

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.3.4>

УДК: 621.376.4

ЦИФРОВЫЕ КАНАЛЫ ПРИЕМА/ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А.С. Косов, В.С. Рожков, Л.С. Рожков, Д.П. Скулачев

ИКИ РАН
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32.

Статья поступила в редакцию 17 января 2023 г.

Аннотация. В статье рассматриваются варианты построения каналов приема/передачи данных космических аппаратов (КА) с использованием цифровых технологий (software define radio, SDR). Предложены конкретные варианты построения различных блоков SDR. Реализованы и проверены каналы приема/передачи данных на базе коммерческих изделий. Выполнена экспериментальная проверка характеристик каналов связи.

Ключевые слова: цифровой канал, приемник, передатчик, микросхема ПЛИС, космическая связь, АЦП, ЦАП.

Финансирование: 1. Госбюджетная тема «Вектор» по соглашению № 075-03-2022-042 от 14.01.2022 между Минобрнауки России и ИКИ РАН; 2. Космический проект «Чибис-АИ», гос. контракт от 21 августа 2020 г. № 1922730301751217000241351/1737

Автор для переписки: Косов Александр Сергеевич, akosov@iki.rssi.ru

Введение

Канал приема/передачи данных является неотъемлемой частью любых космических аппаратов. Последние годы характеризуются интенсивным развитием цифровых технологий применительно к каналам передачи данных

космических аппаратов. Это относится как к аппаратной части, так и к программной. Лидерами в создании аппаратной части являются известные производители микросхем: Analog Devices, Lime Microsystems, Maxim Integrated и другие. В настоящее время освоен серийный выпуск микросхем приемопередатчиков в диапазоне СВЧ, таких как AD9361, AD9166, LMS7002M, MAX2837, MAX5864. Эти микросхемы позволяют принимать и передавать аналоговые сигналы в СВЧ диапазоне.

В составе микросхем имеются аналого-цифровой преобразователь (АЦП в канале приема) и цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП в канале передачи).

Для приема/передачи цифровых потоков чаще всего используются программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС, англ. programmable logic device, PLD) такие как: Lattice ECP5 (Lattice Semiconductors), Intel MAX 10, Intel Cyclone IV, Xilinx CoolRunner-II, Xilinx Spartan-6, Xilinx Zynq-7000, Xilinx Artix7-35T.

ПЛИС может также выполнять функцию управляющего компьютера для канала приема/передачи данных, а именно в ПЛИС возможна поддержка интерфейса связи с бортовым компьютером космического аппарата, запись целевой информации в долговременную память. Перед передачей целевая информации обрабатывается: разбивается на пакеты, выполняется помехоустойчивое кодирование (дифференциальное, сверточное, Рида-Соломона). Далее цифровой поток поступает на модулятор, который создает цифровую форму сигнала (waveform) и направляет цифровую форму на ЦАП в передающем канале. В приемном канале описанные действия выполняются в обратном порядке.

Для выполнения отмеченных действий необходим микрокомпьютер (МК), работающий под управлением операционной системы (преимущественно ядро Linux). В МК устанавливается специальное ПО для обработки радио сигналов. Существует несколько таких ПО: свободно распространяемое GNU Radio, коммерческое LabVIEW от National Instruments и ряд других.

В МК преимущественно используются процессоры с архитектурой ARM, такие как: Rockchip RK3588S, Broadcom BCM2711 или 1892BM15AФ производства Элвис (РФ).

1. Описание аппаратной части канала приема/передачи данных

Как было отмечено во введении приемопередатчик может быть выполнен на различных микросхемах. Для иллюстрации рассмотрим устройство LimeSDR-mini 2.0, выполненное на микросхеме LMS7002M фирмы Lime Microsystems. На рисунке 1 изображена структурная схема платы приемопередатчика, основными элементами которой являются микросхема LMS7002M, ПЛИС Lattice LFE5U-45F, микросхема интерфейса USB 3.0 FTDI FT60x [1].

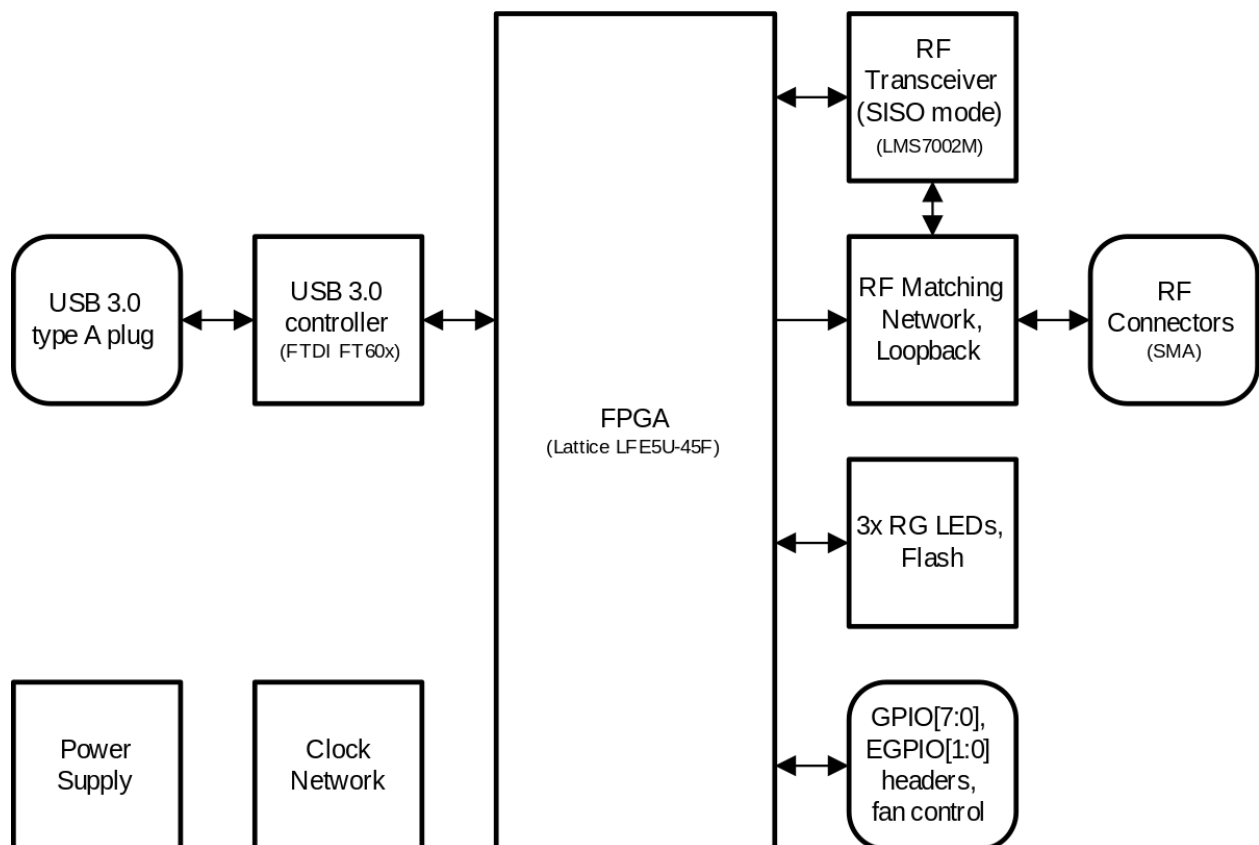


Рис. 1. Структурная схема платы приемопередатчика LimeSDR-mini 2.0

Плата имеет небольшие размеры 69x31,4 мм, два СВЧ соединителя типа SMA для входа приемника (RX) и выхода передатчика (TX). Управление и информационный обмен с внешними устройствами осуществляется через

интерфейс USB-3.0. Фотография платы приемопередатчика LimeSDR-mini 2.0 на интегральной схеме LMS7002M приведена на рисунке 2.

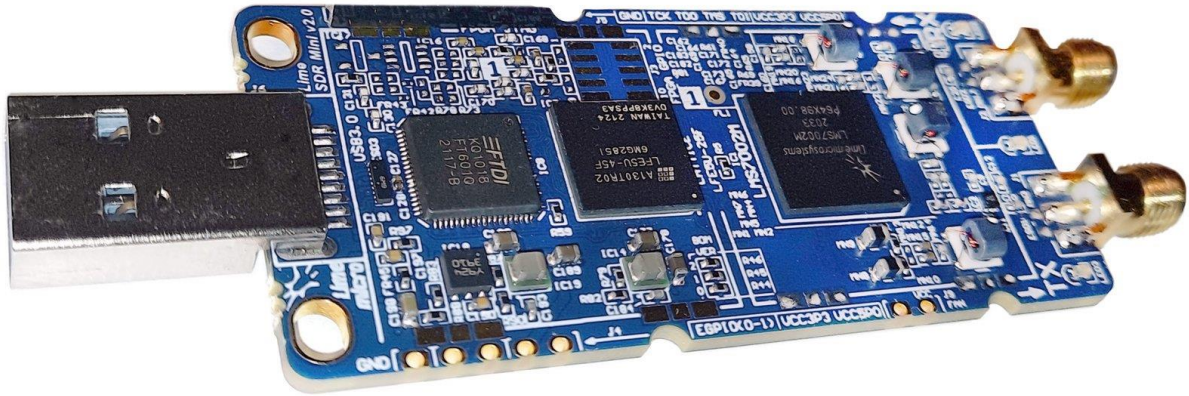


Рис. 2. Фотография платы приемопередатчика LimeSDR-mini 2.0

Имеется вариант исполнения приемопередатчика на IC LMS7002M с интерфейсом miniPCIe (XTRX) [2]. На рисунке 3 представлена фотография платы приемопередатчика с интерфейсом miniPCIe. Плата имеет небольшие размеры: 30 x 51 мм.

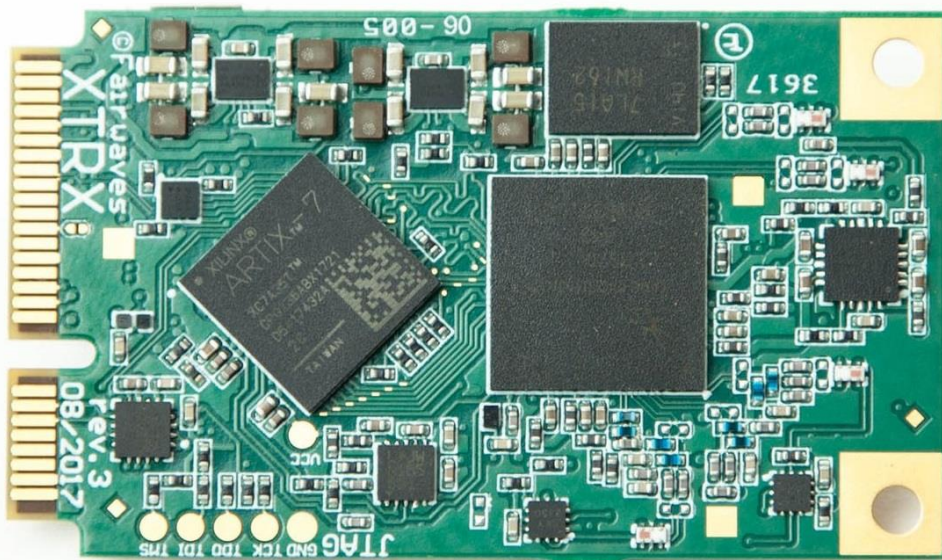


Рис. 3. Плата XTRX с интерфейсом miniPCIe [2]

Внутренняя структура платы XTRX изображена на рисунке 4. Шина данных FPGA и шина GPIO выводятся на соединитель mini PCIe и могут быть напрямую соединены с микрокомпьютером.

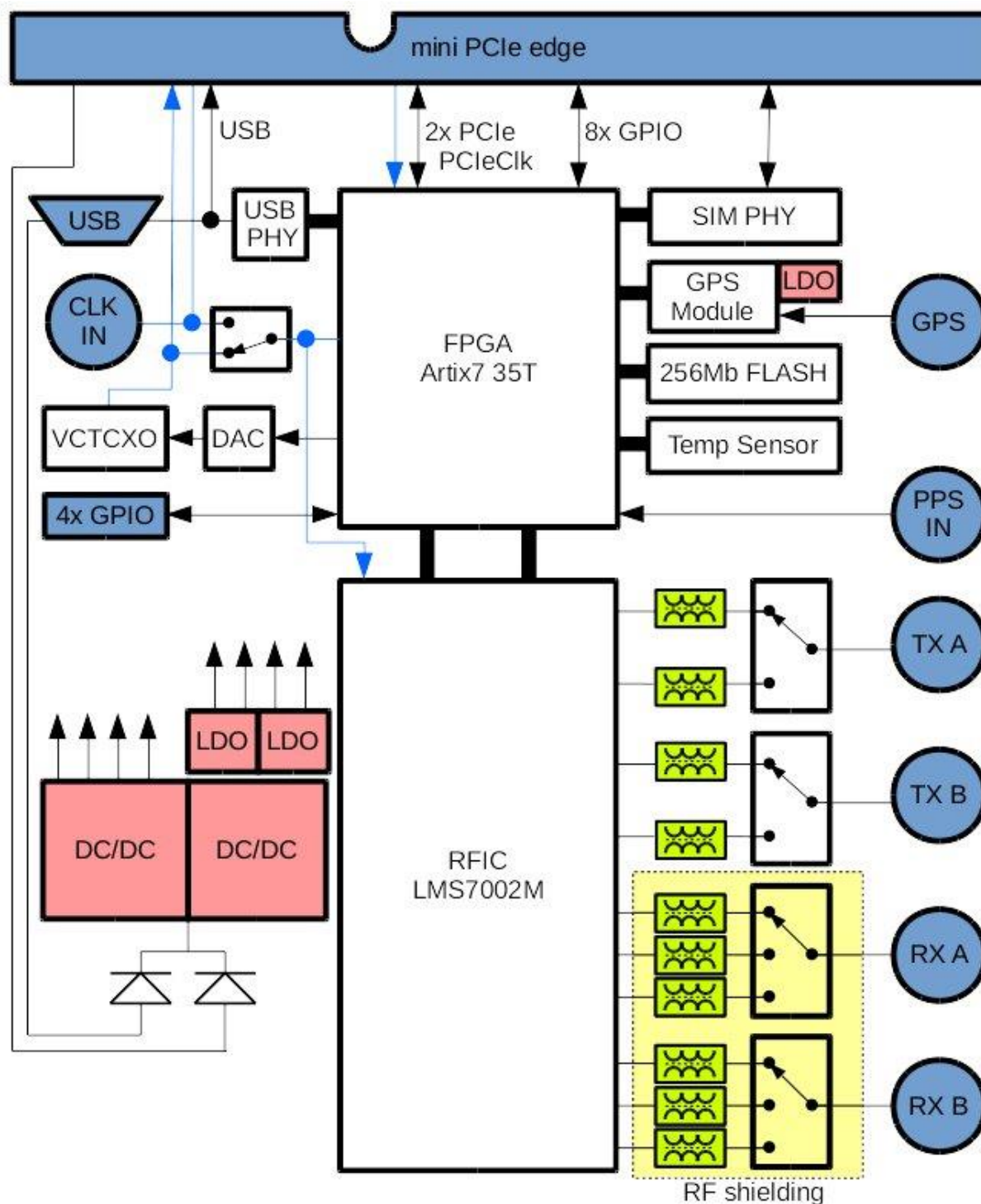


Рис. 4. Структурная схема платы XTRX [2]

Одним из возможных вариантов исполнения микрокомпьютера может быть плата Orange Pi 5, производства KHR, показанная на рисунке 5.

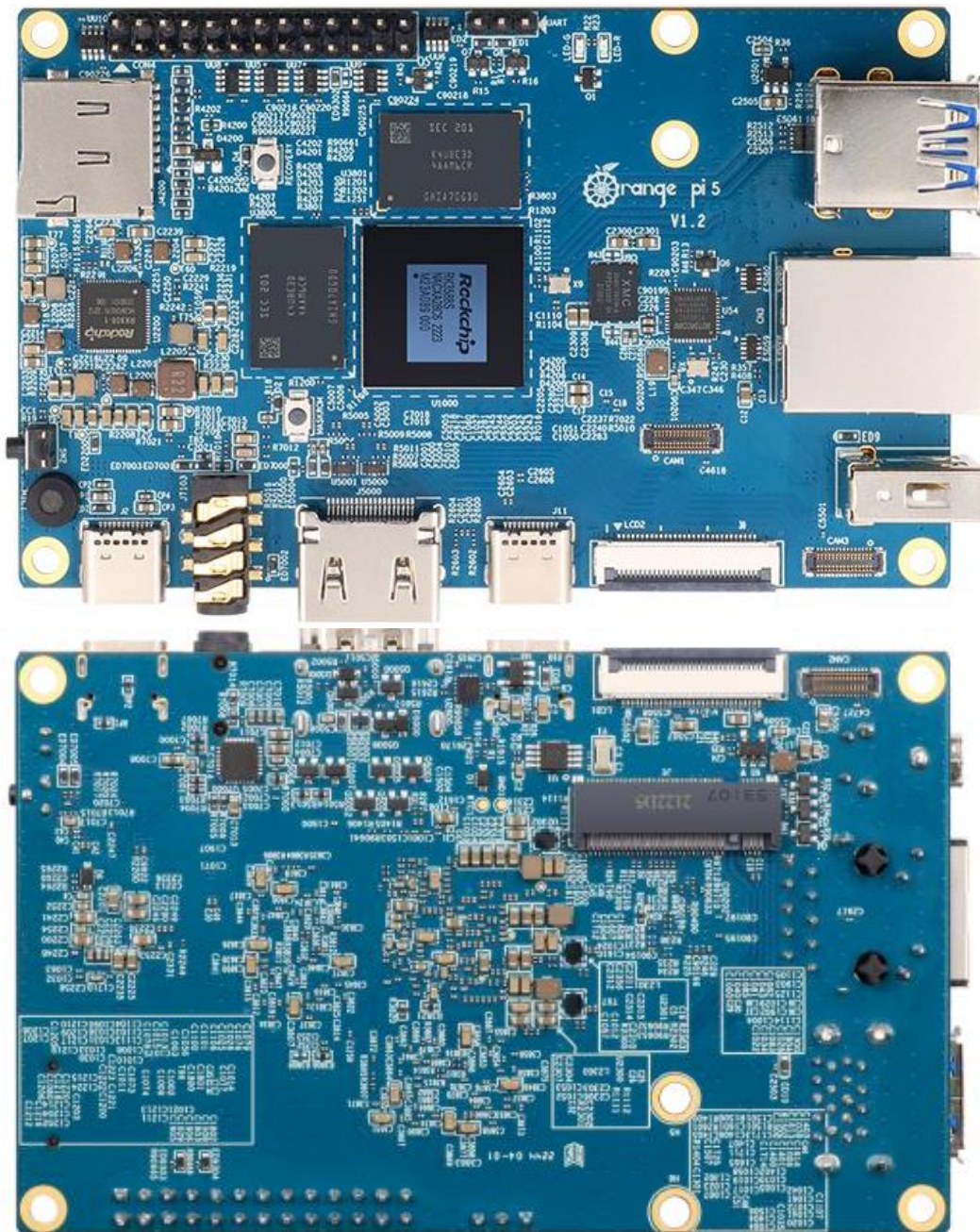


Рис. 5. Плата Orange Pi 5 управляющего компьютера канала приема/передачи данных

Плата Orange Pi 5 создана на базе процессора Rockchip RK3588S (8nm LP process). Размер оперативной памяти до 32 Гб. Операционная система Linux и целевая информация записываются на карту памяти (SD) или на твердотельный диск (SSD), который устанавливается на обратной стороне платы и подключается через соединитель PCIe2.0x1 M.2. Для использования платы в качестве накопителя информации канала приема/передачи данных будет достаточно иметь 256 GB объем памяти SSD Card. Плата имеет интерфейсы Ethernet, 2 USB2.0, 2

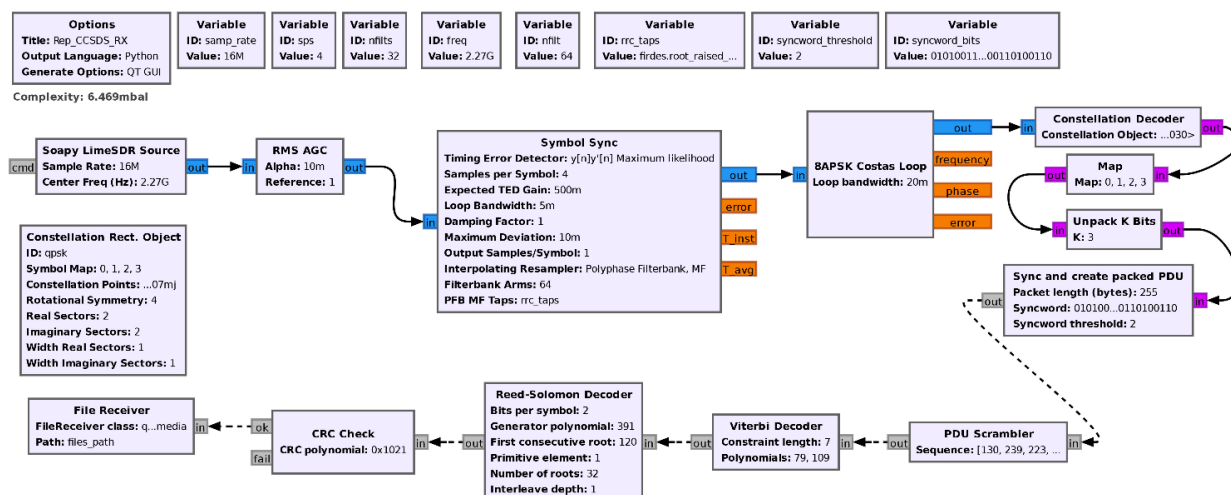
USB3.0. Соединитель PCIe2.0x1 M.2 может быть использован для подключения приемопередатчика LimeSDR XTRX.

Размеры платы Orange Pi5 равняются 100 x 62 мм.

2. Описание программной части канала приема/передачи данных

Как было отмечено выше для работы канала приема/передачи данных требуется программное обеспечение, задачей которого является подготовка и загрузка данных в приемопередатчик, управление приемопередатчиком, работа с бортовым компьютером КА. Такое ПО загружается в микрокомпьютер канала приема/передачи данных, который чаще всего работает под управлением операционной системы Linux. Существует несколько пакетов специального ПО, предназначенного для работы с рассмотренными выше приемопередатчиками. Рассмотрим ниже свободно распространяемый пакет GNU Radio [3], позволяющий решать задачи управления и работы канала приема/передачи данных. Пакет GNU Radio имеет графический интерфейс, в котором различные подпрограммы изображаются прямоугольниками, связанными между собой. В качестве примера на рисунке 6 представлена программа приемной части канала приема/передачи данных, созданного на IC LMS7002M. Блок «Soapy LimeSDR-Source» контролирует работу приемной части приемопередатчика LimeSDR-mini. На выходе блока получается комплексный цифровой поток на близкой к нулю частоте [4]. Блок «RMS AGC» выполняет функцию автоматического регулятора усиления. Блоки «Costas Loop» и «Symbol Sync» выполняют синхронизацию несущей частоты и символьной частоты. Далее с помощью блока «Constellation Decoder» сигнал демодулируется и преобразуется в поток символов. Затем из цифрового потока выделяются пакеты (Frames) определенной длины. В конце пакета находится синхромаркер, который используется для синхронизации пакетов в блоке «Sync and create packed PDU». После синхронизации пакетов поток данных декодируется с помощью Viterby и Reed-Solomon декодеров. После декодирования выполняется проверка контрольной суммы и запись целевой

информации в файл. Параметры программы устанавливаются в специальных блоках «Variable».



Рису. 6. Графическая диаграмма работы приемного цифрового канала

Передающий канал не требует синхронизации несущей, символов и пакетов. По этой причине графическая диаграмма программы передатчика является существенно проще [5,6]. На рисунке 7 представлена графическая диаграмма работы передающего цифрового канала.

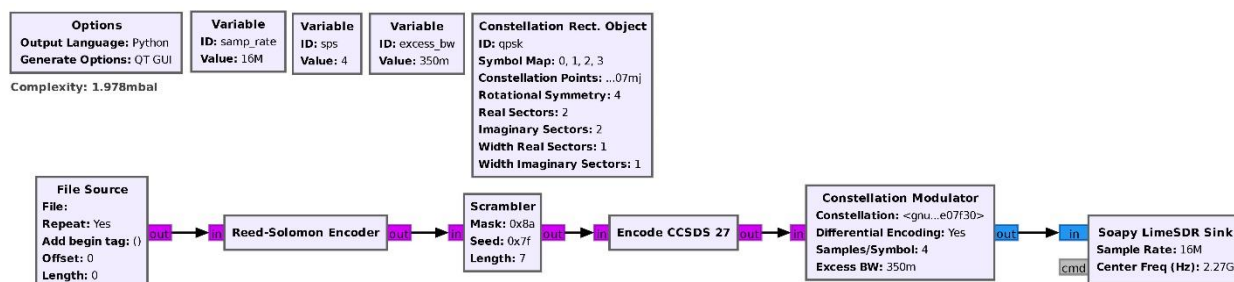


Рис. 7. Графическая диаграмма работы передающего цифрового канала

Целевая информация, записанная в файл, подготавливается для передачи блоком «File Source». Затем цифровой поток проходит через блоки помехоустойчивого кодирования: «Reed-Solomon Encoder», «Scrambler», «Encode CCSDS 27», и подается на «Constellation Modulator». Комплексный цифровой сигнал, сформированный на нулевой центральной частоте (Baseband), поступает на передающий канал приемопередатчика (блок «Soapy LimeSDR-Sink»), на выходе которого создается СВЧ сигнал, предназначенный для передачи.

3. Экспериментальные проверки канал приема/передачи данных

Для оценки работы цифрового канала приема приема/передачи данных космических аппаратов был использован спутниковый модем DMD-50 и цифровой канал, работающий в режиме транспондера. На рисунке 8 представлена графическая программа работы приемопередатчика LimeSDR-mini в режиме транспондера.

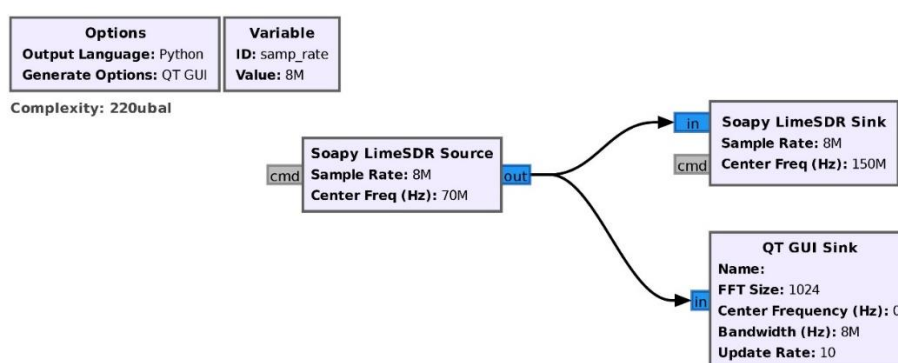


Рис. 8. Графическая диаграмма работы LimeSDR-mini в режиме транспондера

Для проведения проверки радиоканала микрокомпьютер Orange PI5 по интерфейсу USB был соединен с приемопередатчиком LimeSDR-mini как показано на рисунке 9 ниже. Микрокомпьютер работал под управлением операционной системы Linux Ubuntu 22. В Orange PI5 был установлен пакет программ GNURadio 3.10 и графические управляющие программы, рассмотренные ранее.

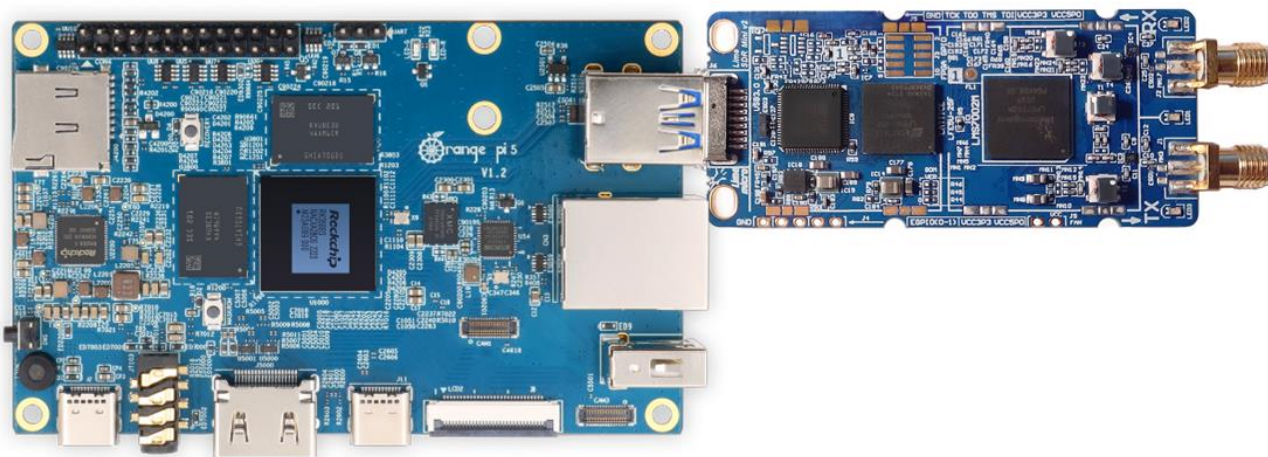


Рис. 9. Соединение Orange PI5 и LimeSDR-mini для проведения проверки радиоканала

В качестве источника тестового сигнала и приемника сигнала испытываемого радиоканала использовался спутниковый модем DMD50, показанный на рисунке 10 ниже.



Рис. 10. Передняя панель спутникового модема DMD50

Выход передатчика модема был соединен со входом RX приемопередатчика LimeSDR-mini. Вход приемника модема был соединен с выходом передатчика TX модуля LimeSDR-mini. Для испытаний на модеме были установлены параметры сигнала, соответствующие Strap Code 176: частота передачи – 70 МГц; частота приема – 150 МГц; символьная скорость – 4 Msps; скремблер V35; сверточное кодирование R=1/2; дифференциальное кодирование; информационная скорость 4 Mbps. В качестве информационного сигнала использовалась тестовая псевдослучайная последовательность чисел $2^{23}-1$.

В испытываемом радиоканале включался режим транспондера с центральной частотой сигналов при приеме – 70 МГц и центральной частотой сигналов при приеме – 150 МГц, рисунок 8. Графическая программа изображена на рисунке 8. Модем DMD50 имеет пользовательский интерфейс, позволяющий управлять параметрами передаваемых и принимаемых сигналов, контролировать ошибки, возникающие при приеме. На рисунке 11 представлено окно «Monitor» пользовательского интерфейса модема DMD50, которое показывает скорость ошибок (BER) при приеме сигнала от модуля LimeSDR-mini. При работе модуля в режиме транспондера окно «Monitor» показывает отсутствие ошибок при приеме.

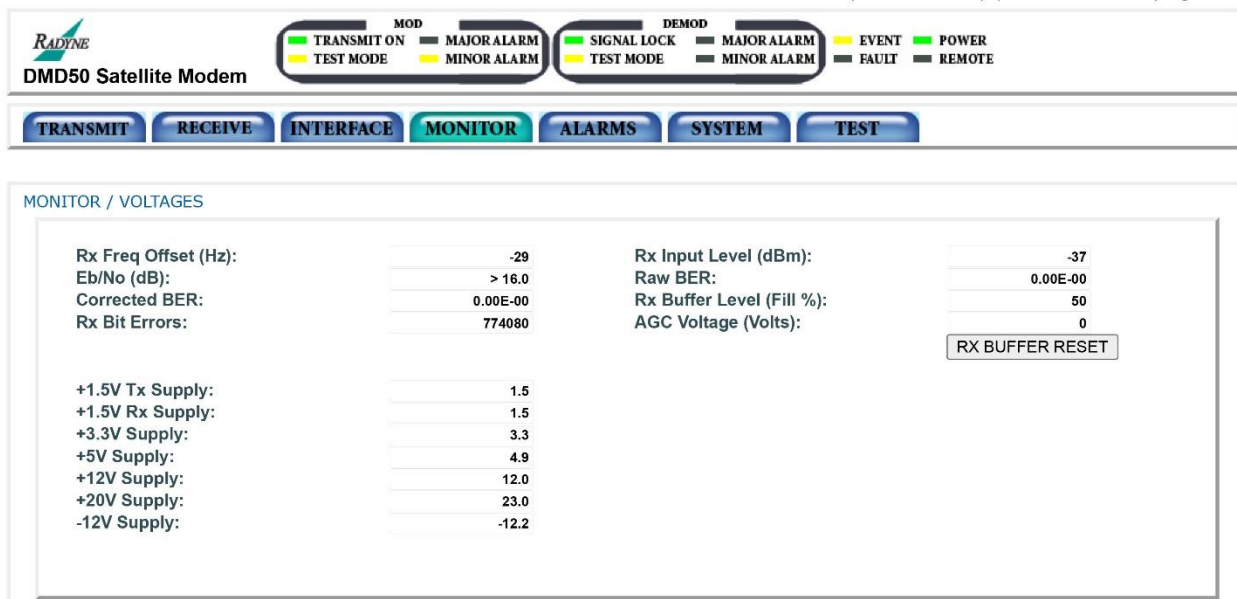


Рис. 11. Окно «Monitor» пользовательского интерфейса модема DMD50

Испытание показывает, что реализованный цифровой канал на узлах Orange PI5 и LimeSDR-mini не создает информационных ошибок в процессе приема/передачи тестового сигнала от модема DMD50.

Заключение

Проведенные исследования показали возможность и целесообразность использования при отработке концепции и создании макета цифрового радиоканала для приема/передачи информации КА коммерчески широкодоступных (off-the-shelf) электронных компонентов, а также свободно распространяемого некоммерческого программного обеспечения. При создании бортовой аппаратуры должны быть использованы высоконадежные электронные компоненты космического уровня качества. Такие компоненты (СВЧ трансиверы, ПЛИС, память) созданы и могут быть поставлены из CASC (China Aerospace Science and Technology Corporation). Конференция CASC была в ИКИ РАН в мае 2022 года.

Финансирование: 1. Госбюджетной тема «Вектор» по соглашению № 075-03-2022-042 от 14.01.2022 между Минобрнауки России и ИКИ РАН; 2. Космического проект «Чиби́с-АИ», гос. контракт от 21 августа 2020 г. № 1922730301751217000241351/1737.

Литература

1. LimeSDR Mini 2.0 [web]. *Crowd Supply*. Дата обращения: 18.01.2023. URL: <https://www.crowdsupply.com/lime-micro/limesdr-mini-2>
2. XTRX [web]. *Crowd Supply*. Дата обращения: 18.01.2023. URL: <https://www.crowdsupply.com/fairwaves/xtrx>
3. Estevez D., Lorenz M., Gulzow P. Deep space reception of Tianwen-1 by AMSAT-DL using GNU Radio [web]. *Proceedings of the 11th GNU Radio Conference*. Дата обращения: 20.01.2023. URL: <https://pubs.gnuradio.org/index.php/grcon/article/view/109>
4. Miller D. Demonstration of GNU Radio High Data Rate QPSK Modem at 15.0 Mbps Real-Time with Multi-Core General Purpose Processor [web]. *Proceedings of the 12th GNU Radio Conference*. Дата обращения: 20.01.2023. URL: <https://pubs.gnuradio.org/index.php/grcon/article/view/120>
5. Coines A.L., Jiménez V. CCSDS 131.2-B-1 Transmitter Design on FPGA with Adaptive Coding and Modulation Schemes for Satellite Communications. *Electronics*. 2021. №10(20). 2476. <https://doi.org/10.3390/electronics10202476>
6. Gupta R., Patel S.M., Patel D.R., Gandhi D. High Data Rate QPSK Modulator with CCSDS Punctured FEC channel Coding for Geo-Imaging Satellite [web]. *High Data Rate QPSK Modulator with CCSDS Punctured FEC channel Coding for Geo-Imaging Satellite*. Дата обращения: 20.01.2023. URL: <https://hobbydocbox.com/Radio/69854876-High-data-rate-qpsk-modulator-with-ccsds-punctured-fec-channel-coding-for-geo-imaging-satellite.html>

Для цитирования:

Косов А.С., Рожков В.С., Рожков Л.С., Скулачев Д.П. Цифровые каналы приема/передачи данных космических аппаратов. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2023. №3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.3.4>