

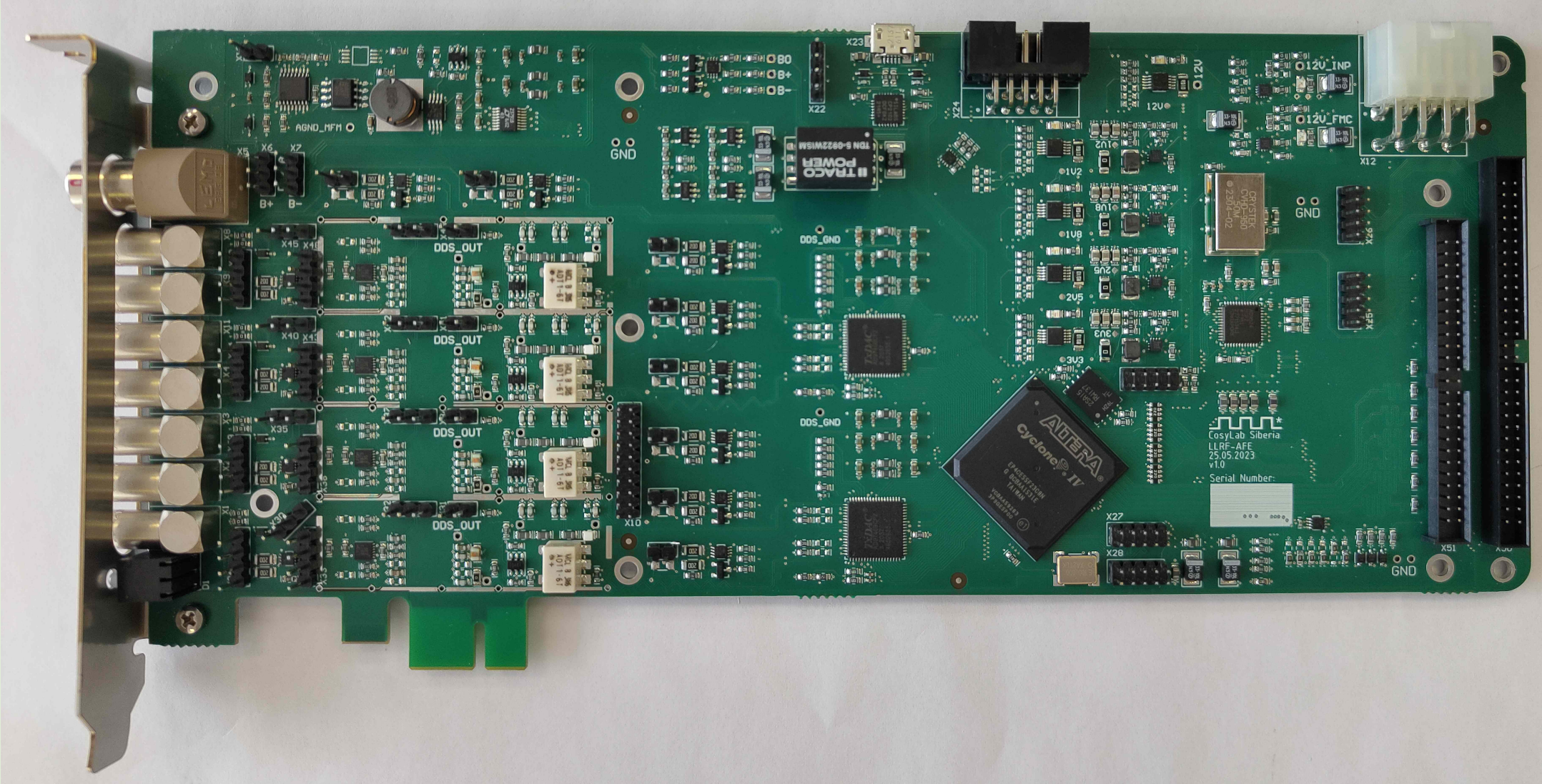
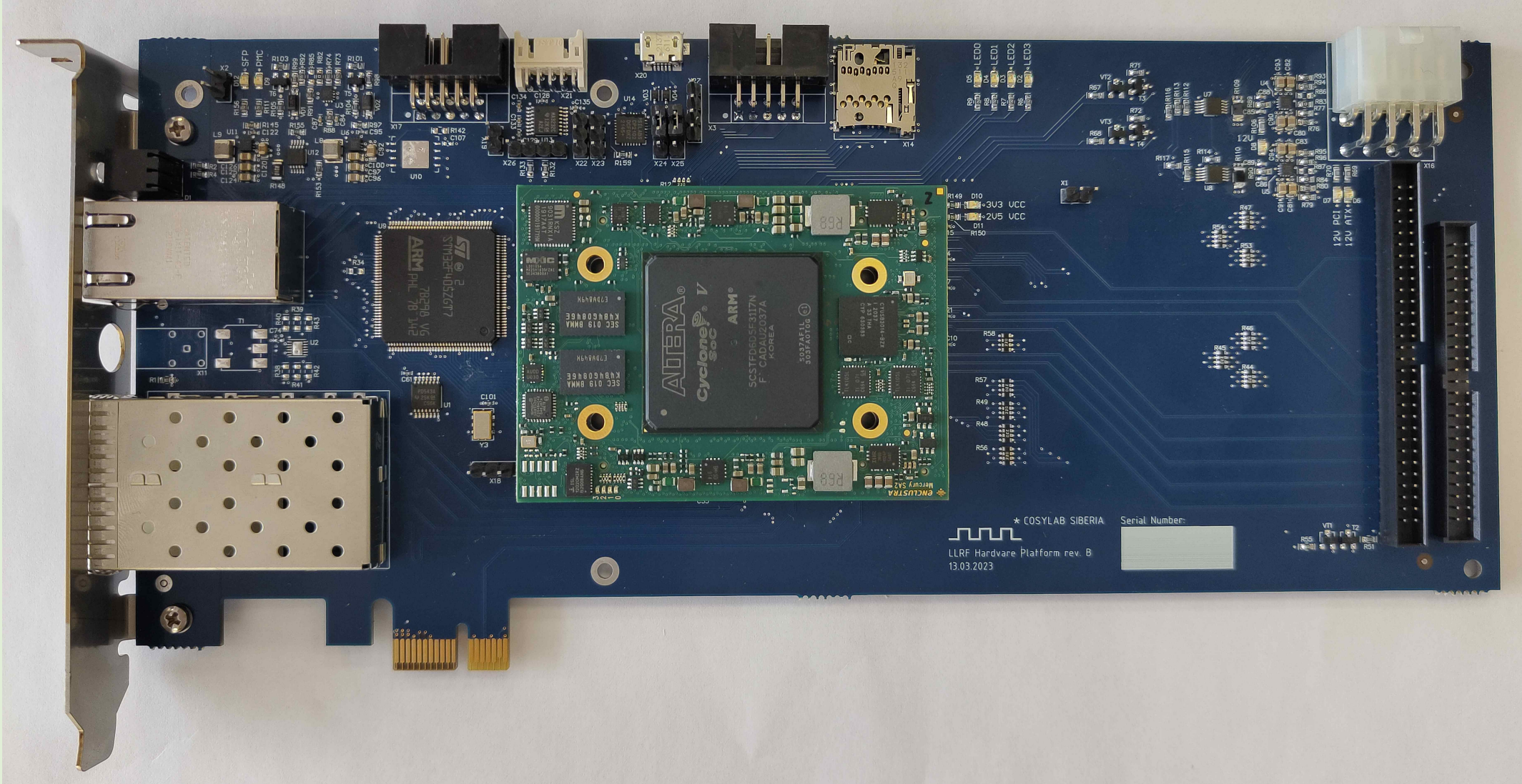


# Аппаратура задающего ВЧ-генератора для Комплекса НИКА

А.С. Стюф<sup>12</sup>, Г.А. Фатькин<sup>12</sup>, А.И. Сенченко<sup>1</sup>, В.Е Ситнов<sup>12</sup>, К. Р. Яминов<sup>1</sup>

1. ООО «Козилаб Сибирь», г. Новосибирск
2. Новосибирский Государственный Университет, г. Новосибирск

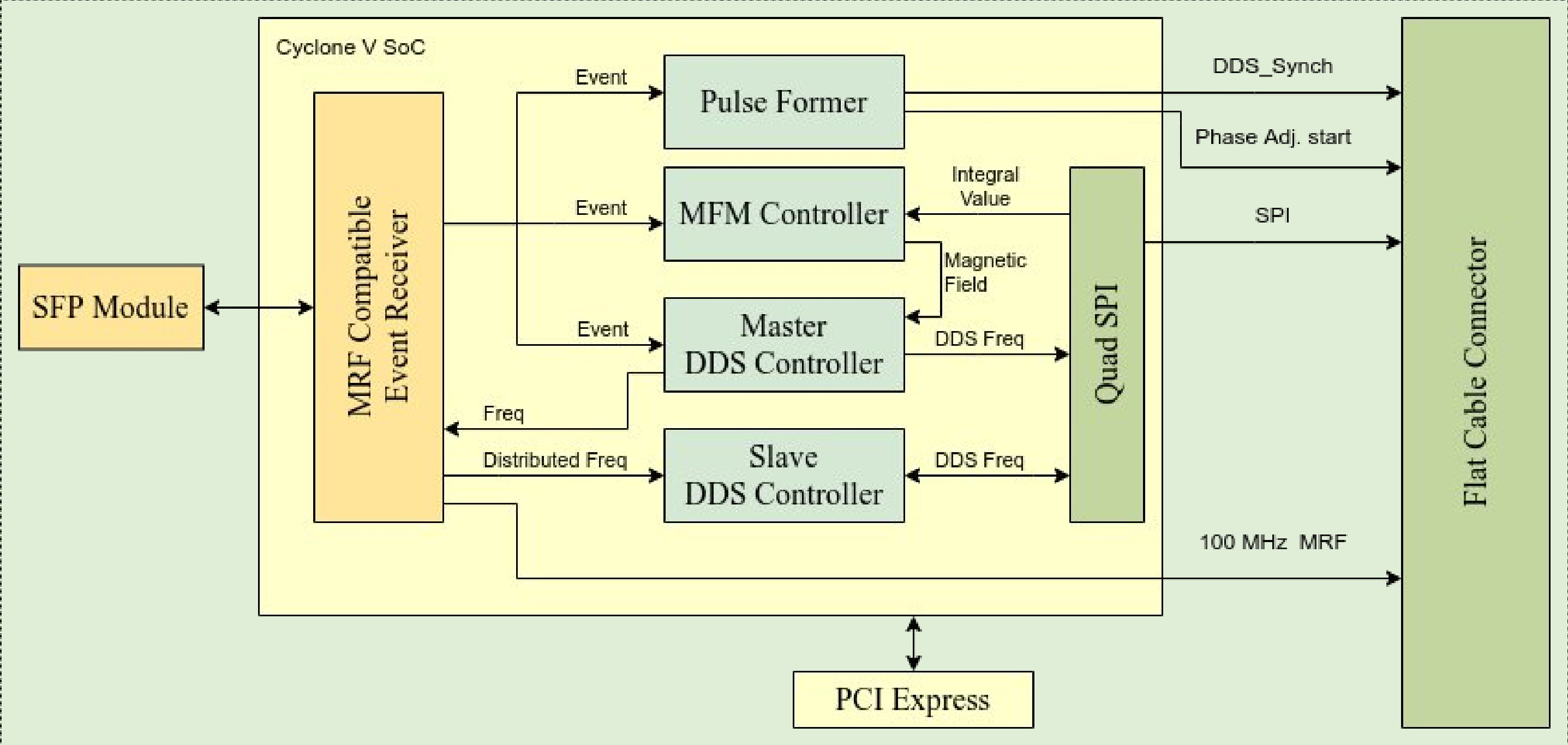
Аппаратура задающего ВЧ-генератора предназначена для построения синхронной системы генерации [1] опорного ВЧ сигнала для трех независимых ВЧ-систем комплекса НИКА: Бустера, Нуклотрона и Коллайдера, а также для ВЧ-синхронных систем диагностики. Основные требования к опорному ВЧ сигналов таблице 1. Требования к частотному диапазону продиктованы рабочими частотами ускорительного комплекса: минимальная частота 505 кГц при старте ускорения в бустере, максимальная - 38742 кГц на ВЧ-3 в коллайдере в момент окончания ускорения.



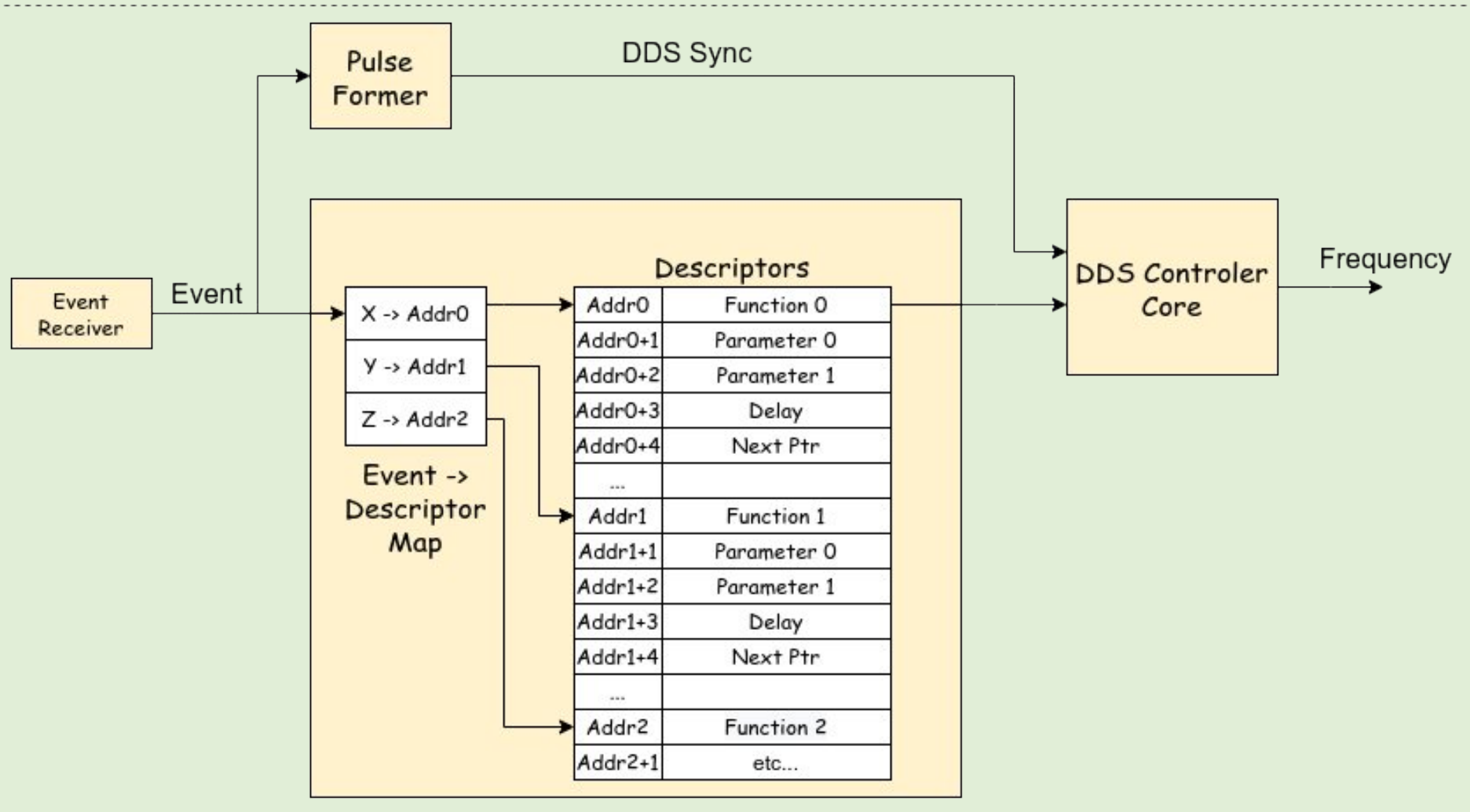
| Таблица 1 – Требования к задающему ВЧ-генератору |            |
|--------------------------------------------------|------------|
| Number of RF OUT channels                        | 4          |
| Frequency range                                  | 0.1-39 MHz |
| Spurious Free Dynamic Range                      | 60 dB      |
| Frequency resolution                             | 0.035 Hz   |
| Output voltage range @ 50Ω                       | ±1 V       |

LLRF-HP представляет собой аппаратную платформу для подключения аналоговой части. Основной вычислительный модуль платформы - SoM на базе ПЛИС Cyclone V (Intel), который предоставляет следующие возможности:

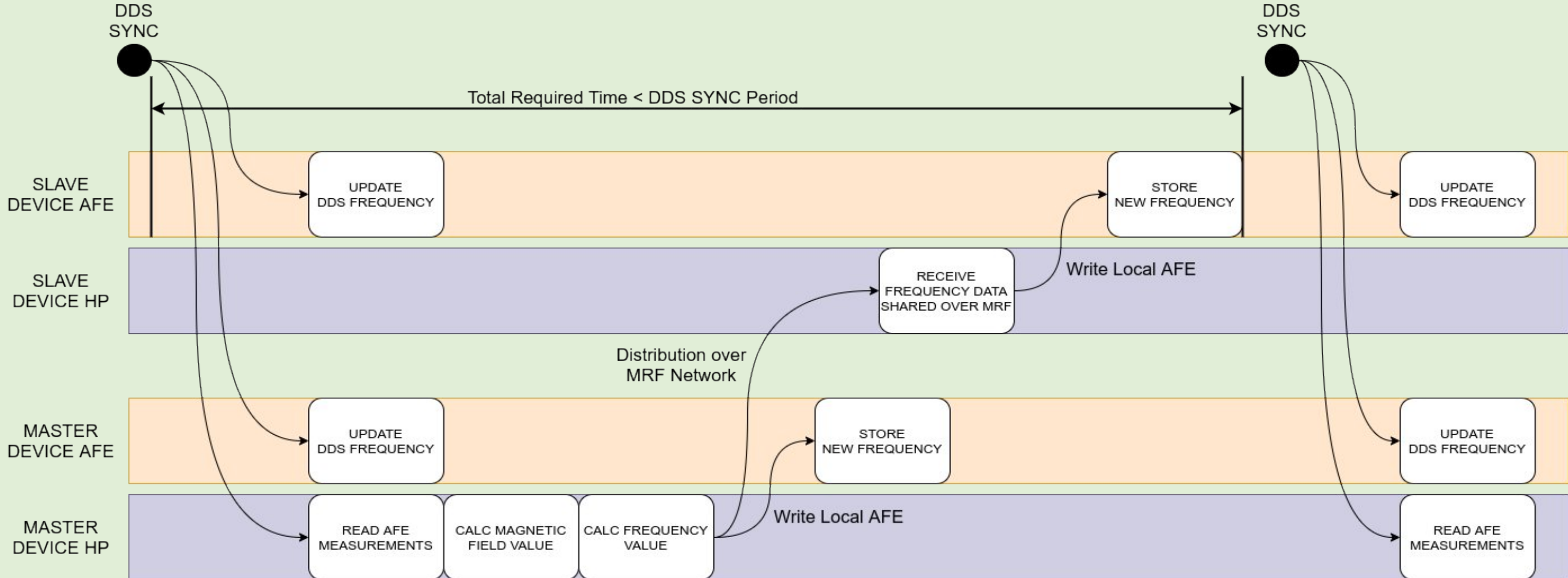
- Интерфейс PCI Express для управления устройством [2]
- Синхронизация по событиям распространяющимся по оптической сети, согласно протоколу MRF
- Компенсация задержки оптического тракта
- Приём и передача данных между устройствами через оптическую сеть
- Задание и выполнение сценариев работы ВЧ-генераторов
- Синхронная генерация опорного ВЧ-сигнала отдельностоящими устройствами



Сценарии работы DDS задаются при помощи дескрипторов. Дескрипторы хранятся в виде таблицы, расположенной в памяти контроллеров, управляющих частотой DDS. Поля дескрипторов описывают операцию, которая должна быть исполнена, и параметры данной операции. Запуск исполнения дескриптора осуществляется по событию, также по завершению исполнения текущего дескриптора может начать исполняться следующий в цепочке. Для запуска по событию имеется таблица, которая транслирует номера событий в адреса дескрипторов. Аналогичным образом реализовано и управление измерителем магнитного поля. Задание сценария работы при помощи дескрипторов используется в ведущих устройствах (генераторы к которым подключены датчики магнитного поля). Ведомые устройства получают значение частоты через оптическую сеть от ведущего.

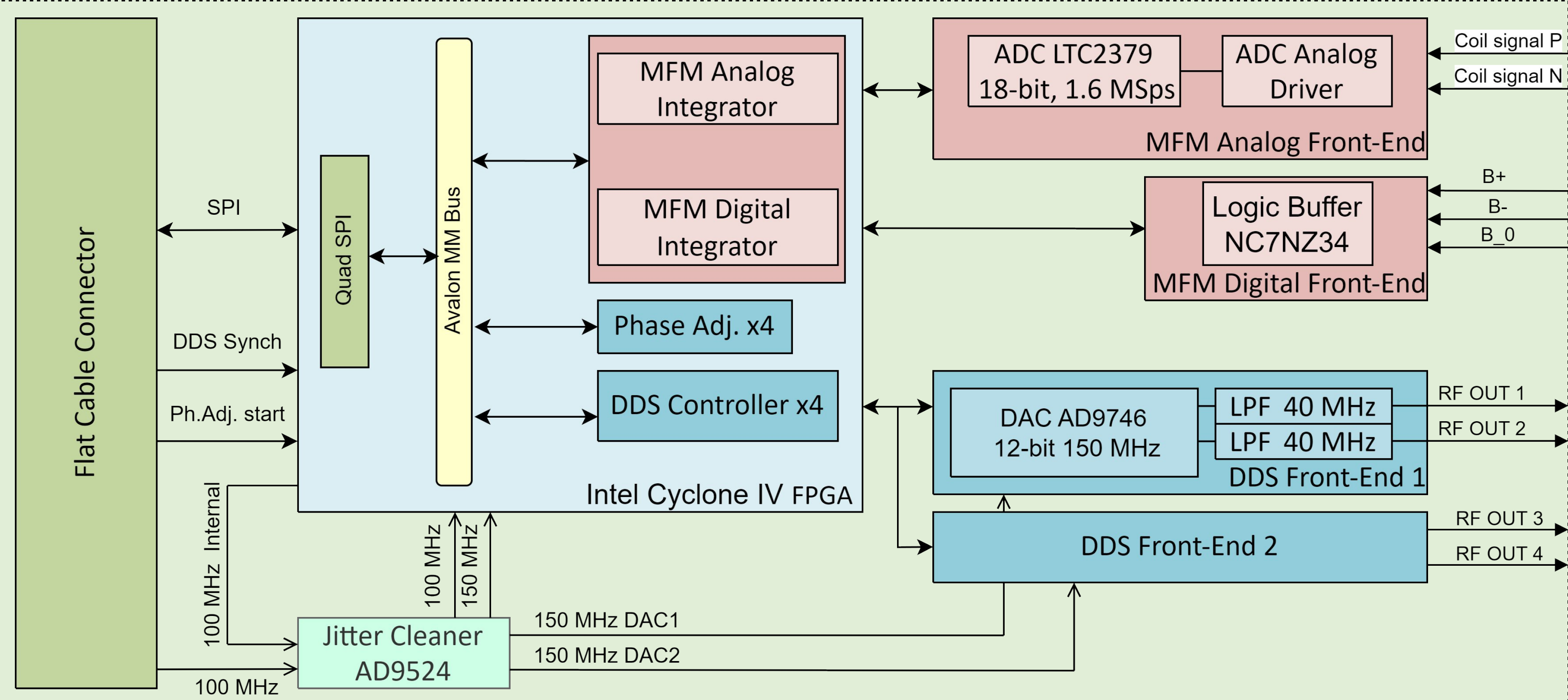


Для синхронной работы ВЧ-генераторов существует периодический импульс, по которому все DDS обновляют уставку частоты. Этот импульс формируется одинаковым образом во всех устройствах по выделенному событию, что обеспечивает синхронную работу генераторов.

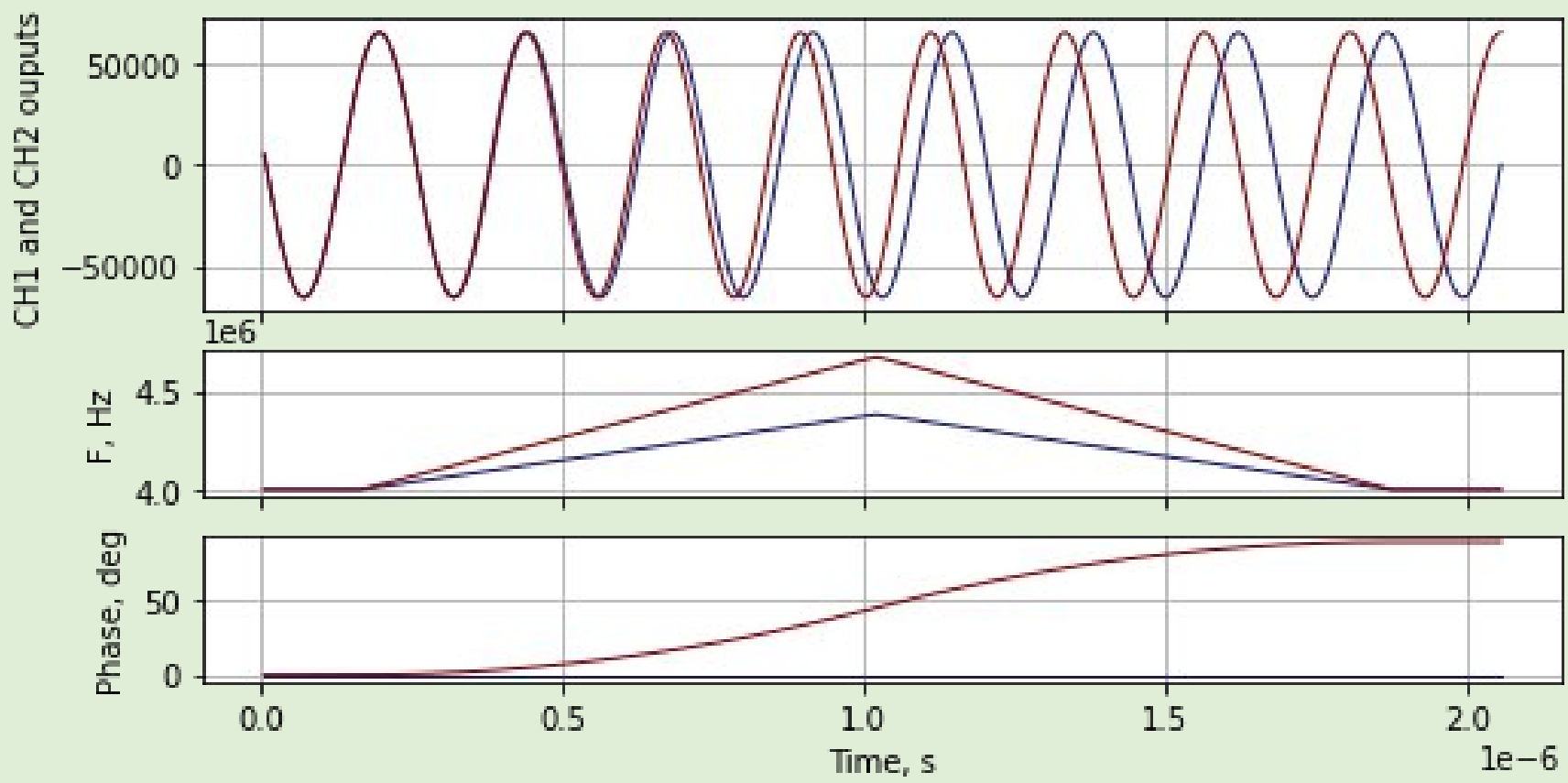


LLRF-AFE представляет собой расширение для LLRF-HP, обеспечивающее следующие функции:

- генерацию 4-х независимых каналов опорного ВЧ сигнала
- измерение сигнала производной магнитного поля
- поддержку цифровых конфигурируемых входов/выходов
- аппаратную реализацию алгоритмов:
  - алгоритм прямого цифрового синтеза (DDS)
  - приведение фаз каналов DDS к заданному значению
  - интегрирование сигнала магнитного поля для цифрового и аналогового каналов

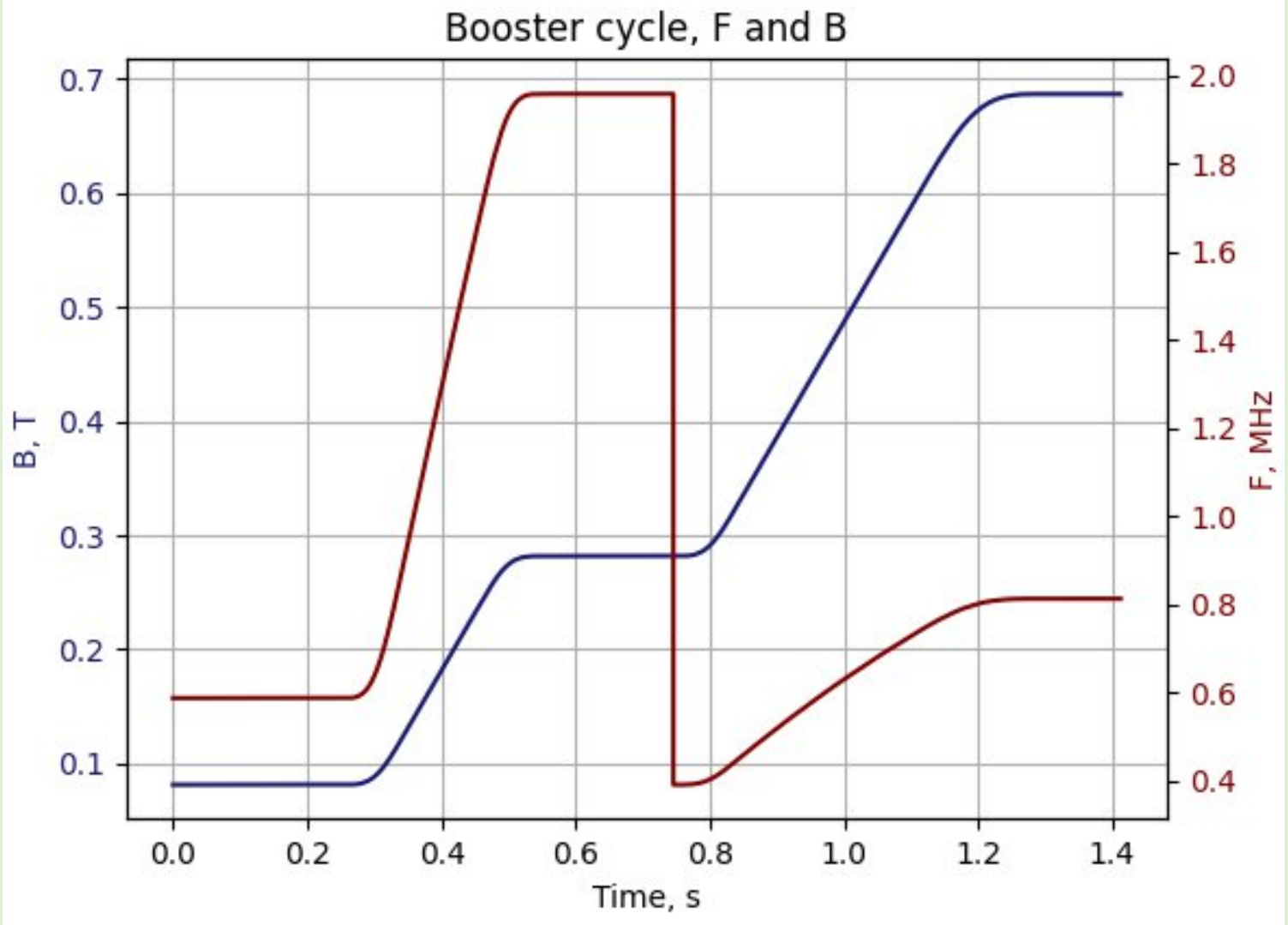


Для синхронного перепуска между частями ускорительного комплекса был разработан и испытан алгоритм приведения фазы каналов DDS с использованием малого изменения частоты, приводящего к плавному смещению фазы до заданного значения. На примере справа производится подстройка фазы в значение 90° для красного канала и 0° для синего канала за время 2 мкс.



Работа LLRF в режиме слежения за магнитным полем была протестирована во время работы Бустера комплекса НИКА. Сигнал магнитного поля получен с измерительной катушки. На основе данного сигнала генерировался опорный ВЧ сигнал:

- 0,5 МГц - 2 МГц на 5-й кратности (левая часть графика)
- 0,4 МГц - 0,8 МГц на 1-й кратности (правая часть графика)



Результаты:

- Прототипы LLRF прошли испытания на зимнем сеансе 2022-2023 года: на Бустере и Нуклотроне продемонстрирована возможность ускорения пучка с использованием аппаратуры LLRF.
- 6 устройств поставлено на комплекс НИКА:
  - 4 устройства установлены на инжекционный комплекс
  - 2 устройства - резерв

Ссылки:

1. Система синхронизации и задающего ВЧ Комплекса НИКА: проект и первые результаты. RuPAC 2023, Г.А.Фатькин
2. Инфраструктура и программное обеспечение системы синхронизации и задающего ВЧ для Комплекса НИКА, RuPAC 2023, А.И.Сенченко