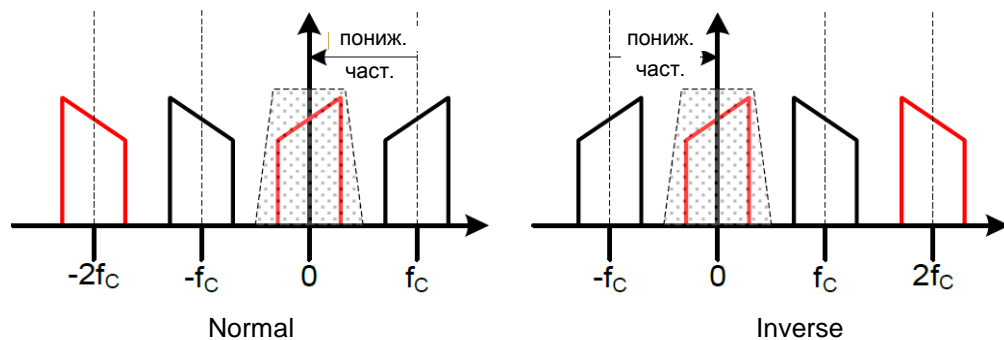


Рисунок 4 – ВЧ-сигналы: настройки боковой полосы



Таблица 1 – Характерные настройки конфигурации для ВЧ-сигналов

Параметр	Мин.	Макс.	Шаг	Команда SCPI
Carrier frequency [Hz] несущая частота, Гц	0.1k	5.0G	0.1k	IQ:CFrequency <IQCarrierFreq>
Sideband боковая полоса	Normal / Inverse			IQ:SBRF <IQSidebandRF>
Input type тип входа	Real			IQ:INPType <IQInputType>
Команды SCPI заданы в канале				CHANnel<m>:

Максимальная перестраиваемая несущая частота, равная 5 ГГц в таблице 1, обозначает математический предел переноса частоты.

## 2.2 Комплексные сигналы с квадратурной модуляцией в нижнем ПЧ диапазоне

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 необходимости 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. Целиком 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 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 в полосу модуляции, 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, 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 спектральные составляющие выходят из-под полосы модуляции (E) из-за второго переноса частоты.

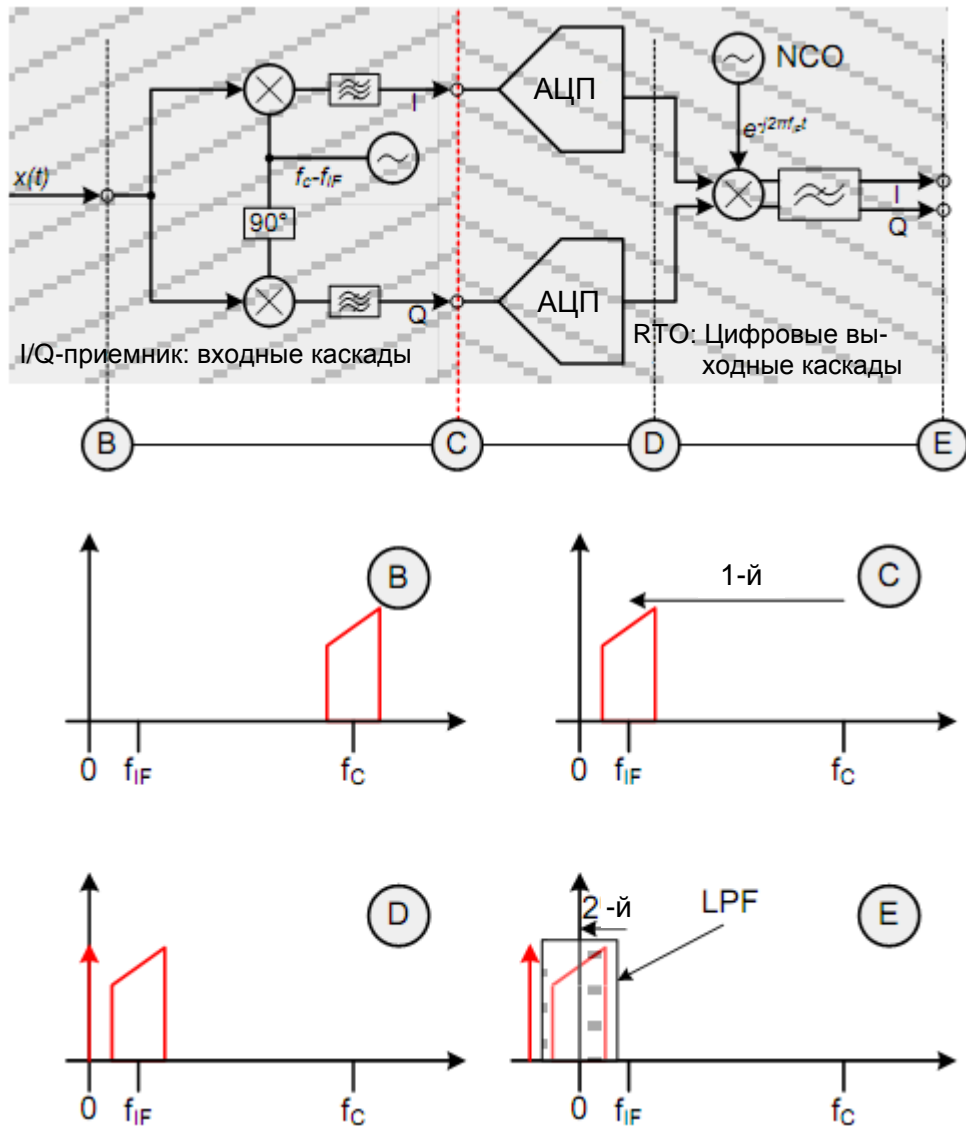


Рисунок 5 – Комплексные сигналы с квадратурной модуляцией в нижнем ПЧ диапазоне

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.

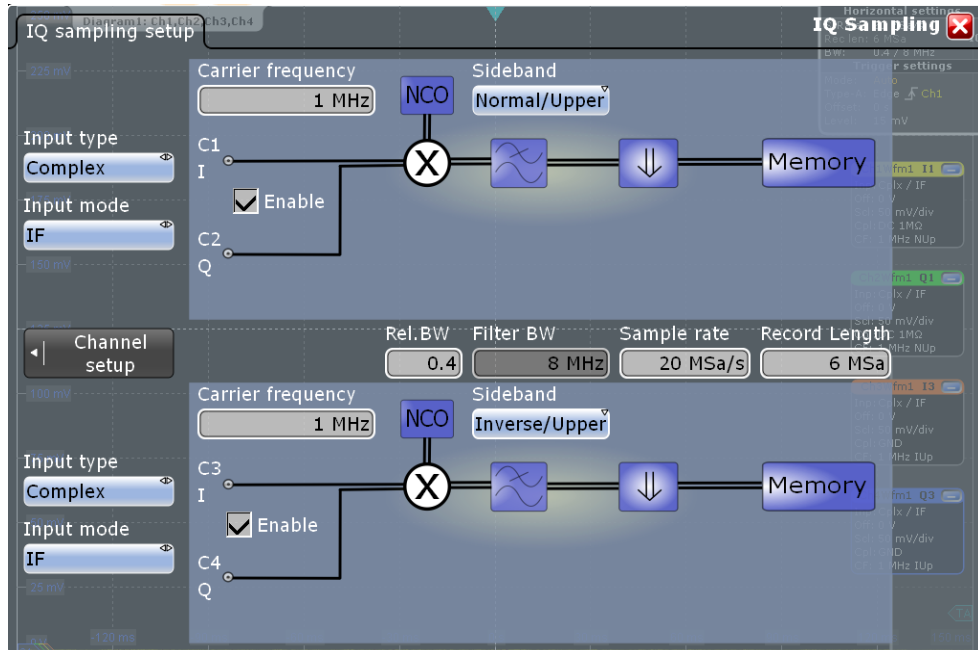
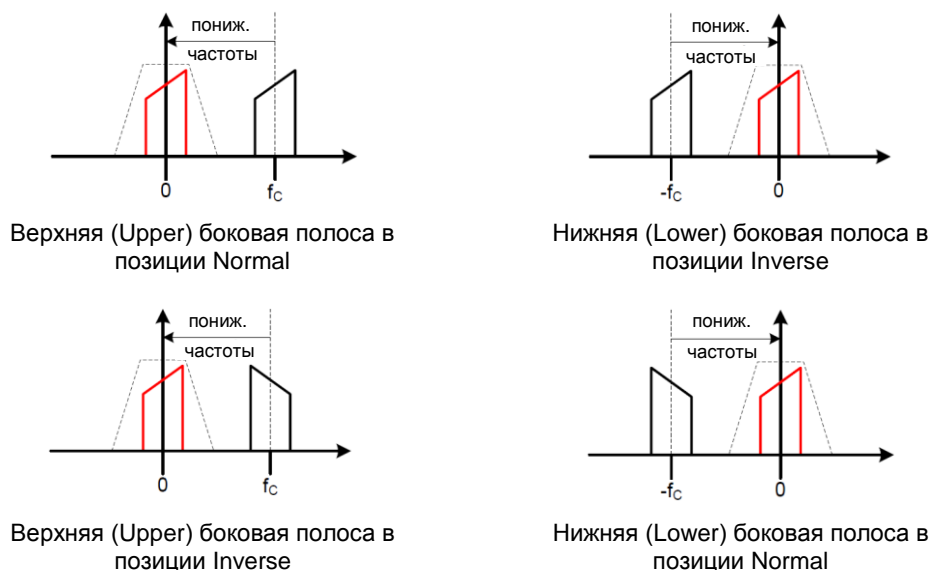


Рисунок 6 – Комплексные сигналы с квадратурной модуляцией в нижнем ПЧ диапазоне

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

В таблице 2 в конце данного раздела описаны параметры, которые характерны для данного режима (несущая частота, настройка боковой полосы, тип входа, режим входа). В таблице 4 в главе 2.4 обсуждаются общие настройки (полоса пропускания, частота дискретизации, длина записи).

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  $e^{\pm j2\pi f_c t}$ . 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 сопряжения, 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.



**Рисунок 7 – Комплексные модулированные сигналы в нижнем ПЧ диапазоне: настройки боковой полосы**

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.

**Таблица 2 – Характерные настройки конфигурации для комплексных модулированных сигналов в нижнем ПЧ диапазоне**

Параметр	Мин.	Макс.	Шаг	Команда SCPI
Carrier frequency [Hz] несущая частота, Гц	0.1k	5.0G	0.1k	IQ:CFrequency <IQCarrierFreq>
Sideband боковая полоса	Верхняя боковая полоса в позиции Normal Нижняя боковая полоса в позиции Normal Верхняя боковая полоса в позиции Inverse Нижняя боковая полоса в позиции Inverse			IQ:SBIF <IQSidebandIF>
Input type тип входа	Complex			IQ:INPType <IQInputType>
Input mode режим входа	IF			IQ:INPMode <IQInputMode>
Команды SCPI заданы в канале				CHANnel<m>:

## 2.3 Комплексные модулирующие I/Q-сигналы

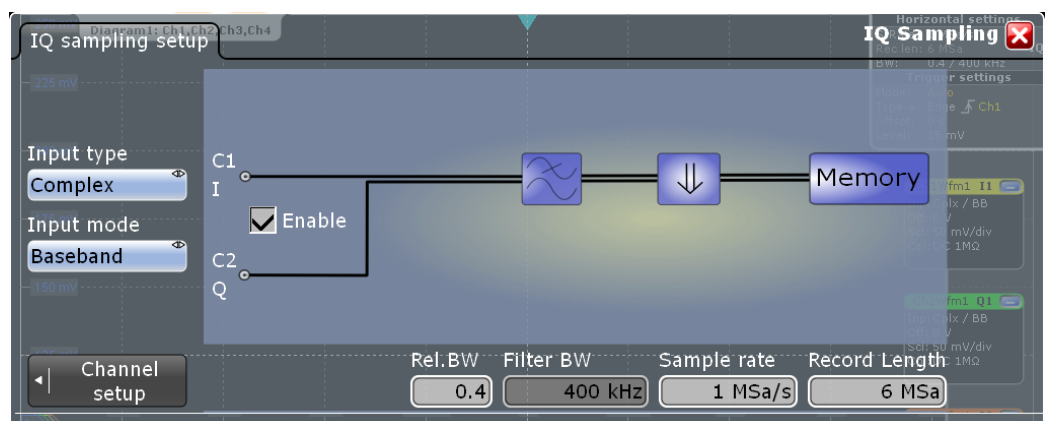
Комплексные модулирующие I/Q-сигналы – это последний из трех используемых режимов, он показан на рисунке 8. Обратившись к примеру приемника на рисунке 1, увидим, что в данном режиме осциллограф RTO перехватывает сигналы в точке измерения C, в которой уже присутствуют модулирующие I/Q-сигналы. В этом 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 таблице 3 приведены параметры, характерные для данного режима (тип входа, режим входа). В таблице 4 в главе 2.4 обсуждаются общие настройки (полоса пропускания, частота дискретизации, длина записи).

**Таблица 3 – Характерные настройки конфигурации для комплексных модулирующих I/Q-сигналов**

Параметр	Значение	Команда SCPI
Input mode режим входа	Baseband	IQ:INPMode <IQInputMode>
Input type тип входа	Complex	IQ:INPTYPE <IQInputType>
Команды SCPI заданы в канале		CHANnel<m>:

В данном случае, как и в главе 2.2, 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.



**Рисунок 8 – Комплексные модулирующие I/Q-сигналы**

## 2.4 Общие параметры

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); они описаны в данном разделе. Все общие параметры сведены в таблицу 4. Данными параметрами являются длина записи, частота дискретизации и полоса пропускания фильтра, которая задается в зависимости от частоты дискретизации. В данном разделе под частотой дискретизации понимается частота, с которой отсчеты сохраняются в памяти выборки. На рисунке 9 изображено меню, в котором можно настроить данные параметры.

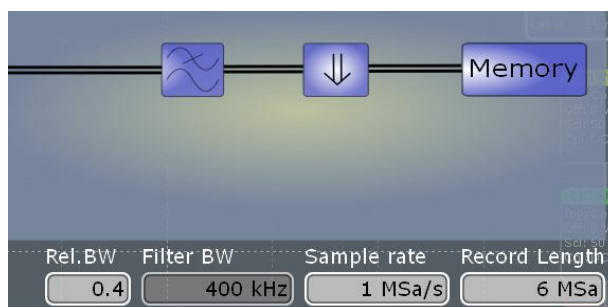


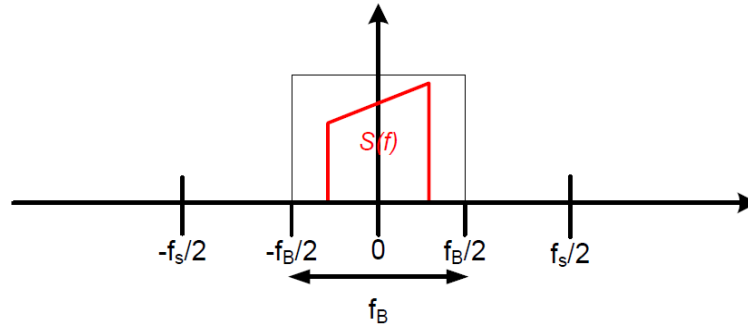
Рисунок 9 – Общие параметры для I/Q-сигналов

Как уже обсуждалось в предыдущих главах, 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 полосы фильтр имеет плоскую АЧХ (полоса не по уровню -3 дБ).

Таблица 4 – Характерные настройки конфигурации для ВЧ-сигналов

Параметр	Мин.	Макс.	Шаг	Команда SCPI
I/Q mode activation активация режима I/Q		ON		IQ:STATe <IQMode>
Sample rate [Sa/s] частота дискретизации, отсчетов/с	1.0k	10.0G	1	IQ:SRATe <SampleRate>
Relative bandwidth относит. полоса	0.04	0.80	0.01	IQ:RBWidth <RelBandwidth>
Record length [Sa] длина записи, отсчетов	1.0k	10M/6M	1	IQ:RLENgth <RecLength>
Acquisition time время захвата	= 'record length' / 'sample rate'		--	--

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.



‘полоса фильтра  $f_B$ ’ = ‘отн. полоса’ \* ‘частота дискретизации’

**Рисунок 10 – Связь полосы фильтра и частоты дискретизации**

Более подробную информацию о функциях программного I/Q-интерфейса можно найти в руководстве пользователя [8].

### 3 Анализ I/Q-данных осциллографа RTO в пакете MATLAB®

Описание метода доступа пакета MATLAB® к осциллографу RTO состоит из пяти частей; в первой описывается измерительная установка. Во второй разъясняются настройки осциллографа RTO для дистанционного управления; третья часть посвящена характерным настройкам программного I/Q-интерфейса, подробное описание которых было дано в предыдущей главе "Функциональные возможности программного I/Q-интерфейса". Четвертая часть посвящена передаче отсчетов I/Q-данных с осциллографа RTO на управляющий ПК. Наконец в последней части приведен пример простого анализа полученных I/Q-данных.

Фирма Rohde & Schwarz предлагает большой набор информационных материалов по автоматизации измерений с помощью пакета MATLAB®. Подробное описание отдельных команд SCPI можно найти в главе 17.2.16 руководства пользователя осциллографа RTO [8]. Конкретные инструкции по дистанционному управлению осциллографом RTO можно найти в указаниях по применению [9], а пример полноценного сценария MATLAB® для настройки и получения I/Q-данных описывается в настоящих указаниях по применению; его также можно скачать из интернет-сети в виде отдельного файла.

## 3.1 Измерительная установка

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 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 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 настроенной оконной функцией типа приподнятого косинуса с полосой 500 кГц (рисунок 12) и коэффициентом скругления 0,75.

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 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.

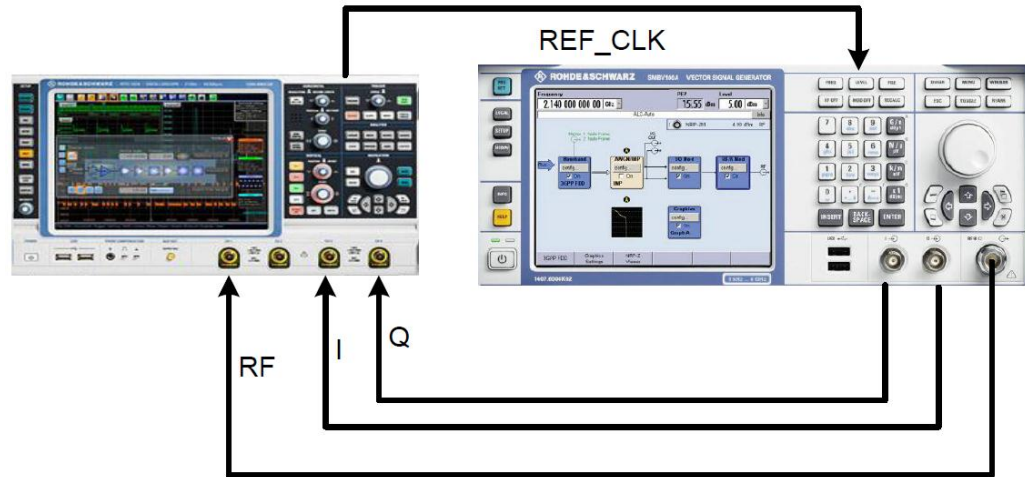
Обработка реальных I/Q-сигналов в настоящих указаниях по применению не описывается. Расширение MATLAB communication toolbox содержит большой выбор моделей, например, DVB-T [11]. Их можно адаптировать под программный I/Q-интерфейс.

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 показан 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 приближ. 500 кГц. Полоса частот сигнала расширена на коэффициент скругления.



**Рисунок 11 – Измерительная установка с осциллографом RTO (слева) и генератором сигналов SMBV100A (справа)**

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 настроен на частоту 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.

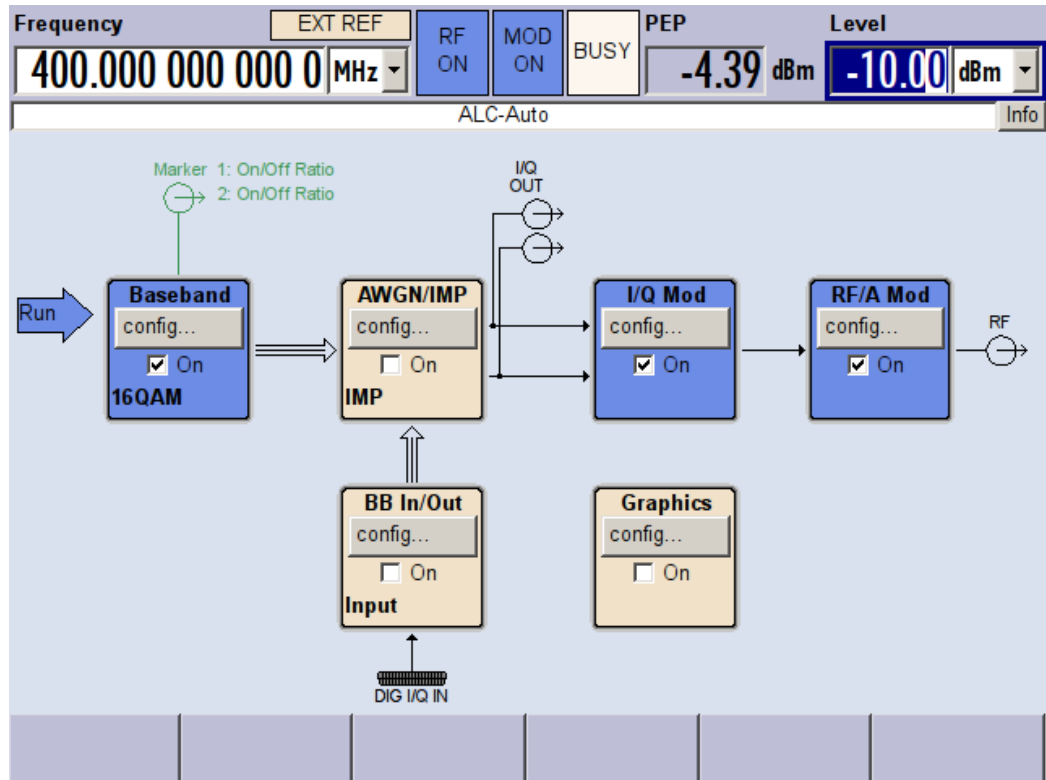


Рисунок 12 – Конфигурация генератора сигналов SMBV100A

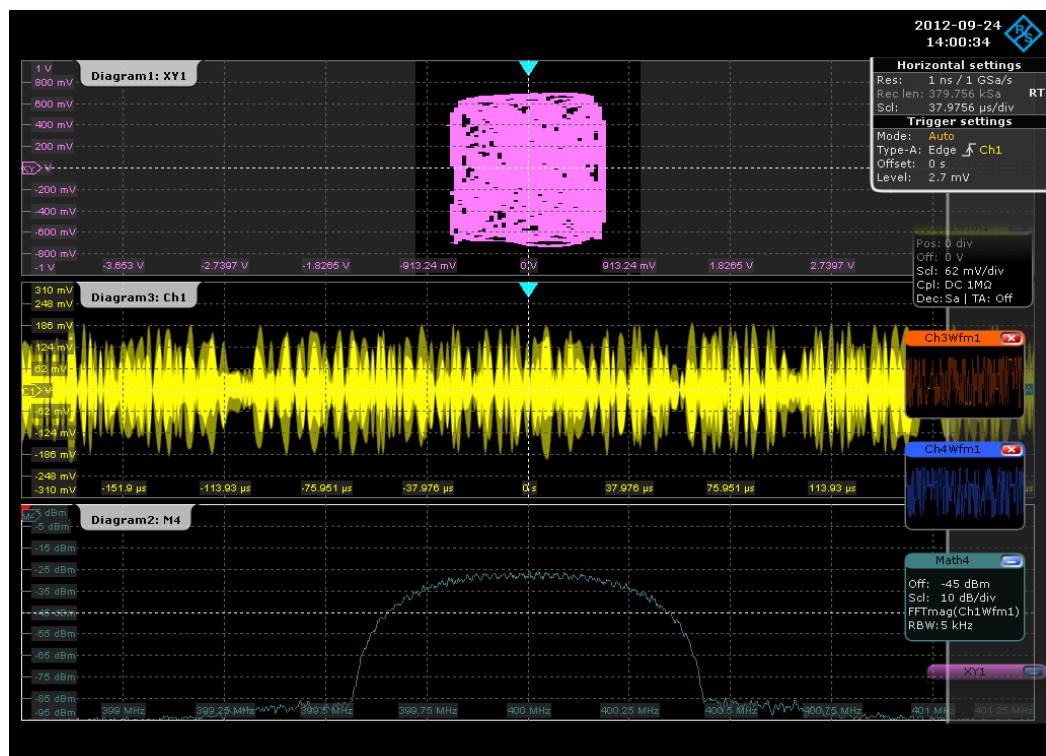


Рисунок 13 – Измерения I/Q-сигнала осциллографом RTO

## 3.2 Основные настройки осциллографа RTO

Фрагмент программного сценария MATLAB®, представленный в данном разделе, демонстрирует дистанционное управление захватом I/Q-данных. Для подключения к прибору, необходимо создать VISA-соединение с помощью IP-адреса, основанного на названии прибора (строки 011 и 013). Ряд команд пакета MATLAB® выполняет основную настройку, состоящую из: включения экрана (строка 019), предварительной настройки осциллографа RTO (строка 022), установки канала на 50 Ом и связи по постоянному току (строка 025) и настройки автомасштабирования (строка 028). Для возможности получения I/Q-данных с помощью созданного объекта пакета MATLAB® (строка 013), необходимо увеличить локальную память. По умолчанию размер буфера в пакете MATLAB® равен 512 байт, что слишком мало для данной задачи при загрузке одного пакета данных. Требуемые размер буфера можно вычислить по следующей формуле: 'число отсчетов' \* 2 (для I и Q) \* 4 (4-х байтное число с плавающей запятой в стандарте IEEE 754). При подключении к осциллографу R&S® RTO с программной I/Q-опцией и при максимальной длине записи 10 млн. отсчетов на канал, для передачи данных достаточно 50 МБ при любых условиях для входного visa-буфера пакета MATLAB (строка 015).

```

001 % несущая частота 400 МГц
002 nCarrierFrequency = 400e6;
003 % передискретизация с множителем 80 от исходной частоты следования
    символов 500 ксим/с
004 nSampleRate = 40000000;
005 % число отсчетов
006 nNofSamples = 800000;
007 % номер канала, подключенного к источнику I/Q-сигнала
008 nChannelNo = 1;
009 % имя осциллографа RTO для дистанционного доступа через сеть
010 sRTO_hostname = 'RTO-200300';
011 sIPAddress = resolvehost(sRTO_hostname, 'address');
012 % Создание VISA-соединения к заданному IP-адресу
013 RTO = visa('ni', ['TCPIP::' sIPAddress]);
014 % Увеличение размера буфера, например, для передачи I/Q-данных
015 RTO.InputBufferSize = 80e6;
016 % Подключение к прибору
017 fopen(RTO);
018 % Включение режима просмотра с помощью дистанционного управления
019 fprintf(RTO, 'SYST:DISP:UPD ON');
020 %% ----- Настройка осциллографа RTO -----
021 % Предварительная настройка осциллографа RTO и ожидания ее окончания
022 fprintf(RTO, '*RST; *OPC?');
023 [~,] = fscanf(RTO);
024 % Установка связи по пост. току 50 Ом
025 fprintf(RTO, ['CHAN' int2str(nChannelNo) ':COUP DC']);
026 % Запуск автомасштабирования,
027 % может занять какое-то время, так что требуется синхронизация с помощью
    функции fscanf()
028 fprintf(RTO, ' AUToscale; *OPC?');
029 [~,] = fscanf(RTO);

```

### 3.3 Настройка программного I/Q-интерфейса осциллографа RTO

Теперь осциллограф RTO можно настроить на конкретный I/Q-режим, в данном случае – захват ВЧ-сигнала согласно главе 2. Следующие настройки (строки 030 ... 052) выполнены согласно описанию в главах 2.1 и 2.4.

```

030     %% ----- Настройка программного I/Q интерфейса RTO-K11-----
031     sInputType = 'REAL';
032     sInputMode = 'RFIF';
033     sSideband = 'NORMal';
034     nRelBW = 0.6;
035     % Включение IQ-режима
036     fprintf(RTO, 'IQ:STATE ON');
037     % Режим однократной развертки
038     fprintf(RTO, 'STOP');
039     % Настройка входного сигнала, режима входа и боковой полосы
040     fprintf(RTO, ['CHAN' int2str(nChannelNo) ':IQ:INPType ' sInputType]);
041     fprintf(RTO, ['CHAN' int2str(nChannelNo) ':IQ:INPMode ' sInputMode]);
042     % Использование нормальной боковой полосы
043     fprintf(RTO, ['CHAN' int2str(nChannelNo) ':IQ:SBRF ' sSideband]);
044     % Несущая частота или центральная частота
045     fprintf(RTO, ['CHAN' int2str(nChannelNo) ':IQ:CFrequency ' ...
046     num2str(nCarrierFrequency) ]);
047     % Установка требуемой частоты дискретизации
048     fprintf(RTO, ['IQ:SRate ' num2str(nSampleRate) ]);
049     % Установка соответствующей полосы пропускания фильтра
050     fprintf(RTO, ['IQ:BWIDth ' num2str(nRelBW) ]);
051     % Используемая длина записи
052     fprintf(RTO, ['IQ:RLEN ' num2str(nNoFSamples) ]);

```

### 3.4 Получение I/Q-данных

После настройки дистанционного доступа и параметров I/Q-захвата, осциллограф RTO готов к захвату I/Q-данных. Фрагмент сценария MATLAB®, представленный в данном разделе настраивает осциллограф RTO на использование чисел с плавающей запятой в двоичном формате (строка 054). Это эффективный способ загрузить данные на компьютер, сэкономить полосу во время передачи и нагрузить процессор осциллографа RTO. Выполняется однократный сбор данных (строка 061) и после успешного запуска I/Q-данные становятся доступны для скачивания.

После завершения сбора данных (строка 062), следующим шагом является полученных данных от осциллографа RTO. Одной команды (более подробную информацию см. в таблице 5 данного раздела) достаточно для начала передачи данных из указанного канала осциллографа RTO (строка 069), а последующие команды считывания (строки 071 и 074, и 077, и 081) извлекают I/Q-данные. Формат передачи задается как 'REAL,32'. Представление чисел с плавающей запятой в формате ASCII также возможно, но такой формат сильнее нагружает процессор осциллографа RTO и процессор ПК. Функция пакета MATLAB® (`textscan`) конвертирует всю загруженную информацию из строки в массив чисел. Данный шаг можно пропустить, если использовать числа с плавающей запятой в двоичном формате.

Полученные I/Q-данные представляют собой одномерный массив с чередующимися действительными (I) и мнимыми (Q) значениями. Это сделано для того, чтобы снизить затраты на передачу. Желательно иметь двумерный массив, один столбец которого содержит действительные, а второй – мнимые значения. В пакете MATLAB® не требуется выполнять перераспределение данных, так как данный язык программирования имеет гибкие процедуры для доступа к I/Q-данным в требуемом формате (строка 082).

**Таблица 5 – Команды SCPI для загрузки данных**

Параметр	Команда SCPI
Получить набор I/Q-данных	IQ:DATA[:VALues]?
Получить конкретные отсчеты записанных I/Q-данных.	IQ:DATA:MEMory? <OffsetSamples>, <NoOfSamples>
Получить заголовок I/Q-данных	IQ:DATA:HEADer?
Команды SCPI заданы в канале	CHANnel<m>:

```

053 %% Формат передачи [ASC/UINT/REAL]
054 sDataFormat = 'REAL,32';
055 sDataFormat = sprintf('FORM %s', sDataFormat);
056 sBinaryFormatString = 'float';
057 nSizeType = 4;
058 fprintf(RTO, sDataFormat);
059 %% ----- Выполнение однократной развертки -----
060 % Выполнение развертки и синхронизации с помощью команды '*OPC?' с
    последующим считыванием
061 fprintf(RTO, 'RUNSingle; *OPC?');
062 [~, ] = fscanf(RTO);
063 %% ----- Запрос I/Q-данных -----
064 % данные следуют в формате #NLLLLFFFFFFf ...
065 % где N - индикатор длины
066 %     LLLL - число отсчетов
067 %     FFFF/ffff 4 байтное число по IEEE 754
068 % Захват I/Q-данных из соответствующего канала
069 fprintf(RTO, ['CHAN' int2str(nChannelNo) ':IQ:DATA:VALues?']);
070 % проверка, что данные начинаются с символа '#'
071 sStartIndicator = fread(RTO,1,'char');
072 if sStartIndicator ~= '#' fprintf('oops!\n'); end;
073 % проверка, что длина в поле длины в единицах измерения
074 nLengthOfLengthfield = fread(RTO,1,'char');
075 nLengthOfLengthfield = str2double(char(nLengthOfLengthfield));
076 % проверка длины записи
077 nBlockLength = fread(RTO, nLengthOfLengthfield , 'char');
078 nBlockLength = str2double(char(nBlockLength)) / nSizeType;
079 % для корректной работы, нужно учесть последний конечный байт!
080 % осциллограф RTO поддерживает возрастающий порядок конечных байтов
081 u = fread(RTO, nBlockLength, 'float');
082 u = u(1:2:end) + 1i*u(2:2:end);

```

### 3.5 Анализ I/Q-данных

Следующий фрагмент кода демонстрирует анализ данных. Полученные данные нормированы на среднюю мощность (строки 085 - 086) и выведены на XY-диаграмме (строка 087). Из-за передискретизации результат не является непосредственно диаграммой сигнальных созвездий и видны переходы из состояния в состояние. Кроме того, из-за не скомпенсированной начальной фазы генератора, ожидаемая диаграмма сигнальных созвездий развернута под углом (см. рисунок 14 левая часть).

```

083     %% ----- Изображение I/Q-данных -----
084     % нормировка на среднюю мощность
085     nMeanMagnitude = sqrt(mean(real(u).^2 + imag(u).^2));
086     u = u / nMeanMagnitude;
087     plot(u);
088     % второй график
089     nOverSampling = nSampleRate / 500000; % symbol rate -- 500 ksym/s
090     nSync = 60; % visually determined
091     meanPhase = mean(angle(u(nSync:nOverSampling:end)));
092     for phase=1:nOverSampling;
093         plot((u((1+phase):nOverSampling:end)*exp(-1i*meanPhase)), '.');
094         pause(0.5);
095     end

```

Необходимо выполнить следующие действия, чтобы восстановить сигнал PRBS-9, с модуляцией типа 16-QAM из захваченных данных. Первое, обнаружить оптимальную фазу дискретизации и второе, развернуть диаграмму сигнальных созвездий для модуляции типа 16-QAM. Для этого может потребоваться цифровая система ФАПЧ, что в настоящих указаниях по применению 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 (строки 092 ... 095). Фаза с наименьшим отклонением отсчетов от сетки символов была принята за оптимальную. Оптимальная фаза передискретизированных I/Q-данных получилась равной #60.

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 (строка 091). Для устранения наклона, данные умножались на отрицательную комплексную оценку фазы ( $e^{-j\varphi}$ , строка 093). Для фазы, равной #60, получается хорошая восстановленная диаграмма сигнального созвездия для модуляции типа 16-QAM (рисунок 14, правая часть).

Представить комплексные I/Q-данные можно с помощью расцветивания (см. рисунок 15), не представленного в примере программного кода. При использовании температурной цветовой палитры, частота появления I/Q-данных показывает диаграмму сигнального созвездия.

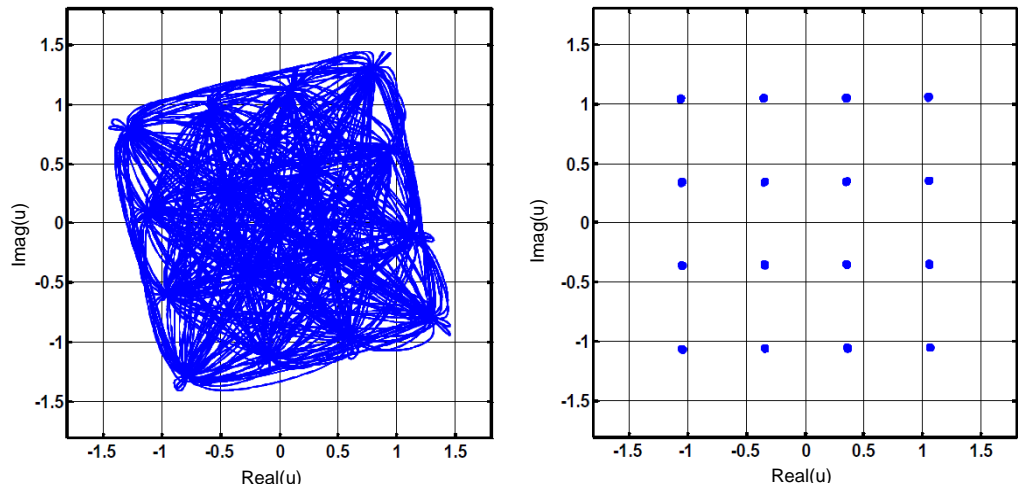


Рисунок 14 – XY-диаграмма собранных I/Q-данных

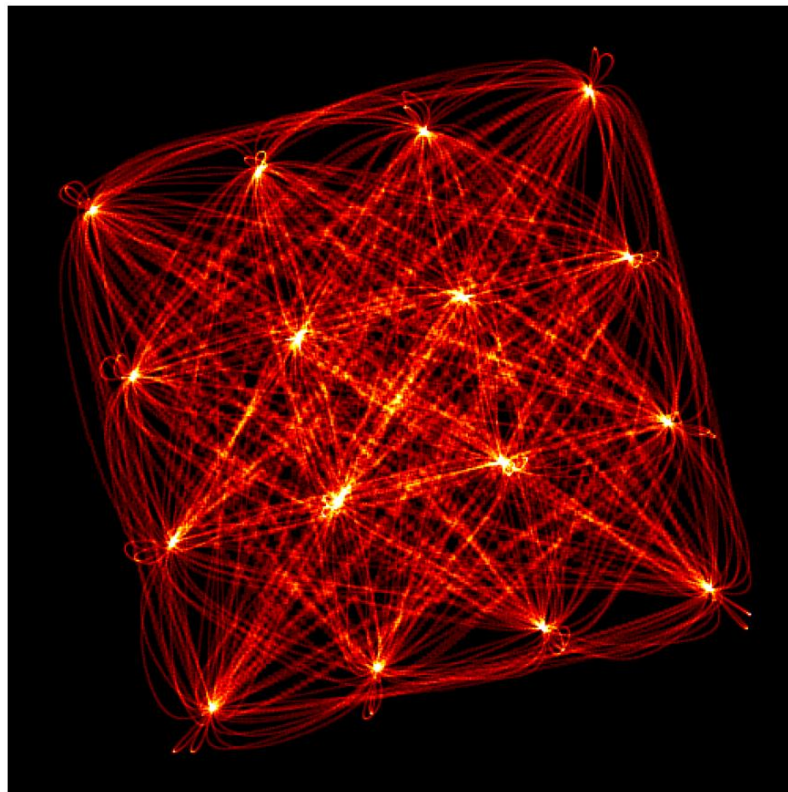


Рисунок 15 – Расцвеченные I/Q-данные

## 4 Заключение

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 с обычными контрольно-измерительными установками на основе ПК. С опцией программного I/Q-интерфейса легко работать и она идеально интегрируется в пакет MATLAB<sup>®</sup>, что делает данную опцию удобным интерфейсом для инструментов анализа.

MATLAB<sup>®</sup> является зарегистрированной торговой маркой фирмы MathWorks, Inc.

R&S<sup>®</sup> является зарегистрированной торговой маркой фирмы Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG.



## 5 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](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](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](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\\_12364/1MA142\\_0e.pdf](http://www2.rohde-schwarz.com/file_12364/1MA142_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 Oszilloscope - User Manual, München: Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, 2012.
- [9] Jürgen 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\\_13938/1MA171\\_5e.pdf](http://www2.rohde-schwarz.com/file_13938/1MA171_5e.pdf).
- [10] Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, R&S®SMBV100A Vector Signal Generator -- Operating Manual, München, 2012.
- [11] MathWorks®, „Digital Video Broadcasting - Terrestrial," 2012. [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/help/comm/examples/digital-video-broadcasting-terrestrial.html>.

## 6 Информация для заказа

Обозначение	Тип	Код заказа
<b>Цифровые осциллографы</b>		
<b>600 МГц, 2 канала</b> 10 млрд. отсчетов/с, 20/40 млн. отсчетов	R&S®RTO1002	1316.1000.02
<b>600 МГц, 4 канала</b> 10 млрд. отсчетов/с, 20/40 млн. отсчетов	R&S®RTO1004	1316.1000.04
<b>1 ГГц, 2 канала</b> 10 млрд. отсчетов/с, 20/40 млн. отсчетов	R&S®RTO1012	1316.1000.12
<b>1 ГГц, 4 канала</b> 10 млрд. отсчетов/с, 20/80 млн. отсчетов	R&S®RTO1014	1316.1000.14
<b>2 ГГц, 2 канала</b> 10 млрд. отсчетов/с, 20/40 млн. отсчетов	R&S®RTO1022	1316.1000.22
<b>2 ГГц, 4 канала</b> 10 млрд. отсчетов/с, 20/80 млн. отсчетов	R&S®RTO1024	1316.1000.24
<b>4 ГГц, 4 канала</b> 20 млрд. отсчетов/с, 20/80 млн. отсчетов	R&S®RTO1044	1316.1000.44
Опция тактирования - ОСХО 10 МГц	R&S®RTO-B4	1304.8305.02
<b>Программные опции</b>		
<b>Программный I/Q-интерфейс</b>	R&S®RTO-K11	1317.2975.02

## 7 Предметный указатель

DVB-T Digital Video Broadcasting – Terrestrial (стандарт цифрового наземного ТВ вещания) .....	3	QAM Quadrature Amplitude Modulation (квадратурная амплитудная модуляция) ..	16
ENOB Effective Number Of Bits (эффективное число битов) .....	5	RADAR RADIO Detection And Ranging (радиолокатор) .....	4
EVM Error Vector Magnitude (модуль вектора ошибок).....	5	RTO Real-Time oscilloscope (осциллограф реального времени) .....	3, 7, 11, 13, 15, 26
I/Q In-phase / Quadrature-Procedure (синфазная/квадратурная процедура) .....	3	SCPI Standard Commands for Programmable Instruments (стандартные команды для программируемых приборов) .....	4
NCO Numerically Controlled Oscillator (программируемый генератор) .....	6	WCDMA Wideband Code Division Multiple Access (широкополосный множественный доступ с кодовым разделением каналов) .....	3
NFC Near Field Communication (связь в ближней зоне) .....	3	XML eXtended Mark-up Language (расширенный язык разметки) .....	3
OFDM Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов) .....	3	ВЧ Высокая частота .....	4
PRBS Pseudo Random Bit Sequence (псевдослучайная битовая последовательность) .....	16	ИУ Испытуемой устройство .....	5
		С/Ш Отношение сигнал/шум .....	6

### **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.

### **Обязательства по охране окружающей среды**

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



### **Контакты в регионах**

США и Канада

США: 1-888-TEST-RSA (1-888-837-8772)

из-за пределов США: +1 410 910 7800

[CustomerSupport@rohde-schwarz.com](mailto:CustomerSupport@rohde-schwarz.com)

Восточная Азия

+65 65 13 04 88

[CustomerSupport@rohde-schwarz.com](mailto:CustomerSupport@rohde-schwarz.com)

Прочие регионы

+49 89 4129 137 74

[CustomerSupport@rohde-schwarz.com](mailto:CustomerSupport@rohde-schwarz.com)

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**

Mühlhofstraße 15 | D - 81671 München

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

[www.rohde-schwarz.com](http://www.rohde-schwarz.com)