

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНО ОПРЕДЕЛЯЕМОГО РАДИО ДЛЯ МОНИТОРИНГА ВНЕЗАПНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Л.С. Варзарь, А.М. Падохин

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

APPLICATION OF SOFTWARE-DEFINED RADIO FOR MONITORING OF SUDDEN IONOSPHERIC DISTURBANCES

L.S. Varzar, A.M. Padokhin

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

Аннотация. В данной работе описывается разработанный программно определяемый приемник ОНЧ на основе программного обеспечения GNURadio. В результате работы приёмника были зафиксированы внезапные ионосферные возмущения, вызванные серией солнечных вспышек X и M класса в апреле–мае 2022 г. и частичным солнечным затмением в октябре 2022 г.

Ключевые слова: ОНЧ, GNURadio, внезапные ионосферные возмущения, солнечные вспышки, солнечное затмение

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

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

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных задач современной геофизики является исследование ионосферных возмущений, вызванных высокоэнергетическими геофизическими событиями, такими как солнечные вспышки, геомагнитные бури, протонные выбросы, 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 Земли — 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 данной работе используется популярный в настоящее время благодаря наличию свободной среды разработки GNURadio [<https://www.gnuradio.org/>] 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 et al., 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 приёмной антенны использовалась всенаправленная, активная, электрическая, широкополосная (0–30 МГц) MiniWhip антенна, установленная на крыше физического факультета МГУ.

ПРИМЕР РЕГИСТРАЦИИ ВНЕЗАПНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Для тестирования разработанного приёмника и детектирования внезапных ионосферных возмущений в данной работе 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 M и X класса, самая интенсивная из которых (X1.1) произошла 30 апреля 2022 г. в 13:47 UT. На верхней панели рис. 2А) приведены вариации рентгеновского излучения Солнца в диапазоне 1–8 А по данным спутника GOES-16 во время солнечных вспышек. Не трудно заметить, что в момент прихода дополнительного ионизирующего излучения, вызванного солнечными вспышками, наблюдаются максимальные вариации интенсивности принятых сигналов.



Рис. 1. Схема программно определяемого ОНЧ-приемника

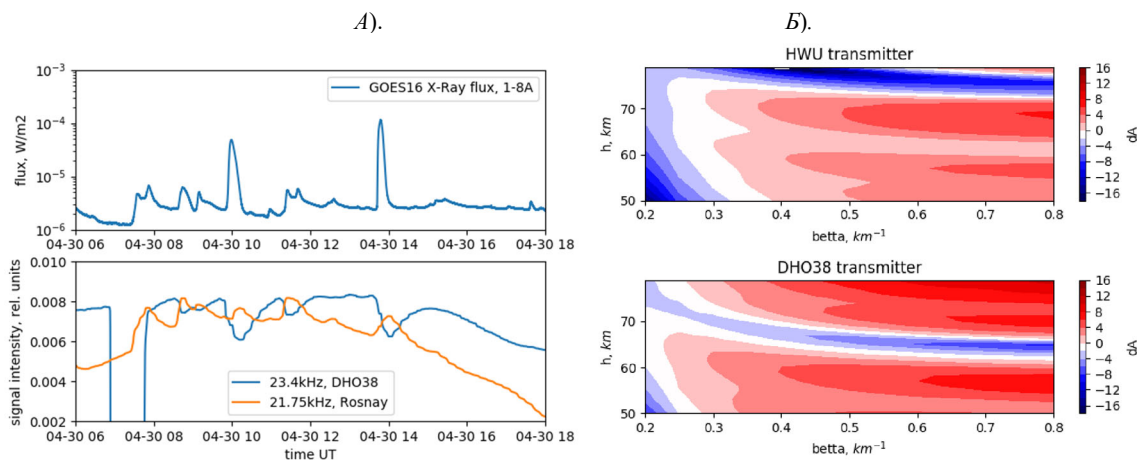


Рис. 2. А). Вариации рентгеновского излучения Солнца в диапазоне (1–8 А) по данным спутника GOES-16 (сверху) и вариации интенсивности ОНЧ сигналов станций DHO38 и HWU на приёмном пункте МГУ (снизу), 29 апреля – 2 мая 2022 г.; Б). Поле возможных значений амплитуды сигналов ОНЧ-передатчиков HWU и DHO38 на приемнике МГУ

Это связано с дополнительной ионизацией в D -слое, которая влияет на параметры распространения небесной ОНЧ волны. 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. Это можно объяснить различной длиной радиотрасс, что приводит к тому, что сигналы небесной и земной волн для станций DHO38 и HWU приходят на приёмник с различным сдвигом фаз.

В работе сделана попытка оценить вариации электронной концентрации в D -слое во время рассматриваемой серии вспышек с использованием простейшей двухпараметрической модели [Wait, Spies, 1964], учитывающей эффективную высоту h' и крутизну β профиля. Для этого с помощью программы LWPC строились карты вариаций амплитуды (относительно невозмущенной) сигналов в широком диапазоне возможных значений β и h' . Такие карты для передатчиков DHO38, HWU и приемника в Москве приведены на рис. 2. Б).

Хорошо видно, что для трассы DHO38 – Москва по результатам численных расчетов наблюдается

уменьшение амплитуды сигнала при переходе от невозмущенных условий $\beta = 0.3 \text{ км}^{-1}$ и $h' = 74 \text{ км}$ в область меньших высот и большей крутизны профиля. В тоже время для трассы HWU – Москва напротив наблюдается увеличение амплитуды в той же области, что полностью согласуется с результатами эксперимента.

С использованием разработанного приемника были исследованы вариации ОНЧ сигналов одной из рассмотренных в работе станций (DHO38) в период частичного солнечного затмения 25 октября 2022 г. Они приведены на рис. 3, для сравнения также показан невозмущенный день 26 октября 2022 г. На рисунке также приведен процент перекрытия солнечного диска в точке приема сигналов. Хорошо видно, что увеличение интенсивности сигнала (по сравнению с невозмущенным днем) происходит при увеличении перекрытия площади солнечного диска. Положительные возмущения здесь можно сравнить с эффектами похожими на заход Солнца, т.е. увеличением эффективной высоты и уменьшением электронной концентрации, что согласуется с модельными расчётами, представленными на рис. 2Б).

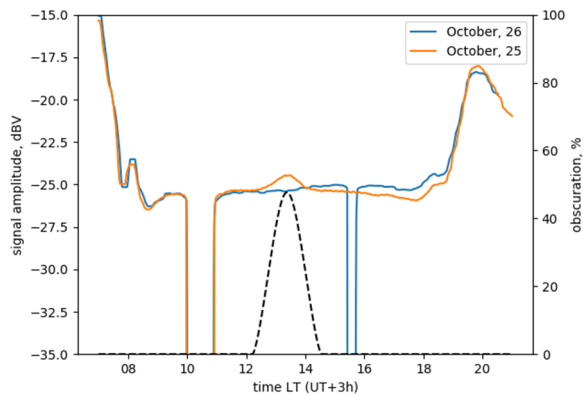


Рис. 3. Вариации интенсивности ОНЧ сигналов DHO38 25 октября 2022 г. (солнечное затмение) и 26 октября 2022 г., процент перекрытие солнечного диска 25 октября 2022 г. в Москве (пунктирная линия)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием технологии программно определяемого радио и библиотеки GNURadio был разработан и протестирован ОНЧ приёмник — детектор внезапных ионосферных возмущений. С его использованием наблюдались вариации амплитудных характеристик сигналов пары европейских ОНЧ передатчиков, вызванные серией солнечных вспышек M и X класса в конце апреля — начале мая

2022 г. и солнечным затмением в конце октября 2022 г. С использованием простейшей двухпараметрической модели проведены оценки возможных изменений h' и β во время вспышек. Для данного явления типичным откликом является уменьшение эффективной высоты и увеличение крутизны профиля. При этом основываясь исключительно на амплитудных измерениях с пары близких радиотрасс невозможно однозначно оценить значения этих параметров в периоды возмущения. Для этого необходимы данные с большего числа радиотрасс, а также фазовые измерения, которые на данный момент не реализованы на разработанном приемнике ОНЧ-сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Митра А. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. М. 1977.
- Leech M. Science without Hardware: Building an SDR SID Receiver in an Afternoon, SARA Proceedings, Mar. 20-21. 2010.
- Vierinen J., Norberg J., Lehtinen M.S. et al. Beacon satellite receiver for ionospheric tomography // Radio Sci. 2014. V. 49. P. 1141–1152. doi:10.1002/2014RS005434.
- Wait J.R., Spies K.P. Characteristics of the earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves. 1964.
- URL: <https://www.gnuradio.org/>