

МАКЕТ БЫСТРОГО ИОНОЗОНДА ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НИРФИ НА БАЗЕ ДВУХ ОТЛАДОЧНЫХ ПЛАТ SDRLab 122-16

К.К. Грехнева, В.А. Павлова, А.В. Шиндин, С.П. Моисеев, А.В. Востоков

Научно-исследовательский радиопизический институт ННГУ им. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия
grekhneva@rf.unn.ru

RRI FAST VERTICAL SOUNDING IONOSONDE BASED ON TWO DEVELOPMENT BOARDS SDRLab 122-16

K.K. Grekhneva, V.A. Pavlova, A.V. Shindin, S.P. Moiseev, A.V. Vostokov

Radiophysical Research Institute, Nizhny Novgorod, Russia
grekhneva@rf.unn.ru

Аннотация. Разработан макет быстрого ионозонда вертикального зондирования на базе двух отладочных плат SDRLab 122-16. Одна из плат используется в качестве задающего генератора в передающей части ионозонда, а другая — в качестве программируемого КВ-приемника. Устройство обладает передовыми техническими характеристиками: время регистрации ионограмм 0.9 с, пространственное разрешение 800 м, возможность быстрого изменения параметров зондирования. По себестоимости комплектующих ионозонд имеет значительное преимущество по сравнению с существующими на рынке аналогами. Разработка направлена на решение задачи быстрой диагностики ионосферы, ее результат — выотно-частотная характеристика. Произведены испытания макета устройства, результаты сопоставлены с известными коммерческими аналогами.

Ключевые слова: вертикальное зондирование ионосферы, ионограмма, ионозонд, диагностика ионосферы.

Abstract. The prototype of the fast vertical sounding ionosonde based on 2 development boards SDRLab 122-16 has been developed. One of the boards is used as a master oscillator in the transmitting part of the ionosonde, and the other is used as a programmable HF receiver. The device has advanced technical characteristics: ionogram registration time in 0.9 s, the spatial resolution is 800 meters, the ability to quickly change the sounding parameters. In terms of the cost of components, the ionosonde has a significant advantage over analogs existing on the market. The development is aimed at solving the problem of diagnostics of the ionosphere, and the result of its work is the height-frequency characteristic of the ionosphere. The prototype of the device was tested, its results were compared with well-known commercial analogs.

Keywords: vertical sounding of the ionosphere, ionogram, ionosonde, diagnostics of the ionosphere.

ВВЕДЕНИЕ

Целью работы является разработка макета ионозонда вертикального зондирования, позволяющего регистрировать ионограммы за время порядка 1 с с минимальной себестоимостью компонентов при сохранении технических характеристик на уровне мировых.

Характерные времена физических процессов при таком воздействии составляют величину порядка 1 с. В связи с этим задача создания прибора, способного регистрировать подобные процессы, выходит на передний план. Существующие и доступные к покупке ионозонды вертикального зондирования не способны регистрировать ионограммы с требуемой скоростью, при этом они имеют запредельную стоимость и ограниченную функциональность.

В разработанном макете ионозонда вертикального зондирования нами были использованы электронные компоненты, доступные в свободной продаже, что обеспечило их низкую себестоимость. В классическую схему излучения ионозонда были внесены изменения, которые обеспечили время регистрации ионограммы 0.9 с [Shindin, 2022].

МЕТОДИКА

Блок-схема устройства передающей части ионозонда показана на рис. 1.

Имеющийся в НИРФИ ННГУ ионозонд CAD1 обладает номинальной выходной мощностью зондирующих импульсов 600 Вт. Чтобы обеспечить

сравнимую мощность в разрабатываемом устройстве, мы использовали линейный усилитель А600, работающий в диапазоне частот 1.8–72 МГц и усиливающий сигнал с 5 до 600 Вт. Для формирования сигнала мощностью 5 Вт используется связка из широкополосного предусилителя и программно-управляемого аттенюатора. Плата SDRLab используется в качестве задающего генератора ионозонда: она формирует амплитудно-манипулированную импульсную последовательность в диапазоне частот от 1 до 10 МГц [<https://redpitaya.readthedocs.io/en/latest/developerGuide/hardware/122-16/top.html>]. Манипуляция импульса представлена кодом Баркера длиной 13 бит с узкой четко выраженной автокорреляционной функцией и минимальным уровнем вторичных максимумов. Период следования импульсной посылки 5 мс. Шаг изменения частоты между последовательными импульсами 50 кГц. Для генерации сигнала использовался задающий генератор на однокристалльной системе Red Pitaya SDRLab 122-16, являющийся измерительным модулем на основе системы на кристалле Xilinx Zynq 7020 SoC FPGA. В составе платы имеются двухъядерный процессор общего назначения ARM Cortex A9, ПЛИС и 512 МБ ОЗУ, а также двухканальный 16-битный аналого-цифровой преобразователь и двухканальный 14-битный цифро-аналоговый преобразователь. Для синхронизации процесса перестройки частоты передачи с приемной частью используется синхронизированный с GPS двухканальный опорный генератор Leo Bodnar Precision GPS Reference Clock (диапазон частот 450 Гц – 800 МГц), из которого были

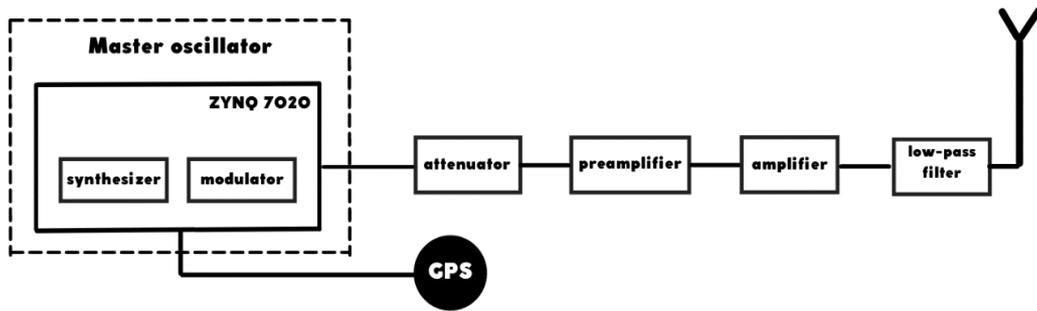


Рис. 1. Блок-схема устройства передающей части макета быстрого ионозонда вертикального зондирования

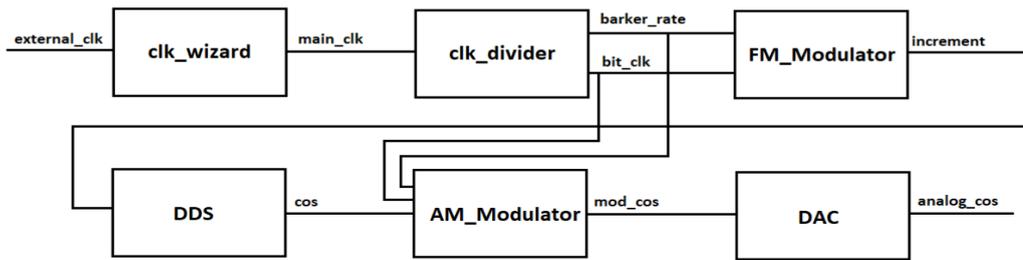


Рис. 2. Функциональная блок-схема прошивки задающего генератора

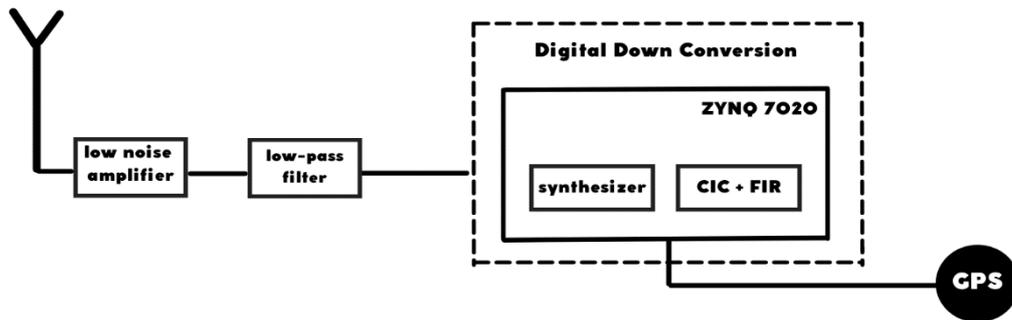


Рис. 3. Блок-схема устройства приемной части макета быстрого ионозонда вертикального зондирования

выведены на плату SDRLab PPS-импульсы (импульсы 100 мс с периодом 1 с, синхронизованные с UT) [http://www.leobodnar.com/shop/index.php?main_page=product_info&cPath=107&products_id=234&zenid=974fd2f393793a8e7aba077f2c2b2559]. Также в состав макета входят НЧ-фильтр с полосой пропускания 30 МГц и КВ-антенна CT-HF-FD.

Для контроля работоспособности макета передающей части ионозонда в лабораторных условиях использовалась согласованная нагрузка с максимально допустимой мощностью 200 Вт.

Функциональная блок-схема программной части задающего генератора на плате Red Pitaya SDRLab 122-16 показана на рис. 2.

Прошивка задающего генератора была реализована с помощью среды проектирования Vivado Xilinx на языке описания аппаратуры Verilog с использованием встроенных IP-ядер Xilinx.

Проект состоит из отдельных модулей, имеющих функциональную связь друг с другом: блок `clk_wizard` преобразует тактовую частоту, блок `clk_divider` — делитель тактовой частоты, блок `FM_Modulator` изменяет инкремент фазы гармонического сигнала раз

в 5 мс с шагом по частоте 50 кГц, блок `DDS` — цифровой вычислительный синтезатор, блок `AM_Modulator` выполняет амплитудную модуляцию сигнала по приходу PPS-сигнала, блок `DAC` — выполняет функции цифро-аналогового преобразователя.

Блок-схема устройства приемной части ионозонда представлена на рис. 3.

В структуру приемной части макета входит КВ-антенна CT-HF-FD, маломощный усилитель с коэффициентом усиления 20 дБ, НЧ-фильтр с полосой пропускания 10 МГц, отладочная плата SDRLab, реализующая автоматически перестраиваемый приемник на основе цифрового понижающего преобразователя, синхронизированный с GPS двухканальный опорный генератор Leo Vodnar Precision GPS Reference Clock для синхронизации процесса перестройки частоты приема с передающей частью.

В макете используется открытый проект конфигурации ПЛИС платы SDRLab, реализующий универсальный двухканальный приемник на основе цифрового понижающего преобразователя [<http://pavel-demin.github.io/red-pitaya-notes/sdr-transceiver-122-88>]. Указанная конфигурация была модифицирована с це-

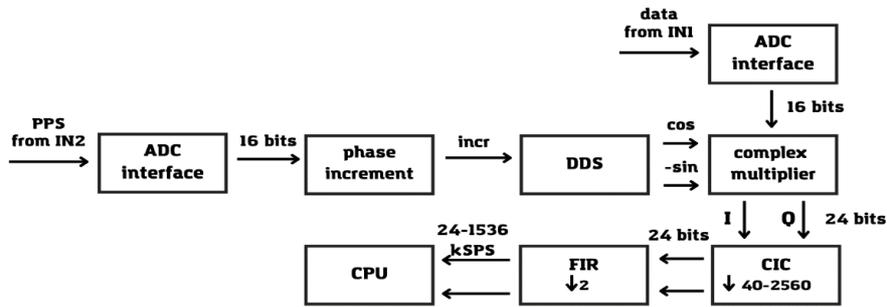


Рис. 4. Функциональная блок-схема цифрового понижающего преобразователя

лю реализацию автоматической перестройки центральной частоты приема.

Функциональная блок-схема цифрового понижающего преобразователя показана на рис. 4.

В плате, реализующей цифровой понижающий преобразователь, имеются два аналоговых входа, на один из которых поступает сигнал из антенны, а на другой — PPS-сигнал с опорного генератора. Оба сигнала оцифровываются АЦП с частотой дискретизации 122.88 Мвыб/с. Оцифрованные отсчеты PPS-сигнала поступают в блок фазового инкремента, где по верхнему фронту этого сигнала перестраивается частота с шагом 50 кГц. Выходной инкремент поступает в блок DDS-генератора (цифрового вычислительного синтезатора), который выполняет роль гетеродина. Настраивать скорость передачи данных можно путем изменения коэффициентов децимации цифрового CIC-фильтра. Нами была использована скорость передачи 192 квыб/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При создании макета быстрого ионозонда вертикального зондирования были разработаны конфигурации ПЛИС и программное обеспечение, реализующие передающую и приемную части прибора, а также реализована возможность синхронной работы передающей и приемной частей ионозонда с помощью PPS-сигналов GPS приемника.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-72-10131).

Работа по монтажу системы охлаждения усилителя А600 выполнена Востоковым А.В. при поддержке проекта № 0729-2020-0057 Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Shindin A.V., Moiseev S.P., Vybornov F.I., et al. The Prototype of a Fast Vertical Ionosonde Based on Modern Software-Defined Radio Devices. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, iss. 3. P. 547. DOI: 10.3390/rs14030547.

URL: <http://pavel-demin.github.io/red-pitaya-notes/sdr-transceiver-122-88/> (дата обращения 25 мая 2022 г.).

URL:

<https://redpitaya.readthedocs.io/en/latest/developerGuide/hardware/122-16/top.html> (дата обращения 21 декабря 2021 г.).

URL:

http://www.leobodnar.com/shop/index.php?main_page=product_info&cPath=107&products_id=234&zenid=974fd2f393793a8c7aba077f2c2b2559 (дата обращения 25 мая 2022 г.).