

## **Результаты первого месяца непрерывной эксплуатации прототипа быстрого ионозонда вертикального зондирования ИОН-ФАСТ НИРФИ.**

С.П. Моисеев, А.В. Шиндин, К.К. Грехнева, В.А. Павлова, Н.С. Тимукин

*Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского*  
603022, г.Нижний Новгород, пр.Гагарина, 23.  
E-mail: moiseev@rf.unn.ru

*В июне 2022 г. на стенде СУРА был введен в непрерывную эксплуатацию разработанный в молодежной лаборатории НИРФИ ионозонд вертикального зондирования ионосферы. Мы назвали свою разработку ИОН-ФАСТ, что характеризует ключевую особенность ионозонда: возможность непрерывной работы со скоростью 1 ионограмма в секунду. В докладе дано описание ионозонда, а также пути, который пришлось пройти от идеи до воплощения; приведены результаты первого месяца эксплуатации прототипа; перспективы дальнейшего использования и модернизации.*

*Ключевые слова: ионозонд, ионосфера, электронная концентрация, программируемые логические интегральные схемы, программно-определяемое радио*

## **Results of the first month of continuous operation of the NIRFI's fast vertical ionosonde prototype ION-FAST.**

S.P. Moiseev, A.V. Shindin, K.K. Grechneva, V.A. Pavlova, N.S. Timukin

*Lobachevsky University.*

*In May 2022, an ionosonde for vertical sounding of the ionosphere, developed at the youth laboratory of the NIRFI, was put into continuous operation at the SURA facility. We called our development ION-FAST, which characterizes the key feature of the ionosonde: the possibility of continuous operation at a speed of 1 ionogram per second. The report gives a description of the ionosonde, as well as the path that had to go from idea to implementation; the results of the first month of operation of the prototype are given; prospects for further use and modernization.*

*Keywords: ionosonde, ionosphere, electron concentration, field-programmable gate array, software-defined radio.*

### **Введение**

За последние 20 лет устройства программно-определяемого радио (SDR) расширили сферу своего применения с профессиональной до радиолюбительской (см., например, [1]). Этому способствовали следующие факторы: удешевление элементной базы и развитие технологии ПЛИС. Последний фактор позволил предельно упростить структуру SDR устройств для ВЧ диапазона, фактически исключив из нее специализированные чипы. Также немаловажную роль в этом процессе сыграло то, что среды разработки для ПЛИС от основных поставщиков стали бесплатными для индивидуального использования. Современные АЦП/ЦАП с частотой дискретизации более 80 МГц позволяют передавать на ПЛИС для обработки весь ВЧ диапазон (3-30 МГц). Все это делает подобные устройства крайне удобными для задач мониторинга прохождения КВ радиоволн через ионосферу и, в частности, для реализации ЛЧМ ионозонда [2]. Для мониторинга текущей ионосферной обстановки наиболее распространена техника вертикального зондирования ионосферы короткими

кодированными импульсами с частотой заполнения, меняющейся в пределах 1-20 МГц. В данной работе представлено описание и результаты испытаний макета ионозонда вертикального зондирования, созданного на базе доступных в настоящее время SDR устройств.

### Методы и подходы

Ионозонд вертикального зондирования – это радиолокационная станция, работающая в КВ диапазоне (см. подробнее, [3]). Во время работы ионозонд излучает короткие радиоимпульсы с частотой заполнения, изменяющейся в диапазоне 1-20 МГц. Как правило к излучаемым импульсам применяются различные виды манипуляций (обычно амплитудная или фазовая). Отраженные от ионосферы импульсы регистрируются и обрабатываются с помощью приемной части. В результате обработки сигнала получается высотно-частотная характеристика, по которой далее можно восстановить профиль электронной концентрации в диапазоне высот 80-700 км.

При разработке прототипа ионозонда вертикального зондирования мы ориентировались на технические характеристики имеющегося в нашем распоряжении ионозонда CADI: мощность излучения в импульсе – 600 Вт, тип кодирования импульсов – фазовая манипуляция 13 битным кодом Баркера с длительностью одного бита 40 мкс, период следования импульсов – от 5 мс, диапазон зондирующих частот – от 1 до 20 МГц с шагом 50 кГц в стандартном режиме. Необходимо отметить, что для повышения соотношения сигнал/шум при регистрации отраженного от ионосферы сигнала наш ионозонд CADI использует усреднение по 4 импульсам, излучаемым с одной и той же частотой заполнения. В целом это требует приблизительно 40 секунд на излучение всех импульсов, а затем еще минуту на то, чтобы обработать сигнал и записать файл с ионограммой на ПК.

Структурная схема разработанного прототипа быстрого ионозонда вертикального зондирования представлена на Рисунке 1. В текущем варианте передающая и приемная части ионозонда – это отдельные устройства. Передающая часть включает в себя: 1) DIY линейный КВ усилитель на LDMOS транзисторах с максимальной мощностью 600 Вт с рабочим диапазоном 1,8-72 МГц; 2) 5 Вт предусилитель с рабочим диапазоном 100 кГц-40 МГц; 3) программируемый аттенюатор с рабочим диапазоном до 6 ГГц и максимальным ослаблением 30 дБ; 5) SDR устройство Red Pitaya SDRlab 122-16. На Рисунке 2 представлено фото передающей части ионозонда ИОН-ФАСТ без корпуса на лабораторном столе.

Red Pitaya SDRlab 122-16 представляет собой плату разработчика, основанную на системе на чипе Xilinx Zynq 7020, сочетающей ПЛИС и двухъядерный ARM процессор общего назначения. Плата оснащена двухканальными 14-ти битным ЦАП и 16-ти битным АЦП с частотой дискретизации 122.88 Мгэсэмплов в с, а также интерфейсами Ethernet и USB2.0 для передачи данных, связи с другими устройствами (ПК), а также для подключения к плате дополнительных устройств. В прототипе, который в настоящее время проходит испытания в режиме непрерывной работы, данная плата используется только в качестве задающего генератора (генератора зондирующих импульсов), однако уже проводятся лабораторные тесты макета ионозонда, в котором на такой же плате реализована и приемная часть.

Приемная часть проходящего испытания прототипа (см. Рисунок 3) основана на двухканальном SDR устройстве LimeSDR с заявленным диапазоном рабочих частот от 100 кГц до 3.8 ГГц, которое способно вести регистрацию сигнала в полосе 61.44 МГц. Чтобы иметь возможность регистрировать КВ сигнал в полосе 10 МГц, были использованы модифицированные апконвертеры, фильтрующие КВ сигнал и перемещающие его в область частот 120-130 МГц, где LimeSDR может обеспечить

необходимую полосу пропускания. Поскольку работа ионозонда предполагает точное согласование по частотам между передающей и приемной частями мы использовали генератор тактового сигнала Leo Bodnar Precision вместе с LimeSDR и апконвертерами. Два канала устройства позволяют при наличии соответствующих антенн и поляризатора регистрировать две поляризации отраженного сигнала (O и X моды). Для усиления принимаемого сигнала используется малошумящий усилитель (+20 дБ). Для регистрации сигнала в полосе 10 МГц LimeSDR подключается к ПК или ноутбуку по интерфейсу USB3.0.

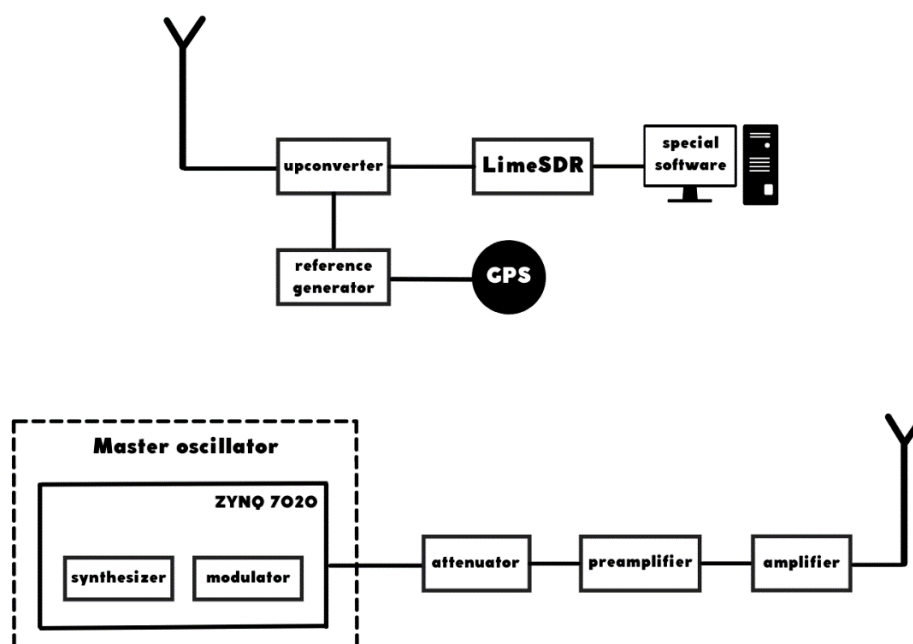


Рис. 1. Структурная схема передающей (снизу) и приемной (сверху) частей ионозонда

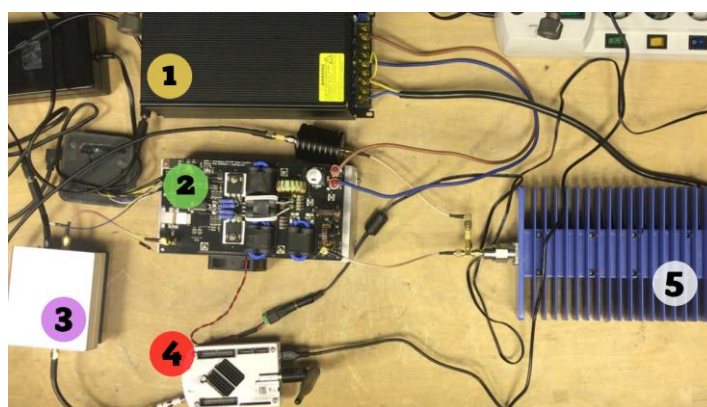
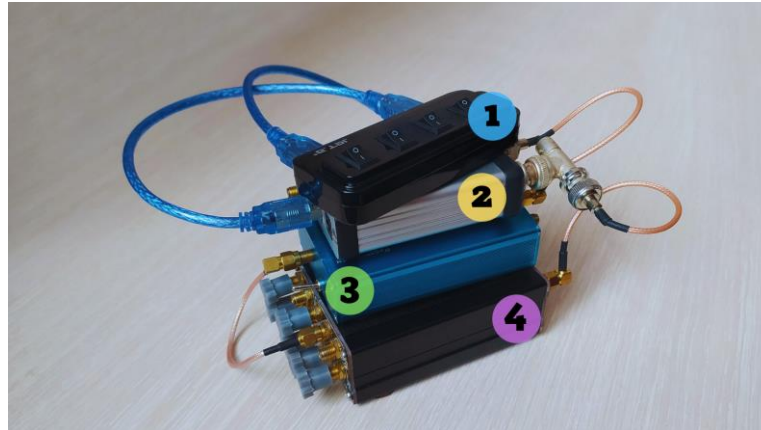


Рис. 2. Фото собранного макета передающей части ионозонда без корпуса. Цифрами обозначены: 1 – блок питания усилителя, 2 – линейный усилитель А600, 3 – 5 Вт предусилитель, 4 –SDRlab 122-16 в роли задающего генератора, 5 – согласованная нагрузка.

Концепция SDR предполагает, что функциональные возможности и даже предназначение устройства определяются программными компонентами, которые могут быть легко изменены или модернизированы. В нашем случае функция быстрого

ионозонда вертикального зондирования ионосферы обеспечена разработкой прошивки для ПЛИС платы SDRlab 122-16 и программного обеспечения для ПК для обработки сигнала и получения ионограмм.

Для достижения времени регистрации ионограмм порядка 1 секунды мы: 1) использовали период следования импульсов 5 мс вместо 25 мс (как у ионозонда CADJ); 2) отказались от усреднения сигналов по четырем импульсам на одной частоте; 3) сократили диапазон частот зондирования до 10 МГц; 4) разработали ПО, позволяющее регистрировать ионограммы в реальном времени, т.е. с задержкой меньше времени, требуемой на излучение всех зондирующих импульсов. Все эти меры обеспечили время зондирования – 0,9 с.



**Рис. 3. Фото собранного макета приемной части ионозонда без управляющего ПК. Цифрами обозначены: 1 – USB разветвитель, 2 – Precision GPS Reference Clock, 3 – Апконвертер, 4 – LimeSDR в корпусе.**

Функциональная блок-схема прошивки задающего генератора на плате SDRlab 122-16 представлена на Рисунке 4. Прошивка задающего генератора была реализована с помощью среды проектирования Xilinx Vivado на языке описания аппаратуры Verilog с использованием встроенных IP-ядер Xilinx. Проект состоит из отдельных модулей, имеющих функциональную связь друг с другом: входная тактовая частота 122.88 МГц, поступающая с кварцевого генератора платы Red Pitaya, подается на вход модуля `clk_wizard`, в котором происходит преобразование в частоту 100 МГц. Тактовый импульс поступает на вход модуля `clk_divider` и делится на две тактовые частоты: 25кГц – символная частота и 200 Гц – частота зондирующих импульсов (посылки). С помощью этих двух частот реализуется управление амплитудной и частотной модуляциями. В модуле `FM_Modulator` происходит изменение инкремента фазы гармонического сигнала раз в 5 мс с шагом по частоте 50кГц (для обеспечения времени регистрации ионограммы – 0,9 с), после чего инкремент поступает на вход модуля цифрового вычислительного синтезатора DDS, где генерируются значения косинуса. Полученный гармонический сигнал поступает в модуль амплитудной модуляции и уже модулированный импульс подается на вход модуля управления цифро-аналоговым преобразователем. Реализации фазовой манипуляции осуществлялась с помощью небольшой модернизации прошивки для амплитудной манипуляции, использующей тот факт, что смена фазы на  $\pi$  эквивалентна умножению сигнала на -1.

ПО для регистрации ионограмм создано на основе фреймворка GNU Radio с дополнительно разработанным модулем-триггером, компенсирующим отсутствующую на данном этапе временную синхронизацию между передающей и приемной частями макета, а также возможные пропуски семплов. Использованный flow graph инструмента

GNU Radio Companion представлен на Рисунке 5. Дополнительная программа, написанная на языке python с использованием сторонних библиотек numpy, scipy и matplotlib использовалась для автокорреляционного анализа и построения ионограмм. Вычислительной мощности ноутбука, оснащенного четырёхъядерным центральным процессором оказывается достаточно для получения ионограммы за время меньше 1 секунду, что фактически обеспечивает мониторинг ионосферы в реальном времени. Отдельное приложение (например, OBS Studio) может быть использовано для оперативной публикации ионограмм в сервисах интернет-видео типа YouTube.

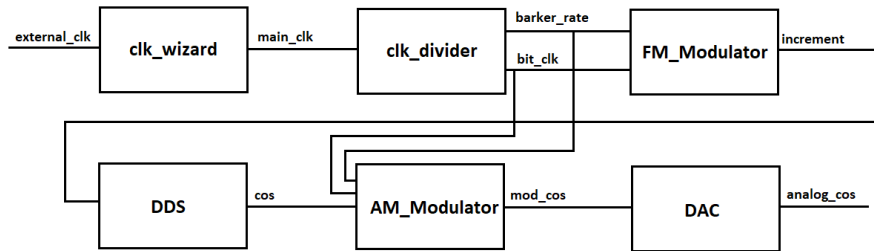


Рис. 4. Функциональная блок-схема прошивки задающего генератора на плате SDRlab 122-16.

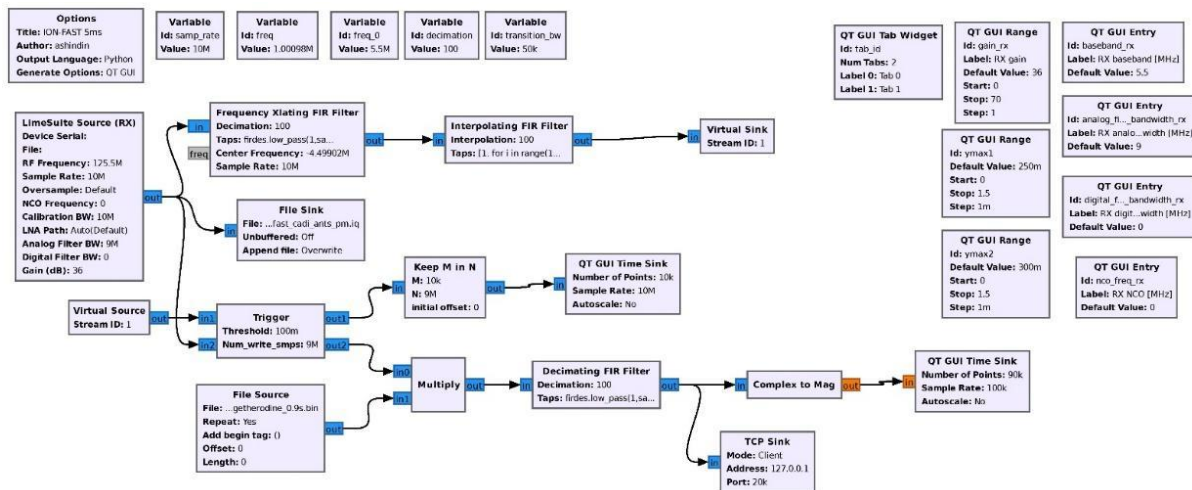


Рис. 5. Поточковый граф GNU Radio Companion, использованный в приемной части ионозонда.

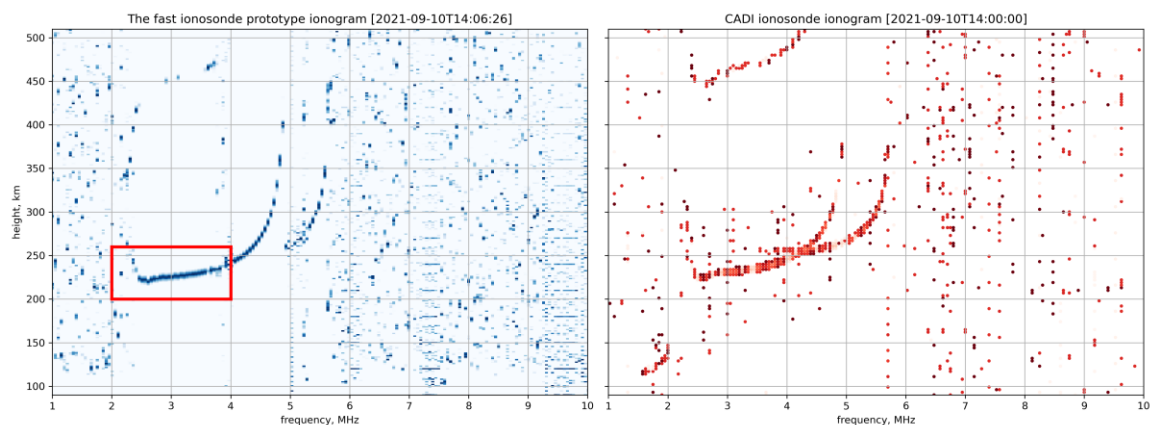
### Результаты испытаний

Перед тем, как запустить ионозонд ИОН-ФАСТ на стенде, было проведено несколько серий предварительных испытаний разработанного прототипа.

Первая серия экспериментов включала в себя непрерывную работу ионозонда на протяжении 24 часов в режиме максимальной скорости регистрации ионограмм. Испытания показали, что тепловой режим и работоспособность комплектующих не нарушаются при длительных нагрузках, а вычислительных возможностей используемых аппаратных средств достаточно для получения ионограмм и их автоматической публикации в сети Интернет в открытом доступе.

Вторая серия экспериментов состояла в использовании в составе ионозонда нескольких видов приемных антенн. Среди них: 1) большая диагностическая антенна, состоящая из 12 скрещенных диполей (размер антенного поля 126x126 м), применяемая

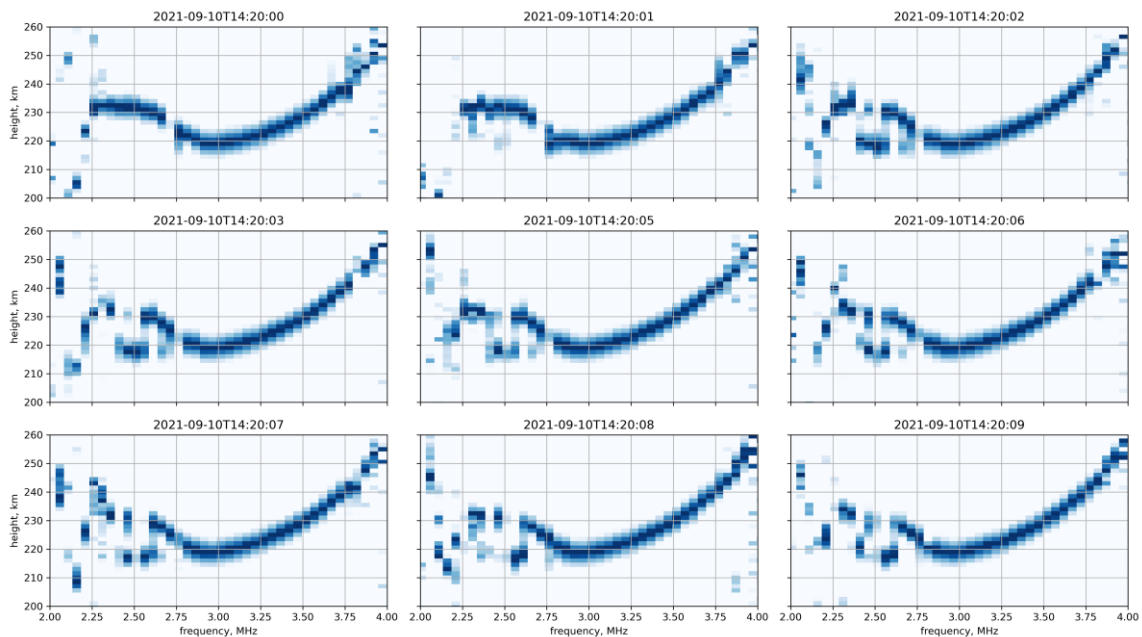
для регистрации искусственного радиоизлучения ионосферы, многочастотного доплеровского зондирования, диагностики нижних слоев ионосферы и мезосферы и др. (см. Рисунок 6); 2) штатная приемная (широкополосный диполь) и передающая (вертикальная Дельта) антенны имеющегося на экспериментально-опытной базе «Васильсурск» ионозонда CADI (см. Рисунок 7); 3) приемо-передающая антенна ЛЧМ ионозонда типа Дельта с диаграммой направленности на север; 4) первая секция антенного поля стенда СУРА (в качестве передающей антенны использовалась 15м антенна T2FD). В настоящее время ионозонд использует в качестве приемной и передающей антенн две компактные 15 м антенны T2FD, которые рассматриваются как штатные средства будущего прибора.



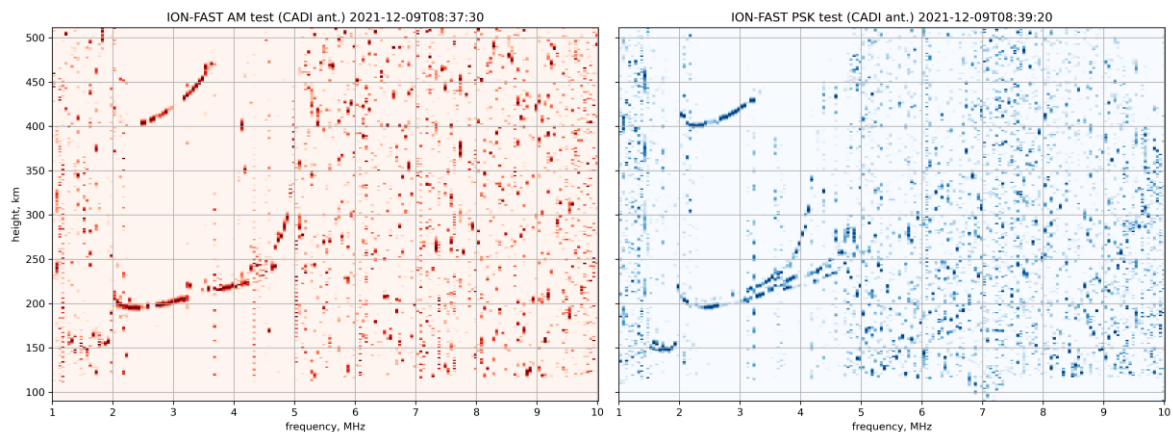
**Рис. 6. Левая панель: пример ионограммы, зарегистрированной с помощью разработанного прототипа ионозонда с использованием диагностической антенны (выход О моды). Правая панель: пример ионограммы, зарегистрированной с помощью ионозонда CADI с шагом по частоте 25 кГц. В верхней части панелей указано время регистрации в формате UTC**

Сравнительный анализ получаемых ионограмм показал, что диагностическая антенна благодаря хорошим параметрам обеспечивает ионограммы с наибольшим отношением сигнал/шум (на мощности 600 Вт порядка 42-44 дБ). Соизмеримым является отношение сигнал/шум, полученное в связке передающей 15м T2FD антенны и первой секции СУРЫ. Штатная приемная антенна ионозонда CADI потребовала для получения сравнимых по качеству ионограмм применения малошумящего усилителя. При использовании наклонной антенны ЛЧМ-ионозонда получить ионограммы с различимыми следами ионосферных слоев на данном этапе испытаний не удалось. При этом ионограммы наклонного зондирования на данную антенну успешно регистрируются. При использовании в качестве передающей и принимающей двух 15м антенн T2FD, отношение сигнал/шум оказывается в диапазоне 32-34 дБ (при излучаемой мощности порядка 600 Вт), что сказывается на качестве (зашумленности) получаемых ионограмм, однако информация о высотно-частотном профиле может быть восстановлена.

В третьей серии испытаний проводилось сравнение двух режимов работы ионозонда: с амплитудной и фазовой манипуляциями зондирующих импульсов. В обоих случаях кодирование осуществлялось 13-битным кодом Баркера. Испытания показали, что ионограммы, полученные с использованием фазовой манипуляции обладают значительно более высоким соотношением сигнал/шум. По-видимому, это связано с более высокой средней мощностью зондирования в этом режиме.



**Рис. 7. Пример 9 последовательных ионограмм, зарегистрированных на скорости 1 ионограмма в с, иллюстрирующий эффект быстрого уменьшения действующей высоты отражения в F-области ионосферы**



**Рис. 8. Примеры ионограмм, зарегистрированных с использованием антенн ионозонда CADI. Левая панель: амплитудная манипуляция. Правая панель: фазовая манипуляция**

### Дискуссия

Быстрый ионозонд может быть использован в исследованиях быстрых естественных вариаций профилей электронной концентрации в F-слое ионосферы. Например, использование быстрого ионозонда с временем регистрации ионограммы 2 с позволили [4]) обнаружить локальные возмущения, перемещающиеся вертикально со скоростями до 50 м/с. Обнаруженные при этом горизонтальные расслоения обладают способностью совершать циклические вертикальные движения с амплитудой до 5 км и периодом около 90 с.

Известно, что перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ) с характерным пространственным масштабом до 100 км часто наблюдаются на средних широтах в

дневное время. Ионозонды, работающие по стандартной 15-ти минутной программе зондирования ионосферы, регистрируют их на единичных ионограммах (см, например, [5]). Редкое территориальное расположение ионозондов не позволяет однозначно определить их параметры. Актуальность задачи определения параметров таких ПИВ с целью выявления источников их генерации объясняется трудностью их прогнозирования и сильным влиянием на каналы КВ связи. Применение ионозондов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) и одноминутным циклом зондирования сделало возможным определение пространственных и динамических характеристик ПИВ по нескольким (обычно 5- 15) ионограммам [6]. Как правило, при этом используется слабонаклонный режим зондирования ионосферы системой синхронно работающих ЛЧМ станций [7;8]. Сокращение времени зондирования до единиц секунд позволило бы детально проследить динамику процессов распространения ПИВ, особенно если бы использовалось несколько близко расположенных (на расстоянии 50-100 км) автоматических синхронно работающих ионосферных станций. Применение нескольких быстрых ионозондов вертикального зондирования, имеющих невысокую стоимость, позволяет создать такие перспективные автоматические системы регистрации параметров ПИВ.

Быстрый ионозонд вертикального зондирования может быть полезен в развитии исследований процессов, происходящих в E и Es слоях ионосферы. Известно, что процессы, протекающие в этих слоях, отличаются быстрой динамикой [9].

Эксперименты по модификации ионосферы Земли мощным коротковолновым излучением [10] показали необходимость разработки и применение быстрого ионозонда вертикального зондирования. Во-первых, ионозонд в таких экспериментах используется для диагностических целей (определение высоты отражения мощной волны) и управления работой нагревного стенда (выбор частоты мощных передатчиков). Как источник импульсной помехи ионозонд должен работать периодически, но кратковременно, не мешая работе диагностической аппаратуре. Во-вторых, скоростной ионозонд необходим для исследовательских целей. Взаимодействие мощного КВ излучения обыкновенной поляризации сопровождается возбуждением искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ). Различают несколько стадий ее развития с характерными временами (развитие стрикционной параметрической неустойчивости – 5-20 мс, стадия восстановления уровня отраженного сигнала волны накачки – 0,5-3 с, аномальное ослабление – 0,5-10 с, развитие самофокусировочной неустойчивости – 10-30 с) [20]. Обычно исследования ИИТ проводятся на фиксированных частотах с использованием передатчика пробных волн. Применение нового быстрого ионозонда вертикального зондирования может оказаться полезным при проведении исследований свойств ИИТ.

### **Выводы**

В работе мы показали, что в настоящее время можно из доступных к покупке широкому кругу людей комплектующих общей стоимостью (по ценам декабря 2021 года) приблизительно 1600 ЕВРО (без учета стоимости ПК для регистрации ионограмм, а также передающей и приемной антенн) собрать прототип ионозонда вертикального зондирования, который обладает скоростью регистрации ионограмм 1 ионограмма в 1 секунду. Причём передающая часть макета стоит 1050 ЕВРО. В перспективе мы планируем реализовать на плате SDRlab 122-16 также и приемную часть макета, что позволит дополнительно сократить общую стоимость на 550 ЕВРО. Авторам неизвестны случаи демонстрации непрерывной длительной работы других ионозондов на подобной скорости.



### **Литература**

1. Yamamoto M., “Digital beacon receiver for ionospheric TEC measurement developed with GNU Radio”, *Earth Planet Sp* 60, e21–e24, 2008, doi: <https://doi.org/10.1186/BF03353137>.
2. Ivanov V.A.; Kurkin V.I.; Nosov V.E.; Uryadov V.P.; Shumaev V.V., “Chirp ionosonde and its application in the ionospheric research”, *Radiophys. Quantum Electron*, v. 46, pp 821–851, 2003
3. Hunsucker R.D., “Radio Techniques for Probing the Terrestrial Ionosphere”; *Book Series Physics and Chemistry in Space 22 Planetology*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, pp. 65–93, 2003
4. Branitskii A.V.; Kim V.Y.; Polimatidi V.P., “Rapid Variations in Electron Density Profiles in the Ionosphere Detected with the Izmiran High-Speed Ionosonde”, *Geomagn. Aeron.*, v.60, pp. 63–79, 2020. [CrossRef]
5. Vybornov F.I.; Mityakova E.E.; Rakhlin A.V.; Krupenya N.D., “Analysis of appearance of moving ionospheric disturbances of the “sickle” type at middle latitudes”, *Radiophys. Quantum Electron*, v.40, pp. 980–986, 1997. [CrossRef]
6. Vertogradov G.G.; Uryadov V.P.; Vybornov F.I.; Pershin A.V., “Modeling of Decameter Radio Wave Propagation Under Conditions of a WaveLike Electron-Density Disturbance”, *Radiophys. Quantum Electron.*, v. 61, pp. 407–417, 2018. [CrossRef]
7. Harris T.J.; Cervera M.A.; Meehan D.H., “SpICE: A program to study small-scale disturbances in the ionosphere”, *J. Geophys. Res.*, 117, A06321, 2012. [CrossRef]
8. Kurkin V.I.; Laryunin O.A.; Podlesny A.V.; Pezhemskaya M.D.; Chistyakova L.V., “Studying morphological characteristics of traveling ionospheric disturbances with the use of near-vertical ionospheric sounding data”, *Atmos. Ocean. Opt.*, v. 27, pp. 303–309, 2014. [CrossRef]
9. Bakhmet’eva N.V.; Belikovich V.V.; Ignat’ev Y.A.; Ponyatov A.A., “Vertical motions in the lower ionosphere and a sporadic E layer”, *Radiophys. Quantum Electron.*, v. 42, pp. 22–30, 1999. [CrossRef]
10. Frolov V.L.; Bakhmet’eva N.V.; Belikovich V.V.; Vertogradov G.G.; Vertogradov V.G.; Komrakov G.P.; Kotik D.S.; Mityakov N.A.; Polyakov S.V.; Rapoport V.O., et al., “Modification of the earth’s ionosphere by high-power high-frequency radio waves”, *Phys.-Uspekhi*, v. 50, pp. 315–324, 2007 [CrossRef]