

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ МАКЕТА БЫСТРОГО ИОНОЗОНДА ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НИРФИ

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

Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия
pavlova@nirfi.unn.ru

RESULTS OF TESTING RFI'S FAST VERTICAL SOUNDING IONOSONDE

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

Radiophysical Research Institute UNN, Nizhny Novgorod, Russia
pavlova@nirfi.unn.ru

Аннотация. В докладе приводятся результаты испытаний макета быстрого ионозонда вертикального зондирования, приемная и передающая части которого созданы на базе плат Red Pitaya SDRlab 122-16. Испытания макета начались в 2021 г. В ходе испытаний были зарегистрированы первые односекундные ионограммы. Серия испытаний в мае 2022 г. была осуществлена с применением приемного пункта моностатической локации Луны, что позволило принимать сигнал малой мощности и не создавать больших помех в эфире. Отраженный от ионосферы сигнал был зарегистрирован на уровне –22 дБ от уровня земной волны.

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

Abstract. This report presents the testing results of a prototype of a fast vertical sounding ionosonde whose receiving and transmitting parts are based on Red Pitaya SDRlab 122-16 boards. Prototype tests began in 2021. During the tests, the first one-second ionograms were recorded. In May 2022, a series of tests was carried out using a receiving point of the monostatic radar observations of the Moon. This allowed us to receive a low power signal and to avoid large interference on the air. The signal reflected from the ionosphere was recorded at a level of -22 dB from the ground wave level.

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

ВВЕДЕНИЕ

Испытания макета быстрого ионозонда начались в 2021 г. Первые ионограммы, зарегистрированные со скоростью 1 ионограмма в секунду, были получены в сентябре–декабре 2021 г. на экспериментально-опытной базе «Васильсурск» [Shindin et al., 2022]. В этих экспериментах использовались разные варианты приемных антенн, включая большую диагностическую антенну (126×126 м), антенну ЛЧМ-ионозонда и антенну ионозонда CADI.

Основным результатом проведенных в 2021 г. испытаний является регистрация быстрых процессов перераспределения электронной концентрации.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Пятого мая 2022 г. была запланирована новая серия испытаний. Целью этих испытаний была проверка работоспособности приемной части ионозонда на базе Red Pitaya SDRLab 122-16, а также комплектов специально приобретенных широкополосных КВ-антенн.

Для приема и передачи сигналов в нашем макете используются антенны CT-HF-FD [<https://comtech.ru/produktsiya/antennye-sistemy/kv/shirokopolosnye-kv-antenn/shirokopolosnaya-kv-antenna-ct-hf-fd>]. Данные антенны обладают диапазоном частот от 1.5 до 30 МГц, мощностью 2 кВт и сопротивлением 50 Ом.

К моменту проведения испытаний передающая часть нашего макета оказалась готова не полностью, поскольку при измерении максимальной выходной мощности основного усилителя в лаборатории сгорел аттенюатор, что привело к выходу из строя LDMOS-транзисторов усилителя. Это повлекло изменение плана предполагаемого эксперимента.

В ходе эксперимента передающая часть макета была собрана на одном пятиваттном предусилителе и установлена в здании передатчиков.

Поскольку в передающей части макета отсутствовал усилитель, мощности нашего сигнала не хватало для того, чтобы зафиксировать его отражение от ионосферы приемной частью нашего макета. Поэтому для регистрации сигнала мы использовали, имеющийся на полигоне, приемный пункт моностатической локации Луны. В качестве приемной антенны использовалась одна из секций антенной системы стенда СУРА.

Данный пункт обладает значительно более высокой чувствительностью, нежели приемная часть макета быстрого ионозонда с антенной CT-HF-FD. Благодаря этому мы смогли зарегистрировать отражение от ионосферы сигнала мощностью 5 Вт.

Регистрация сигналов в пункте моностатической локации Луны осуществляется при помощи приемника NetSDR [<https://www.radiomasterlist.com/en/rf-space-netsdr.html>]. Данный приемник обладает 16-рядным АЦП и имеет полосу пропускания от 10 кГц до 2 МГц.

Несмотря на высокую чувствительность приемного пункта на базе NetSDR, отраженный пятиваттный сигнал виден только при накоплении (наложении эпох) порядка 1000 импульсов. В результате на регистрацию ионограммы требуется 15 мин, что не позволяет реализовать быструю регистрацию ионограмм.

Для проверки работоспособности передающей части использовалась прошивка, генерирующая импульсы на частоте 5 МГц с периодом 5 мс. Видно, что пятиваттный сигнал занимает 20 % амплитудной шкалы приемника (рис. 1).

После накопления 1000 импульсов в течение 5 с была получена осциллограмма амплитуды комплексного сигнала (рис. 2). Горизонтальная ось задержек пересчитана в ось действующих высот.

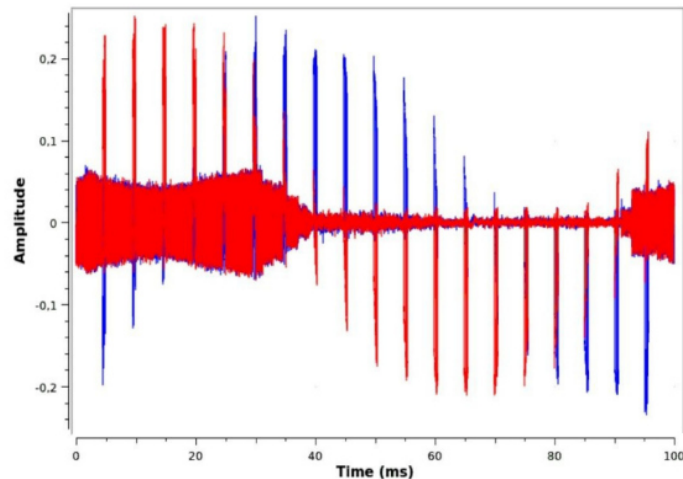


Рис. 1. Излучаемый сигнал, зафиксированный с помощью приемника NetSDR и среды GNU Radio

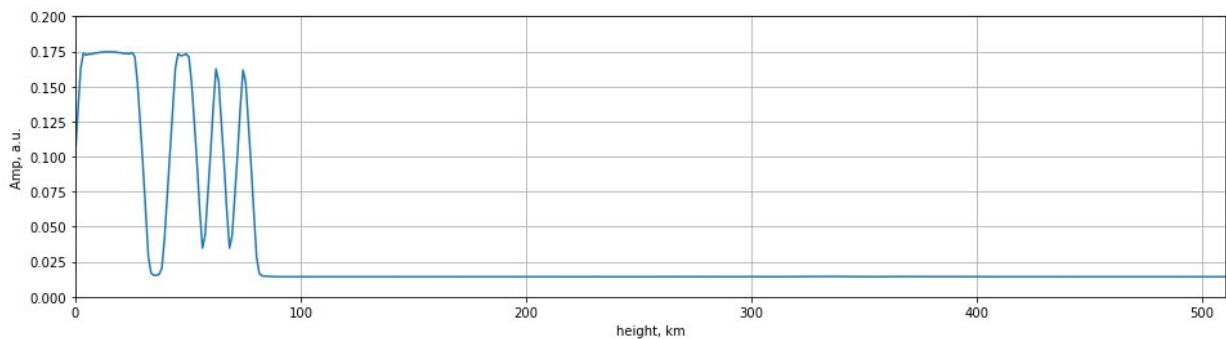


Рис. 2. Осциллограмма сигнала NetSDR + CYPA

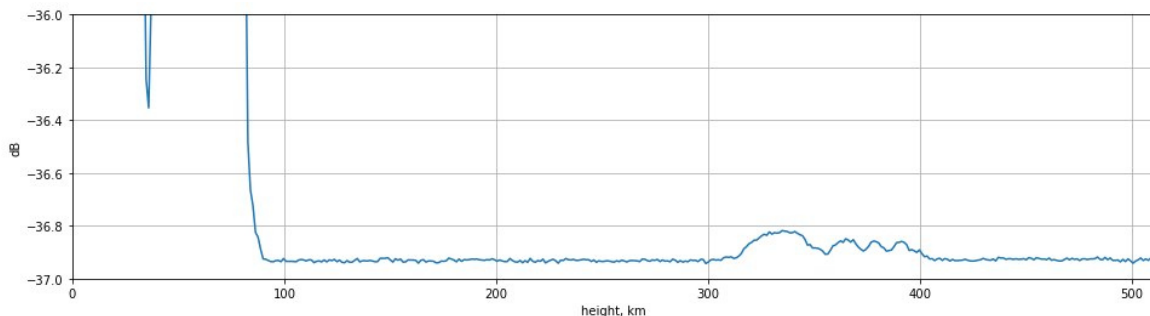


Рис. 3. Осциллограмма сигнала NetSDR + CYPA в логарифмическом масштабе

Пересчитав ось амплитуд в ось дБ, мы получили график, приведенный на рис. 3. Здесь виден отраженный сигнал, зарегистрированный на уровне -22 дБ относительно прямого сигнала.

Приемная часть нашего макета тоже была собрана и установлена в лабораторном корпусе полигона, после чего была проверена ее работоспособность. Был принят прямой сигнал, излучаемый передающей частью макета. На рис. 4 приводится график, получившийся в результате накопления 10000 импульсов.

Видно, что уровень прямого сигнала всего на 12 дБ выше уровня шумов. Отраженный же сигнал ожидается на уровне -22 дБ. Таким образом, проведенные испытания позволяют рассчитывать на то, что при использовании усилителя мощностью 600 Вт (20 дБ) отраженный сигнал будет зарегистрирован с использованием антенны СТ-HF-FD без накопления.

ПЛАНЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Разработанный макет ионозонда мы планируем ввести в круглосуточную эксплуатацию на полигоне «Васильсурск» в июне 2022 г. Для этого нами была реализована гибкая система управления ионозондом.

На языке Python была разработана программа, позволяющая запускать ионозонд, задавая время начала его работы при помощи ключей программы.

Данная программа реализует три варианта работы ионозонда:

- Запуск ионозонда в определенное время суток со снятием одной секундной ионограммы в заданные периоды времени. Программа повторяет заданное расписание каждые сутки. Выключение устройства происходит путем выключения программы.
- Запуск ионозонда в определенное время со снятием одной секундной ионограммы в заданные пери-

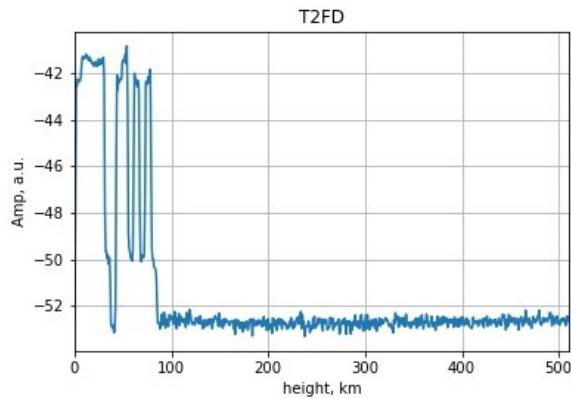


Рис. 4. Осциллограмма излучаемого сигнала, принятого приемной частью макета

оды времени. Ежечасное повторение заданного расписания. Выключение устройства осуществляется путем выключения программы.

Запуск ионозонда в одно определенное заданное время с непрерывной регистрацией ионограмм до момента выключения программы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе эксперимента был зарегистрирован отраженный от ионосферы сигнал на уровне -22 дБ относительно сигнала земной волны и выяснено, что приемная часть ионозонда на базе SDRLab и антенны CT-HF-FD при пятиваттном прямом сигнале обеспечивает уровень -41 дБ при уровне шума -53 дБ.

Кроме того, оказалось, что одна секция антенной системы стенда СУРА позволяет зарегистрировать

отражение от ионосферы импульса мощностью 5 Вт при накоплении 1000 импульсов, откуда следует принципиальная возможность создания на базе секции стенда СУРА пятиваттного ионозонда вертикального зондирования, который бы работал фактически без создания значимых помех в эфире.

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, 547.

URL: <https://comtech.ru/produksiya/antennye-sistemy/kv/shirokopolosnye-kv-antenny/shirokopolosnaya-kv-antenna-ct-hf-fd> (дата обращения 4 мая 2022 г.).

URL: <https://www.radiomasterlist.com/en/rf-space-netsdr.html> (дата обращения 4 мая 2022 г.).