ЭКСПОНЕНТА
ЦЕНТР ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
И МОДЕЛИРОВАНИЯ

РИТМ SDR USRP 2.0

Программно совместимая и функционально сопоставимая альтернатива USRP X410



Привычные инструменты

Engee
MATLAB
LabVIEW
GNURadio
python

LTE/5G/GPU

OPEN AIR interface
SRS RAN
NVIDIA
UHD™
Wi Fi™

РИТМ SDR USRP 2.0

ЭКСПОНЕНТА
ЦЕНТР ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Широкополосная радиоплатформа для разработки и испытаний радиосистем

РИТМ SDR USRP – широкополосная программно-аппаратная радиоплатформа для разработки систем связи, измерений и аппаратной реализации алгоритмов цифровой обработки сигналов. РИТМ SDR USRP RITM2-02 содержит два канала передачи и два канала приёма; РИТМ SDR USRP RITM2-04 – четыре канала передачи и четыре канала приёма. Оба исполнения используют AMD Zynq UltraScale+ и единое программное окружение.

Полная программная совместимость с USRP X410 позволяет работать с РИТМ SDR USRP в Engee, MATLAB/Simulink, LabVIEW, GNU Radio, C/C++ и Python, используя поставляемые интерфейсы, драйверы и демонстрационные проекты. В одной прошивке поддерживаются PS-TCP и UHD, поэтому пользователь выбирает способ подключения под требования приложения. Обработку сигналов можно распределять между ПК, ПЛИС, встроенной процессорной подсистемой и NVIDIA Jetson Orin NX, а управление и обновление ПО выполнять по проводным и беспроводным интерфейсам.



Рисунок 1 – РИТМ SDR USRP – радиоплатформа для связи, измерений и аппаратной обработки

1. Описание радиоплатформы РИТМ SDR USRP

РИТМ SDR USRP RITM2-02 применяется для двухканальных измерений, отладки алгоритмов связи, стендов MIMO 2×2 и исследования усилителей мощности с использованием обзорного приёмного тракта ORX. В режиме аппаратного интерливинга два канала RX образуют один приёмный канал с полосой 450 МГц.

РИТМ SDR USRP RITM2-04 обеспечивает четыре канала передачи и четыре канала приёма для стендов MIMO 4×4, пространственной обработки и одновременной работы с несколькими радиоканалами. При попарном аппаратном интерливинге доступны два приёмных канала с полосой 450 МГц каждый.

Для обоих исполнений диапазон настройки радиочастоты составляет от 75 МГц до 6 ГГц. Выбор комплектации определяет число физических каналов, тогда как принципы управления, работы с I/Q-данными и подключения аппаратных алгоритмов остаются общими. Это позволяет использовать наработанное программное обеспечение при переходе от двухканального стенда к четырёхканальной системе.

Цифровая часть построена на AMD Zynq UltraScale+ и объединяет процессорную подсистему PS с программируемой логикой PL. Четыре ядра Cortex-A53 выполняют Linux и прикладные службы, а два ядра Cortex-R5 используются для задач управления реального времени. Процессорной подсистеме доступно 4 ГБ DDR4, программируемой логике – 2 ГБ DDR4. Такое разделение памяти позволяет обслуживать сетевые приложения и одновременно буферизовать потоки I/Q в аппаратном тракте, в том числе при записи и воспроизведении через RFNoC Replay.

Основные технические характеристики

Параметр	РИТМ SDR USRP
Исполнения	RITM2-02: 2TX/2RX; RITM2-04: 4TX/4RX
Диапазон настройки	75 МГц – 6 ГГц; с опцией B040 – до 10 ГГц
Полоса RX	До 200 МГц на канал; 450 МГц с интерливингом*
Полоса синтеза TX	До 450 МГц
Полоса ORX	До 450 МГц
Цифровая платформа	3 AMD Zynq UltraScale+; 4 × Cortex-A53, 2 × Cortex-R5
Память	PS: 4 ГБ DDR4; PL: 2 ГБ DDR4
Обмен I/Q	UHD: SFP+ 10 GbE; PS-TCP: Ethernet 1 Гбит/с, Wi-Fi с B130
Интерфейсы ПО	UHD, RFNoC, PS-TCP
Базовый DFE	AGCex-IP, DDCex-IP, DUCex-IP
Синхронизация	Команды с временной меткой, PPS; GPSDO – B010

** Аппаратный интерливинг двух каналов RX: РИТМ SDR USRP RITM2-02 – один канал приёма 450 МГц; РИТМ SDR USRP RITM2-04 – два канала по 450 МГц. Каждая пара RX используется как один широкополосный канал.*

Полоса и частота отсчётов сигнала

В штатном режиме полоса основного приёмного тракта составляет до 200 МГц на канал. Аппаратный интерливинг двух каналов расширяет полосу одного результирующего канала приёма до 450 МГц: один такой канал доступен в РИТМ SDR USRP RITM2-02, два – в РИТМ SDR USRP RITM2-04. Полоса синтеза передатчика и полоса обзорного приёмника ORX достигают 450 МГц. Расширенный спектр TX и ORX используется при цифровой линеаризации усилителя. Полезная полоса передаваемого сигнала, частота отсчётов и цифровые фильтры задаются профилем радиотракта.

IP-ядра цифрового повышения и понижения частоты дискретизации – DUCex-IP и DDCex-IP – согласуют поток отсчётов радиотракта с требованиями прикладного алгоритма и выбранного интерфейса передачи данных. Для высокоскоростного обмена по UHD используются порты SFP+ 10 GbE, а для PS-TCP предусмотрены Ethernet 1 Гбит/с процессорной подсистемы и Wi-Fi. Приложение UHD получает фактически установленную частоту дискретизации методами get_rx_rate() и get_tx_rate() и использует её при формировании сигналов, построении частотной шкалы и расчёте параметров обработки.

Аппаратная фильтрация и изменение частоты дискретизации позволяют выделять требуемую полосу непосредственно в ПЛИС. На компьютер передаются данные, необходимые для последующих вычислений. Режим приёма 450 МГц характеризует радиотракт; возможность непрерывной передачи полного потока на ПК определяется частотой отсчётов, форматом I/Q и пропускной способностью интерфейса. Для широкополосных захватов используются локальная буферизация и аппаратная обработка. Регулирование уровня, снижение пик-фактора и цифровая линеаризация настраиваются в составе выбранной прошивки.

Характеристики базового радиотракта РИТМ SDR USRP RITM2-02

Показатель	Типовое значение и условия
Выход TX	До +10 dBm; усиление PA 14 дБ на 2 ГГц
МШУ RX	Усиление 15 дБ; 300 МГц – 6 ГГц
EVM TX	0,7% при 1,9 и 3,8 ГГц; 1,1% при 5,9 ГГц. Тестовые сигналы 3GPP
ACLR TX	−67 / −64 / −60 дБ для 0,075–2,8 / 2,8–4,8 / 4,8–6 ГГц. LTE 20 МГц, −12 dBFS
Зеркальный сигнал TX	Подавление 65 / 62 / 60 дБ для 0,6–4 / 4–4,8 / 4,8–6 ГГц. Коррекция I/Q включена
Спектральная шумовая плотность TX	−148 / −149 / −150,5 дБм/Гц для 0,6–3 / 3–4,8 / 4,8–6 ГГц. В полосе, ослабление TX 0 дБ
Фазовый шум	−100 / −104 / −99 дБн/Гц при 1,9 / 3,8 / 5,9 ГГц; отстройка 100 кГц, полоса ФАПЧ 50 / 300 / 300 кГц
HD3 RX	−66 дБн на 0,6–4,8 ГГц; −62 дБн на 4,8–6 ГГц. CW, на 4 дБ ниже верхнего рабочего уровня; отстройка 1/6 полосы RX

Типовые значения приведены для указанных частот и тестовых режимов базового радиотракта. Дополнительные усилители и фильтры учитываются при выборе комплектации. Характеристики гармоник передатчика определяются выходным каскадом и фильтрами.

Преимущества единой аппаратной платформы

РИТМ SDR USRP объединяет радиочастотную часть, собственные DSP-ядра, программные интерфейсы и средства эксплуатации в согласованный комплект. Пользователю доступны готовые способы подключения к инженерным средам и примеры обмена сигналами, поэтому основные усилия можно сосредоточить на разработке приложения и алгоритмов. Совместимость с X410 сохраняет применимость существующего UHD-кода, а открытые интерфейсы аппаратной обработки позволяют расширять платформу под требования конкретной системы.

2. Архитектура и потоки данных

В приёмном тракте сигнал от РЧ-входа через цепи коммутации поступает в радиочастотную часть РИТМ SDR USRP, где выполняются преобразование частоты, фильтрация и оцифровка. Квадратурные отсчёты передаются в ПЛИС по интерфейсу JESD204. Далее AGCex-IP регулирует цифровой уровень, а DDCex-IP выполняет частотное преобразование и децимацию. Подготовленный поток направляется в прикладные аппаратные блоки, память или интерфейс обмена с хостом.

В передающем тракте источником I/Q-данных служит приложение на ПК, локальная память, SSD либо аппаратный генератор. После маршрутизации отсчёты поступают в DUCex-IP для интерполяции и подготовки цифрового сигнала. Радиочастотная часть преобразует полученные по JESD204 данные в сигнал TX. Для разработки передатчиков предусмотрены встроенные опции S020 PC-CFRex-IP и S110 DPDex-IP; положение этих блоков в тракте определяется конфигурацией алгоритма. Полоса синтеза до 450 МГц обеспечивает спектральный запас для формирования предыскажённого сигнала.

Обзорный тракт ORX используется как канал обратной связи при исследовании и линеаризации передатчика. Часть выходного сигнала через ответвитель и цепь согласования уровня подаётся на обзорный вход, после чего оцифрованная последовательность используется для оценки характеристик усилителя и расчёта коэффициентов предыскажения. Для многоканальных измерений программа согласует выбор входа ORX, захват данных и калибровки трансивера.

Управление и потоковая обработка распределены между PS и PL. Процессорная подсистема загружает конфигурацию устройства, обслуживает сетевые соединения и выполняет команды приложения. Программируемая логика обрабатывает отсчёты, переключает маршруты, управляет аппаратными буферами и обеспечивает передачу данных между радиотрактом, памятью и внешними интерфейсами. Такое разделение позволяет выполнять вычисления над непрерывным потоком без участия Linux в обработке каждого отсчёта.

Протоколы PS-TCP и UHD

PS-TCP предоставляет программный доступ к управлению устройством, регистрам IP-ядер и передаче I/Q-данных через процессорную подсистему. Клиентское приложение соединяется со службой Linux по отдельному порту Ethernet 1 Гбит/с PS либо по Wi-Fi. Обмен между памятью PS и аппаратными трактами выполняется средствами DMA. Этот способ подключения удобен для собственных приложений, автоматизации измерений и управления расширенными функциями платформы.

Интерфейс UHD предназначен для подключения приложений, использующих программную модель USRP X410. Потоки I/Q передаются через SFP+ 10 GbE либо Ethernet 1 Гбит/с со стороны PL. Цифровой тракт сопрягается с Radio и блоками RFNoC, благодаря чему приложение использует стандартные механизмы потокового обмена и управления UHD. Базовые AGCex-IP, DDCex-IP и DUCex-IP размещаются во внешнем DFE-контуре и выполняют обработку между радиочастотным трансивером и транспортной частью.

PS-TCP и UHD доступны в одной прошивке. Координация доступа к каналам, общим параметрам трансивера и памяти обеспечивает согласованную работу приложений через оба интерфейса. Например, пользователь может применять Engee для настройки аппаратной обработки и UHD-приложение для работы с выделенными

потоками данных. Переход между способами подключения не требует замены прошивки; распределение ресурсов задаётся конфигурацией устройства и приложений.

Расчёт транспортной нагрузки при передаче данных

При выборе частоты дискретизации необходимо учитывать число активных каналов и формат передачи данных. В формате sc16 каждый комплексный отсчёт содержит 16-разрядную I-компоненту и 16-разрядную Q-компоненту, поэтому полезная скорость потока в одном направлении определяется выражением:

$R = N \times Fs \times 32$ бит/с,

Здесь N – число одновременно передаваемых каналов, а Fs – частота комплексных отсчётов в каждом канале, Гц. При Fs = 30,72 Мвыб/с два канала формируют полезную нагрузку 1,966 Гбит/с, четыре канала – 3,932 Гбит/с. Нагрузка RX и TX рассчитывается отдельно для каждого направления полнодуплексного соединения; дополнительно учитываются заголовки пакетов и служебный обмен. Аппаратная децимация, локальная буферизация и запись на SSD позволяют распределить данные между обработкой на устройстве и передачей на ПК.

Синхронизация

Опция GPSDO обеспечивает привязку опорной частоты к спутниковой системе синхронизации и доступна через средства выбора источников тактирования UHD. Опорный генератор и системы фазовой автоподстройки частоты задают тактирование радиочастотной и цифровой частей. Импульс PPS используется для привязки времени и согласованного запуска операций, а синхронизация JESD204 обеспечивает требуемые временные соотношения при передаче отсчётов между трансивером и ПЛИС.

В приложениях UHD момент начала передачи или приёма задаётся с помощью аппаратного счётчика времени и команд с временной меткой. В PS-DMA предусмотрен запуск по PPS или внешнему триггеру. Для задач когерентного приёма и пространственной обработки дополнительно выполняется согласование задержек и фазовых смещений каналов: частотная синхронизация обеспечивает общую опору, временная – согласованный запуск, а калибровка компенсирует различия между трактами.

3. Аппаратная обработка и расширение возможностей платформы

Базовый набор DFE: AGCex-IP, DDCex-IP, DUCex-IP

AGCex-IP выполняет автоматическую регулировку уровня цифрового сигнала в ПЛИС. Ядро оценивает уровень поступающих отсчётов, формирует управляющий коэффициент и применяет одинаковое усиление к I- и Q-компонентам, сохраняя их взаимное соотношение. Пользователь задаёт целевой уровень, параметры сглаживания, скорость регулирования и реакцию на пиковые значения. Такая обработка согласует динамический диапазон принятого сигнала с последующими аппаратными алгоритмами.

Встроенная АРУ радиочастотного тракта и AGCex-IP работают на разных участках приёмника. Радиочастотная АРУ управляет усилением до передачи цифровых данных в ПЛИС; AGCex-IP регулирует амплитуду уже оцифрованной последовательности. При совместной настройке сначала обеспечивается запас до перегрузки радиотракта, затем задаётся требуемый цифровой уровень для дальнейшей обработки.

DDCex-IP выполняет цифровое понижение частоты и уменьшение частоты дискретизации с предварительной фильтрацией, подавляющей составляющие, которые могли бы наложиться на полезный спектр при децимации. DUCex-IP решает обратную задачу: повышает частоту дискретизации и фильтрует спектральные копии, возникающие при интерполяции. Для коэффициента преобразования K частоты связаны выражениями $Fs_out = Fs_in / K$ для DDC и $Fs_out = Fs_in \times K$ для DUC. Например, K = 8 обеспечивает переход между 245,76 и 30,72 Мвыб/с.

Конфигурации ядер включают цифровой перенос частоты, коррекцию уровня и

постоянной составляющей. Полезная полоса выбирается с учётом переходной области фильтров, а при последовательном включении собственных ядер и штатных DUC/DDC RFNoC согласуются суммарный коэффициент преобразования частоты и положение сигнала в спектре. Для многоканальных приложений также задаются порядок каналов и компенсация задержек, чтобы сохранить требуемые соотношения между потоками.

Дополнительные IP-ядра

PC-CFRex-IP уменьшает пик-фактор сигнала, а DPDex-IP формирует цифровые предыскажения, компенсирующие нелинейную характеристику усилителя мощности. Совместное применение этих ядер позволяет выбирать рабочий режим передатчика с учётом выходной мощности, качества модуляции и внеполосных излучений. Обзорный тракт ORX формирует обратную связь для идентификации усилителя и настройки предыскажения. В Signal Soft доступны управление ядрами, анализ амплитудных и фазовых характеристик, оценка EVM и мощности излучения в соседних каналах по ACLR/ACPR.

Дополнительные функции поставляются как встроенные программные опции S: FFTex-IP, OFDMex-IP, LTECSex-IP, LTEQex-IP, LTE-SCHex-IP, VITERBIex-IP, DVB-S2/T2 FEC ENCODERex-IP и DVB-S2X LDPC DECODERex-IP. Пользователь получает готовую прошивку, API и полную документацию. Для подключения пользовательских аппаратных алгоритмов используется инфраструктура AXI4-Stream и AMD/Xilinx Multichannel DMA. Каталог опций и состав пакетов приведены в разделе 8.

Пользовательские IP-ядра могут включаться в потоковый контур вне RFNoC либо интегрироваться в RFNoC-граф через соответствующую оболочку. Внешний контур обеспечивает непосредственную обработку данных радиотракта и связь с PS-TCP; RFNoC обеспечивает взаимодействие со штатными блоками и UHD. Базовые AGCex-IP, DDCex-IP и DUCex-IP входят в штатную прошивку. Поставка готовых опций S не включает переносимый пакет IP для самостоятельной сборки FPGA-проекта.

На рисунке 2 приведён интерфейс настройки маршрутов в Signal Soft для конфигурации с дополнительными DSP-блоками. Пользователь задаёт последовательность обработки и выбирает точки подключения источников и приёмников данных. Такой способ настройки используется при исследовании радиотракта и отладке аппаратных алгоритмов.

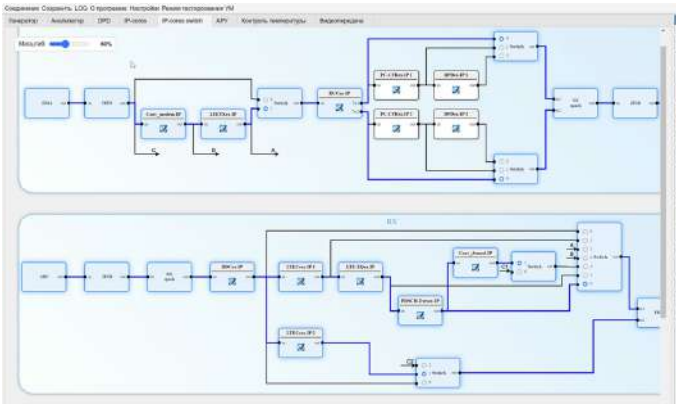


Рисунок 2 – Настройка маршрутов обработки в Signal Soft: пример расширенного FPGA-тракта

4. Программные экосистемы

РИТМ SDR USRP поддерживает работу в инженерных средах Engee, MATLAB/Simulink, LabVIEW, GNU Radio, C/C++ и Python. В состав программного комплекта входят драйверы, клиентские интерфейсы и демонстрационные проекты, которые связывают средства формирования и анализа сигналов с радиочастотным оборудованием. Пользователь может разрабатывать алгоритм в привычной среде, выполнять испытания на реальном тракте и включать те же операции в автоматизированный стенд.

Engee и собственный интерфейс PS-TCP

В Engee устройство подключается через поставляемый программный интерфейс PS-TCP. Приложение задаёт параметры радиотракта, передаёт подготовленные квадратурные отсчёты, получает результат приёма и обращается к регистрам IP-ядер. Такой способ работы позволяет объединить расчёт сигнала, настройку аппаратной обработки и анализ результата в одном вычислительном сценарии. Взаимодействие

осуществляется с помощью пакета поддержки из EngeeDeviceManager. Targets.RITM_SDR_API.

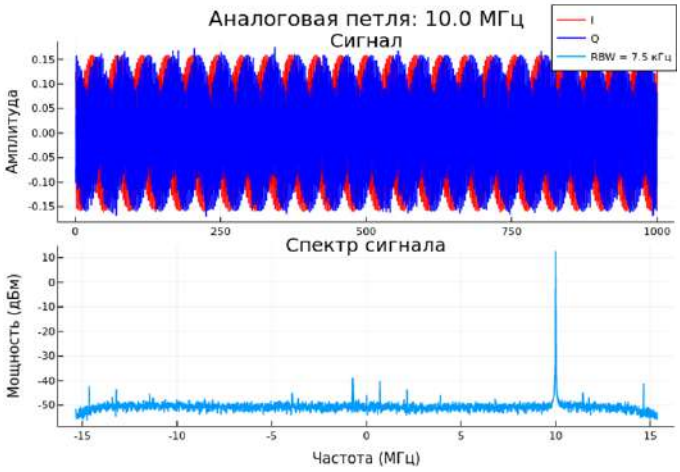


Рисунок 3 – Engee: осциллограмма и спектр принятого тестового сигнала

Python и C/C++: управление и потоковый обмен

Для работы через UHD используются стандартные объекты управления устройством и потоками данных. В Python объект uhd.usrp.MultiUSRP задаёт частоту, усиление, частоту дискретизации и активные каналы, а объекты TX/RX обеспечивают передачу массивов и приём отсчётов вместе с метаданными. Эти же принципы доступны через C++ API UHD и используются при создании приложений с собственным управлением памятью и потоками выполнения.

В демонстрационном проекте Python формирует комплексный тон, выполняет параллельную передачу и приём, а затем отображает временную реализацию и спектр. Вычисления выполняются средствами NumPy, графики строятся в Matplotlib. Частота радиосигнала в примере составляет 1,42 ГГц, смещение тона – 500 кГц; результат работы показан на рисунке 4. Исходный скрипт и пояснения к обмену данными приведены в демонстрационном проекте X410.

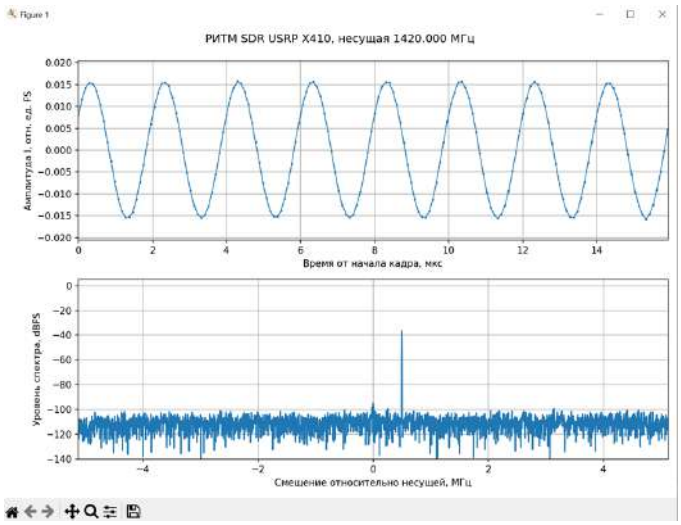


Рисунок 4 – Python/UHD: осциллограмма и спектр принятого тестового сигнала

MATLAB: программируемые измерения

В MATLAB управление через UHD выполняется системными объектами comm. SDRuTransmitter и comm.SDRuReceiver из пакета аппаратной поддержки USRP. Пользователь задаёт платформу X410, адрес устройства, канал, радиочастоту и коэффициенты интерполяции и децимации. Полученные комплексные массивы доступны для обработки средствами MATLAB, а возвратные признаки передачи и приёма используются для контроля непрерывности обмена.

В примере из документации передаётся тон со смещением 200 кГц при частоте дискретизации 4,096 Мвыб/с. Принятые данные поступают в Time Scope и Spectrum Analyzer; для оценки спектра используется метод Уэлча. На рисунке 5 показан результат спектрального анализа. Такой сценарий можно расширить автоматическим изменением частоты и уровня, расчётом метрик и сохранением результатов измерения.

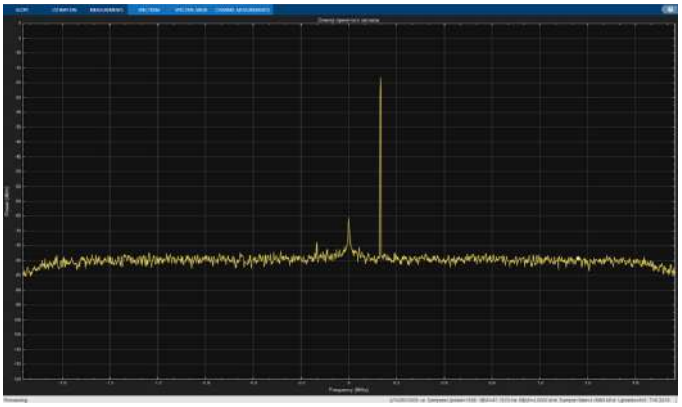


Рисунок 5 – MATLAB/UHD: спектральный анализ принятого сигнала

Simulink: модельно-ориентированная разработка

В Simulink радиоплатформа подключается к вычислительной схеме через блоки SDRu Transmitter и SDRu Receiver. На рисунке 6 показан пример, в котором Sine Wave формирует комплексный сигнал для передачи, а принятые отсчёты поступают в Time Scope и Spectrum Analyzer. Параметры радиотракта и кадрового обмена задаются в свойствах блоков.

Вместо тестового генератора и средств отображения пользователь может подключить собственные блоки модуляции, фильтрации, синхронизации и демодуляции. Это позволяет исследовать алгоритм с реальным радиоканалом в той же модели, которая используется для его разработки. Готовая модель и параметры её запуска доступны в документации.

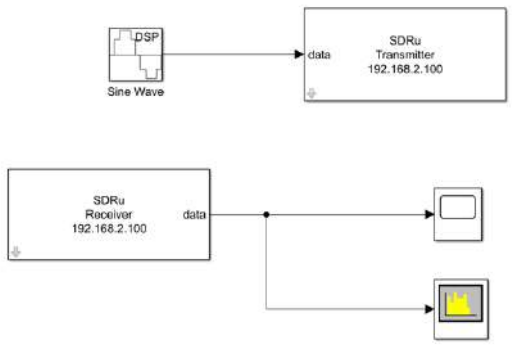


Рисунок 6 – Simulink: схема передачи и приёма с блоками SDRu

GNU Radio: потоковые схемы обработки

В GNU Radio Companion РИТМ SDR USRP включается в граф обработки через блоки UHD: USRP Source и UHD: USRP Sink. Передающий блок получает комплексный поток от генератора или алгоритма модуляции, а выход приёмного блока соединяется с фильтрами, демодулятором и средствами визуализации. Параметры радиотракта можно изменять из графического интерфейса во время выполнения приложения.

Пример на рисунке 7 объединяет генерацию сигнала, передачу через радиотракт и отображение спектра и спектрограммы. На его основе пользователь может последовательно добавлять собственные блоки и проверять их работу с поступающими от устройства данными. Файл проекта GRC поставляется вместе с описанием настроек.

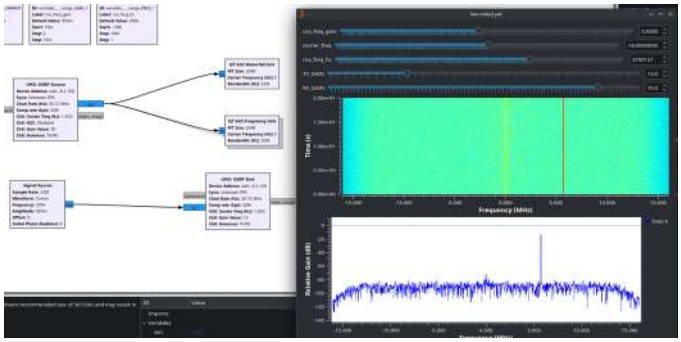


Рисунок 7 – GNU Radio: граф UHD и наблюдение принятого сигнала

LabVIEW: интеграция в измерительный стенд

В LabVIEW устройство используется через драйвер NI-USRP и стандартные виртуальные приборы передачи и приёма. В демонстрационном проекте niUSRP EX Tx Continuous Async формирует и передаёт тестовый сигнал, а niUSRP EX One Shot Rx выполняет захват данных. На передних панелях задаются адрес устройства, активный канал, несущая частота, частота дискретизации и параметры сигнала.

На рисунке 8 показаны панели передающего и приёмного примеров с осциллограммами и спектром. Использование стандартных средств NI-USRP позволяет включать РИТМ SDR USRP в существующие измерительные последовательности LabVIEW совместно с другими приборами. Описание в Wiki содержит настройки примера и пояснение к выбору длины циклически воспроизводимого массива.

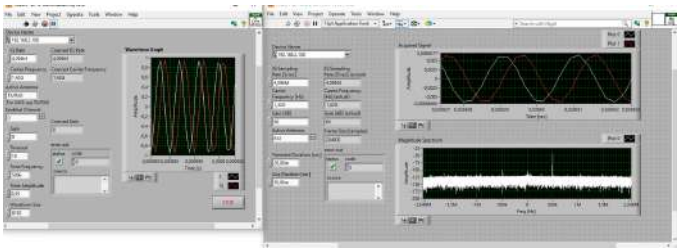


Рисунок 8 – LabVIEW/NI-USRP: передача тона и захват принятого сигнала

OpenAirInterface и srsRAN: LTE и 5G

Готовые сценарии OpenAirInterface и srsRAN используют РИТМ SDR USRP через UHD в качестве радиочастотной части базовой станции или пользовательского оборудования UE. Комплект примеров содержит конфигурации запуска и настройки обмена, которые используются для развёртывания лабораторной сети LTE или 5G. Open5GS может применяться как ядро сети в составе соответствующего стенда. Выбор исполнения 2TX/2RX или 4TX/4RX определяет доступное число физических каналов для экспериментов с MIMO.

Перенос приложения с X410

Программная совместимость с USRP X410 сохраняет UHD API, модель потокового обмена и работу с RFNoC. Приложение использует физические каналы РИТМ SDR USRP и получает параметры устройства через стандартные средства драйвера. Настройка частот и полос выполняется в пределах радиотракта платформы.

Примеры запуска охватывают обнаружение устройства, настройку каналов, приём и передачу, временной запуск и RFNoC Replay. Единый комплект ПО сокращает подготовку стенда и позволяет воспроизводить эксперименты в разных средах.

5. Прикладные сценарии

Широкополосные сигналы и лабораторные измерения

РИТМ SDR USRP применяется для формирования тестовых сигналов, захвата квадратурных отсчётов, спектрального анализа и исследования многонесущих режимов. Пользователь задаёт радиочастоту, полезную полосу, уровни и число активных каналов, после чего выбирает непрерывную передачу, работу с ограниченным массивом данных или воспроизведение подготовленной записи. Программное управление позволяет включить эти операции в автоматизированную последовательность испытаний.

На рисунке 9 показан лабораторный стенд с наблюдением спектра сигнала, содержащего несколько несущих. РИТМ SDR USRP формирует радиочастотный сигнал, а независимый анализатор используется для контроля его спектрального состава. Подобная конфигурация применяется при настройке генерации, проверке цифровой обработки и оценке работы передающего тракта.

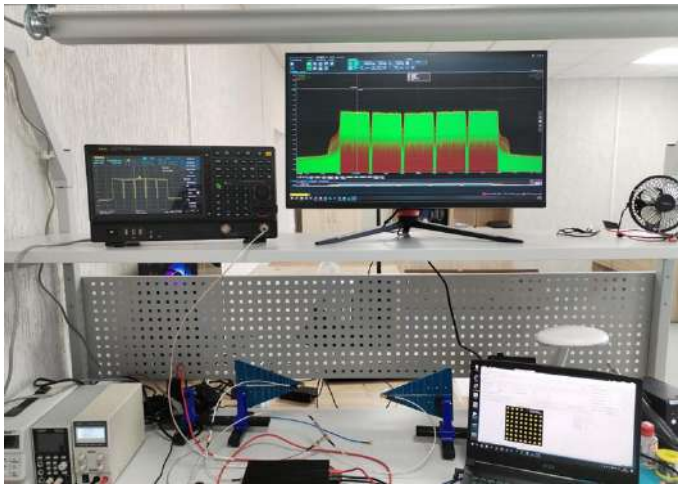


Рисунок 9 – Лабораторный стенд: наблюдение многонесущего сигнала

Анализ LTE-сигналов

Средства Signal Soft позволяют формировать и анализировать тестовые сигналы LTE E-UTRA, включая E-TM 1.1, 1.2, 2 и 3.1–3.3, а также пользовательские кадры. Пользователь выбирает параметры сигнала и измерения, после чего анализирует спектр, сигнальное созвездие, EVM/MER, пик-фактор PAPR и мощность в соседних каналах ACLR/ACPR. При наличии известной эталонной последовательности дополнительно определяется BER. Это позволяет использовать один набор инструментов при разработке алгоритма и при испытаниях

радиочастотного тракта.

Несколько несущих могут формироваться внутри одного потока I/Q, поэтому их количество определяется структурой сигнала и доступной полосой обработки. Число физических радиочастотных каналов задаётся выбранным исполнением 2TX/2RX или 4TX/4RX. Такое разделение позволяет исследовать агрегацию несущих и многоканальную передачу как самостоятельные параметры системы.

На рисунке 10 показаны средства настройки обработки и анализа созвездия в Signal Soft. Графики позволяют сопоставлять параметры сформированного сигнала с результатом прохождения через радиотракт, а численные показатели используются для сравнения настроек в одинаковых условиях измерения.

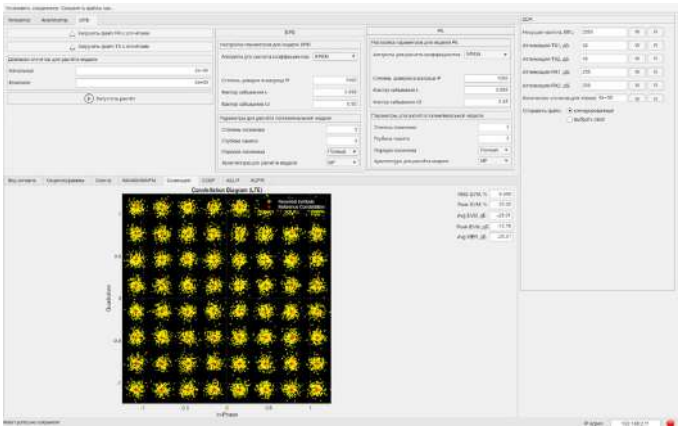


Рисунок 10 – Signal Soft: анализ созвездия и метрик LTE-сигнала

Анализ 5G NR-сигналов

Signal Soft предоставляет средства формирования, передачи, приёма и анализа 5G NR-сигналов нисходящей и восходящей линий связи в аппаратном стенде с РИТМ SDR USRP. Пользователь задаёт конфигурацию сигнала, формирует последовательность, сохраняет её в файл с комплексными отсчётами I/Q, передаёт через тракт TX, выполняет DMA-захват через выбранный канал RX и получает результаты демодуляции и измерений качества. Основной сценарий работы: «формирование → передача через SDR → приём через SDR → демодуляция → оценка метрик». На рисунке 11 показано окно генератора 5G NR Downlink со спектром сформированного сигнала.



Рисунок 11 – Signal Soft: генератор сигналов 5G NR downlink

Для 5G NR Downlink и Uplink в Signal Soft настраиваются параметры несущей, ширина канала, разнесение поднесущих, идентификатор соты, временная структура и выделение ресурсов. В зависимости от направления используются параметры PDSCH или PUSCH, BWP, размещение PRB, модуляция, MCS, скорость кодирования, HARQ/RV, LDPC, PT-RS, мощность и параметры DM-RS. Интерфейс позволяет задать тип DM-RS, позицию Type-A, дополнительные позиции, длину, порты, идентификатор последовательности и число пространственных слоёв.

После аппаратного приёма Signal Soft сохраняет RX-захват и подготавливает его к обработке в соответствии с параметрами сформированного 5G NR-сигнала. Обработка включает определение временного положения кадра, оценку и компенсацию частотного смещения, OFDM-демодуляцию, оценку канала по опорным символам и обработку транспортного канала. В стендовом режиме используются параметры и эталонная последовательность последнего сформированного сигнала, что позволяет корректно учитывать задержку тракта при сравнении переданной и принятой последовательностей.

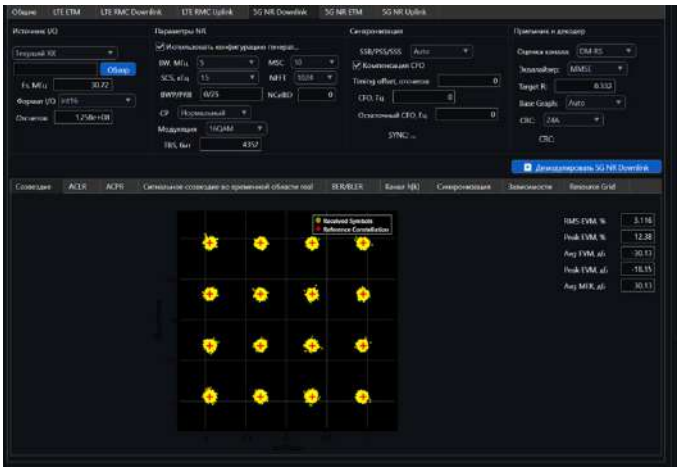


Рисунок 12 – Signal Soft: анализ созвездия и метрик 5G NR-сигнала

Для 5G NR Downlink и Uplink предусмотрен единый контур анализа: ресурсная сетка принятого и эталонного сигналов, графики синхронизации и оценки канала, спектр, созвездие и метрики RMS EVM, Peak EVM, BER, BLER, CRC, временное смещение и CFO. Для контроля спектральных характеристик используются измерения ACLR/ACPR, а также анализ PAPR и CCDF. Конкретный набор отображаемых результатов определяется выбранным направлением, конфигурацией сигнала и доступными данными аппаратного захвата. На рисунке 12 приведён пример отображения созвездия и метрик качества 5G NR-сигнала в Signal Soft.

Такой набор средств позволяет использовать Signal Soft для аппаратной проверки 5G NR-сценариев с РИТМ SDR USRP, сравнения настроек радиотракта и оценки влияния частоты дискретизации, уровней, фильтрации, цифровой обработки и синхронизации на качество принятого сигнала. Сохранение конфигурации генератора, параметров захвата и результатов измерения обеспечивает воспроизводимость эксперимента при повторной настройке стенда и сравнении различных режимов работы.

Исследование усилителей и цифровых предыскажений

РИТМ SDR USRP сочетает полосу синтеза TX до 450 МГц и тракт обратной связи ORX до 450 МГц для наблюдения спектрального расширения сигнала на выходе усилителя. При исследовании формируется тестовый сигнал и выполняется захват входной и выходной последовательностей. После согласования задержек и уровней рассчитываются характеристики усилителя и коэффициенты предыскажения, затем измерение повторяется с включённой коррекцией. S020 PC-CFRex-IP снижает пик-фактор; S110 DPDex-IP компенсирует нелинейность. AM-AM характеризует амплитудное усиление, AM-PM – фазовый сдвиг в зависимости от входного уровня.

Для сопоставления результатов до и после включения DPD сохраняются частота, форма тестового сигнала, рабочая мощность и настройки измерительных средств. Результат оценивается по характеристикам усилителя, качеству модуляции и внеполосным излучениям. На рисунке 13 приведены графики AM-AM и AM-PM в Signal Soft, используемые при настройке и анализе цифровой линеаризации.

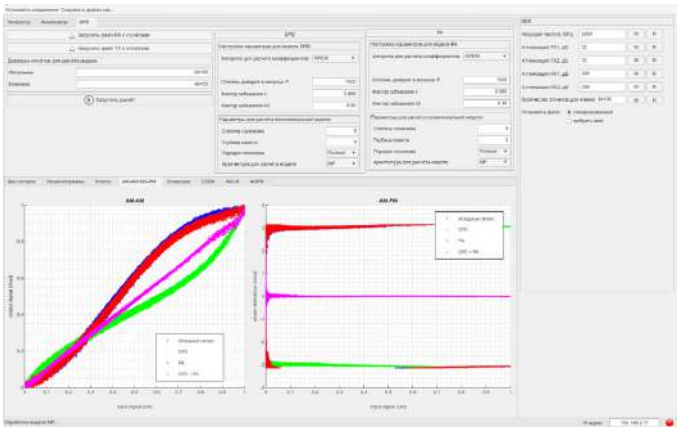


Рисунок 13 – Signal Soft: анализ характеристик AM-AM и AM-PM

6. Автономная обработка и беспроводной доступ

NVIDIA Jetson Orin NX и Sionna

В комплектации с NVIDIA Jetson Orin NX вычислительно интенсивные алгоритмы выполняются на встроенном GPU совместно с аппаратной предобработкой в ПЛИС. Такой вариант применяется для исследования алгоритмов физического уровня, обработки многоканальных данных и использования методов машинного обучения. Пакеты NVIDIA Sionna обеспечивают программные средства для разработки и исследования систем связи, а РИТМ SDR USRP предоставляет радиочастотный ввод и вывод сигналов.

При построении приложения ПЛИС выполняет операции над непрерывным потоком, Jetson обрабатывает подготовленные блоки данных, а Linux управляет конфигурацией и обменом между подсистемами. Это позволяет переносить выбранные вычисления с внешнего ПК на устройство и создавать автономные экспериментальные радиосистемы.

Потоковая запись и воспроизведение на SSD

Опция встроенного SSD обеспечивает потоковую запись и последующее воспроизведение квадратурных отсчётов. Вместе с данными сохраняются параметры, необходимые для их интерпретации: формат, частота дискретизации и конфигурация каналов. Пользователь может записать сеанс приёма, повторно обработать его выбранным алгоритмом либо использовать подготовленный массив для передачи. Такой режим удобен для длительных измерений и воспроизводимых экспериментов, когда постоянная передача всего потока на ПК не требуется.

Wi-Fi, Bluetooth и Android

Опция B130 включает USB-адаптер Wi-Fi/Bluetooth, собственный драйвер и настройку беспроводного подключения в ПО РИТМ SDR USRP. Wi-Fi используется для команд PS-TCP и обмена I/Q через внешнюю точку доступа либо прямое соединение. Частота дискретизации и число потоков выбираются с учётом пропускной способности беспроводного канала.

Bluetooth используется для подключения внешних устройств и передачи команд управления. Мобильное приложение Android предоставляет интерфейс настройки радиотракта, выбора режима и контроля состояния оборудования. Для передачи квадратурных отсчётов приложение использует Wi-Fi, а Bluetooth обеспечивает дополнительный канал взаимодействия с устройством и периферией.

Локальный графический интерфейс

Интерфейс MIPI DSI позволяет подключить локальный дисплей и организовать графическое управление в автономной конфигурации. Пользователь получает доступ к параметрам устройства и результатам контроля непосредственно на приборе. Локальный интерфейс и сетевые приложения используют общую конфигурацию, что обеспечивает согласованное отображение настроек при разных способах управления.

7. Обновление, диагностика и поддержка

Удалённое обновление

Программное обеспечение поставляется в виде согласованных версионированных комплектов, включающих FPGA-образ, встроенные службы, драйверы и клиентские компоненты. Хранилище релизов позволяет выбрать требуемую версию и установить её дистанционно по Ethernet либо Wi-Fi. Перед применением обновления проверяются целостность пакета и его соответствие аппаратному исполнению. Механизм восстановления обеспечивает возврат к работоспособной конфигурации при нарушении процедуры обновления.

Встроенная диагностика

Встроенные средства диагностики охватывают процессорную подсистему, ПЛИС и приложение Signal Soft. При запуске и в процессе эксплуатации контролируются состояние радиотракта, источники синхронизации, сетевые соединения и обмен I/Q-данными. Журналы событий и сведения о версиях помогают определить участок, на котором возникла неисправность, и воспроизвести условия её появления. Эти данные используются как при обслуживании стенда пользователем, так и при обращении в техническую поддержку.

Документация и сопровождение

Пользовательская документация охватывает подготовку оборудования, архитектуру аппаратной части, работу IP-ядер, интерфейсы PS-TCP и UHD и примеры для инженерных сред. Документация на опции S описывает алгоритмы, API, регистры и доступные настройки готовой прошивки. Демонстрационные клиентские проекты могут использоваться как основа собственного приложения. Линия поддержки ЦИТМ

«Экспонента» обеспечивает консультации по развёртыванию, интеграции алгоритмов и эксплуатации.

Базовое и расширенное исполнения РИТМ SDR USRP используют общий подход к разработке: знакомая программная среда, настраиваемый радиотракт, расширяемая обработка в ПЛИС и единые средства эксплуатации. Заказчик выбирает число физических каналов и аппаратные опции под требования своей системы, сохраняя возможность повторного использования прикладного программного обеспечения и алгоритмов.

8. Комплектации и опции для заказа

РИТМ SDR USRP 2.0 поставляется как сконфигурированная радиоплатформа. При заказе выбираются основное исполнение, аппаратные опции B и встроенные программные опции S. Число каналов и потоков, рабочие диапазоны, профиль FPGA и состав документации фиксируются в спецификации поставки.

Основные исполнения

Выберите одно из двух исполнений радиоплатформы.

Код заказа	Основное исполнение
RITM2-02	РИТМ SDR USRP RITM2-02: 2TX/2RX; AMD Zynq UltraScale+. Приём до 200 МГц на канал либо один RX 450 МГц с интерливингом.
RITM2-04	РИТМ SDR USRP RITM2-04: 4TX/4RX; AMD Zynq UltraScale+. Приём до 200 МГц на канал либо два RX по 450 МГц с интерливингом.

Аппаратные опции

Коды Bxxx обозначают аппаратные опции семейства РИТМ SDR USRP 2.0. В спецификации они записываются с префиксом RITM2-, например RITM2-B010. Состав радиочастотных модулей выбирается с учётом числа оснащаемых каналов и рабочего диапазона.

Код опции	Назначение
B010	GPSDO. Спутниковая привязка опорной частоты и времени; управление источниками синхронизации через UHD.
B020	Преселектор RX. Встроенная входная фильтрация для подавления сигналов вне выбранного диапазона приёма.
B030	Дополнительный усилительный модуль. Диапазон частот, усиление, выходная мощность и остальные параметры согласуются индивидуально при поставке.
B040	Расширение до 10 ГГц дополнительным частотным преобразованием. Состав каналов и архитектура модуля согласуются по требованиям заказчика.
B110	NVIDIA Jetson Orin NX 16 ГБ. GPU-модуль, охлаждение, подключение и базовая настройка ПО; интеграция алгоритмов NVIDIA Sionna.
B120	SSD 1 или 2 ТБ. Встроенная запись и воспроизведение I/Q; установка, настройка и проверка режима непрерывной записи.
B130	Wi-Fi и Bluetooth. USB-адаптер, собственный драйвер и настройка беспроводного подключения в ПО РИТМ SDR USRP.
B140	Локальный дисплей MIPI DSI. Графический интерфейс для автономной работы с устройством.

Встроенные программные опции

Программные опции расширяют аппаратную обработку средствами IP-ядер ЦИТМ «Экспонента». Поставка включает готовую прошивку, API, полную документацию на ядра и описание их использования в РИТМ SDR USRP. Штатные AGCex-IP, DDCex-IP и DUCex-IP входят в базовую конфигурацию.

Код	Встроенная функция
База	AGCex-IP, DDCex-IP, DUCex-IP – штатный цифровой тракт
S010	FFTex-IP – БПФ/ОБПФ, два потока
S020	PC-CFRex-IP – снижение пик-фактора, два TX
S030	OFDMex-IP – модуляция либо демодуляция, два TX либо два RX
S040	OFDMex-IP – приём и передача, два TX и два RX
S050	LTECSex-IP – поиск соты LTE и синхронизация, два RX
S060	LTEQex-IP – эквализация LTE, два RX
S070	LTE-SCHex-IP – выделение элементов PDSCH LTE, два RX
S080	VITERBIex-IP – декодирование, один поток

S090	DVB-S2/T2 FEC ENCODERex-IP – кодирование, один поток
S100	DVB-S2X LDPC DECODERex-IP – декодирование, один поток
S110	DPDex-IP – цифровые предыскажения; конфигурация согласуется отдельно

Программные пакеты

Код	Состав пакета
S210	OFDM: два TX и два RX; CFR на два TX. S040 + S020
S220	LTE: синхронизация, OFDM-демодуляция, эквализация и выделение PDSCH на два RX. S050 + S030 (RX) + S060 + S070

Состав пакета относится к указанному числу трактов. БПФ внутри OFDM входит в соответствующий OFDM-тракт. Расширение на четыре тракта и сочетание опций согласуются в спецификации.

Поставка и использование IP-ядер

Выбранные IP-ядра используются в составе приобретённого экземпляра РИТМ SDR USRP. Управление выполняется через API и предусмотренные регистры готовой прошивки. Срок и объём прав фиксируются в договоре; ежегодное продление для работы приобретённых функций не требуется. При гарантийной замене устройства опции переносятся на заменяющий экземпляр.

HDL-исходники, переносимый пакет IP и проект для самостоятельной сборки FPGA в комплект опций S не входят. Перенос ядер на другую аппаратную платформу и тиражирование в других изделиях требуют отдельного соглашения с правообладателем. Полная документация описывает алгоритмы, интерфейсы и доступные настройки.

Как сформировать обозначение заказа

Пример: RITM2-04 + B010 + B020 + S210.

Такая запись обозначает РИТМ SDR USRP RITM2-04 с четырьмя каналами передачи и приёма, GPSDO, преселекцией RX и пакетом OFDM/CFR. Число трактов обработки пакета указывается отдельно. RITM2-02 и RITM2-04 являются взаимоисключающими основными исполнениями.

Для радиочастотных опций указываются оснащаемые каналы и рабочий диапазон; параметры усилительного модуля согласуются индивидуально. Штатные усилительные каскады входят в базовую комплектацию, B030 обеспечивает дополнительное усиление. Для преселектора задаются диапазоны фильтрации, для SSD – ёмкость. Опция B040 расширяет рабочий диапазон за счёт дополнительного частотного преобразования.

Базовый программный комплект включает совместную работу PS-TCP и UHD, штатный DFE-тракт AGCex-IP/DDCex-IP/DUCex-IP, клиентские интерфейсы и примеры. Опции B и S отражаются в конфигурации устройства, документации и комплекте обновления. При выборе S010, S020 и S030 доступны исполнения на два или четыре тракта; для кодеров и декодеров задаются число независимых потоков и требуемая суммарная производительность.

9. Техническое сравнение с другими SDR

РИТМ SDR USRP – программно совместимая и функционально сопоставимая альтернатива USRP X410. При выборе исполнения сопоставляются число физических каналов, полоса радиотракта, транспорт I/Q и средства аппаратной обработки.

Сопоставление с USRP X410

Параметр	РИТМ SDR USRP	USRP X410
Каналы	2TX/2RX либо 4TX/4RX	4TX/4RX
Диапазон	75 МГц–6 ГГц	1 МГц–7,2 ГГц; настройка до 8 ГГц
RX	До 200 МГц на канал; 450 МГц*	До 400 МГц на канал
TX	Синтез до 450 МГц	До 400 МГц на канал
ORX	До 450 МГц	Отдельный ORX не указан
Транспорт данных	SFP+ 10 GbE	QSFP28, до 100 GbE
Интерфейсы	UHD, RFNoC, PS-TCP	UHD, RFNoC
GPSDO	Опция B010	Встроенный

** Режим RX 450 МГц использует аппаратный интерливинг пар каналов: один результирующий канал у РИТМ SDR USRP RITM2-02 и два – у РИТМ SDR USRP RITM2-04. У X410 полоса до 400 МГц доступна на*

каждом из четырёх каналов.
Для TX отдельно учитываются полоса синтеза и полезная полоса сигнала в выбранном профиле.
Для 100 GbE у X410 требуется соответствующая конфигурация и UHD 4.2 или новее. Полоса радиотракта не определяет автоматически скорость непрерывной передачи I/Q на ПК.

Сопоставление с Luowave

Модель	Ключевые параметры
РИТМ SDR USRP RITM2-02	2TX/2RX; RX до 200 МГц или 450 МГц с интерливингом; синтез TX до 450 МГц; Zynq UltraScale+ ZU15EG; 10 GbE
Luowave LW-B210	2TX/2RX; RX/TX до 56 МГц; Spartan-6 XC6SLX150; USB 3.0
Luowave LW-N321	2TX/2RX; RX/TX до 200 МГц; Zynq-7100; SFP+ 1/10 GbE и QSFP+
Luowave LW320	2TX/2RX; RX/TX до 200 МГц; Zynq UltraScale+ ZU11EG; GbE и PCIe

РИТМ SDR USRP сочетает широкополосный радиотракт, UHD/RFNoC, PS-TCP и готовые встроенные IP-ядра. Для разработки передатчиков доступны синтез TX и обратная связь ORX до 450 МГц, снижение пик-фактора и цифровые предыскажения. Signal Soft объединяет настройку, формирование и анализ LTE/5G NR и исследование усилителей.

В таблице Luowave перечислены заявленные полосы TX и RX; у РИТМ SDR USRP 450 МГц TX обозначает полосу синтеза. Различия режимов и состава ПО учитываются при выборе конфигурации.

Технические источники: Ettus USRP X410; Luowave LW-B210; Luowave LW-N321; Luowave LW320. Описания встроенных функций: документация IP-ядер ЦИТМ «Экспонента».

Источники и практические руководства

Документация РИТМ SDR USRP; архитектура аппаратной части; DFE и IP-ядра; профиль совместимости X410; демонстрационный проект X410; пример работы через PS-TCP.

Свяжитесь с нами, чтобы узнать больше технических подробностей!

+7 (495) 009 65 85
info@exponenta.ru
www.exponenta.ru