

ПРОГРАММНО ОПРЕДЕЛЯЕМЫЙ ОНЧ-ПРИЕМНИК ДЛЯ МОНИТОРИНГА ВНЕЗАПНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Л.С. Варзарь, А.М. Падохин

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
varzar.ls18@physics.msu.ru

SOFTWARE DEFINED VLF RECEIVER FOR MONITORING SUDDEN IONOSPHERIC DISTURBANCES

L.S. Varzar, A.M. Padokhin

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
varzar.ls18@physics.msu.ru

Аннотация. Описывается разработанный программно-определяемый ОНЧ-приемник на основе программного обеспечения GNURadio. В результате работы приемника были зафиксированы внезапные ионосферные возмущения, вызванные серией солнечных вспышек классов X и M в апреле–мае 2022 г.

Ключевые слова: ОНЧ, GNURadio, внезапные ионосферные возмущения, солнечные вспышки.

Abstract. This paper describes the software defined VLF receiver based on the GNURadio software. The receiver recorded sudden ionospheric disturbances from series of X and M class solar flares in April–May 2022.

Keywords: VLF, GNURadio, sudden ionospheric disturbances, solar flares.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных задач современной геофизики является исследование ионосферных возмущений, вызванных высокоэнергетическими геофизическими событиями, такими как солнечные вспышки, геомагнитные бури, протонные высыпания, гамма-вспышки, солнечные затмения, разряды молний и землетрясения. Данные явления оказывают существенное воздействие на D-слой ионосферы, изучение которого затруднительно из-за малой электронной концентрации [Митра, 1977]. Эффективным методом его изучения является зондирование в ОНЧ-диапазоне. ОНЧ-сигналы распространяются в волноводе Земля—ионосфера, верхней границей которого является D-слой. Вариации электронной концентрации в D-слое, вызванные внезапными ионосферными возмущениями, приводят к изменению параметров волновода и могут быть зарегистрированы в амплитудных и фазовых характеристиках ОНЧ-сигналов.

В работе используется популярный в настоящее время благодаря наличию свободной среды разработки GNURadio программно-ориентированный подход к построению ОНЧ-приемника — детектора внезапных ионосферных возмущений, заключающийся в максимальном использовании методов цифровой обработки сигналов непосредственно в компьютере. Отметим, что с использованием данного подхода и среды GNURadio были разработаны применяемые в задачах томографии ионосферы УКВ-приемники сигналов низкоорбитальных спутниковых радиомаяков [Vierinen, 2014], а также детектор внезапных ионосферных возмущений ОНЧ-диапазона [Leesch, 2010], на программно-аппаратную реализацию которого мы во многом опирались в настоящей работе.

ПРОГРАММНО ОПРЕДЕЛЯЕМЫЙ ОНЧ-ПРИЕМНИК

Учитывая пересечение частотных диапазонов ОНЧ-радиоволн и звуковых волн, в качестве АЦП для регистрации ОНЧ-сигналов можно использовать

звуковую карту персонального компьютера. В настоящей работе была использована внешняя звуковая карта SBX X-Fi Surround 5.1 с частотой дискретизации 96 кГц, что позволяет принимать сигналы ОНЧ-передатчиков в полосе 0–48 кГц. Звуковая карта была подключена через USB-порт к персональному компьютеру с операционной системой Linux Mint и установленной средой GNURadio. В качестве приемной антенны использовалась всенаправленная активная электрическая широкополосная (0–30 МГц) MiniWhip антенна, установленная на крыше физического факультета МГУ.

Программная реализация приемника в среде GNURadio показана на рис. 1. Блок Audio Source получает реальный сигнал с АЦП звуковой карты. После умножения на константу (Multiply Const) сигнал поступает на блок преобразования Гильберта (Hilbert), который переводит сигнал в комплексный вид для удобства дальнейшей обработки средствами GNURadio. После этого сигнал поступает на режекторный фильтр (FFT Filter с коэффициентами notch taps) для подавления гармоник сети питания (кратные гармоники 50 Гц). Далее сигнал поступает на фильтр с конечной импульсной характеристикой (Frequency Xlating FIR Filter), который производит сдвиг частоты на частоту принимаемой станции, выделение в сигнале заданной полосы с использованием окна Ханнинга с частотой отсечки 200 Гц и переходной частотой 40 Гц, а также децимацию (в 480 раз). После этого сигнал поступает на блок RMS, который вычисляет СКО сигнала в окне, т. е. его амплитудную характеристику. Блок (Keep 1 in N) осуществляет дополнительную децимацию (в 25 раз) данных мощности сигнала, после чего эти значения записываются на жесткий диск компьютера блоком File Sink с частотой дискретизации 8 Гц для последующего анализа. Дополнительно в программе предусмотрены блоки визуализации QT GUI Waterfall Sink и QT GUI Time Sink для отображения текущего спектра сигнала, поступающего с АЦП

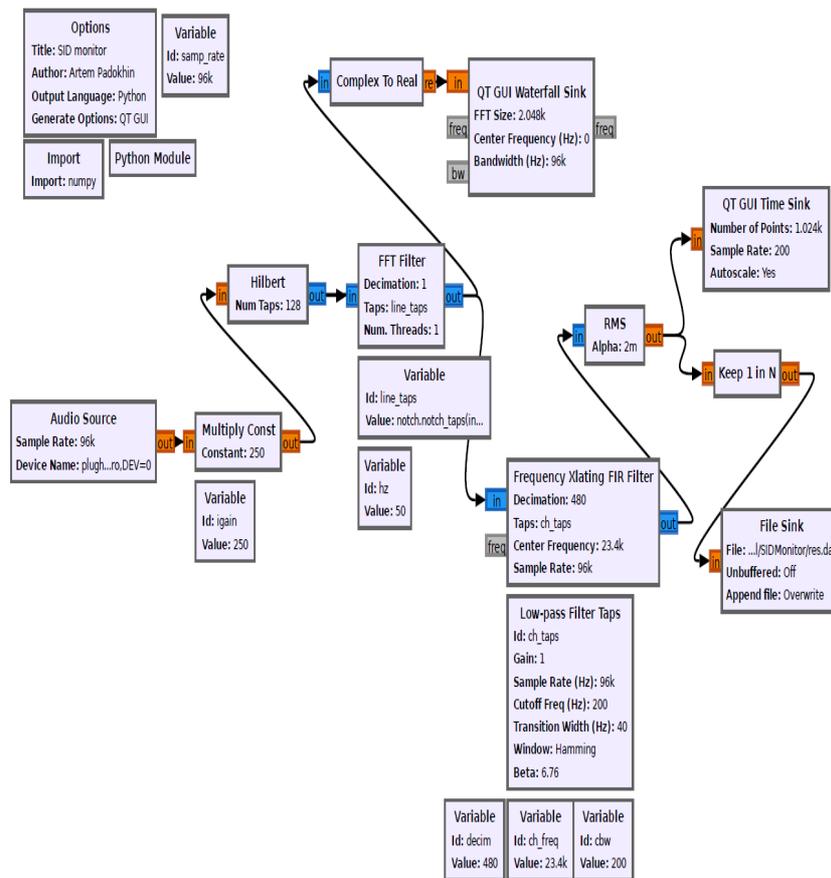


Рис. 1. Программная реализация ОНЧ-приемника в среде GNURadio

и амплитудной характеристики сигнала принимаемой ОНЧ-станции.

ПРИМЕР РЕГИСТРАЦИИ ВНЕЗАПНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, ВЫЗВАННЫХ СОЛНЕЧНЫМИ ВСПЫШКАМИ

Для тестирования разработанного приемника и детектирования внезапных ионосферных возмущений использовались сигналы двух европейских ОНЧ-передатчиков: HWU (21.75 кГц) и DHO38 (23.4 кГц). В период проведения тестовых экспериментов 30 апреля – 1 мая 2022 г. на Солнце была зарегистрирована серия вспышек классов M и X, самая интенсивная из которых (X1.1) произошла 30 апреля 2022 г. в 13:47 UT. На рис. 2 (вверху) показаны вариации рентгеновского излучения Солнца в диапазоне 1–8 Å по данным спутника GOES-16 в это время. Внизу показаны вариации интенсивности ОНЧ-сигналов со станций DHO38 (синяя кривая) и HWU (оранжевая кривая). В спокойные дни (29 апреля, 2 мая) можно наблюдать слабые вариации интенсивности сигнала в дневные часы, что связано с тем, что для трасс длиной более 2000 км основной вклад в интенсивность сигнала в дневное время вносит слабоменяющаяся земная волна. Можно наблюдать резкое падение интенсивности сигнала и последующий ее рост в часы восхода и захода и сильные вариации амплитуды в ночные часы для обеих станций, что связано с интерференцией сигналов,

распространяющихся в виде земной и небесной волн — небесная волна начинает регистрироваться, когда D-слой рекомбинирует в отсутствие солнечного излучения. Отметим также периодическое профилактическое выключение станции DHO38 в утренние часы. При этом хорошо видно, что вариации интенсивности 30 апреля значительно (более чем на 3σ) отличаются от кривой спокойного дня. Нетрудно заметить также, что в момент прихода дополнительного ионизирующего излучения, вызванного солнечными вспышками, наблюдаются максимальные вариации интенсивности принятых сигналов. Это связано с дополнительной ионизацией в D-слое, которая влияет на параметры распространения небесной ОНЧ-волны. При этом видно, что в случае со станцией HWU дополнительная ионизация в D-слое, вызванная вспышкой, приводит к увеличению интенсивности принимаемого сигнала, а в случае станции DHO38, наоборот, — к уменьшению интенсивности принимаемого сигнала. Это можно объяснить различными длинами радиотрасс, что приводит к тому, что сигналы небесной и земной волн для станций DHO38 и HWU приходят на приемник с различным сдвигом фаз, вызывая за счет интерференции как положительные, так и отрицательные вариации амплитуды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием технологии программно-определяемого радио и библиотеки GNURadio был разрабо-

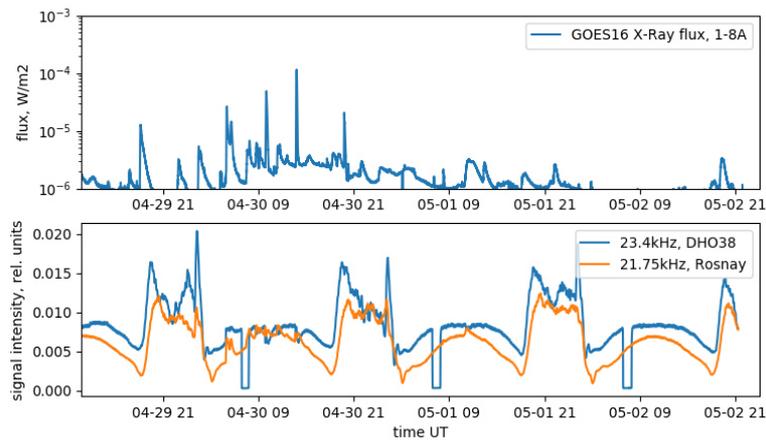


Рис. 2. Вариации рентгеновского излучения Солнца в диапазоне 1–8 Å по данным спутника GOES-16 (вверху) и вариации интенсивности ОНЧ-сигналов станций ДНО38 и НВU на приемном пункте МГУ 29 апреля – 2 мая 2022 г.

тан и протестирован ОНЧ-приемник — детектор внезапных ионосферных возмущений. С его помощью наблюдались вариации амплитудных характеристик сигналов пары европейских ОНЧ-передатчиков, вызванные серией солнечных вспышек классов М и Х в конце апреля — начале мая 2022 г. Разработанный приемник может использоваться не только для регулярного мониторинга внезапных ионосферных возмущений в D-слое ионосферы, но и в качестве экспериментальной основы задачи специального физического практикума для студентов отделений радиофизики и геофизики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Митра А. *Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли*. М.: 1977.

Ряховский И.А. Генерация и распространение КНЧ/ОНЧ-излучения в литосферно–ионосферной системе. Дисс. на соискание уч. степени к.ф.-м.н. Москва, 2014.

Leech M. Science without hardware: building an SDR SID Receiver in an afternoon. *Proc. SARA*. March 20–21, 2010.

Vierinen J., Norberg J., Lehtinen M.S., et al. Beacon satellite receiver for ionospheric tomography. *Radio Sci.* 2014. Vol. 49. P. 1141–1152. DOI: [10.1002/2014RS005434](https://doi.org/10.1002/2014RS005434).

URL: <https://www.gnuradio.org>.

URL: <https://www.swpc.noaa.gov>.