

Контрольно-измерительные решения для программно-определяемых радиосистем (SDR)

Указания по применению

Первоначально применяемая в гражданских мобильных телефонах, концепция программно-определяемой радиосистемы (SDR, software defined radio) начала проникать на рынок радиосистем, используемых для военных применений.

В настоящем документе содержится описание технологии SDR в применении для военных радиостанций и представлены соответствующие контрольно-измерительные решения, предлагаемые компанией Rohde & Schwarz.

Содержание

1	Введение	4
1.1	Программно-определяемая радиостанция (SDR)	4
1.2	Требования к радиоаппаратуре военного назначения	6
1.3	Протоколы связи и параметры измерений	7
1.3.1	Протоколы связи	7
1.3.2	Параметры испытаний	8
1.4	SDR-радиостанции от компании Rohde & Schwarz	11
2	Контрольно-измерительные решения в сфере разработки, производства и обслуживания.....	13
2.1	Измерения в диапазоне ВЧ и ПЧ	15
2.1.1	Испытания передатчика: анализатор спектра и сигналов	15
2.1.2	Испытания приемника: генераторы сигналов	23
2.1.3	Рабочие характеристики гетеродина (LO)	27
2.1.4	Измерение параметров усилителя	29
2.1.5	Измерение параметров фильтра / смесителя	31
2.1.6	Измерение параметров аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 33	
2.1.7	Антенны.....	35
2.2	Измерения в диапазоне модулирующих частот	36
2.2.1	Измерения в шинах связи: осциллографы	37
2.2.2	Подключение к цифровому I/Q-интерфейсу (EX-IQ-Box).....	38
2.2.3	Измерения на аудиоинтерфейсе	38
2.3	Испытания на электромагнитную совместимость	39
2.4	Система тестирования для производства, контроля и обслуживания	40
2.5	Эмулятор канала: замирания	44
2.6	Аналоговый радиокommunikационный монитор CMS ¹	47
2.7	Тестер СТН: обслуживание на месте эксплуатации	50
2.8	Интеграция приборов в инструменты EDA	51
3	Приложение	52
3.1	Библиография.....	52
3.2	Дополнительная информация	53
3.3	Информация для заказа	53

В настоящих указаниях по применению для контрольно-измерительного оборудования компании Rohde & Schwarz используются следующие сокращения:

R&S[®]SMU200A именуется SMU.
R&S[®]SMJ100A именуется SMJ.
R&S[®]AMU200A именуется AMU.
R&S[®]SMBV100A именуется SMBV.
R&S[®]AFQ100A/B именуется AFQ.
R&S[®]Ex-IQ-Box именуется Ex-IQ-Box.

R&S[®]SMA100A именуется SMA.
R&S[®]SMB100A именуется SMB.
R&S[®]SMC100A именуется SMC.
R&S[®]SMF100A именуется SMF.
R&S[®]SGS100A именуется SGS.

R&S[®]FSQ именуется FSQ.
R&S[®]FSV именуется FSV.
R&S[®]FSW именуется FSW.
R&S[®]FSG именуется FSG.
R&S[®]FSUP именуется FSUP.
R&S[®]FMR именуется FMR.
R&S[®]FSVR именуется FSVR.
R&S[®]FSL именуется FSL.
R&S[®]FSH4/8 именуется FSH.
R&S[®]FMU36 именуется FMU.

R&S[®]ZVA именуется ZVA.
R&S[®]ZVB именуется ZVB.
R&S[®]ZNB именуется ZNB.
R&S[®]ZNC именуется ZNC.
R&S[®]ZVL именуется ZVL.

R&S[®]ESU именуется ESU.
R&S[®]ESPI именуется ESPI.
R&S[®]ESCI именуется ESCI.
R&S[®]ESL именуется ESL.

R&S[®]RTO именуется RTO

R&S[®]CTH100A/200A именуется CTH.

1 Введение

В эпоху аналоговой радиосвязи радиотехнические системы были полностью основаны на аппаратной базе. Даже с появлением стандартов цифровой радиосвязи, радиотехника оставалась зависима от аппаратной базы, и поэтому вся аппаратура была приспособлена к единой технологии радиосвязи.

Почему SDR?

Эта идея появилась незадолго до того, как пользователи заинтересовались радиоустройством, которое поддерживало бы несколько стандартов радиосвязи. Например, путешественникам требовались мобильные телефоны, которые могли бы одновременно работать более чем с одним стандартом радиосвязи уже тогда, когда в коммерческом применении использовались лишь стандарты GSM и CDMA. Сейчас любой имеющийся на рынке современный мобильный телефон поддерживает, минимум, несколько стандартов, включая LTE, W-CDMA, GSM, Bluetooth® и WLAN.

Одним из способов получения такого устройства является использование множества аппаратных конфигураций, каждая из которых была специально адаптирована к одному из стандартов радиосвязи, но такой метод ведет к радикальному увеличению стоимости. Идеальным решением было бы радиоустройство, которое может (пере)конфигурироваться с помощью программного обеспечения.

Термин “программно-определяемая радиосистема” (“software defined radio”, SDR) определен недостаточно четко. Определение различается в зависимости от автора и сферы применения. Форум по инновациям в области беспроводных технологий [Wireless Innovation Forum](#) определяет SDR следующим образом: “Радиосистема, в которой некоторые или все функции физического уровня определяются программным образом”

В данном документе представлена основная идея SDR-радиостанции и приведен обзор радиостанций от Rohde & Schwarz. В главе 2 представлены контрольно-измерительные решения, предлагаемые компанией Rohde & Schwarz.

1.1 Программно-определяемая радиостанция (SDR)

От аналоговых до программно-определяемых радиосистем (радиостанций)

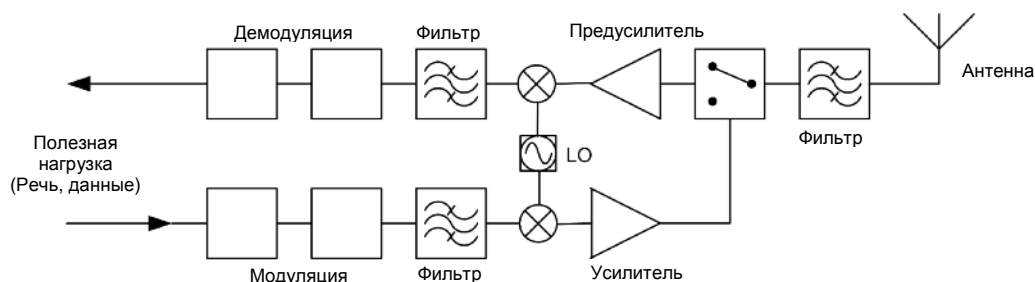


Рис. 1 – Обычная (аппаратная) радиостанция (упрощенный вид).

На рис. 1 показано схематическое изображение классической аппаратной радиостанции, разделенной на передающую и принимающую части. Принимаемый сигнал в первую очередь фильтруется и проходит через предварительный усилитель. Затем сигнал проходит понижающее преобразование с частоты несущей на промежуточную частоту (эта процедура может выполняться в

несколько этапов). Сигнал еще раз фильтруется, а затем демодулируется. Блок (де)модуляции может быть как аналоговым, так и цифровым.

В идеальной SDR-радиостанции вся система может быть цифровой, а значит, переконфигурируемой с помощью программного обеспечения. Аналогово-цифровое преобразование должно производиться как можно ближе к антенне (см. рис. 2). Преобразование на промежуточную частоту не требуется.

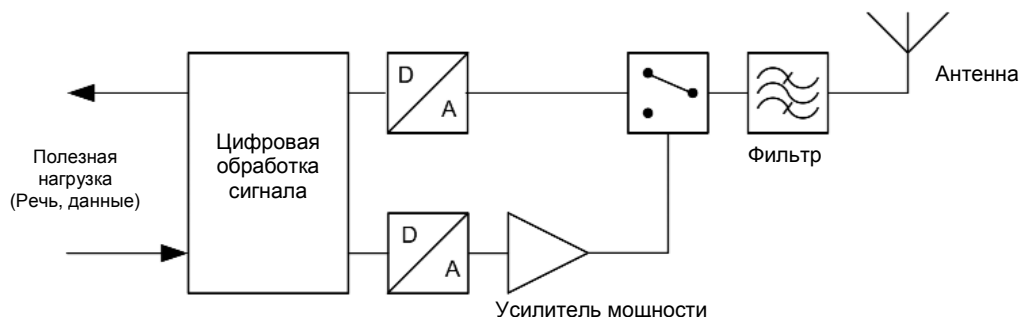


Рис. 2 – “Идеальная” SDR-радиостанция (упрощенный вид).

В идеальной SDR-радиостанции аналого-цифровой преобразователь (АЦП) должен работать со всем частотном диапазоне. С нынешними АЦП это (пока что) невыполнимо и неприменимо в портативных устройствах, так как требуется использование оборудования большой мощности.

С другой стороны, если ВЧ-сигналы будут преобразованы на промежуточную частоту за один этап, АЦП должен будет работать только в полосе пропускания канала (то есть примерно 20 МГц для LTE сигнала). Это делает возможной упрощенную модель, основанную на реальных SDR-системах. SDR-радиостанция может быть разделена на аналоговую и цифровую части. Некоторые части действительно физически разделены и соединены дополнительной цифровой шиной, по которой передаются цифровые I/Q-сигналы (рис. 4). Такая реализация в действительности предпочтительнее из-за повышения эффективности, которое может быть получено при использовании адаптивного цифрового предвысказания для модуля усилителя мощности.

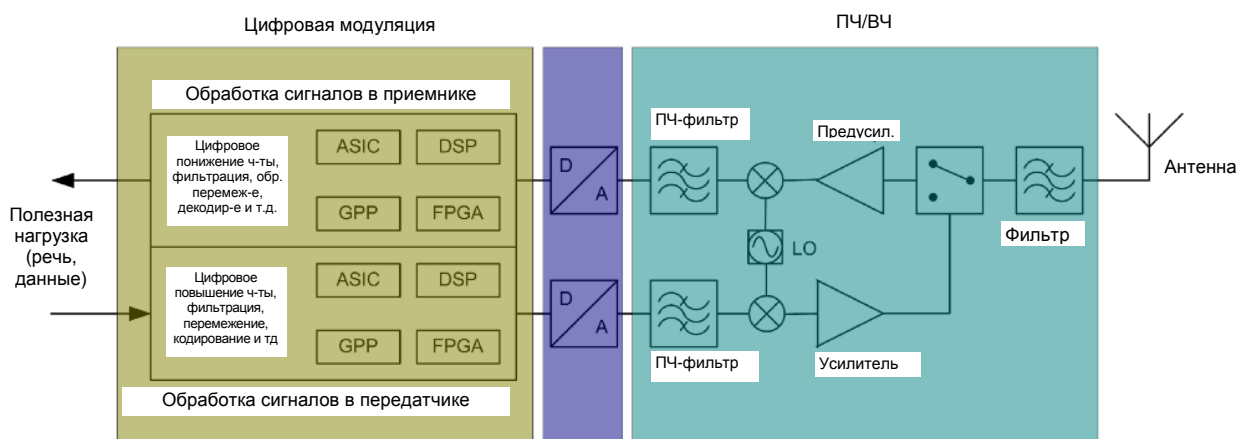


Рис. 3 – Фактическая реализация SDR-радиостанции (упрощенный вид).

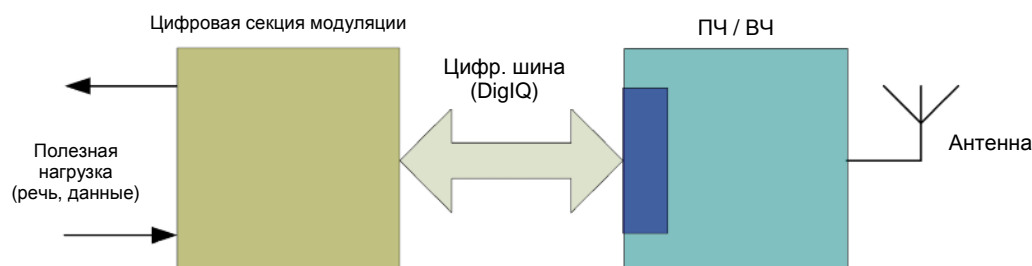


Рис. 4 – Разделение SDR-радиостанции на аналоговую (TRX модуль) и цифровую (BB модуль) части. I/Q-данные передаются посредством цифровой шины.

1.2 Требования к радиоаппаратуре военного назначения

Радиоаппаратура, используемая для связи в аэрокосмической и оборонной отраслях, в том числе в упоминаемой в настоящем документе системе управления воздушным движением (УВД), сталкивается с разнообразными трудностями. В профессиональных приложениях и приложениях систем безопасности большая часть обязательных требований относятся к таким характеристикам, как доступность, безопасность и надежность. Пользователи привыкли к маленьким модным мобильным телефонам с высокой скоростью передачи данных и современным дизайном (гаджеты), имеющимся на потребительском рынке.

Требования военной связи очень сильно зависят от применения. Условно, радиосвязь действует в диапазоне частот от 1,5 до 400 МГц, который включает в себя диапазоны ВЧ (HF), ОВЧ (VHF) или УКВ и УВЧ (UHF) и более высокие частоты.

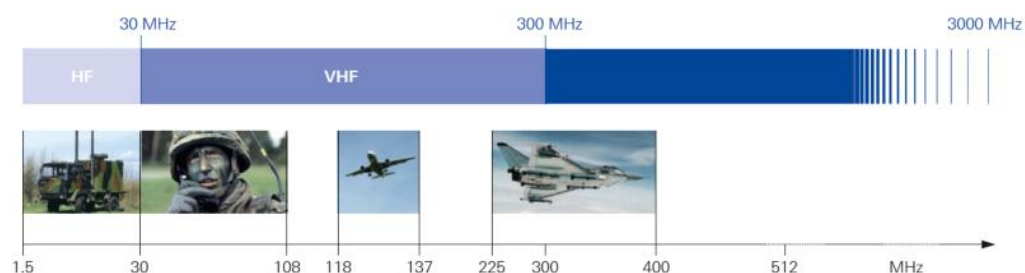


Рис. 5 – Диапазоны частот радиосвязи.

В диапазоне ВЧ (коротковолновый диапазон) связь возможна на очень длинные расстояния благодаря отражению от земной атмосферы (в условиях отсутствия прямой видимости). В этом частотном диапазоне, например, возможна защищенная связь между посольствами по всему миру. Тактическая наземная связь также работает в УКВ-диапазоне до 88 МГц.

При работе гражданской системы УВД используются частоты от 118 до 137 МГц, тогда как в военной системе УВД используется диапазон 137–156 МГц. Гражданская морская связь работает в диапазоне 156–174 МГц, а военно-морская связь в диапазоне 225–400 МГц.

Требования будут также изменяться в зависимости от конкретного применения. Сухопутные войска располагают радиооборудованием (до 150 Вт), расположенном на мобильных средствах передвижения, в дополнение к устройствам, сравнимым с мобильным телефоном по весу и продолжительности работы от батарей; такие устройства обладают небольшой выходной мощностью (5 Вт). Стационарные устройства (в том числе судовая радиоаппаратура) может быть большего размера, но и требуемая выходная мощность у них гораздо больше (до 1000 Вт). Устройства на самолетах, с другой стороны, должны иметь определенную форму и удовлетворять очень строгим полетным стандартам (относительно вибрации, температуры, ЭМС) и должны функционировать при очень больших (относительных) скоростях, то есть они должны быть устойчивы к эффектам замирания сигнала.

Для военной связи также существует множество стандартов и протоколов сигналов. Кроме стандартных протоколов сигналов, таких как HaveQuick или SATURN, принятых NATO, используются частные стандарты. Также особое внимание уделяется поддержке коммерческих стандартов или адаптации этих стандартов к военным требованиям, таким как работа с превышением доплеровской скорости, задержка распространения до спутника и военное использование распределения частот.

1.3 Протоколы связи и параметры измерений

1.3.1 Протоколы связи

В технологии военной радиосвязи термин «протокол связи» (форма сигнала) относится ко всей технологии радиосвязи, то есть к протоколам ISO (Международная организация по стандартизации) уровней 1-7 и соответствующей административной функциональности.

Данные, передаваемые в военной связи, должны быть защищены. Этот раздел, называемый COMSEC (обеспечение скрытности связи), включает в себя шифрование сообщений и обычно содержится в каждом военном протоколе связи.

С другой стороны, раздел TRANSEC (обеспечение скрытности связи при передаче), относится к мерам защиты физического уровня передачи. Он включает в себя такие процедуры, как модуляция с расширенным спектром для предотвращения обнаружения радиосигнала или скачкообразная перестройка частоты, затрудняющая глушение канала. Эти процедуры также известны как меры электронной защиты (Electronic Protection Measures, EPM).

Протоколы связи фиксированной частоты

Это самые старые типы протоколов. Для передачи речи обычно использовалась аналоговая модуляция, такая как AM, ЧМ и ОБП (SSB) со стандартными полосами каналов от 3 до 25 кГц. В этом частотном диапазоне возможная частота передачи данных составляет несколько кбит/с. Примерами таких протоколов могут служить стандарты NATO в STANAG 420xSeries.

Протоколы связи EPM

Для защиты передачи от глушения к характеристикам протоколов, описанных выше, добавляется скачкообразная перестройка частоты. Типичный пример – стандарты NATO HaveQuick или SATURN.

Тактические линии связи

Тактические линии связи ушли далеко от простых протоколов связи и формируют системы, объединяющие множество составляющих, например для получения данных о местоположении. Режим TDMA (множественный доступ с разделением по времени) знаком множеству пользователей. Полоса пропускания

увеличивается, используются сложные режимы цифровой модуляции, а скорость передачи данных составляет порядка 100 кбит/с. Примерами являются протоколы Link 16 или Link 22.

Частные протоколы связи и их будущее

Кроме всего прочего различные предприятия предлагают частные протоколы связи. Например, компания Rohde & Schwarz работает с протоколом SECOM.

В нем увеличены требования к скорости передачи данных в военной отрасли применения. В будущих протоколах будут использованы методы модуляции с несколькими несущими, такие как OFDM (мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов) и будет достигнута скорость передачи данных 10 Мбит/с.

1.3.2 Параметры испытаний

Некоторые требования к тестированию радиоаппаратуры определяются общепринятыми параметрами, такими как мощность и модуляция. Уже в 1993 году НАТО определил и стандартизировал международную процедуру испытаний (ITOP, international test operations procedure) для аналоговой радиоаппаратуры фиксированной частоты. ITOP содержит чрезвычайно подробное описание измерений и определяет состав измерительной установки (схему измерений). В ITOP описываются следующие испытания:

Испытания передатчиков
Выходная мощность и потребление питающей мощности
Время нарастания ВЧ сигнала
Характеристики модуляции
Полоса частот шума несущей
Эффективность согласования с антенной
Характеристики боковой составляющей спектра
Погрешность и стабильность частоты
Занимаемая ширина полосы частот и мощность в соседнем канале
Гармонические составляющие передатчика и паразитное излучение
Влияние несогласованных нагрузок
Взаимная модуляция (интермодуляция) с другими передатчиками

Пример испытания передатчика: интермодуляция с другими передатчиками

Интермодуляция (взаимная модуляция) может появиться в случае, если в одно время работают два расположенных рядом передатчика (например, в машине или при работе бортовой радиостанции и наблюдательной радиоаппаратуры в самолете). Сильный сигнал одного передатчика будет оказывать влияние на выходной каскад второй радиостанции.

Измерение интермодуляционной составляющей третьего порядка обязательно, а 2-го и 5-го необходимо, только если они существенны.



Рис. 6 – Схема для измерения интермодуляции передатчиков.

Частота f_1 остается постоянной на испытуемом устройстве (ИУ), а частота f_2 варьируется. Необходимо измерить уровень на частоте $2f_1 - f_2$ относительно уровня на испытуемом устройстве. Должен быть указан средний максимальный уровень взаимной модуляции на частоте $2f_1 - f_2$. Предельной величины не задано.

Испытания приемников
Чувствительность приемника и связанные характеристики
Характеристики демодуляции
Динамическая чувствительность и падение чувствительности
Радиопомехи и подавление помех по промежуточной частоте
Чувствительность к взаимной модуляции (внеполосная)
Помеховое заграждение
Излучение генератора
Подавление перекрестной модуляции
Время отклика приемника

Пример испытания приемника: помеховое заграждение

Сильный источник помех вне канала создает нелинейные искажения маломощного усилителя приемного тракта, тем самым ухудшая характеристики приемника. Это называется помеховым заграждением.

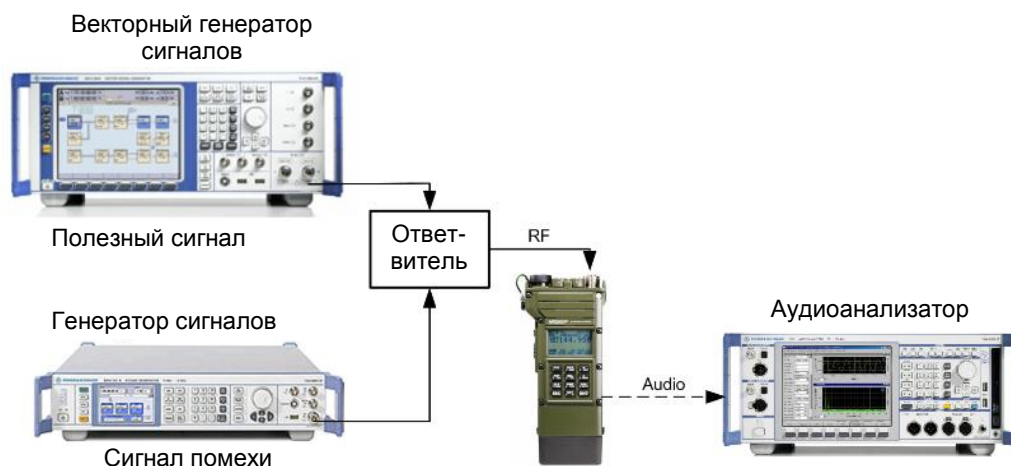


Рис. 7 – Установка для тестирования помехового загрождения.

В данном испытании используется векторный генератор сигналов для получения полезного сигнала, на который затем накладывается непрерывный сигнал помехи, получаемый от генератора сигналов. Частота полезного сигнала затем варьируется пользователем пошагово в диапазоне $\pm 5\%$ от частоты сигнала помехи. Для каждого шага уровень сигнала помехи устанавливается таким образом, чтобы отношение SINAD или уровень аудиосигнала уменьшался на 3 дБ. Предельного значения не задано.

Цифровые протоколы связи

Хотя требований к методам испытаний протоколов связи с цифровой модуляцией не существует, основная последовательность ВЧ-испытаний остается той же самой.

На рис. 8 снова показана блок-схема SDR-радиостанции, но на этот раз с важными параметрами испытаний и указанием мест, где они проверяются. В аналоговой части гетеродин (LO) и смеситель являются источниками фазового шума, тогда как нелинейные компоненты, такие как усилитель и фильтры, генерируют гармонические спектральные составляющие. Антенна также играет важную роль в радиостанции в целом. В интерфейсе между аналоговой и цифровой частями, АЦП является источником паразитных излучений.

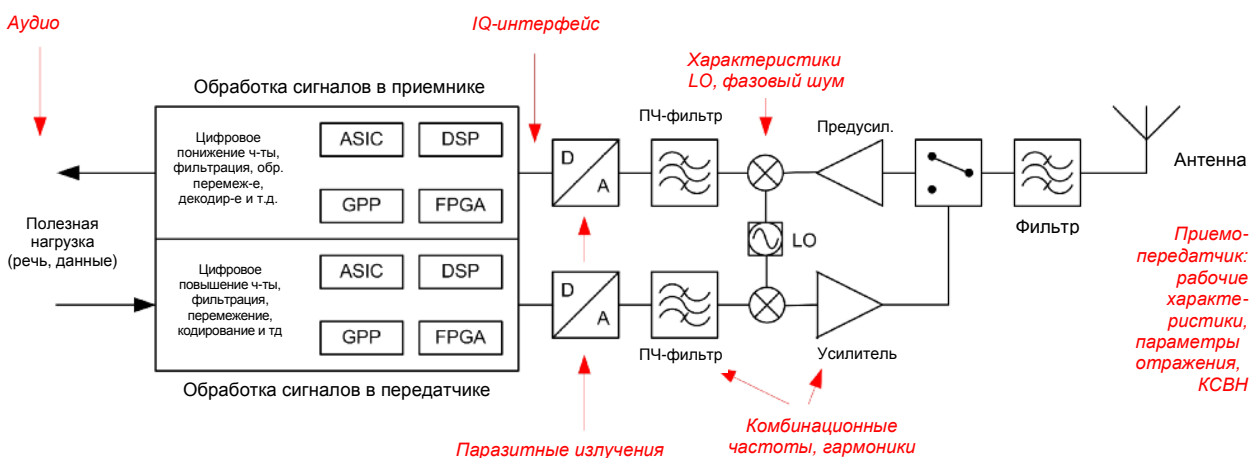


Рис. 8 – Обзор измерений в радиостанции SDR.

С усилением разделения на ВЧ-секцию и секцию цифровой модуляции пользователи должны выполнять все больше и больше измерений без использования фактической ВЧ-технологии. Это означает, что необходимо будет испытывать и цифровой I/Q-интерфейс.

Также важно проверять качество передачи речи в пользовательском интерфейсе.

1.4 SDR-радиостанции от компании Rohde & Schwarz

Компания Rohde & Schwarz предлагает радиооборудование защищенной связи, как для военных целей, так и для управления воздушным движением (УВД). Семейство изделий M3xR – серия программно-определяемых радиостанций, где x определяет область применения радиостанции:

- M3TR Тактические радиостанции
- M3SR Стационарные радиостанции
- M3AR Бортовые авиационные радиостанции



Рис. 9 – Семейство радиостанций M3xR.

Все радиостанции поддерживают все общепринятые протоколы связи NATO (протоколы связи фиксированной частоты и EPM), а также процедуры SECOM и SECOS, разработанные компанией Rohde & Schwarz.

Стационарные радиостанции

Семейство M3SR стационарных и корабельных радиостанций обозначается как серия 4x00Series:

Series4100	ВЧ, до 1000 Вт
Series4200	АТС УКВ/УВЧ, 50 Вт
Series4400	УКВ/УВЧ, до 100 Вт

Бортовые авиационные радиостанции

Бортовые авиационные радиостанции представлены семейством M3AR MR6000 с мощностью от 20 Вт (АМ) и 30 Вт (СМ). Такие радиостанции поддерживают стандарты военных и гражданских УВД и приняты в различных конфигурациях для реактивных и винтовых самолетов, а также для вертолетов и беспилотных летательных аппаратов (дронов).

Тактические радиостанции

Семейство M3TR MR300x доступно в различных конфигурациях, от ручных устройств до бортового оборудования для автотранспорта:

- MR3000P Портативная станция, от 25 до 146 МГц, 5 Вт
- MR300xH Носимая станция, от 1,5 до 108 МГц, 10 Вт (УКВ), 20 Вт (ВЧ)
- MR300xU Носимая станция, от 25 до 512 МГц, 10 Вт (УКВ), 1 мВт (ВЧ)
- MR300xH/U автомобильная станция, от 1,5 до 512 МГц, с внешним усилителем 50 Вт (УКВ), 150 Вт (ВЧ)

Дополнительная информация о семействе радиостанций M3xR доступна на нашем [веб-сайте](#).

2 Контрольно-измерительные решения в сфере разработки, производства и обслуживания

Помимо военных радиостанций (см. раздел 1.4) компания Rohde & Schwarz также предлагает широкий спектр соответствующих контрольно-измерительных приборов, начиная от (портативных) анализаторов спектра и сигналов, векторных генераторов сигналов и заканчивая полноценными системами тестирования.

На рис. 10 показано разделение SDR-радиостанции на цифровой модуль модуляции (BB) и аналоговый модуль приема-передатчика (TRX), а также соответствующие контрольно-измерительные приборы. Для аналоговой ВЧ-секции используются традиционные контрольно-измерительные приборы, такие как (векторный) генератор сигналов, анализатор спектра и сигналов и векторный анализатор цепей.

Цифровая шина позволяет использовать векторные анализаторы и генераторы с цифровым I/Q-интерфейсом для независимой проверки этих двух модулей. В цифровом модуле модуляции BB шины связи между отдельными процессорами (универсального процессора, ПЛИС, ЦСП и др.) тестируются с использованием осциллографа, а аудио-интерфейс для пользователя тестируется с помощью аудиоанализатора.

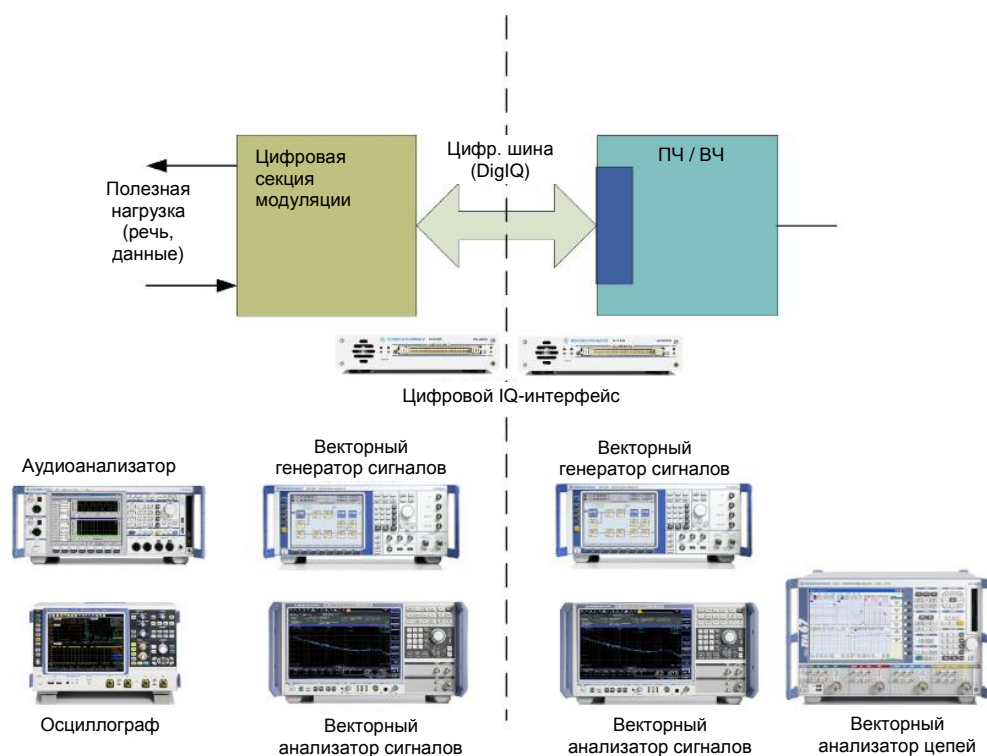


Рис. 10 – Обзор применяемых контрольно-измерительных приборов, разделенных на группы аналогового TRX модуля и цифрового BB модуля. Цифровой I/Q-интерфейс (EX-IQ-Box) позволяет измерять или генерировать одни и те же сигналы как в качестве аналоговых сигналов в ВЧ-диапазоне, так и цифровых в полосе модулирующих частот.

Модуль цифрового сигнального интерфейса (EX-IQ-Box)

Векторный генератор сигналов компании Rohde & Schwarz, например генератор SMU, оснащенный модулем EX-IQ-Box, позволяет тестировать цифровые модули приема и передачи (или другие компоненты) с использованием цифровых

модулирующих сигналов. Такая схема позволяет работать с современными стандартами мобильной радиосвязи, такими как LTE (которые также могут быть использованы в качестве основы для будущих стандартов военной связи), пользовательскими сигналами и специальными эффектами, в том числе замираниями, белым шумом AWGN или I/Q-искажениями. Анализатор сигналов компании Rohde & Schwarz в сочетании с модулем EX-IQ-Vox обеспечивает надежный анализ цифровых компонентов.

Модуль EX-IQ-Vox позволяет выполнять как последовательную, так и параллельную передачу I/Q-сигналов на ИУ с применением пользовательского протокола передачи, и поддерживает гибкие импульсные режимы, различные скорости передачи данных и различные уровни сигналов. Физическое подключение к ИУ позволяет подключать адаптеры (“переходные платы”) непосредственно к модулю EX-IQ-Vox. Интерфейс подключения к ИУ может варьироваться (допустимы различные логические уровни, такие как LVTTTL, CMOS и LVDS), и в качестве стандартно поставляемого оборудования включены две стандартные переходные платы (несимметричные и дифференциальные сигналы). По мере необходимости может производиться функциональное расширение модуля (например, за счет переходных плат для конкретного пользовательского протокола).



Рис. 11 – Модуль EX-IQ-Vox: вид спереди.

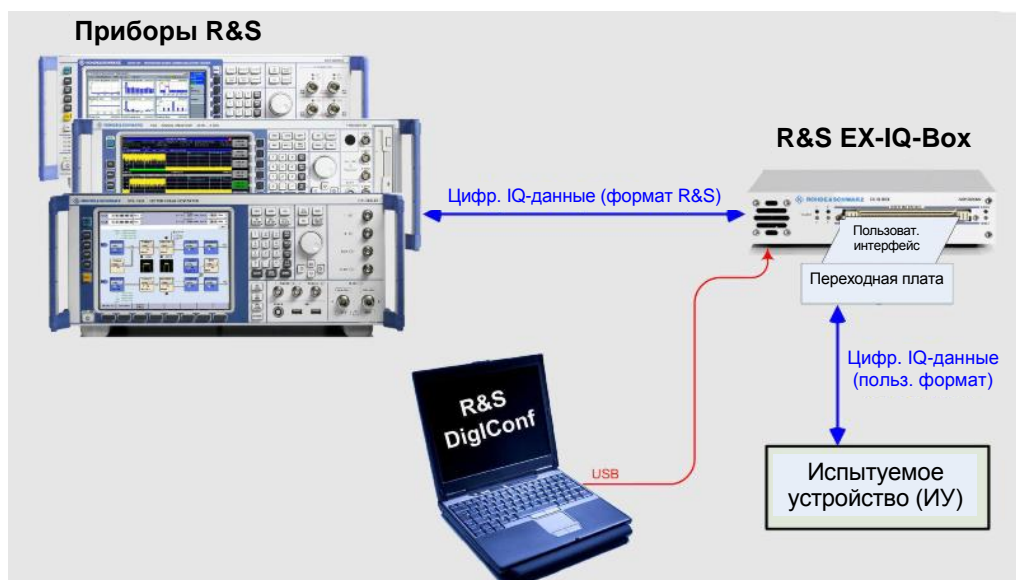


Рис. 12 – Схема измерительной установки с использованием модуля EX-IQ-Vox.

Модуль EX-IQ-Vox может подключаться и непосредственно управляться с различных приборов R&S, или же он может работать в автономном режиме с помощью компьютерного ПО.

Поставляемое компьютерное ПО DiglConf обеспечивает удобную работу с модулем (рис. 13).

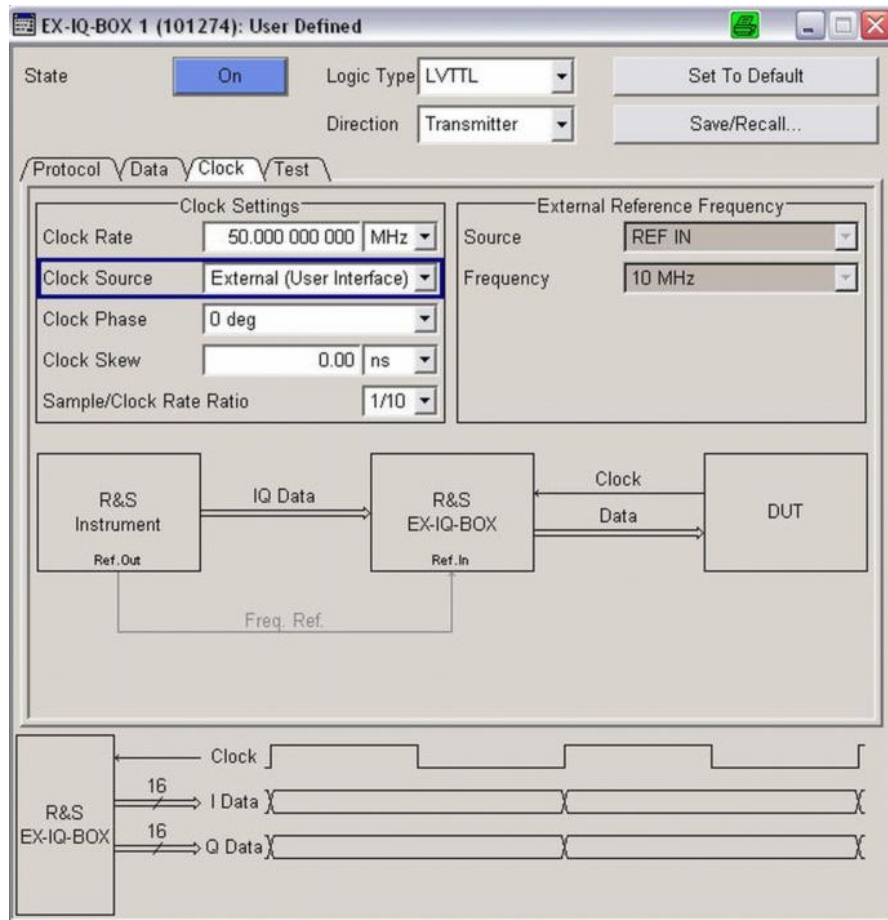
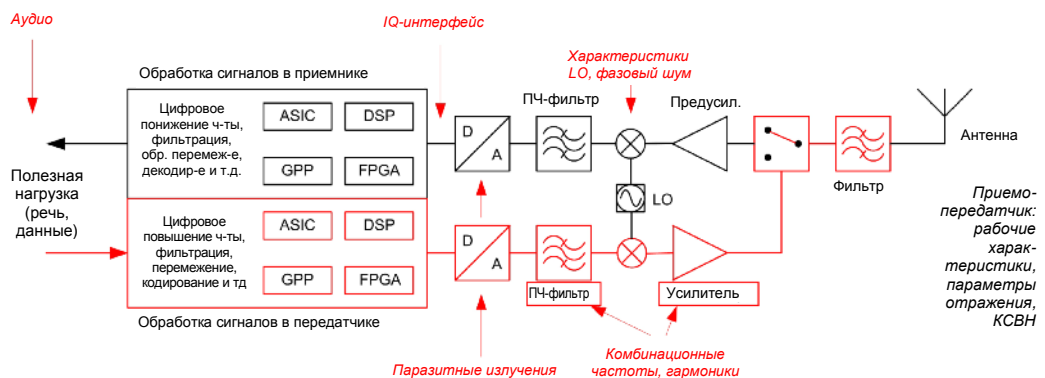


Рис. 13 – Пример настроек в компьютерном ПО DigICConf. Это окно используется для конфигурации логического интерфейса между модулем EX-IQ-Box и ИУ.

Дополнительную информацию см. в указаниях по применению Успешное начало с помощью модуля R&S® EX-IQ-Box [16].

2.1 Измерения в диапазоне ВЧ и ПЧ

2.1.1 Испытания передатчика: анализатор спектра и сигналов



Испытание передатчика (TX) состоит из двух основных измерений:

- Измерение мощности и спектра
- Демодуляция (режим аналоговой и цифровой модуляции)

На рисунках 14 и 15 показаны установки для измерения параметров передатчика.



Рис. 14 – Базовая установка для испытаний передатчика. Анализатор измеряет передаваемый радиосигнал через аттенюатор. Входным сигналом может служить, например, аудиосигнал из аудиогенератора UPV.

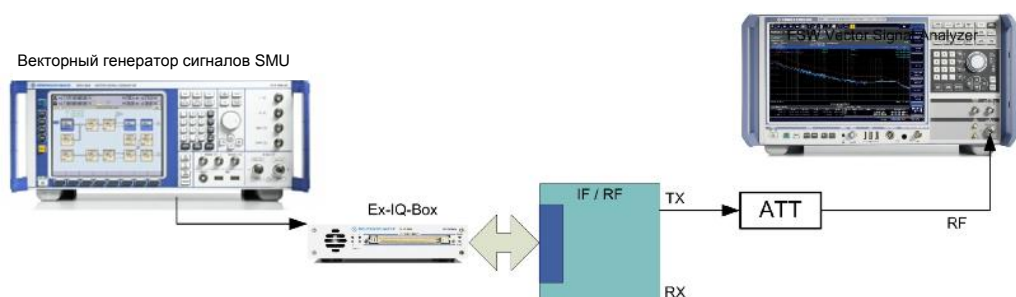


Рис. 15 – Базовая установка для измерения параметров передатчика только с приемопередающим модулем (TRX). Анализатор измеряет передаваемый радиосигнал через аттенюатор. Для создания входного сигнала генератор SMU с модулем EX-IQ-Box заменяет модулирующий модуль BB и подает сигнал прямо на модуль TRX через цифровую I/Q-шину.

Для единичных измерений мощности компания Rohde & Schwarz предлагает серию датчиков мощности NRP-Z. Они компактны, имеют малый вес, просты в обращении и характеризуются типичной погрешностью измерений менее 0,1 дБ. Доступны также модели с USB-портом, позволяющие работать с датчиками в автономном режиме с помощью ПК. Дополнительную информацию см. в брошюре с описанием изделия [2].

В анализаторах спектра и сигналов компании Rohde & Schwarz доступны не только измерения мощности и спектра (например, коэффициента утечки в соседний канал ACLR или занимаемой полосы частот OBW), а также имеется возможность демодуляции и анализа как аналоговых, так и цифровых сигналов.

Доступен широкий ассортимент анализаторов для различных применений. Портативный анализатор FSH, анализатор среднего класса FSV и расширяемый до высшего класса анализатор FSW отличаются по своим ВЧ-характеристикам и поддерживаемым диапазонам частот.

Вот краткий обзор анализаторов:

- Высший класс
 - FSW Сегмент высшего качества, анализатор спектра и сигналов, полоса пропускания 160 МГц, сенсорный экран
 - FSQ Анализатор спектра и сигналов, 120 МГц, поддержка всех стандартов связи
 - FSU Диапазон частот до 67 ГГц, исключительные характеристики по динамическому диапазону, фазовому шуму, точности, разрешению

- FSUP Тестер фазового шума / анализатор спектра высшего класса
 - FSMR Тестовый приемник
 - FMU Анализатор модулирующего сигнала
- Реального масштаба времени
 - FSVR Анализ спектра и сигналов в реальном масштабе времени в диапазоне до 40 ГГц
- Универсальные
 - FSG Анализатор сигналов для широкополосной связи
 - FSV Самый быстродействующий анализатор
 - FSL Носимый анализатор спектра
- Портативные
 - FSH Портативный анализатор спектра / модуляции для полевых применений
 - ZVN Портативный анализатор кабелей и антенн
 - FSC Компактный анализатор с низкими требованиями к рабочим характеристикам

Все анализаторы сигналов обеспечивают измерение спектра и дополнительные демодуляцию и анализ аналоговых сигналов (АМ, ЧМ, ФМ) (опция K7 для FSx), а также цифровых сигналов (ФМн, различные уровни КАМ-модуляции). Опция универсального векторного анализа сигналов K70 для FSx позволяет проводить гибкий анализ практически любого сигнала. Для анализа сигналов с несколькими несущими (OFDM) в анализаторах FSx доступна опция K96.

Аналоговая демодуляция (опция K7 для FSx)

Для анализаторов доступна опция K7, которая позволяет проводить измерения сигналов с аналоговой модуляцией. Она может использоваться для индикации важнейших параметров амплитудной (АМ), частотной (ЧМ) и фазовой модуляции (ФМ) (см. рис. 16).

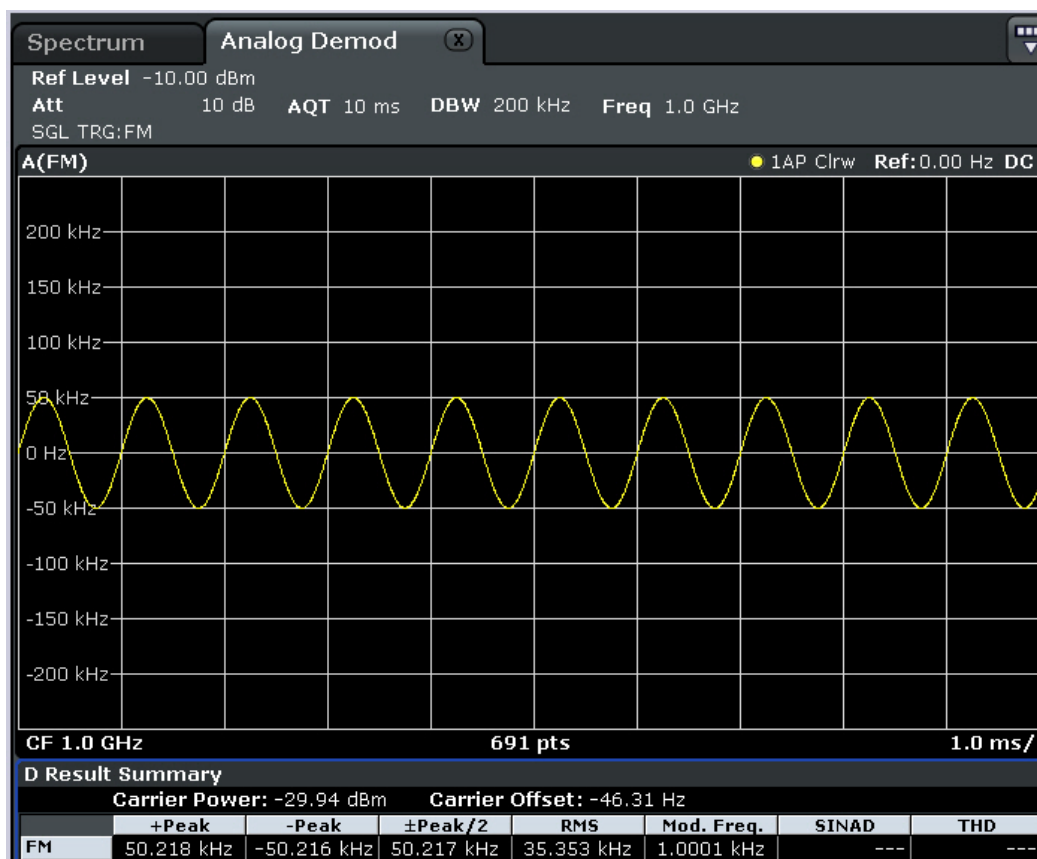


Рис. 16 – Пример измерения частотно-модулированного (ЧМ) сигнала с помощью опции K7. Сигнал имеет полосу качания 50 кГц и частоту модуляции 1 кГц. Кроме того, в таблице в нижней части экрана показана мощность сигнала и погрешность частоты.

Общий анализ сигналов с цифровой модуляцией (опция K70 для FSx)

Сигналы с цифровой модуляцией могут быть проанализированы с помощью опций для конкретных стандартов, доступных для анализаторов (например, для стандартов GSM, W-CDMA / LTE и WLAN). С помощью опции общего векторного анализа сигналов K70 возможно проведение универсального анализа, независимо от стандарта, всех обычных сигналов и сигналов с цифровой модуляцией. Результаты измерений, включая следующие, отображаются оптимальным образом:

- Синфазные и квадратурные сигналы во времени
- Модуль и фаза во времени
- Глазковая диаграмма
- Векторная диаграмма
- Диаграмма сигнального созвездия
- Таблица с коэффициентом ошибок модуляции (MER)
- Демодулированный битовый поток
- Статистический анализ
- Параметры модуляции
- Спектральный анализ
- Измерение искажений усилителя

На рисунках 17 и 18 показан пример настроек и результаты анализа сигнала с модуляцией 16QAM.

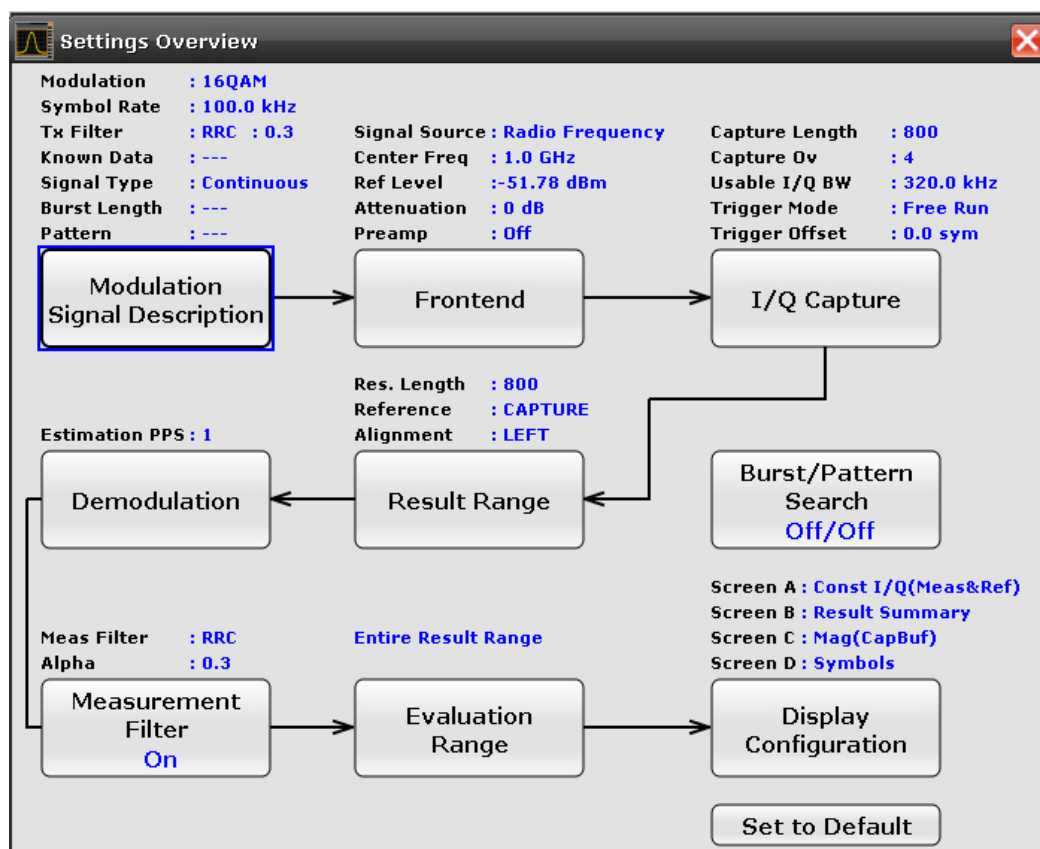


Рис. 17 – Настройки для функции векторного анализа сигналов: на данном экране можно отрегулировать необходимые настройки для измеряемого сигнала. Области обработки сигнала могут выбираться по отдельности.

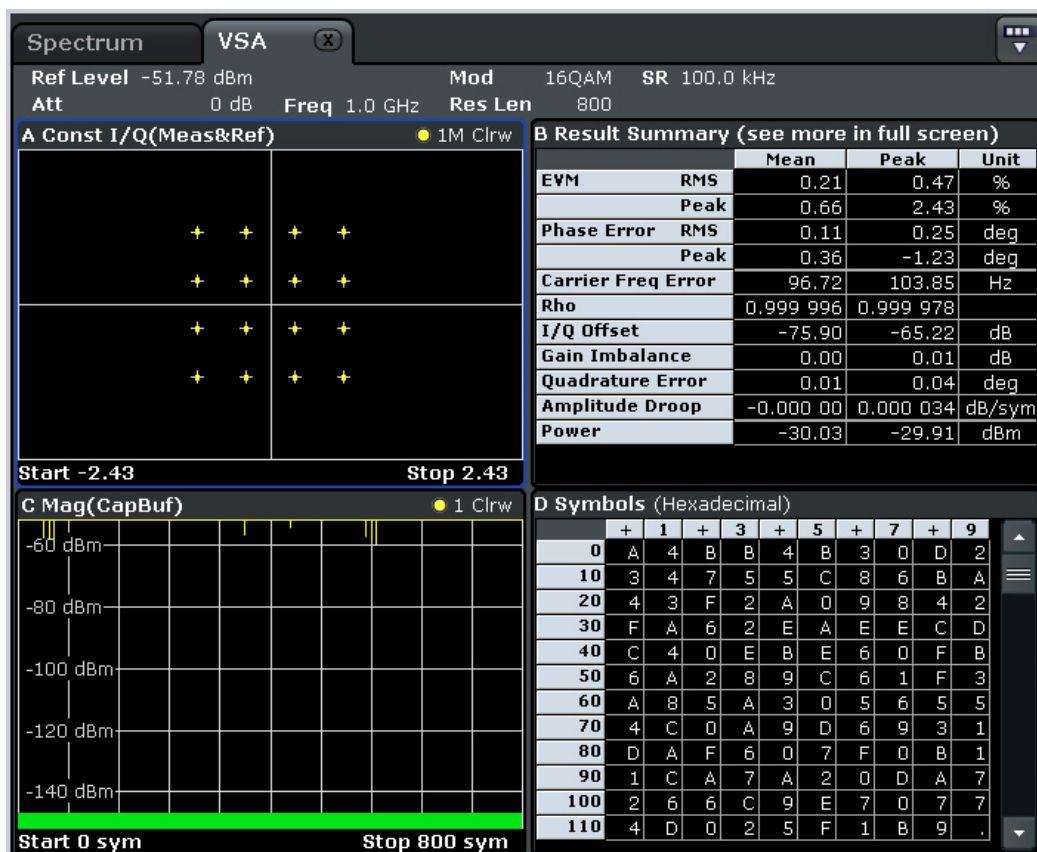


Рис. 18 – Пример анализа сигнала 16QAM с помощью опции K70. На рисунке показана диаграмма сигнального созвездия, сводка важнейших результатов и символьный (битовый) поток.

Дополнительную информацию см. в брошюре с описанием изделия [2].

Общий векторный анализ сигналов OFDM (опция K96 для FSx)

Для анализа сигналов мультиплексирования с ортогональным частотным разделением (OFDM) за пределами существующих стандартов, таких как LTE, WiMAX, WLAN, DVB и аналогичных, компания Rohde & Schwarz предлагает программную опцию векторного анализа OFDM-сигналов K96 для своего семейства анализаторов спектра. Опция позволяет адаптировать параметры OFDM, в том числе длину FFT, циклический префикс, характеристики кадра и так далее, к измеряемому сигналу практически без ограничений.

Опция позволяет проводить типовые измерения, в том числе:

- Мощность
 - от несущей
 - от символа
 - спектр
- Модуль вектора ошибок EVM
 - от несущей
 - от символа
- Канал
 - характеристики
 - групповая задержка
 - импульсная характеристика
 - диаграммы сигнальных созвездий

На рис. 19 показан пример измерения модуля EVM и его изображение в виде диаграммы сигнального созвездия.

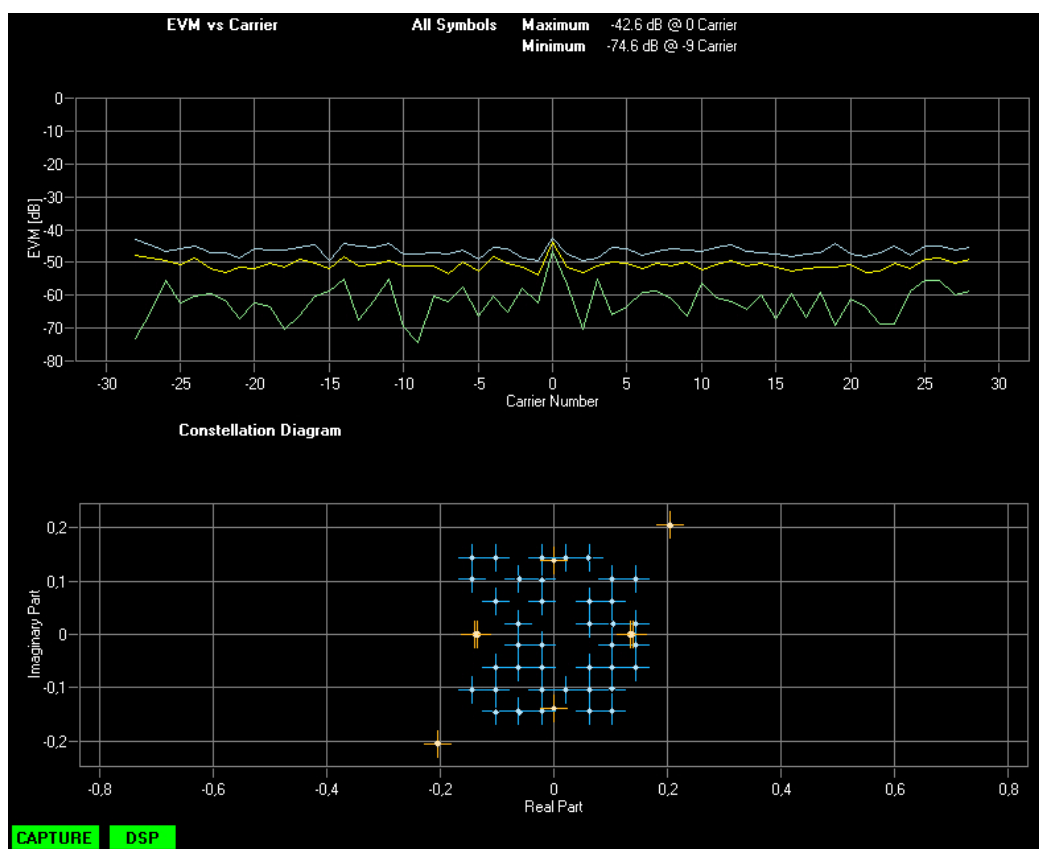


Рис. 19 – Пример измерения с помощью опции K96: сверху показан модуль EVM по несущим; снизу диаграмма сигнального созвездия.

Дополнительную информацию см. в брошюре с описанием изделия [3].

Спектральный анализ в реальном масштабе времени (FSVR)

Помимо опции полнофункционального анализа спектра и сигналов анализатора FSV, анализатор FSVR обеспечивает анализ спектра в реальном масштабе времени, в том числе:

- Функция временной спектрограммы для непрерывного отображения спектра во временной области (“водопадная диаграмма”)
- Запуск по частотной маске (FMT) для запуска измерений по отдельным, нерегулярно возникающим событиям в спектре сигнала
- Режим послесвечения для визуализации частоты возникновения сигналов со 100% вероятностью перехвата
- Зависимость мощности от времени для анализа вариаций длины/длительности сигналов
- Поточная передача I/Q-данных в реальном масштабе времени для регистрации длительных ВЧ-последовательностей

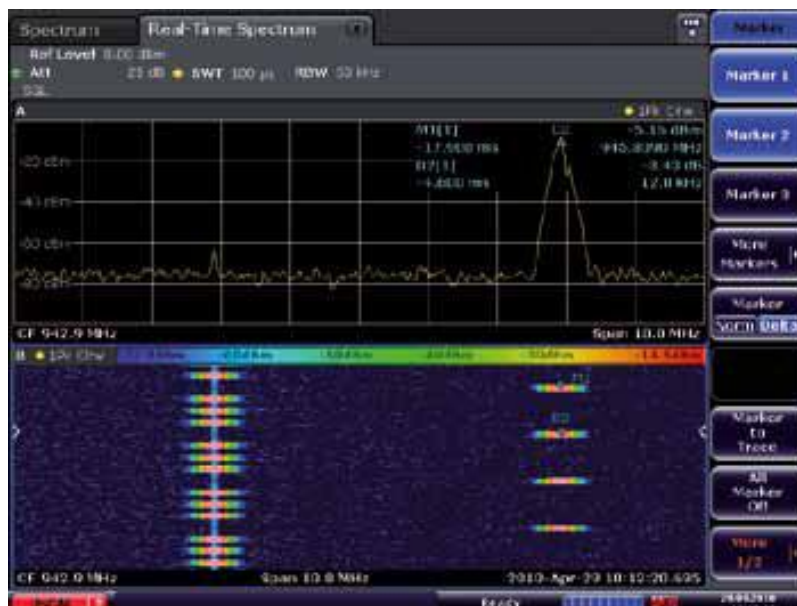


Рис. 20 – Спектрограмма на анализаторе FSVR; сверху показан текущий спектр, ниже изменение спектра во времени.

Отдельно возникающие события могут быть проанализированы с помощью запуска по частотной маске (FMT). Если спектр нарушает пределы заранее заданной маски в реальном режиме времени, анализатор FSVR на это реагирует и останавливает измерение либо сразу же, либо после выбираемого периода наблюдения. Данные, собранные в ответ на событие запуска, остаются доступными для детального анализа.

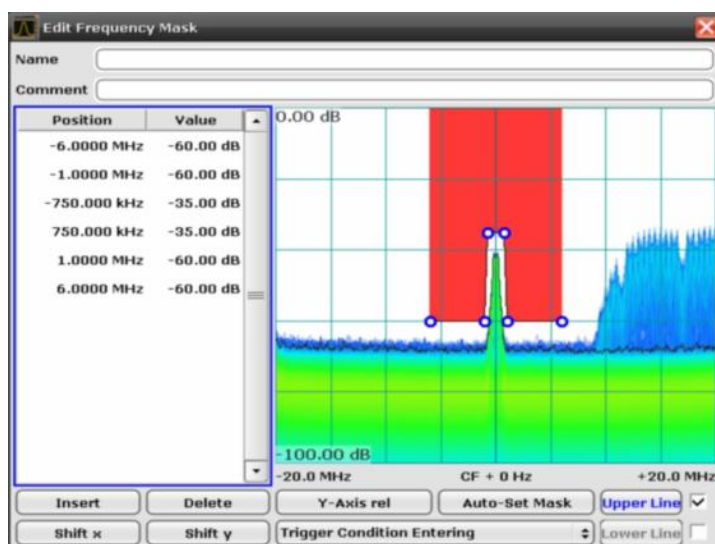


Рис. 21 – Установка запуска по частотной маске.

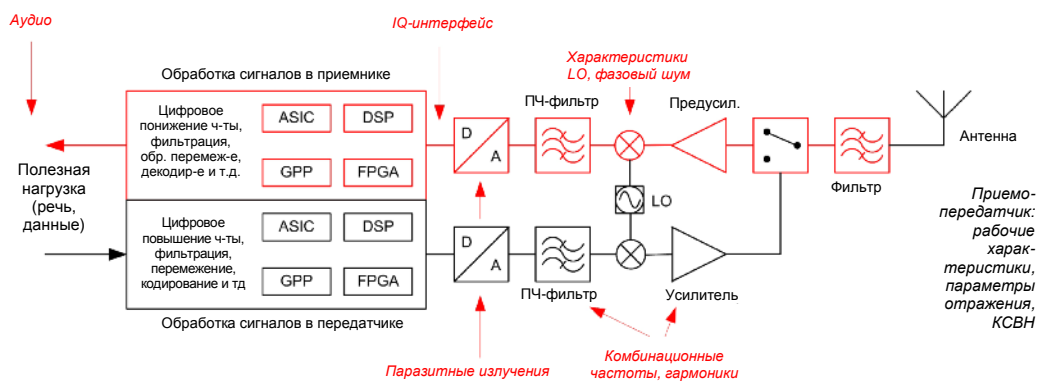
Являясь частью анализатора FSVR, функция FMT также может быть использована в различных контрольно-измерительных приложениях. Например, функция общего векторного анализа сигналов (опция K70; см. выше) может использоваться для демодуляции и анализа сигналов сразу после скачкообразной перестройки частоты.

Это означает, что анализатор FSVR способен обнаруживать очень кратковременные явления. Например, он может быть использован для проверки скачкообразной перестройки частоты в SDR-радиостанции.

Для межобластного анализа можно использовать функции послесвечения реального времени и запуска по частотной маске анализатора FSVR совместно с осциллографом смешанных сигналов (MSO), например, осциллографом RTO, чтобы выявлять критические ошибки синхронизации, которые проявляются в виде искажения спектра. Они могут быть вызваны недопустимыми значениями программных фильтров или включением передачи до того, как наступило устойчивое состояние аппаратного обеспечения.

Дополнительную информацию см. в брошюре с описанием изделия [9].

2.1.2 Испытания приемника: генераторы сигналов



Испытания приемника проводятся с использованием заданных ВЧ-сигналов. Для более углубленных испытаний требуются дополнительные сигналы (например, сигналы помех).

На рисунках 22 и 23 показаны установки для измерения параметров приемников.

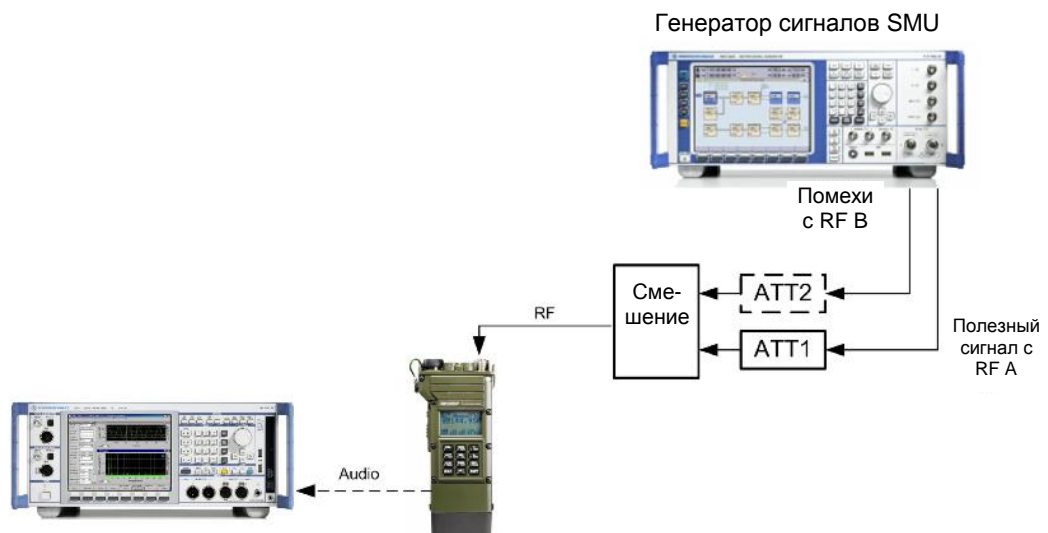


Рис. 22 – Базовая установка для испытаний приемника. Генератор сигналов формирует подходящий радиосигнал на входе радиостанции. Качество звука также можно проверить с помощью аудиоанализатора UPV. В то же время, для некоторых испытаний требуется второй (помеховый) радиосигнал (например, при испытании помехоподавления). Он легко создается во втором канале генератора SMU.

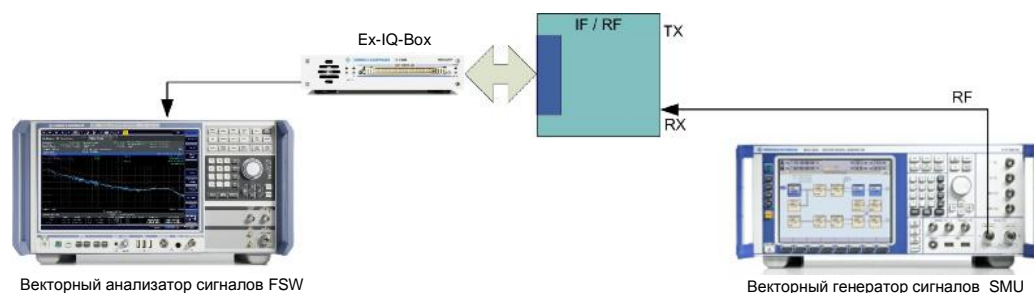


Рис. 23 – Установка для измерения параметров приемника только с приемо-передающим модулем (TRX). На цифровой стороне векторный анализатор сигналов может подключаться к цифровой I/Q-шине через интерфейсный модуль EX-IQ-Box.

Для испытаний приемников компания Rohde & Schwarz предлагает расширенный ассортимент генераторов сигналов. Они варьируются от экономичных до векторных генераторов сигналов высшего класса, работающих в диапазоне от ВЧ до СВЧ как в аналоговом, так и в цифровом режимах. Вот краткий обзор генераторов:

- Векторные цифровые
 - SMU200A высшего класса, двухканальный с функциями MIMO и замираний
 - SMJ100A высшего класса, универсальный для разработчиков
 - SMBV100A промежуточного класса
 - SGS100A компактный и быстродействующий источник ВЧ-сигналов для автоматизированных испытаний
- Цифровые модулирующие
 - AMU200A универсальный генератор модулирующих сигналов с функциями MIMO и замираний
 - AFQ100A/B (ARB-) генератор произвольных сигналов высшего класса
 - EX-IQ-Box цифровой сигнальный интерфейс для приборов компании Rohde & Schwarz
- Аналоговые ВЧ-генераторы
 - SMA100 ВЧ-генератор со сверхнизким шумом
 - SMB100 компактный ВЧ-генератор промежуточного класса с высокой выходной мощностью
 - SMC100 компактный экономичный прибор
- Аналоговые СВЧ-генераторы
 - SMF100A: источник СВЧ-сигналов высшего класса

Кроме того, двухканальные генераторы SMU и AMU обеспечивают опциональную эмуляцию замираний модулирующего сигнала в реальном масштабе времени, функцию MIMO до схемы 4x2 и генерацию белого шума AWGN (см. раздел 2.5).

Аналоговые виды модуляции можно устанавливать непосредственно в ВЧ-блоке (векторные генераторы сигналов) или в блоке модуляции (аналоговые генераторы) (см. рис. 24).

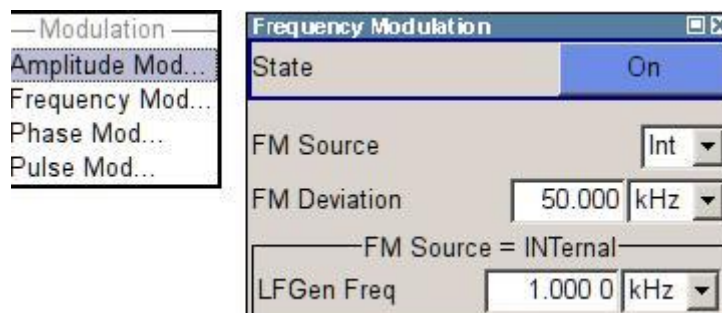


Рис. 24 – Настройки аналоговой модуляции (слева: меню выбора вида модуляции; справа: пример настроек для частотной модуляции (FM)).

Цифровые сигналы могут генерироваться в реальном масштабе времени непосредственно на приборе в блоке цифровой модуляции (рис. 25) или могут быть воспроизведены из ARB-файла, созданного во внешнем приложении (например, в ПО WinIQSim2 или MATLAB®).

При испытании приемников с использованием цифровых сигналов, в качестве характеристики их качества, как правило, используют коэффициент битовых ошибок (BER). Коэффициент BER может быть рассчитан непосредственно в приемнике (односторонний BER) или определен непосредственно в генераторе SMU (опция BERT) с помощью метода закольцовывания.

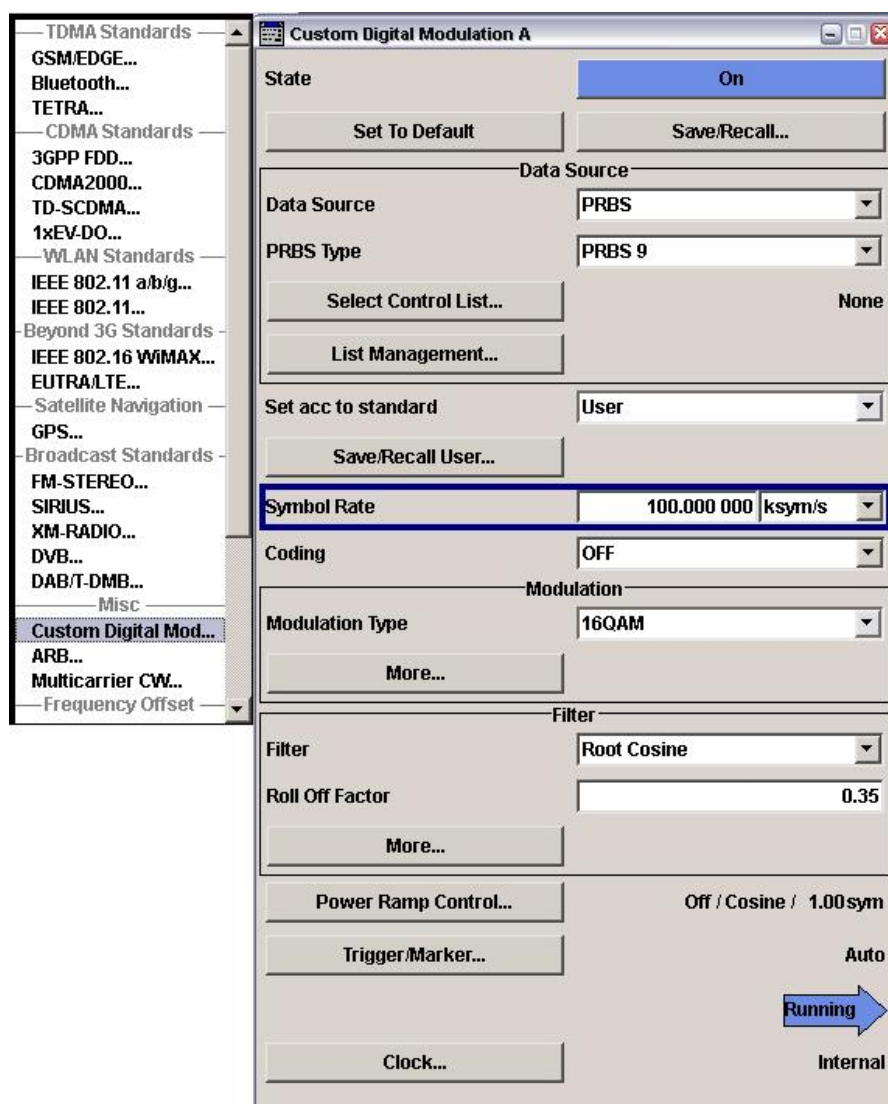


Рис. 25 – Настройки цифровой модуляции (слева: меню в блоке цифровой модуляции; справа: пример настроек для модуляции 16QAM).

Измеритель коэффициента битовых ошибок (BERT)

Для генератора SMU доступна опция K80 для измерения коэффициента битовых ошибок BER. Она позволяет определять коэффициент BER и/или BLER непосредственно в генераторе. Для этого генератор формирует псевдослучайную битовую последовательность (PRBS). Приемник передает демодулированные данные обратно на генератор, который сравнивает два потока данных и непосредственно по ним вычисляет коэффициент BER. Это позволяет определить чувствительность приемника и проанализировать его поведение в моделируемых

условиях прохождения канала (замирание, помехи) (измерительная установка приведена на рис. 26).

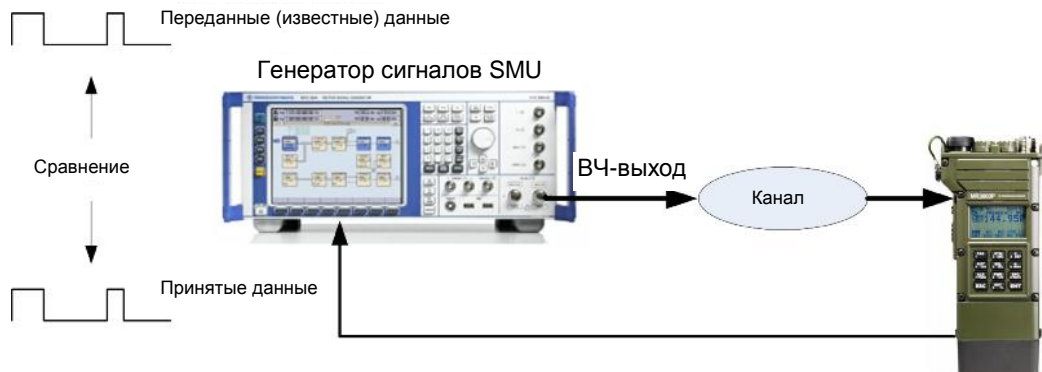


Рис. 26 – Принцип измерения BER с помощью SMU. Генератор передает известные данные через радиоканал на приемник. Это можно сделать непосредственно или путем эмуляции канала (с замираниями, помехами). Радиостанция передает демодулированные данные и тактовый сигнал обратно на SMU, который выполняет их сравнение и вычисляет BER.

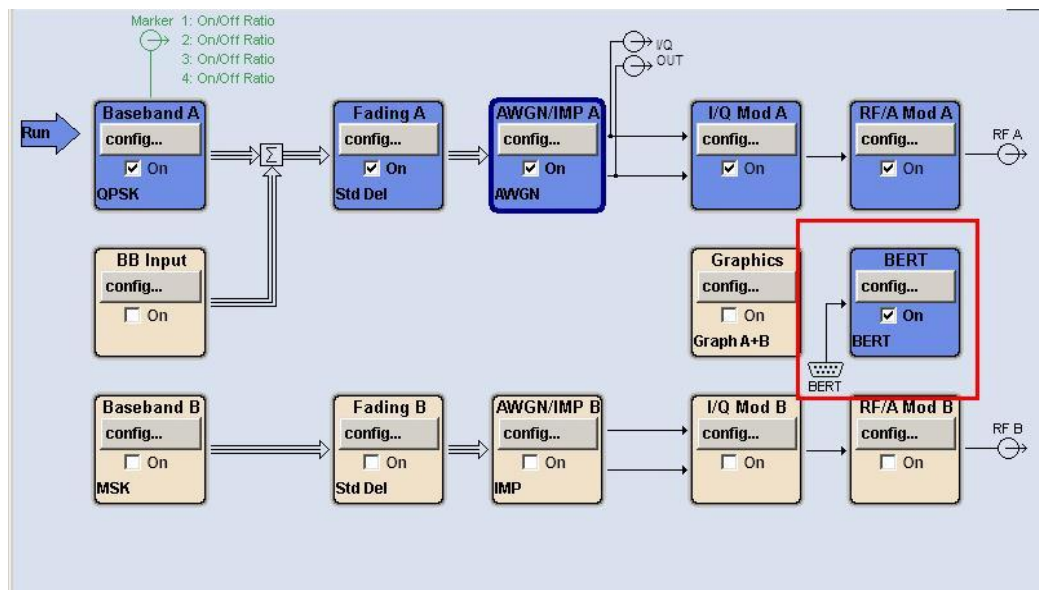


Рис. 27 – Экрана генератора SMU при измерении BER. Тракт А генерирует сигнал с модуляцией QPSK, содержащий PRBS-данные и передаваемый по эмулируемому каналу, а ИУ передает принятые данные обратно на функциональный блок BERT.

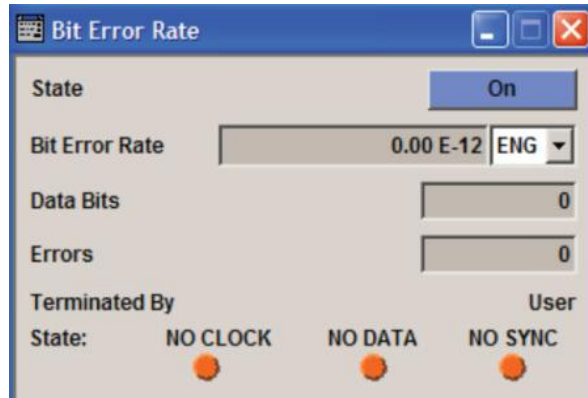


Рис. 28 – Индикация функции BERT в генераторе SMU. Коэффициент BER, принятые данные, рассчитанные ошибки и различные индикаторы состояния в одном окне.

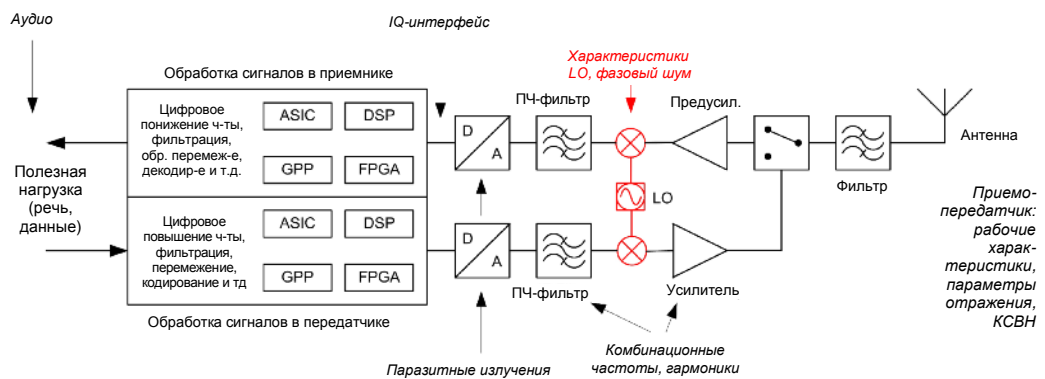
Данные, возвращаемые из ИУ, подаются на разъем на задней панели генератора SMU.

ИУ должно передать следующие данные на генератор SMU:

- Демодулированные данные
- Тактовый сигнал
- Сигнал о достоверности данных
- Сигнал перезапуска

Радиостанции могут быть подключены, например, через интерфейс MIL-STD-1553.

2.1.3 Рабочие характеристики гетеродина (LO)



Гетеродин оказывает значительное влияние на качество аналогового сигнала. Особенно необходимо учитывать фазовые шумы гетеродина. Кроме того, гетеродины в военных радиостанциях должны обеспечивать быструю скачкообразную перестройку частоты, поэтому он должен иметь возможность очень быстрой подстройки.

Измерение фазового шума

В приборе FSUP пользователи получают специализированный тестер фазового шума в сочетании с анализатором сигналов. Оснащенный превосходным внутренним источником опорной частоты, он обладает чувствительностью -143 дБн (1 Гц) при отстройке 10 кГц (от несущей 1 ГГц). Автоматизированная настройка, например, для метода с двумя ИУ, делает анализатор FSUP очень удобным в работе. Если наивысший уровень точности измерений не требуется, то FSUP может быть заменен на анализатор спектра FSx с опцией K40.



Рис. 29 – Измерение фазового шума с помощью анализатора FSUP.

Дополнительную информацию см. в брошюре с описанием изделия FSUP [8].

Эмуляция гетеродина

Для проверки характеристик ПЧ/ВЧ-секции радиостанции, гетеродин LO может быть заменен генератором сигналов с очень хорошим уровнем фазовых шумов, например, генератором SMA100A. С помощью этого прибора можно эмулировать любую частоту гетеродина (см. измерительную установку на рис. 30).

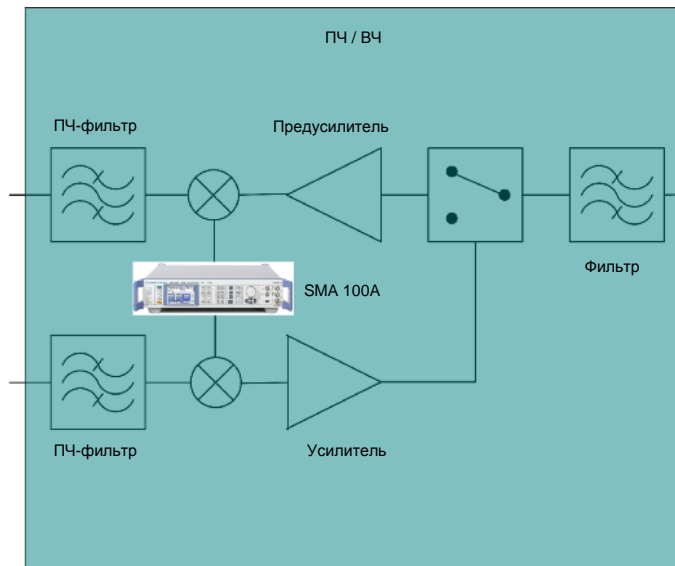
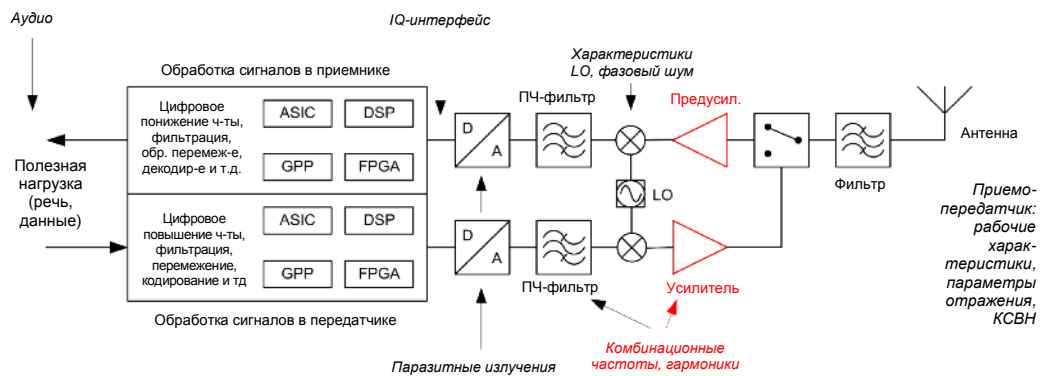


Рис. 30 – Вид ПЧ/ВЧ-секции с использованием генератора SMA100A в качестве гетеродина.

SSB-характеристики могут быть искусственно ухудшены с помощью ЧМ-сигнала с шумом в качестве сигнала модуляции. Таким образом, можно провести нагрузочное тестирование радиостанции и определить проектные пределы рабочих характеристик.

2.1.4 Измерение параметров усилителя



Усилители являются основной частью любой радиостанции. Их назначение – гарантировать высокую степень усиления в модуле передачи и усилить сигнал в приемном модуле с минимальным уровнем шума.

Нагрузочное тестирование усилителя можно легко провести с помощью векторного генератора сигналов, например, генератора SMU. Для этого можно воспроизвести сигналы, сгенерированные непосредственно в генераторе, или ARB-файлы, сгенерированные во внешнем устройстве. Для анализа может использоваться любой анализатор спектра, входящий в наш ассортимент (см. схему измерений на рис. 31). Все анализаторы позволяют проводить анализ с использованием “дополнительной интегральной функции распределения” (CCDF). Кроме того, обеспечивается непосредственное считывание I/Q-значений.

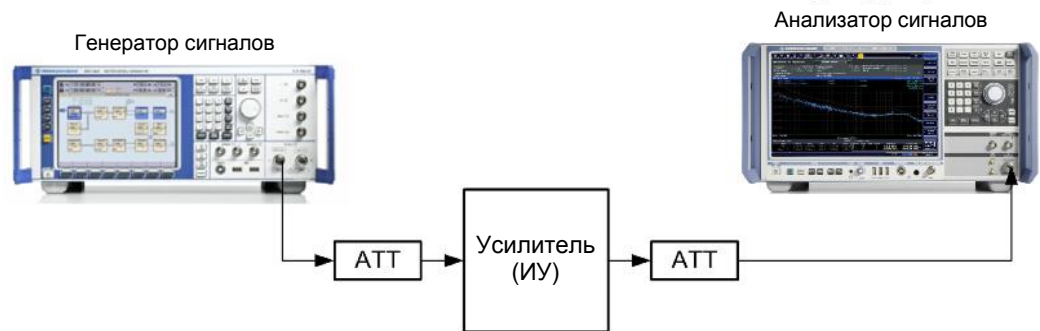


Рис. 31 – Установка для измерения параметров усилителя.

Программное обеспечение для анализа искажений (опция FS-K130)

Программное обеспечение для анализа искажений позволяет измерять и моделировать линейные и нелинейные искажения от усилителей, смесителей и компонентов цифровой модуляции. Программа упрощает и ускоряет разработку линеаризованных компонентов.

Программа измеряет уровень нелинейности и вычисляет необходимый уровень предсказаний на базе выбираемой модели. Программа также управляет необходимыми измерительными приборами (генераторами и анализаторами) и считывает I/Q-данные.

На рис. 32 показаны различные виды измерений.

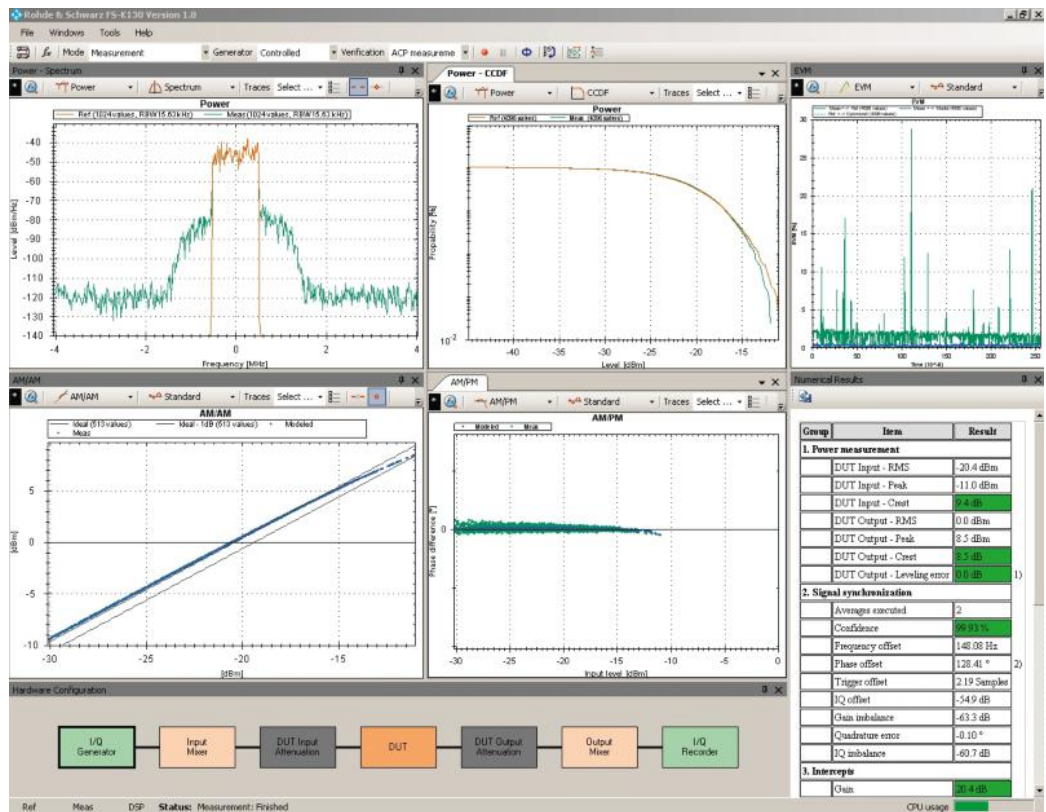
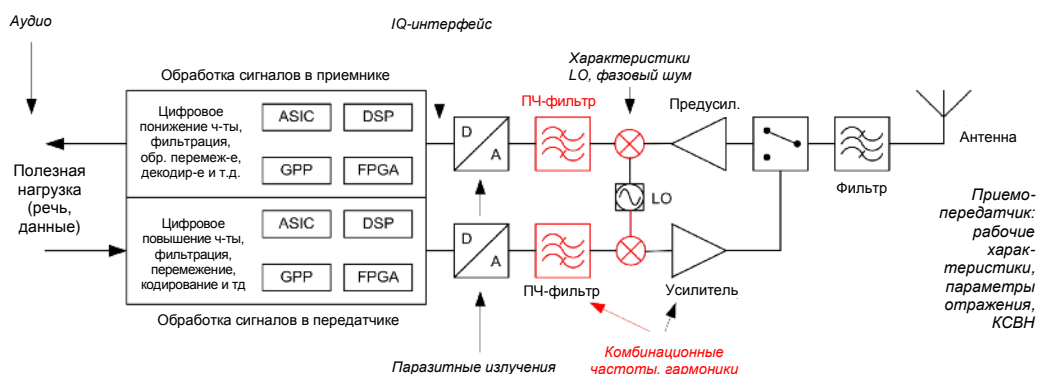


Рис. 32 – Пример измерений с помощью опции K130. На одном экране отображены все важнейшие параметры.

Дополнительную информацию см. в брошюре с описанием изделия [5].

2.1.5 Измерение параметров фильтра / смесителя



Фильтр

Фильтры предназначены для подавления нежелательных помех вне требуемой полосы частот и, таким образом, защиты приемников от перегрузки. Совместное размещение передатчиков особенно часто встречается в военных приложениях, а это означает, что два или более передатчиков, которые могут создавать помехи друг другу, размещены в небольшом пространстве. Именно поэтому для совместно размещаемого оборудования чаще всего используются фильтры.

Эти фильтры предназначены для обеспечения минимально возможного ослабления в полосе пропускания с тем, чтобы чувствительность приемника оставалась на высоком уровне и при этом обеспечивалась высокая степень подавления помех. Фазовая характеристика и задержка также являются важными параметрами фильтра (см. примеры на рис. 33).

Для проведения таких измерений компания Rohde & Schwarz предлагает семейство векторных анализаторов электрических цепей ZVx.

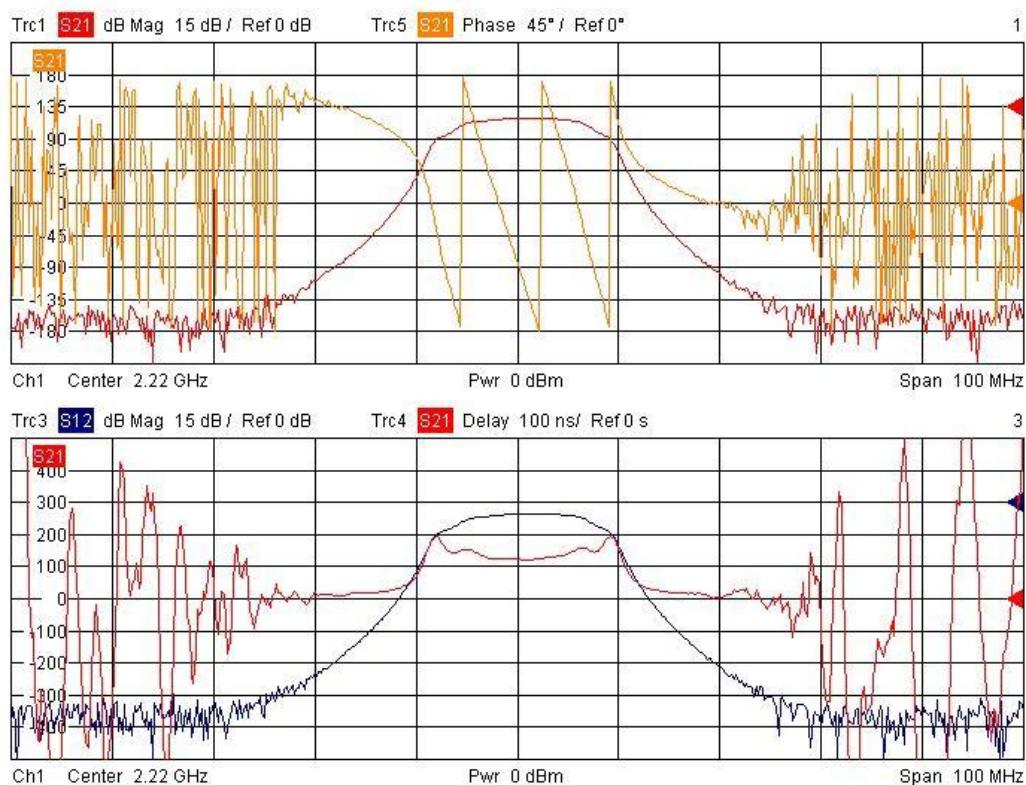


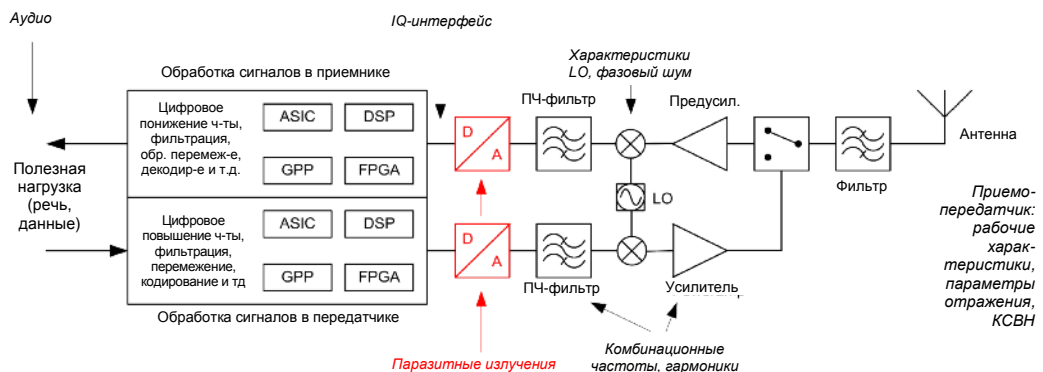
Рис. 33 – Пример АЧХ, ФЧХ и характеристики задержки фильтра, измеренных с помощью ZVA.

Смеситель

Смесители являются нелинейными компонентами и порождают множество помеховых частотных составляющих. Измеряемыми характеристиками смесителей являются динамический диапазон (точка IP3 и диапазон компрессии), а также потери на преобразование и развязка между частотами гетеродина (LO), ПЧ (IF) и ВЧ (RF). Для таких измерений, как правило, используется векторный анализатор цепей, например, анализатор ZVx. Сигнал гетеродина LO может быть смоделирован либо непосредственно через ZVx, либо с помощью генератора сигналов с низким уровнем фазовых шумов, например, генератора SMA100A (см. раздел 2.1.3)

Дополнительную информацию см. в указаниях по применению [6].

2.1.6 Измерение параметров аналого-цифрового преобразователя (АЦП)



Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) являются центральным компонентом цифровых радиостанций, действуя в качестве связующего звена между цифровой секцией модуляции и аналоговой ВЧ-секции.

Отношение сигнал-шум (SNR), отношение сигнал-шум+искажения (SINAD) и эффективное число битов (ENOB)

В идеальном АЦП связь между отношением сигнал-шум (SNR) и количеством битов B может быть представлена следующим образом (в дБ):

$$SNR_{дБ} \approx 1,76 + 6,0 \cdot B \quad [17]$$

Реальные АЦП являются нелинейными устройствами, и поэтому создают нелинейные искажения. При определении качества реального АЦП необходимо принять во внимание возникающие шумы и искажения (отношение SINAD).

Исходя из отношения SINAD, можно определить более наглядное значение – эффективное число битов (ENOB). Оно определяется как:

$$ENOB = (SINAD_{дБ} - 1,76 \text{ дБ}) / 6,02 \text{ дБ}$$

Измерение параметров ЦАП

На рис. 34 показан возможный вид измерительной установки для тестирования ЦАП. В этом случае генератор модулирующих сигналов, например, AFQ, передает ARB-сигнал (предварительно созданный с помощью программы WinIQSim2 или MATLAB®) на ЦАП через цифровую шину (LVDS). Тактовый сигнал для ЦАП генерируется с помощью генератора сигнала, который обладает очень низким уровнем дрожания фазы (джиттером), например, генератор SMA100A. Аналоговый сигнал с ЦАП затем может быть измерен с помощью анализатора модулирующего сигнала, например, анализатора FMU. Такая схема измерения позволяет легко обнаруживать искажения, порождаемые ЦАП.

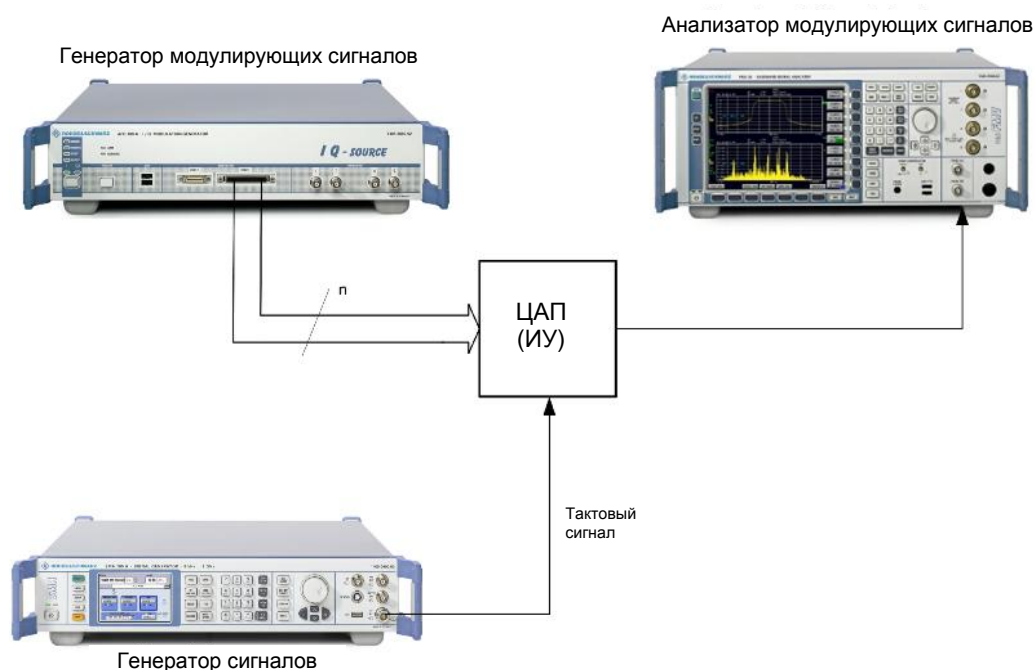


Рис. 34 – Измерительная установка для тестирования ЦАП.

Дополнительную информацию см. в указаниях по применению [7].

Измерение параметров АЦП

Для измерения параметров АЦП тактовый сигнал генерируется с помощью генератора сигналов с очень низким уровнем дрожания фазы (джиттером), например, генератором SMA100A. Аналоговый входной сигнал генерируется с помощью генератора сигналов на базе требуемого типа сигналов, например, с помощью генератора SMU. На цифровой стороне сигнал может быть проверен с помощью опции смешанных сигналов (MSO) осциллографа RTO (см. также раздел 2.2.1 и рис. 35).

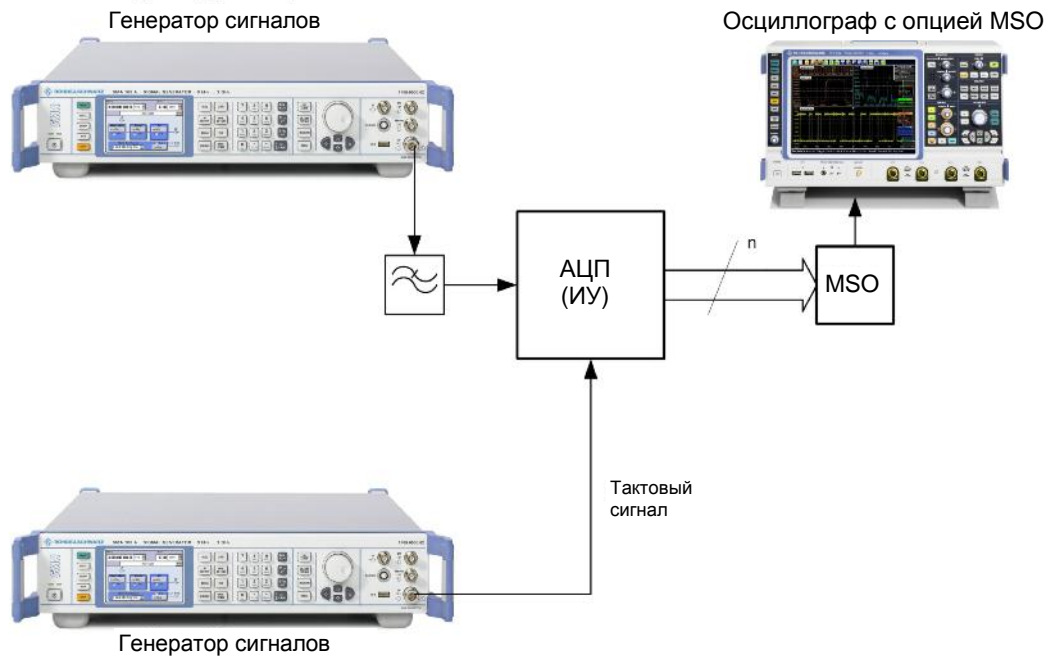
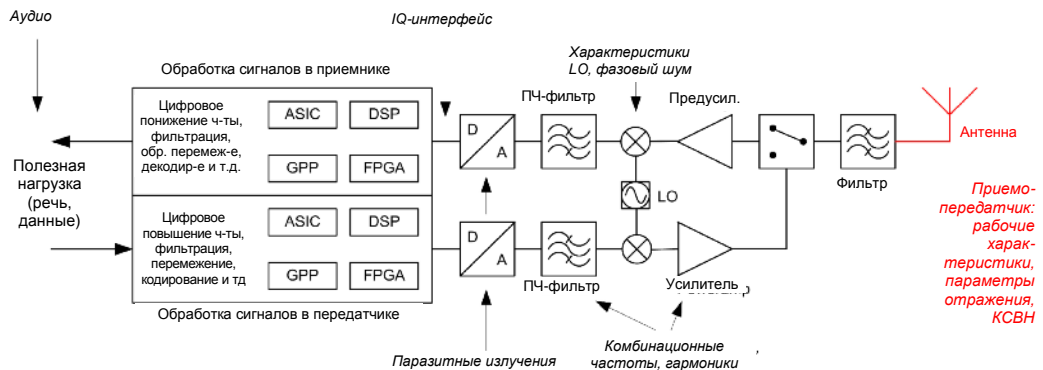


Рис. 35 – Измерительная установка для тестирования АЦП.

2.1.7 Антенны



Антенны являются важной составляющей радиостанции, потому что они обеспечивают эфирный (беспроводной) интерфейс. Они должны быть настроены на рабочую частоту, и по этой причине одной антенны для покрытия всего диапазона частот недостаточно. Как правило, антенные измерения проводятся в испытательных камерах с использованием поворотных устройств для определения характеристик излучения во всех трех измерениях.

Для измерения модуля и фазы параметров и характеристик используются приборы из семейства векторных анализаторов цепей ZVx.

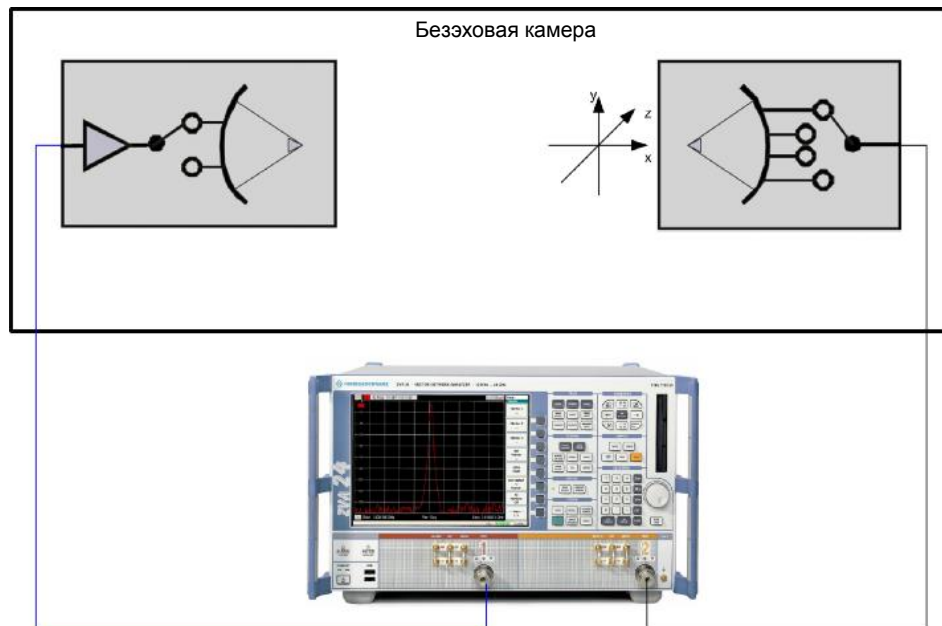
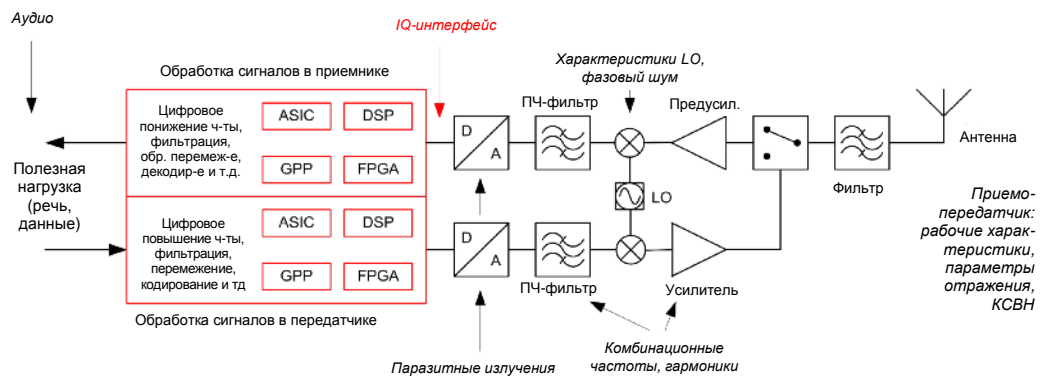


Рис. 36 – Измерение параметров типовой антенны с помощью векторного анализатора цепей.

2.2 Измерения в диапазоне модулирующих частот



Модуль цифровой модуляции состоит из нескольких процессоров, включая универсальные процессоры, цифровые сигнальные процессоры и ПЛИСы, соответствующего запоминающего устройства (флэш-память и/или DDR-RAM), а также внутренние шины связи между отдельными компонентами. К ним добавляются внешние интерфейсы, такие как аудиоинтерфейс или LAN-соединение, а также цифровой I/Q-интерфейс и низкоскоростная шина управления для подсоединения к приемо-передающему (TRX) модулю.

Здесь также используется программная часть SDR. В принципе, отдельные компоненты те же, что и в коммерчески доступных ПК или во встраиваемых системах. Конфигурация и тесты выполняются с помощью собственных инструментов, таких как отладочные интерфейсы, или с помощью программных тестов (например, теста оперативной памяти, в котором производится чтение и запись специальных шаблонов данных).

Важное значение также имеют нагрузочные тесты. Они включают в себя проверку работы цифрового оборудования при наихудших условиях. Поскольку сигналов, которые в настоящее время поддерживаются или планируются, не хватает, то в качестве наихудшего сценария может потребоваться разработать какие-то нестандартные формы сигналов.

2.2.1 Измерения в шинах связи: осциллографы

Отдельные компоненты цифрового модуля взаимодействуют друг с другом через некоторые из нескольких шин связи, в зависимости от используемых процессоров.

Помимо функций обычного осциллографа, таких как цифровая синхронизация, высокая частота дискретизации, АЦП с коэффициентом ENOB > 7 и удобное управление, осциллограф RTO дополнительно поддерживает опции для логического анализа шин, а также опцию смешанных сигналов (опцию MSO), которая позволяет анализировать 16 дополнительных цифровых каналов. На рис. 37 показан пример логического анализа с помощью осциллографа RTO.



Рис. 37 – Пример логического анализа: высокая частота дискретизации позволяет быстро обнаруживать ошибки в протоколе передачи данных.

В качестве опций логического анализа доступны следующие протоколы:

- I2C
- SPI
- UART/RS-232
- CAN, LIN, FlexRay

Дополнительную информацию см. в брошюре с описанием изделия [10].

2.2.2 Подключение к цифровому I/Q-интерфейсу (EX-IQ-Box)

Множество контрольно-измерительных приборов могут быть подключены к цифровой шине через цифровой интерфейс, описанный в разделе 2 (EX-IQ-Box). Он позволяет проводить тестирование цифрового модуля независимо от аналогового приемо-передающего модуля. Никаких изменений в измерительных опциях, а значит и в работе анализаторов и генераторов сигналов, не имеется. См. также разделы 2.1.1 и 2.1.2.

На рисунках 38 и 39 показаны схемы измерения параметров цифрового модуля.

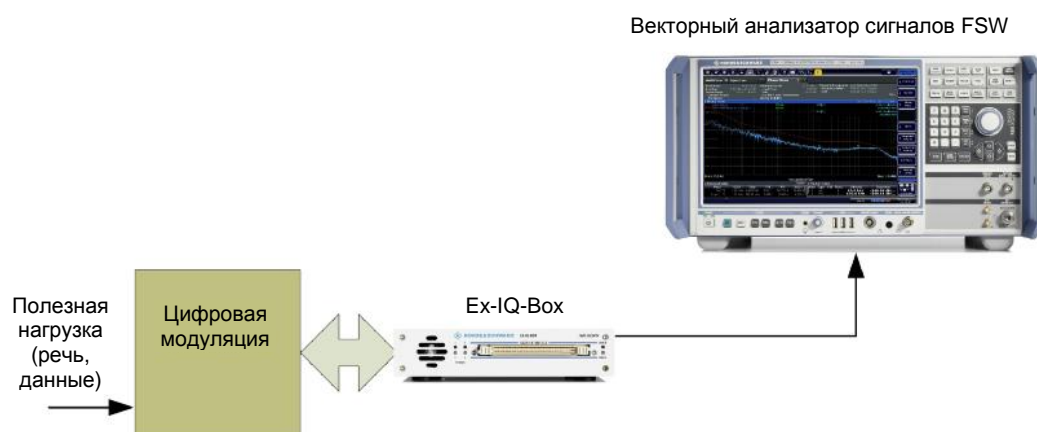


Рис. 38 – Измерение “передающего” канала цифрового модуля с помощью EX-IQ-Box и анализатора сигналов.

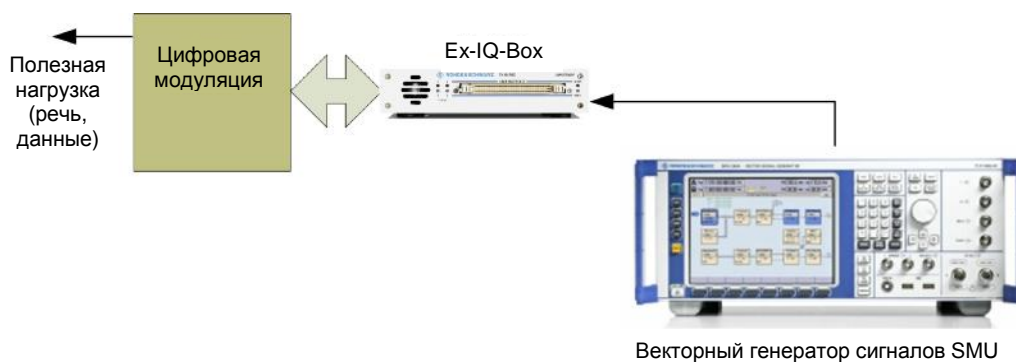


Рис. 39 – Измерение “приемного” канала цифрового модуля с помощью EX-IQ-Box и генератора сигналов.

2.2.3 Измерения на аудиоинтерфейсе

Передача речи по-прежнему остается основным применением военной радиосвязи, даже с учетом роста информационного трафика. Компания Rohde & Schwarz предлагает компактный прибор для генерации и анализа аналоговых и цифровых аудиосигналов – аудиоанализатор UPV. Полоса пропускания в генераторе до 185 кГц, а в анализаторе до 250 кГц позволяет измерять обычные речевые сигналы, а также сигналы аналоговых модемов.

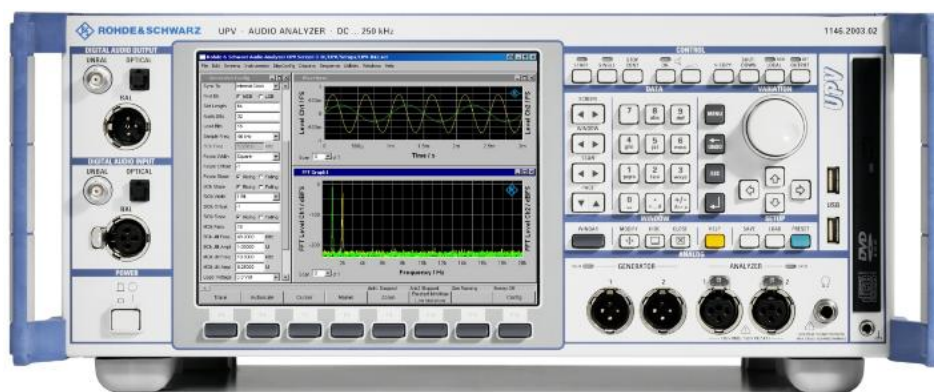


Рис. 40 – Аудиоанализатор UPV.

Основные характеристики аудиоанализатора UPV:

- аналоговый и цифровой интерфейсы
- генератор с малым уровнем искажений в диапазоне до 185 кГц
- двухканальный генератор в диапазоне частот до 80 кГц
- двухканальный анализатор с полосой до 250 кГц
- динамический диапазон: 140 дБ в аналоговом, >170 дБ в цифровом режимах
- Многоканальный анализатор с полосой пропускания 40 кГц

Дополнительную информацию см. в брошюре с описанием изделия [11].

2.3 Испытания на электромагнитную совместимость

Все электрические изделия создают нежелательное излучение в кабелях (например, источники питания) а также в воздухе. Коммерческие радиостанции должны соответствовать различным требованиям к уровню излучений, например, требованиям CISPR 16 – “Технические требования к аппаратуре для измерения радиопомех и помехозащищенности и методы измерений”. Кроме того, военные радиостанции могут неумышленно сделать доступными нешифрованные данные из-за возникновения внутренних помех в различных узлах, от АЦП до усилителей мощности. Излучения военных радиостанций нормируется военными стандартами.

Вот почему различные испытания на ЭМС должны проводиться как на проводных интерфейсах, так и на устройстве в целом.

Компания Rohde & Schwarz предлагает различные измерительные приемники радиопомех для проведения заключительных и предварительных испытаний на соответствие различным стандартам серии CISPR и военным стандартам MIL-STD:

Испытание на соответствие:

- ESU высочайшая точность, диапазон до 40 ГГц
- ESCI диапазон до 7 ГГц
- ESR диапазон до 7 ГГц (MIL-STD)

Предварительное испытание на соответствие:

- ESPI разработка и предварительные испытания, диапазон до 7 ГГц
- ESL компактное, экономичное решение для предварительных испытаний в диапазоне до 6 ГГц
- ESR предварительные испытания в диапазоне до 7 ГГц (CISPR)

Кроме того, для полностью автоматизированного испытания на соответствие военным стандартам в диапазоне до 40 ГГц доступна полноценная, модульная система тестирования TS9975 на базе приемника ESU с экранированной камерой, измерительными антеннами и программным обеспечением EMC32.

Дополнительную информацию см. в брошюре с описанием изделия [12].

2.4 Система тестирования для производства, контроля и обслуживания

Система тестирования радиооборудования R&S UCS226x позволяет проводить функциональные и проверочные испытания радиостанций компании Rohde & Schwarz (см. раздел 1.4).



Рис. 41 – Мобильная версия системы тестирования UCS226x.

Она подходит для технического обслуживания на месте эксплуатации, ремонта и тщательного тестирования на заключительной стадии испытаний. Радиостанции также могут проверяться на стадии крупно-узловой сборки.

Наконец, система может быть дополнительно расширена до полноценной производственной системы глубокого тестирования. Она основана на системе UCS, которую используют в компании Rohde & Schwarz для собственного производства радиостанций. В настоящее время поддерживаются следующие семейства радиостанций:

- M3xR
- Series4200
- Series2000

Система UCS226x построена целиком на модульном принципе. Это означает удобство и простоту выполнения возможных изменений и (будущих) расширений.

Для проведения испытаний в режиме EPM могут быть добавлены эталонные радиостанции.

Пользовательское программное обеспечение обладает интуитивно-понятным интерфейсом. Оно поддерживает как предварительно заданные тестовые последовательности, так и специализированные пользовательские тесты в четко структурированном графическом интерфейсе пользователя (GUI).

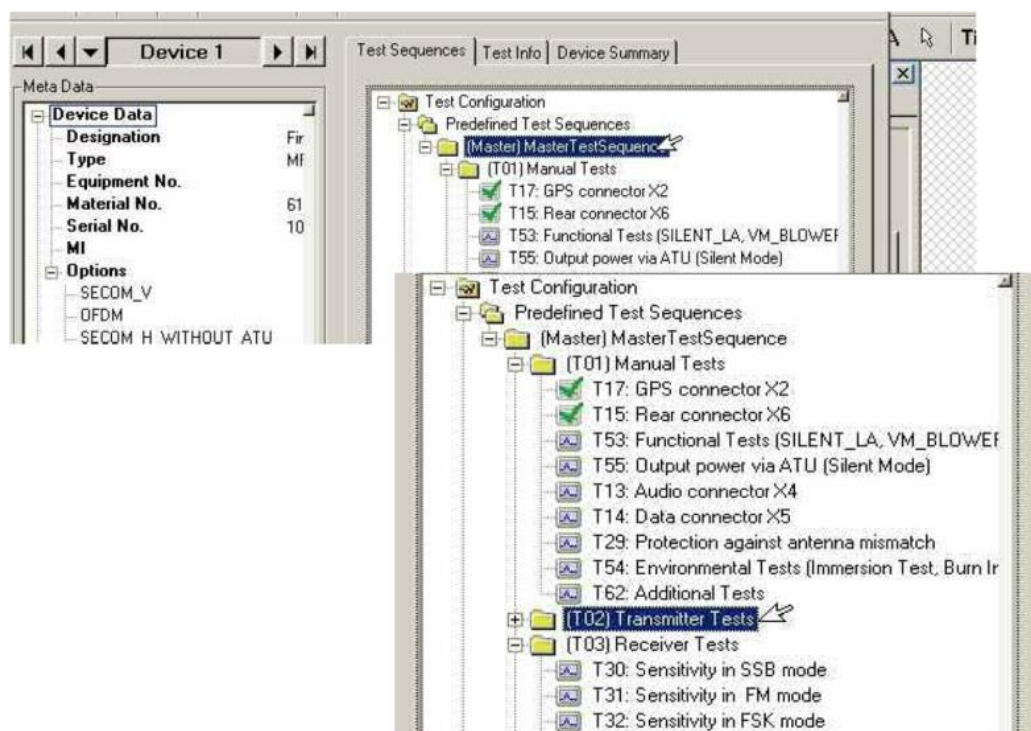


Рис. 42 – Пример предварительно заданных тестовых последовательностей, доступных для пользователя.

Функция создания отчетов позволяет сохранить обзор тестовых данных, вывести данные на принтер или экспортировать их в различные стандартные форматы, такие как CSV, PDF и т.п.

Мощная статистическая функция позволяет проводить углубленный анализ данных.

В следующих примерах показаны отдельные отрывки отчета об испытаниях (рис. 43–46):

GPS Functionality and GPS Antenna Connector X2, 6.4	13
PEP in SSB Mode, 7.1.1.1	13
Single Carrier Power in FM Mode, 7.1.1.2	14
Power in Bypass Mode, 7.1.1.3	14
Power at REAR Connector, 7.1.1.4	14
Distortion Measurement in FM Mode, 7.1.2	15
Frequency Accuracy, 7.1.3	15
Two Tone Intermodulation Distortion @ 24VDC, 7.1.7	16
Two Tone Intermodulation Distortion @ 20 VDC, 7.1.8	16
Two Tone Intermodulation Distortion @ 33 VDC, 7.1.9	16
Protection against Antenna Mismatch, 7.1.11	17
Sensitivity in SSB Mode, 7.2.1.1	18
Sensitivity in FM Mode, 7.2.1.2	18
Sensitivity in A3E Mode, 7.2.1.3	19
Weighted S/N Ratio, 7.2.6	19

Рис. 43 – Обзор (часть 1) отчета об испытаниях для типовой радиостанции.

Frequency Response SSB, 7.2.7.1	20
Frequency Response FM, 7.2.7.2	20
FM - Wideband RX Frequency Response LINE Interface, 7.2.7.4	20
LINE Interface TX Frequency Response, 7.2.7.5	21
Image rejection, 7.2.8	22
IF Rejection, 7.2.9	23
THD Measurement, 7.2.10	24
Power Consumption, 8	24
Receive-, Transmit- & Standby Mode, 8.1 - 8.3	24
Power OFF Mode, 8.4	24
SECOM-V, 9.1	25
OFDM V/UHF Data Modem, 9.2	25
SECOM-P, 9.4	25
Test Completion - Necessary Procedures, 10	26
Real time function, 10.1	26
Erase Function, 10.3	26

Рис. 44 – Обзор (часть 2) отчета об испытаниях для типовой радиостанции.

Single Carrier Power in FM Mode

Test Document 7.1.1.2

Settings: Modulation F3E, RF -> Front to 50 Ohm
no modulating Signal at Audio Input of Radio

TX Frequency /MHz	Nom. /W	DL /dB	specified Power /W	Actual /W	MU /W
VHF range:					
25.1	10	1.0	7.94 - 12.59	10.01	0.378
42.1	10	1.0	7.94 - 12.59	10.00	0.378
70.1	10	1.0	7.94 - 12.59	10.38	0.378
107.9	10	1.0	7.94 - 12.59	10.21	0.378
25.1	5	1.0	3.97 - 6.29	4.97	0.189
25.1	2	2.0	1.26 - 3.17	1.96	0.076
25.1	1	2.0	0.63 - 1.58	1.01	0.038
25.1	0.5	3.0	0.25 - 1.00	0.52	0.019
UHF Range:					
108.1	10	1.0	7.94 - 12.59	10.23	0.378
185.1	10	1.0	7.94 - 12.59	10.01	0.378
310.1	10	1.0	7.94 - 12.59	10.21	0.378
502.125	10	1.0	7.94 - 12.59	10.31	0.378
108.1	5	1.0	3.97 - 6.29	5.11	0.189
108.1	2	2.0	1.26 - 3.17	2.04	0.076
108.1	1	2.0	0.63 - 1.58	1.04	0.038
108.1	0.5	3.0	0.25 - 1.00	0.53	0.019

Рис. 45 – Пример испытания передатчика: мощность модулированного сигнала в отсутствии входного сигнала.

OFDM V/UHF Data Modem

Test Document 9.2

Settings: RF -> Front to 50 Ohm, TX Power = 10.0 W;
Data Rate is set to 72 kbps
Result: Bit Error Rate (BER) at Data Terminal 1 of Radio

Test Freq. /MHz	DUT	Average RX Level /dBm	DUL /%	Actual /%	MU
30.1	Receive Mode	-92	1.0	0.00	{e}
30.1	Transmit Mode	-92	1.0	0.00	{e}
107.9	Receive Mode	-92	1.0	0.00	{e}
107.9	Transmit Mode	-92	1.0	0.00	{e}

Рис. 46 – Пример испытания приемника: коэффициент битовых ошибок (BER) для информационного OFDM-сигнала.

2.5 Эмулятор канала: замирания

Чтобы в лабораторных условиях обеспечить условия испытаний приемников, максимально приближенные к реальным, может быть использован генератор SMU вместе с опцией (модулирующего) эмулятора замираний (K71: замирания, K72: расширенные замирания, K74: MIMO). Это частично или полностью устраняет необходимость в дорогостоящих полевых испытаниях.

В общей сложности, могут быть смоделированы около 40 каналов замираний с шириной полосы пропускания 80 МГц и разрешением 10 нс. Для наилучшего разрешения по времени (10 пс) можно уменьшить как полосу пропускания, так и количество каналов. Поскольку генератор SMU поддерживает до двух ВЧ-трактов, можно смоделировать сценарии для приемника с двумя антеннами, например разнесенный прием или режим MIMO (2x2). Для реализации сценариев вида 4x2 или 2x4 могут быть объединены два генератора SMU. На рисунках 47 и 48 показаны общие параметры замираний, а также параметры каналов.

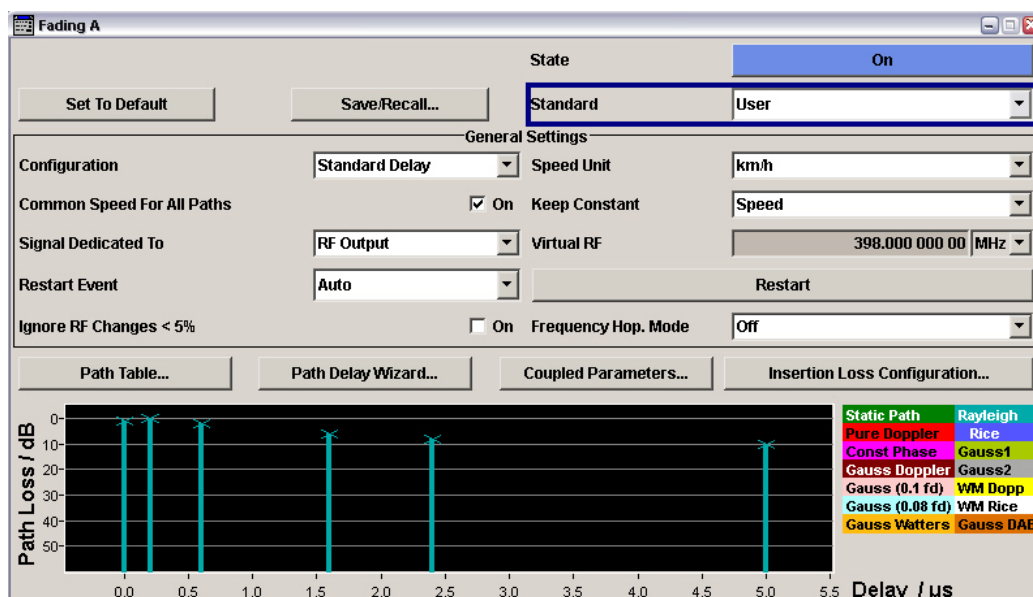


Рис. 47 – Пример параметров замираний в генераторе сигналов SMU. В данном примере показаны 6 каналов Рэля.

	1	1	1	1	1	2	2
	1	2	3	4	5	1	2
State	On	On	On	On	On	On	On
Profile	Rayleigh	Rayleigh	Rayleigh	Rayleigh	Rayleigh	Rayleigh	Rayleigh
Path Loss /dB	3.00	0.00	2.00	6.00	8.00	10.00	
Basic Delay /µs	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Additional Delay /µs	0.00	0.20	0.60	1.60	2.40	5.00	
Resulting Delay /µs	0.00	0.20	0.60	1.60	2.40	5.00	
Power Ratio /dB							
Const Phase /Deg	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Speed /km/h	49.997	49.997	49.997	49.997	49.997	49.997	
Freq. Ratio	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Res. Doppler Shift /Hz	46.33	46.33	46.33	46.33	46.33	46.33	
Correlation Path	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Coefficient /%	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Phase /Deg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Lognorm State	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Local Constant /m	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Standard Dev. /dB	0	0	0	0	0	0	0

Copy Path Group

Source Destination

Рис. 48 – Настройки для отдельных канальных параметров.

Эмуляция динамических сценариев (опция K77)

Специально предназначенная для тестирования военных радиостанций опция K77 (эмуляция динамических сценариев) предлагает сценарии для передачи сигналов между двумя подвижными радиостанциями. На сегодняшний день поддерживаются три сценария:

- судно-судно
- вышка-самолет
- пользовательский

Опция K77 позволяет эмулировать доплеровские сдвиги частоты для скоростей до 8100 км/ч (7,5 махов при $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$) и расстояний до 48 км. На рис. 49 показан пример сценария вида вышка-самолет.

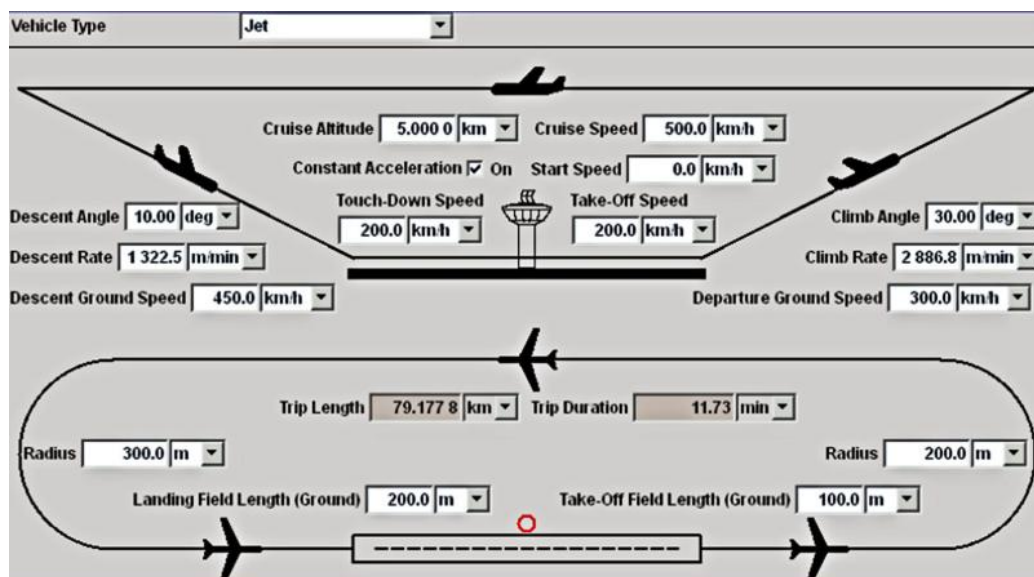


Рис. 49 – Пример настроек для эмуляции вида вышка-самолет.

Замирение ВЧ-сигнала

Большинство испытаний приемников могут быть проведены с использованием замираний в полосе модулирующего сигнала. Однако для более глубокого уровня анализа могут потребоваться замирания ВЧ-сигнала. К такому виду анализа относятся испытания радиостанций в режиме EPM.

Для проведения данных испытаний соединяют вместе анализатор спектра и генератор сигналов (см. рис. 50).

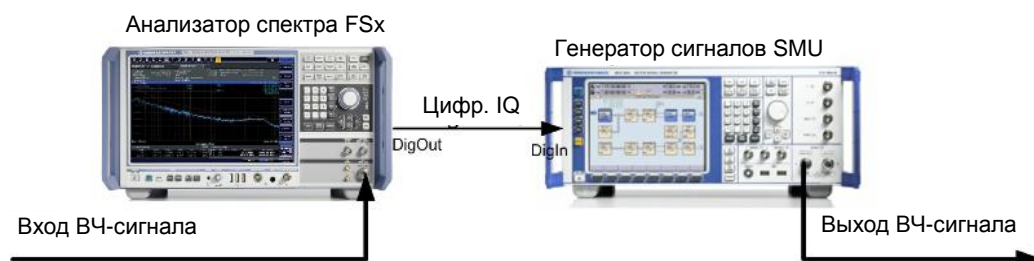


Рис. 50 – Замирение ВЧ-сигнала с использованием анализатора спектра и генератора сигналов. I/Q-данные, оцифрованные анализатором FSx, передаются на генератор SMU через цифровой интерфейс, ослабляются и переносятся на исходную высокую частоту.

Анализатор FSx оцифровывает ВЧ-сигнал и передает сформированные I/Q-данные для генератора SMx через цифровой интерфейс. Затем генератор SMU выполняет эмуляцию замирания в полосе модулирующего сигнала и переносит сигнал на исходную высокую частоту.

Отдельные приборы поддерживают следующие полосы частот модуляции:

- FSW 80 МГц (160 МГц)
- FSQ 28 МГц
- FSG 28 МГц
- FSV 40 МГц

Эти высокие полосы частот модуляции также позволяют добавлять замирания к сигналам со скачкообразной перестройкой частоты.

Дополнительную информацию о замираниях ВЧ-сигналов см. в указаниях по применению 1MA145: [Универсальный эмулятор замираний радиосигналов на базе R&S®FSQ/FSG/FSV и R&S®SMU](#) [15] и карте применений: [Тестирование предельных возможностей авиационных бортовых радиостанций](#) [18].

2.6 Аналоговый радиокommunikационный монитор CMS¹

Радиокommunikационный сервисный монитор CMS часто используется в качестве компактного тестера аналоговых радиостанций на фиксированных частотах в сфере обслуживания, производства и разработки. В корпусе одного прибора содержатся и генератор для испытаний приемников, и анализатор для испытаний передатчиков. С помощью прибора CMS могут быть проведены все испытания в стандарте ITOP (см. 1.3.2). Прибор CMS охватывает диапазон частот от 0,4 до 1000 МГц.

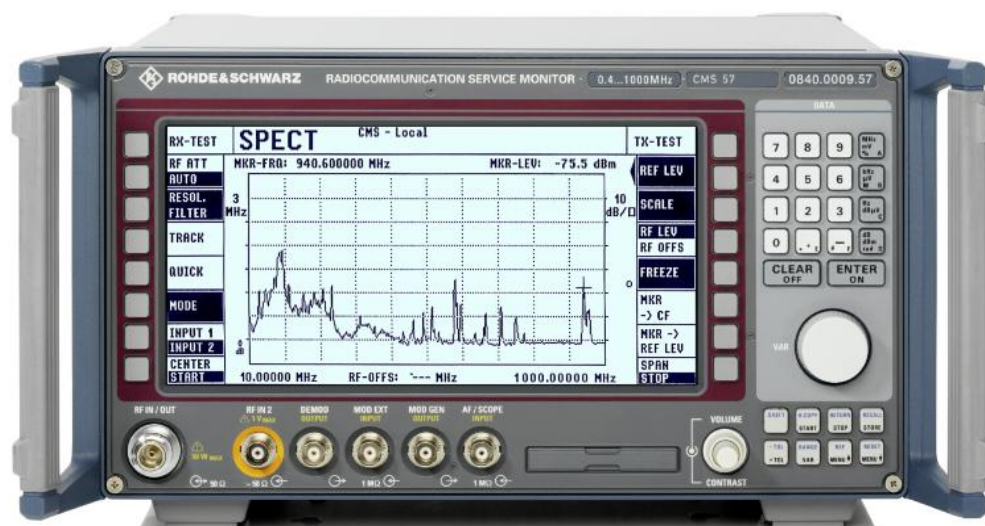


Рис. 51 – Радиокommunikационный сервисный монитор CMS.

Генераторная часть прибора обеспечивает выполнение следующих функций:

- АМ, ЧМ, ФМ и многотональная модуляция
- Два независимых модуляционных генератора
- Кодер селективного вызова для всех стандартов
- Кодер CDCSS
- Кодер DTMF
- Генератор VOR/ILS-сигналов

¹ Необходимо отметить, что в настоящее время прибор CMS снят с производства.

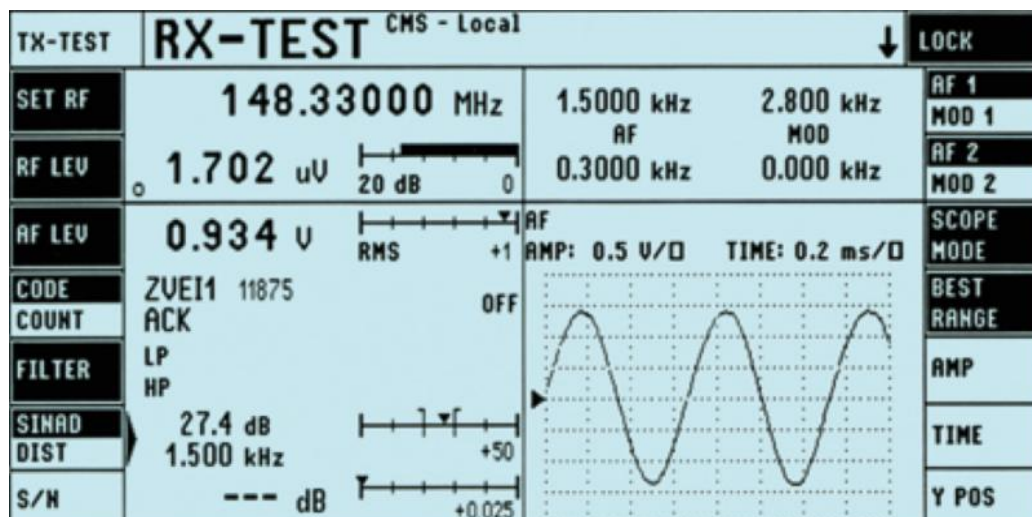


Рис. 52 – Испытание приемника: настройки генератора, НЧ-анализ приемника.

Анализатор обеспечивает выполнение следующих важнейших функций:

- ВЧ-частотомер, счетчик ошибок частоты ВЧ-сигнала
- ВЧ-измеритель мощности в диапазоне от 1 мВт до 100 Вт
- Селективный ВЧ-измеритель мощности до уровня –100 дБмВт
- Монитор ВЧ-спектра с возможностью анализа модуляции (AM, FM, SSB)
- Следящий генератор
- Измерения в соседнем канале со стандартизованными фильтрами ETSI
- Тестер модуляции для AM-, ЧМ- и ФМ-модуляции
- Тестер дуплексной модуляции для любой дуплексной разницы частот
- НЧ-вольтметр с индикацией пикового и среднеквадратического значений
- Измерение отношения SINAD с переменной тестовой частотой
- Измерение отношения С/Ш
- Измерение искажений с переменной тестовой частотой
- НЧ-частотомер с измерением по периоду и временному стробу
- Декодер селективного вызова для всех стандартов (включая частные)
- Декодер DTMF
- Осциллограф
- Измерение постоянной составляющей AM-колебания/напряжения
- Регистратор переходных процессов для анализа отклонений мощности и частоты
- Меню SSB
- Измерение уровня гармоник
- Измерение расстояния до повреждения

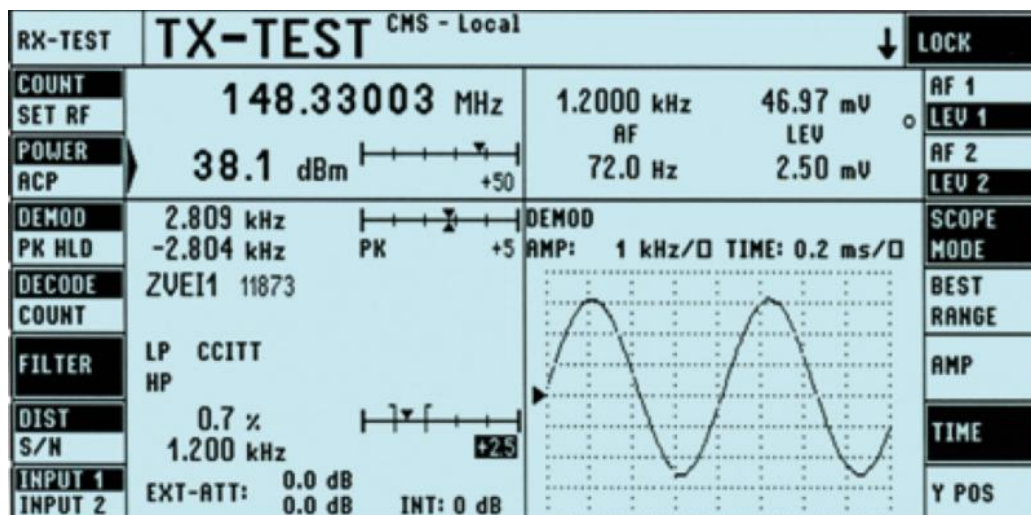


Рис. 53 – Испытание передатчика: ВЧ-измерения, анализ модулированного сигнала и настройки модуляционного генератора.

Дополнительную информацию см. в брошюре с описанием изделия [13].

2.7 Тестер СТН: обслуживание на месте эксплуатации

Тестер СТН представляет собой тестер аналоговых FM радиостанций, предназначенный для выездного обслуживания в полевых условиях. Он был специально разработан для наружного использования и суровых условий эксплуатации. Для использования тестера СТН не требуется экспертных знаний. Существует две модели тестера СТН: СТН100 и СТН200.



Рис. 54 – Тестер СТН в составе типичной измерительной установки.

Тестер СТН поддерживает выполнение следующих измерений:

- Измерение параметров передатчика
 - Передаваемая мощность
 - Отраженная мощность
 - Частотомер
- Измерение параметров приемника
 - Помехоподавление
 - Демодуляция

Модель СТН200 поддерживает следующие функции:

- Эфирные (беспроводные) измерения
- Измерение расстояния до повреждения
- Голосовой отчет о результатах

Дополнительную информацию см. в брошюре с описанием изделия [14].

2.8 Интеграция приборов в инструменты EDA

Инструменты автоматизации проектирования электронных изделий (инструменты EDA) незаменимы при проектировании ВЧ- и СВЧ-систем и систем связи. В дополнение к обычному проектированию микросхем поддерживается возросшее количество функций, которые улучшают конечную точность и снижают количество циклов разработки, тем самым сокращая время выхода изделия на рынок.

На рынке имеются разнообразные инструменты проектирования и моделирования. Чтобы обеспечить применимость моделирования в различных областях, компания Rohde & Schwarz упростила интеграцию своих контрольно-измерительных приборов в эти инструменты. Таким образом, компания Rohde & Schwarz не только привнесла в эти инструменты совместимые со стандартами сигналы, но и обеспечила дистанционное управление приборами и беспрепятственную передачу данных.

Посетите наш веб-сайт [EDA software support](#) для получения дополнительной информации об интеграции наших приборов в эти инструменты EDA:

- MATLAB® от компании MathWorks™
- Microwave Office® (MWO) и Visual System Simulator™ (VSS) от компании AWR
- Advanced Design System (ADS) от компании Agilent

3 Приложение

3.1 Библиография

- [1] Международная процедура проведения испытаний (ИТОР) 6-2-242: **Процедуры испытаний аналоговых передатчиков и приемников связи**, Октябрь 1993
- [2] Rohde & Schwarz: **Семейство измерителей мощности NRP**, брошюра с описанием изделия, май 2008
- [3] Rohde & Schwarz: **Универсальный векторный анализатор сигналов**, брошюра с описанием изделия, август 2004
- [4] Rohde & Schwarz: **Векторный анализ сигналов OFDM**, брошюра с описанием изделия, март 2012
- [5] Rohde & Schwarz: **ПО анализа искажений**, брошюра с описанием изделия, июль 2010
- [6] Rohde & Schwarz: **Выполнение измерений со смесителем с помощью векторного анализатора цепей ZVA**, указания по применению **1EZ58**, март 2009
- [7] Rohde & Schwarz: **Выбор генератора сигналов для тестирования АЦП**, указания по применению **1GP66**, декабрь 2010
- [8] Rohde & Schwarz: **FSUP**, брошюра с описанием изделия, июль 2010
- [9] Rohde & Schwarz: **FSVR**, брошюра с описанием изделия, июль 2010
- [10] Rohde & Schwarz: **RTO**, брошюра с описанием изделия, апрель 2012
- [11] Rohde & Schwarz: **UPV**, брошюра с описанием изделия, июль 2010
- [12] Rohde & Schwarz: **EMC**, брошюра с описанием изделия, март 2006
- [13] Rohde & Schwarz: **CMS**, брошюра с описанием изделия, октябрь 2007
- [14] Rohde & Schwarz: **СТН**, брошюра с описанием изделия, октябрь 2011
- [15] Rohde & Schwarz: **Универсальный эмулятор замираний радиосигналов на базе R&S®FSQ/FSG/FSV и R&S®SMU**, указания по применению 1MA145
- [16] Rohde & Schwarz: **Успешное начало с помощью модуля R&S®EX-IQ-Box**, указания по применению 1MA186, May 2012
- [17] Rohde & Schwarz: **Эффективное количество битов (ENOB) цифрового осциллографа R&S**, указания по применению 1ER03_1e, апрель 2011
- [18] Rohde & Schwarz: **Тестирование предельных возможностей авиационных бортовых радиостанций**, карта применений

3.2 Дополнительная информация

Любые комментарии и предложения по данному документу направляйте по адресу

TM-Applications@rohde-schwarz.com

Посетите наш сайт

<http://www2.rohde-schwarz.com/>

Зарегистрированные пользователи могут посетить веб-сайт для заказчиков GLORIS по адресу

<https://extranet.rohde-schwarz.com/>

3.3 Информация для заказа

Информация для заказа		
Векторные генераторы сигналов		
SMU200A		1141.2005.02
SMJ100A		1403.4507.02
SMBV100A		1407.6004.02
AMU200A	Генерация модулирующих сигналов и замираний	1402.4090.02
AFQ100A/B	Генерация сигналов и I/Q-модуляция	
EX-IQ-Box	Модуль цифрового сигнального интерфейса	1409.5505.04
xMU-K71	Динамическое замирание и улучшенное разрешение	
xMU-K72	Расширенные функции замираний	
xMU-K74	Замирания MIMO	
xMU-K77	Имитация динамических сценариев	
xMU-K80	Измерение коэффициентов BER/BLER	
Генераторы сигналов		
SMA100A		1400.0000.02
SMB100A	Генератор сигналов диапазонов ВЧ и СВЧ	1406.6000.02
SMC100A		1411.4002.02
SMF100A	Генератор сигналов диапазона СВЧ	1167.0000.02
SGS100A	Источник ВЧ-сигналов для SGMA	1416.0505.02

Информация для заказа		
Анализаторы спектра и сигналов		
FSW	диапазон до 8/13/26 ГГц	1312.8000Kxx
FSQ	диапазон до 3/8/26/40 ГГц	1313.9100.xx
FSV	диапазон до 3/7/13/30/40 ГГц	1307.9002.xx
FSUP	диапазон до 8/26/50 ГГц	1166.3505.xx
FSMR	диапазон до 3,6/26,5/43/50 ГГц	1313.9200.xx
FSG	диапазон до 8/13 ГГц	1309.0002.xx
FSVR	диапазон до 7/13/30/40 ГГц	1311.0006.xx
FSL	диапазон до 3/6/18 ГГц	1300.2502.03
FSH4/8	диапазон до 4/8 ГГц	1309.6000.08
FMU36		1303.3500.02
K7	Измерительный ЧМ-демодулятор	
K40	Измерение фазового шума	
K70	Общий векторный анализ сигналов	
K96(PC)	ПО для векторного анализа сигналов OFDM	
K130(PC)	ПО для анализа искажений	1310.0090.06
Векторные анализаторы цепей		
ZVA	диапазон до 8/24/40/50/67/110 ГГц	
ZVB	диапазон до 4/8/14/20 ГГц	1145.1010.xx
ZNB	диапазон до 4,5/8,8 ГГц	1311.6010.xx
ZNC	диапазон до 3 ГГц	1311.6004.12
ZVL	диапазон до 3/6/13,6 ГГц	1303.6509.xx
Тестовые приемники ЭМП		
ESU	диапазон до 8/26,5/40 ГГц	1302.6005.xx
ESPI	диапазон до 3/7 ГГц	1164.6407.xx
ESCI	диапазон до 3/7 ГГц	1166.5950.xx
ESL	диапазон до 3/6 ГГц	1300.5001.xx
ESR	диапазон до 3/7 ГГц	1316.3003.xx
Осциллограф		
RTO	диапазон до 0,6/1/2/4 ГГц	1316.1000.14
RTO-B1	Опция смешанных сигналов MSO	1304.9901.03
RTO-K1	Синхронизация и декодирование сигналов I ² C/SPI	1304.8511.02
RTO-K2	Декодирование сигналов последовательного интерфейса RS-232/UART	1304.8528.02
RTO-K3	Синхронизация и декодирование сигналов CAN/LIN	1304.8534.02

Информация для заказа		
RTO-K4	Синхронизация и декодирование сигналов FlexRay	1304.8540.02
Система		
UCS226x	Оборудование для тестирования радиосистем	
Портативный радиотестер		
СТН100А/200А	Портативный радиотестер для аналоговых приемо-передатчиков	1207.1000.xx
Датчик мощности		
NRP-Z	Семейство датчиков	
Аудиоанализатор		
UPV	Анализатор звуковых сигналов	1146.2003.02

О компании Rohde & Schwarz

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

Обязательства по охране окружающей среды

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



Контакты в регионах

Европа, Африка, Ближний Восток
+49 89 4129 12345

customersupport@rohde-schwarz.com

Северная Америка

1-888-TEST-RSA (1-888-837-8772)

customer.support@rsa.rohde-schwarz.com

Латинская Америка

+1-410-910-7988

customersupport.la@rohde-schwarz.com

Азия/Тихий океан

+65 65 13 04 88

customersupport.asia@rohde-schwarz.com

Китай

+86-800-810-8228 /+86-400-650-5896

customersupport.china@rohde-schwarz.com

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