

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2018.03.010>

УДК 550.385.37; 550.388

А. В. Зализовский¹, А. С. Кашеев^{1,2}, С. Б. Кашеев¹, А. В. Колосков¹,
В. Н. Лисаченко¹, В. В. Пазнухов³, И. И. Пикулик¹, А. А. Сопин¹, Ю. М. Ямпольский¹

¹ Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины, Харьков, Украина

² Международный центр теоретической физики имени Абдус Салама, Триест, Италия

³ Исследовательский институт при Бостон колледже, штат Массачусетс, США

МАКЕТ ПОРТАТИВНОГО КОГЕРЕНТНОГО ИОНОЗОНДА

В Радиоастрономическом институте Национальной академии наук Украины совместно с Международным центром теоретической физики имени Абдус Салама разработан экономичный портативный когерентный ионозонд на базе технологии программного радио. Первые лабораторные и полевые испытания нового ионозонда были проведены в Украине. В апреле 2017 г. система была введена в постоянную эксплуатацию на Украинской антарктической станции «Академик Вернадский». Описаны принципы построения ионозонда на уровне функциональной схемы, приведены его основные характеристики и примеры вертикального зондирования ионосферы в Украине и Антарктике. В качестве демонстрации успешного испытания ионозонда представлены ионограммы вертикального зондирования, а также суточные высотные зависимости плазменных частот, доплеровских смещений частоты и интенсивностей зондирующих сигналов. Низкая цена и простота в обслуживании разработанного ионозонда может позволить в будущем установить значительное число систем, обеспечивающих высокое пространственное разрешение, недоступное ни в одной из работающих на сегодня сетей ионозондов.

Ключевые слова: ионосфера, ионозонд, когерентное ВЧ-зондирование.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема исследования ионосферы возникла в начале 20-го века с момента предсказания А. Хэвисайдом и О. Кеннели формирования ионизированного слоя на высотах больше 100 км в верхней атмосфере. Впервые экспериментально ее существование в 1926 г. подтвердил профессор Э. Апплетон. По существу это были первые в мире радиолокационные эксперименты. В этом же году Г. Брейт и М. Тьюве использовали импульсную технику измерения высоты отражения пробных сигналов от разных ионосферных сло-

ев в зависимости от частоты излучающего передатчика. Принято считать, что именно с этого времени началось развитие методов радиодиагностики ионосферы [6]. Следует отметить, что за открытие ионосферы в 1947 г. Э. Апплетон был удостоен Нобелевской премии по физике. Поскольку собственные плазменные частоты наиболее интенсивного и протяженного по высоте F-слоя варьируют от единиц до десятка мегагерц, оптимальным для радиозондирования ионосферы является высокочастотный (ВЧ) диапазон. Самый распространенный метод диагностики носит название вертикального зондирования ионосферы (ВЗИ), а установки для его реализации называются ионозондами. Ионозонды представляют собой классические радары, регистрирующие время задержки сигналов, отраженных от

© А. В. ЗАЛИЗОВСКИЙ, А. С. КАШЕЕВ, С. Б. КАШЕЕВ,
А. В. КОЛОСКОВ, В. Н. ЛИСАЧЕНКО, В. В. ПАЗНУХОВ,
И. И. ПИКУЛИК, А. А. СОПИН, Ю. М. ЯМПОЛЬСКИЙ, 2018

ионосферы, в зависимости от несущей частоты излучения.

Почти за вековую историю ионозондов было создано множество их модификаций, использующих различные виды приемно-передающих устройств, разные типы модуляции, обработки и визуализации данных, однако основная информационная цель осталась неизменной. Основным результатом метода ВЗИ является высотнo-частотная характеристика (ВЧХ), или ионограмма, представляющая собой частотную зависимость действующей высоты отражения пробного сигнала от ионосферы. Развитие современных высокостабильных когерентных приемно-передающих устройств и компьютерных систем обработки радиолокационных данных, кроме ВЧХ позволяет восстанавливать доплеровские смещения частоты отраженных сигналов, и следовательно, оценивать вертикальную составляющую скорости движения ионосферной плазмы. Пространственное разнесение приемных позиций дает возможность измерять отклонение направления прихода пробного сигнала от ожидаемого и оценивать величину горизонтальных градиентов электронной концентрации. На сегодня наиболее современным и распространенным ионозондом является «дигизонд» DPS4D (Digisonde-Portable-Sounder-4D) [12], разработанный под руководством профессора Б. Райниша в Центре атмосферных исследований Массачусетского университета (г. Лоуэлл, США). В настоящее время на земном шаре работает сеть, включающая более ста «дигизондов», объединенных в Глобальную ионосферную радиобсерваторию — GIRO (Global Ionosphere Radio Observatory) [13]. Несмотря на такую, казалось бы, развитую сеть станций ВЗИ, для многих научных и прикладных задач получаемой сегодня ионосферной информации недостаточно. Прежде всего это связано с ограниченным пространственно-временным разрешением данных. Станции GIRO на земном шаре расположены крайне неравномерно, характерный пространственный разнос между ними варьирует от сотен до нескольких тысяч километров. Глобальные ионосферные карты, представляемые этой виртуальной обсерваторией, «сглажены» сплайно-

выми функциям с грубым пространственным разрешением. Стандартный темп съема ионограмм составляет 15 мин. Поэтому имеющаяся ионосферная информация применима только для «медленных» и крупномасштабных изменений, таких как регулярные сезонные и суточные вариации плазменных характеристик либо глобальные возмущения. Для многочисленных научных и прикладных задач требуется либо еще более разветвленная мировая сеть, либо региональные системы ионосферного зондирования.

На сегодняшний день на территории Украины нет регулярно работающей станции ВЗИ. Исследовательские установки, имеющиеся на обсерваториях Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина и Института ионосферы Национальной академии наук Украины и Министерства образования и науки Украины, морально и физически устарели и не могут быть использованы в непрерывном режиме для диагностики ионосферы. Единственный «украинский» штатный ионозонд (IPS-42, австралийского производства, 1982 г. выпуска), регулярно работающий в режиме 15-минутного зондирования, находится на Украинской антарктической станции (УАС) «Академик Вернадский». Эта установка также давно устарела, и в процессе эксплуатации регулярно требует ремонта. Ближайшие к территории Украины современные станции ВЗИ находятся на больших расстояниях (порядка 1000 км) в Праге и в Москве. Учитывая активные украинские наземно-космические программы и перспективные проекты по исследованию геокосмоса, развитию спутниковых технологий в области навигации, связи и информации, назрела необходимость создания национальных установок зондирования ионосферы. К сожалению, сегодня ни одно из ведомств Украины, заинтересованных в информации об ионосфере, не располагает финансовыми ресурсами для приобретения хотя бы одного современного «дигизонда» (его стоимость составляет более 200 тыс. долларов США). В связи с этим в Радиоастрономическом институте Национальной академии наук Украины (РИ НАН Украины) в рамках двух научных программ (Государственной программы исследований Украины в Ан-

тарктике и Целевой научной программы НАН Украины по космическим исследованиям) совместно с Международным центром теоретической физики имени Абдус Салама проведены работы по созданию экономичного портативного современного ВЧ-комплекса когерентного зондирования ионосферы.

Разработанный комплекс позволяет проводить ионосферную диагностику в непрерывном режиме и не требует больших финансовых затрат. Ближайшими целями для его практического использования является эксплуатация на УАС «Академик Вернадский», а также оснащение аналогичными установками нескольких обсерваторий в Украине для создания системы подспутникового ионосферного мониторинга (СПИМ) и информационного обеспечения национального Центра космической погоды.

При создании макета комплекса для расширения его диагностических возможностей применены оригинальные методы частотно-углового зондирования [4], многопозиционной доплероскопии ионосферы [15] и частотно-временной селекции [2, 3], ранее разработанные в РИ НАН Украины.

МАКЕТ ПОРТАТИВНОГО КОГЕРЕНТНОГО ИОНОЗОНДА

Основным назначением разработанного когерентного ионозонда является измерение ВЧХ ионосферы для расчета профиля электронной концентрации. Кроме этого, он позволяет измерять вертикальную составляющую скорости движения областей отражения зондирующего сигнала на разных частотах в широком интервале высот.

Принцип построения ионозонда основан на идеях, заложенных в конструкцию аналогичных современных устройств, в частности дигизонда DPS4 [14], а также на использовании технологии программного радио SDR (Software Defined Radio) для ионосферного зондирования [11]. Основным отличием данного комплекса от разработанных ранее аналогов является применение связного передатчика сравнительно малой мощности. Достаточные для проведения измерений значения соотношения сигнал/шум на выходе комплекса и разрешающей способности

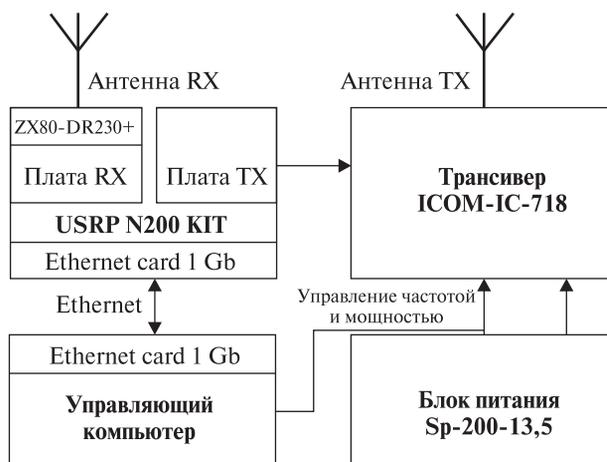


Рис. 1. Блок-схема макета ионозонда

по высоте обеспечиваются за счёт применения длинных фазоманипулированных зондирующих импульсов, их последующей цифровой свертке с опорными кодовыми последовательностями и доплеровской фильтрации, в ходе которой когерентно обрабатываются и накапливаются несколько кодовых посылок на каждой частоте зондирования. Функции обработки и анализа сигналов осуществляются с помощью персонального компьютера (ПК). Аналоговая часть устройства существенно упрощена за счет использования стандартных маломощного связного передатчика и программного радио (SDR) с широкой полосой пропускания. Использование таких серийных устройств значительно снизило себестоимость созданного макета ионозонда.

Функционально ионозонд состоит из управляющего компьютера, программного радио USRP N200 KIT (Universal Software Radio Peripheral) [<https://www.ettus.com/product/details/UN200-KIT>], антенного коммутатора ZX80-DR230+ [<https://ww2.minicircuits.com/pdfs/ZX80-DR230+.pdf>] и трансивера ICOM-IC-718 [9] с блоком питания SP-200-13,5 (рис. 1).

Установка функционирует следующим образом. В управляющем ПК на каждой частоте зондирования формируются пробные импульсы, состоящие из последовательности фазоманипулированных субимпульсов («chirps»). Для генерации субимпульсов используются комплементарные коды [7], которые обеспечивают необхо-

димое высотное разрешение, соответствующее длине одного субимпульса. Такая кодировка улучшает соотношение сигнал/шум пропорционально количеству субимпульсов («битности») кода. В программном радио USRP с помощью цифроаналогового преобразователя эта последовательность преобразуется в аналоговый сигнал, усиливается до необходимого уровня на плате TX и, после усиления трансивером ICOM, подается на передающую антенну. Отраженный от ионосферы сигнал поступает на приёмную антенну, а с нее — на приёмную плату RX устройства USRP, где он усиливается до уровня входных напряжений АЦП. После оцифровки принятый сигнал поступает в ПК, который выполняет функции управления программным радио, формирования и обработки сигналов, отображения и сбора данных, их хранения и анализа.

Основные технические параметры комплекса зондирования ионосферы (без характеристик антенно-фидерной системы) следующие:

диапазон рабочих частот, МГц	1.6...30
диапазон измеряемых высот, км	90...825
разрешающая способность по высоте, км	1.4
максимальная мощность излучения передатчика в импульсе, Вт	100
фиксированная длительность одиночной кодовой посылки, мс.	0.6
количество элементарных субимпульсов в одной кодовой посылке изменяется ступенчато	от 4 до 64 ($2n, n = 2...6$)
количество кодовых посылок на одной частоте в режиме ионозонда	от 1 до 250
потребляемая мощность, Вт	250
вес, кг	10
требования к управляющему компьютеру:	
наличие сетевого адаптера 1Gb Ethernet	

Как видно из рис. 1 для выполнения зондирования требуется две антенны: приемная и передающая. На практике могут использоваться антенны различных типов с рабочей полосой частот 1.6...30 МГц. Для передающей антенны допустимая входная мощность должна быть больше 100 Вт, а коэффициент стоячей волны (КСВ) в антенно-фидерном тракте не должен превышать 2.5.

Параметры режима получения ионограммы могут варьироваться в широких пределах и вы-

бираются в зависимости от внешних условий и поставленной задачи. Определяющим параметром зондирования является количество пробных частот. Его увеличение повышает качество ионограмм и точность определения критических частот ионосферных слоев. Однако при этом возрастает время получения ВЧХ, поэтому выбор числа частот зондирования зависит от заданного темпа построения ионограммы в целом или детализации какого-либо ее высотного фрагмента. Удобство компьютерного управления режимом излучения состоит также в задании неэквидистантного шага по частоте, что позволяет, например, более подробно исследовать ВЧХ конкретных ионосферных областей. Возможность быстрой смены сетки частот зондирования позволяет адаптировать ионозонд к помеховой обстановке в месте его расположения.

Следующим важным параметром режима работы является количество элементарных субимпульсов в одной посылке. Применение коротких субимпульсов позволяет повысить разрешающую способность по высоте отражения, однако при этом расширяется спектр зондирующего сигнала. В диспергирующей среде это может приводить к уменьшению спектральной плотности отражённого широкополосного сигнала. Кроме того, увеличение полосы сигнала, при неизменной мощности излучения, приводит к уменьшению соотношения с/ш.

Увеличение числа когерентных накоплений кодовых посылок на одной частоте приводит к улучшению отношения с/ш и повышению точности измерений. При этом длительность полного цикла зондирования, равная произведению времени измерения на одной частоте на число частот, увеличивается, что может быть неприемлемо для исследования достаточно быстрых ионосферных процессов. Для оценки скорости движения плазмы в ионосфере предусматривается режим излучения с уменьшением числа зондирующих частот. В этом случае результатом зондирования является высотная зависимость доплеровского смещения частоты (ДСЧ) — «доплерограмма». Время накопления принятого сигнала на каждой фиксированной частоте определяет спектральное разрешение и, как следствие,

точность оценки скорости движения. Практика исследований нестационарных процессов в ионосфере показывает, что оптимальным частотным разрешением является 0.1 Гц (длительность накопления 10 с).

Восстановление ионограмм/доплерограмм осуществляется с помощью оригинального пакета прикладных программ, который работает согласно следующему алгоритму. На каждой частоте зондирования рассчитывается функция корреляции принятого и излученного сигналов. После этого для каждой высоты зондирования рассчитывается спектр последовательности значений корреляционной функции, из которого определяется спектральная составляющая с максимальной амплитудой. Амплитуды и частоты таких спектральных составляющих для разных высот представляют собой высотно-частотные распределения интенсивности и ДСЧ отраженного сигнала, т. е. ионограммы и доплерограммы. Результаты такой обработки и параметры, с которыми выполнялось зондирование (частоты и высоты зондирования, число усредняемых кодовых посылок и «битность» кода), записываются на жесткий диск компьютера как текстовые файлы ионограмм (ion) и доплерограмм (dop). Кроме того, ионограммы и доплерограммы визуализируются в виде цветных изображений и сохраняются в графическом формате (png). Примеры ионограмм и доплерограмм будут приведены ниже.

Заметим, что рассмотренный выше алгоритм позволяет легко модифицировать любые параметры зондирования. Для обеспечения циклограммы мониторинговых измерений разработано программное обеспечение автоматического вызова приложений зондирования и обработки данных с заданной периодичностью. При этом стандартный цикл получения ионограмм составляет 15 мин, а доплерограмм — 5 мин. Последнее значение выбрано для обеспечения диагностики перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), связанных с распространением атмосферных гравитационных волн (АГВ), периоды которых превышают обратное значение частоты отсечки Брента — Вьясяля (для F-области ионосферы — это примерно 10 мин). Тестовые испытания ионозонда позволили оценить опти-

мальные параметры для выполнения зондирования. Для построения достаточно подробных ионограмм — это 200 зондирующих частот и 100 кодовых посылок на каждой частоте. В таком случае время получения ионограммы составляет около трех минут. Меньшее количество частот ухудшает детализацию структуры ионосферных слоев, а увеличение времени усреднения не приводит к существенному улучшению соотношения с/ш из-за частичной потери когерентности ионосферного сигнала, и неоправданно удлиняет время получения ионограммы. Для доплерограммы используется 25 частот зондирования и 1500 посылок на каждой частоте. При этом время получения каждой доплерограммы составляет около 4 мин, а доплеровское разрешение — около 0.1 Гц. Данные параметры были апробированы при проведении зондирований ионосферы в течение нескольких полных суток и построении суточных распределений высот ионосферных слоев и скоростей их вертикального движения. Для наглядного отображения временных изменений параметров ионосферы было разработано программное обеспечение, позволяющее проводить визуализацию ВЧХ в виде вариаций информационного параметра в координатах время — высота («Sky-maps»). Информационным параметром Sky-map при классическом ВЗИ являются высотно-временные зависимости частот отражения зондирующих сигналов. В случае, если на выходе ионозонда сохранена информация о мощности отраженного сигнала, появляется возможность получать зависимости высотно-временных вариаций мощности в полосе зондирующих частот, так называемые НТИ-диаграммы (Height-Time-Intensity) [8]. Для когерентного зондирования существенным преимуществом является возможность визуализации высотно-временных вариаций скоростей изменения фазовых путей сигналов зондирования, которые легко оцениваются по ДСЧ. Получаемые таким образом вариации ДСЧ на разных высотах отражения позволяют получить информацию о высотном профиле движений в ионосфере. Поскольку при пространственном разнесении приемных позиций основными диагностическими параметрами также являются значе-

ния ДСЧ в каждом пункте наблюдений, появляется возможность объединения метода ВЗИ с многопозиционным доплеровским зондированием. Такая комбинация двух методов диагностики ионосферы является продуктивной, например, для восстановления трехмерной структуры АГВ/ПИВ.

КОМПЛЕКС МНОГОПОЗИЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Целью многопозиционного зондирования ионосферы является восстановление пространственно-временной структуры ионосферных неоднородностей. Решение такой задачи реализуется измерением временных задержек или фазовых сдвигов между вариациями информационных параметров в пространственно-разнесенных точках как по высоте (режим ВЗИ), так и в горизонтальной плоскости.

Разработанный в РИ НАН Украины когерентный комплекс ВЧ-зондирования позволяет проводить диагностику ионосферы в трех режимах:

- измерение высотного профиля электронной концентрации (ВЗИ),
- многочастотное вертикальное доплеровское зондирование ионосферы,
- многопозиционное многочастотное доплеровское зондирование ионосферы на наклонных радиоперелиниях.

Комплекс состоит из четырех модулей: одного излучающего и трёх однотипных приёмных установок.

Как уже отмечалось выше, комплекс разработан на базе стандартных устройств, которые выпускаются серийно. Для проведения доплеровских измерений стабильность частоты излучения передатчика обеспечивается опорным генератором, разработанным на базе термостатированного кварцевого осциллятора ОСХО 131-1000. Таким образом, достигается частотная нестабильность измерений не хуже $5 \cdot 10^{-10}$. В качестве передающей антенны может быть применена широкополосная антенна с вертикально ориентированной диаграммой направленности (ромбовидная, дельтаобразная, дипольная и т. д.). Передающий модуль может излучать в одном из трёх режимов:

- импульсное излучение с изменяющейся частотой (режим ионозонда),
- непрерывное/импульсное излучение на фиксированной частоте,
- параллельное непрерывное излучение на нескольких частотах.

Управление режимами работы может осуществляться вручную оператором, автоматически по заданному на локальном ПК расписанию или дистанционно по интернету.

Принцип работы передающего модуля аналогичен описанному выше принципу действия излучающего устройства ионозонда. Пространственно разнесенные приёмные модули состоят из цифрового приёмника WinRadio G-313i и компьютера. Для стабилизации частоты гетеродинов приёмника также применяется опорный генератор на базе кварцевого осциллятора ОСХО 131-1000. Для небольших пространственных разносов в квазивертикальном режиме зондирования в качестве приёмных антенн могут эффективно использоваться достаточно компактные рамочные антенны.

Приёмный модуль работает следующим образом. Аналоговый сигнал с антенны поступает на приёмник, фильтруется, переносится на промежуточную частоту, преобразовывается в цифровой вид и далее подаётся на компьютер. ПК обеспечивает управление работой модуля, выполняет экспресс-обработку сигналов, осуществляет отображение результатов зондирования и архивирование данных измерений. При наличии доступа к интернету в выносном пункте наблюдения всеми перечисленными функциями можно управлять дистанционно. Взаимная временная синхронизация работы пространственно разнесенных модулей осуществляется с помощью GPS-приемников.

Двухпозиционный комплекс когерентного ионосферного зондирования, разработанный по описанным выше принципам, создан в РИ НАН Украины и успешно эксплуатируется в Антарктиде, начиная с мая 2015 г. Его передающий модуль установлен в центральном здании Украинской антарктической станции (УАС) «Академик Вернадский». На расстоянии примерно 500 м от передатчика расположен первый приёмный мо-

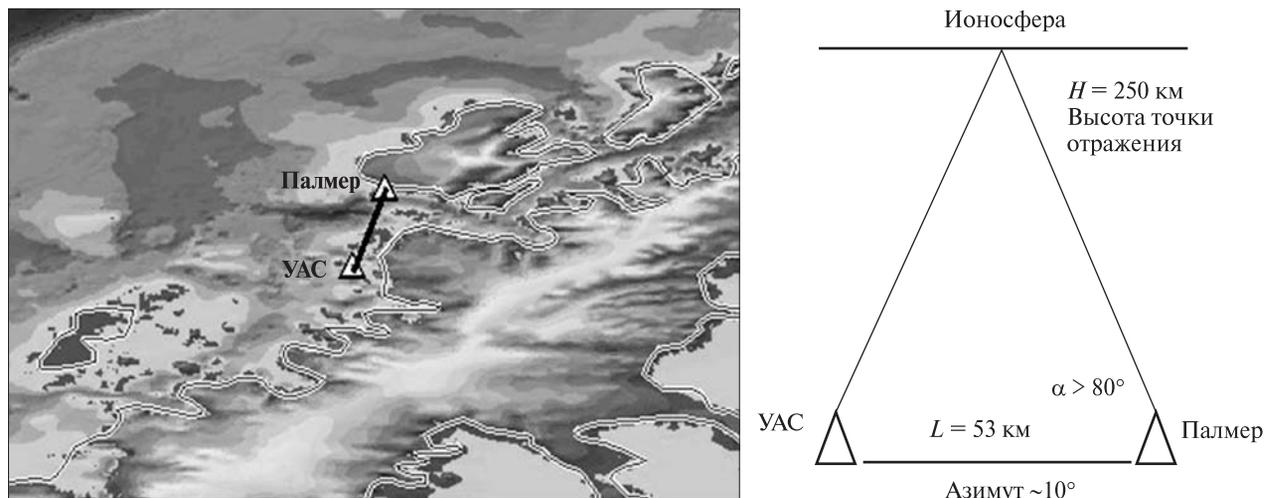


Рис. 2. Схема доплеровского ВЧ-зондирования ионосферы в Антарктике

дуль. Второй приёмный модуль двухпозиционной системы зондирования создан и эксплуатируется коллегами из Исследовательского института при Бостон-колледже (Institute for Scientific Research at Boston College, Mass. USA). Он расположен на американской антарктической станции «Палмер». Расстояние между приёмной и передающей позициями по поверхности Земли составляет около 53 км и 26.5 км — между точками отражения в ионосфере (рис. 2).

На станции «Палмер» установлен модуль, содержащий три независимых АЦП, а его антенно-фидерная система состоит из трёх рамочных антенн, разнесённых друг относительно друга на несколько десятков метров. С использованием метода частотно-углового зондирования ионосферы [5] на этом трёхканальном приёмном комплексе можно восстанавливать не только доплеровские спектры отражённого от ионосферы сигнала, но и вариации углов прихода.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ КОГЕРЕНТНОГО ИОНОЗОНДА

Первые полевые испытания макета ионозонда были проведены с различными антенными системами. Наиболее простым и бюджетным решением, пригодным для создания мобильных комплексов, является использование стандартных радилюбительских петлевых дипольных антенн класса ICOM АН-710 [<http://www.icom.co.jp/>

[world/support/download/manual/pdf/АН-710.pdf](http://www.icom.co.jp/world/support/download/manual/pdf/АН-710.pdf)]. В то же время эффективность таких антенн уступает антеннам бегущей волны, которые обычно применяются в серийно выпускаемых ионозондах. Тестовые измерения показали, что при использовании ICOM АН-710 для получения ионограмм требуется накапливать 200 или более зондирующих импульсов. Это приемлемо для измерений в доплеровском режиме, однако в режиме ионограмм приводит к увеличению времени зондирования до 6 мин, либо к уменьшению числа рабочих частот и получению недостаточно детальных ВЧХ. Поэтому основной объём тестовых измерений был выполнен на штатных антеннах ионозонда IPS-42 [10], размещённого на УАС, и с помощью антенн ионосферной станции «Базис» Института ионосферы НАН Украины и МОН Украины [1].

На Украинской антарктической станции измерения проводились во время сезонных работ 22-й Украинской антарктической экспедиции в марте — апреле 2017 г. Для тестирования нового комплекса был организован режим автоматического последовательного восстановления ВЧХ штатным ионозондом IPS-42 и макетом нового ионозонда. Ионограммы, полученные практически одновременно двумя устройствами, приводились к идентичным диапазонам высот отражения и частот зондирования и отображались для сравнительного анализа с одинаково-

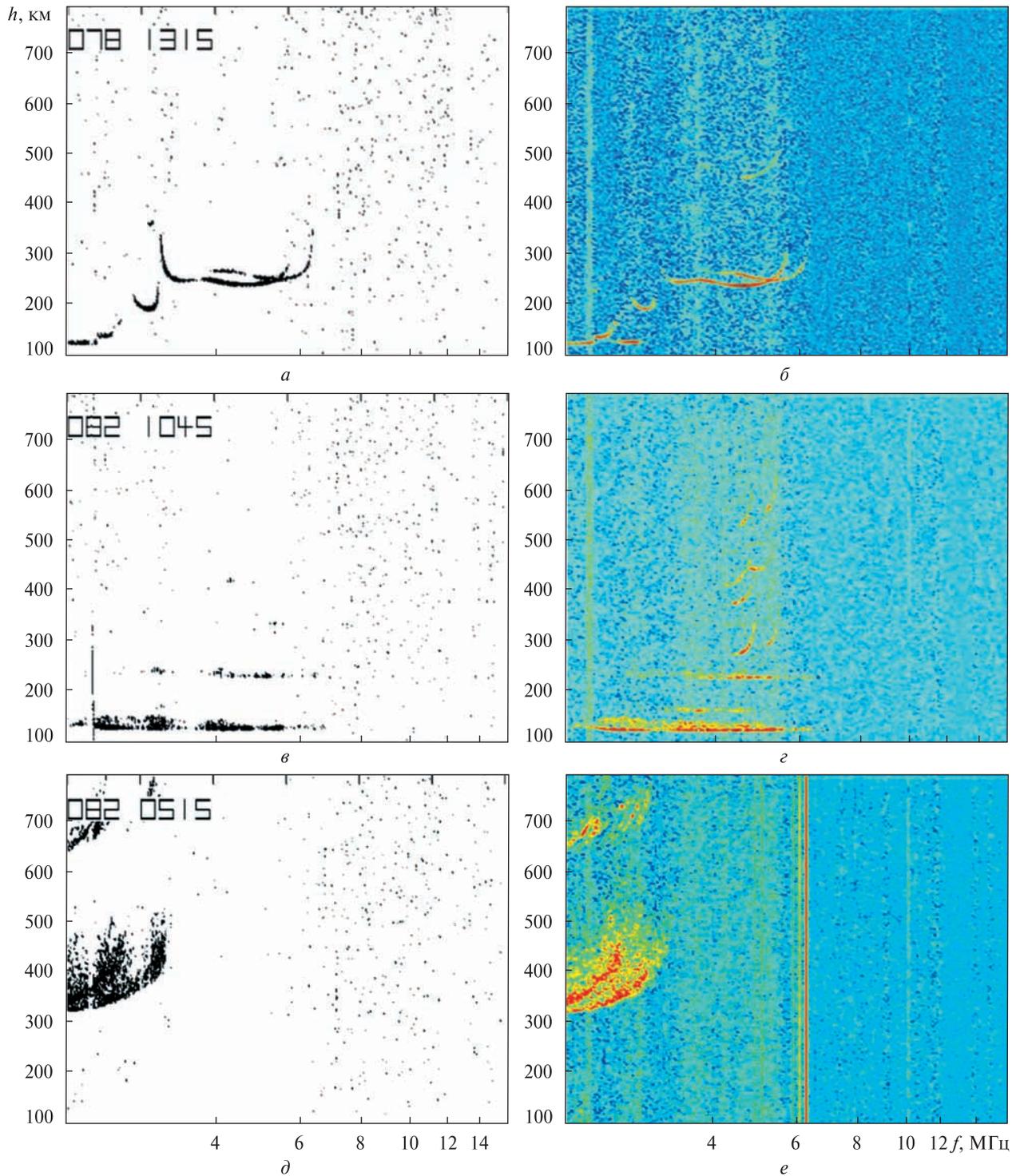


Рис. 3. Сопоставление ионограмм, полученных ионозондом IPS-42 (слева) и макетом ионозонда РИ НАН Украины (справа) для условий: *a, б* — спокойной дневной ионосферы; *в, з* — при наличии экранирующего спорадического слоя Es; *д, е* — при наличии эффекта F-рассеяния. На ионограммах IPS-42 указан номер дня 2017 г. и локальное время зондирования

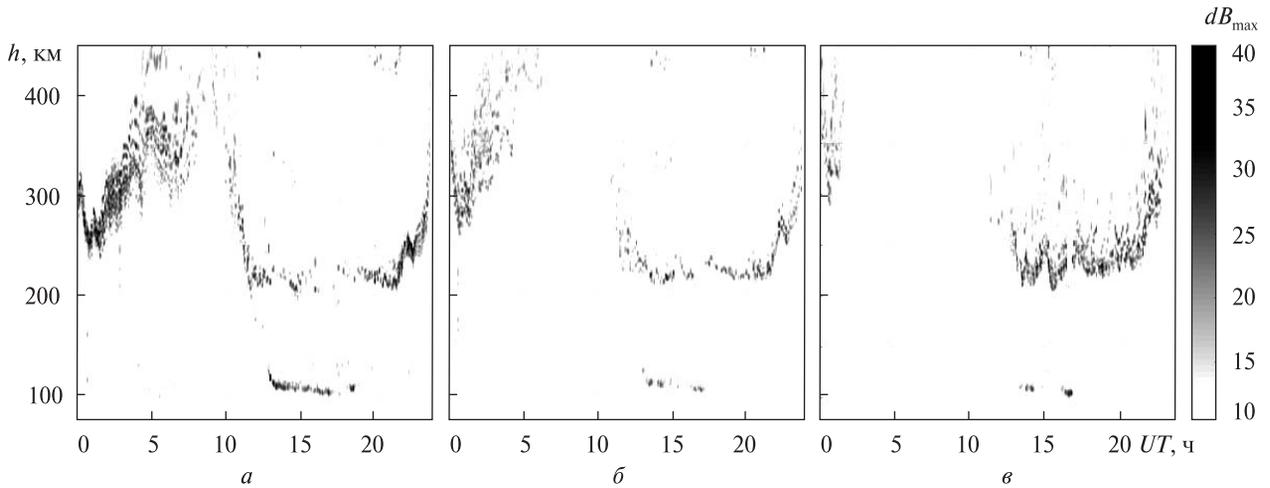


Рис. 4. Примеры ИТІ-диаграмм для 8 апреля 2017 г. в полосах зондирующих частот: а – 1...3 МГц, б – 3...4 МГц, в – 4...10 МГц

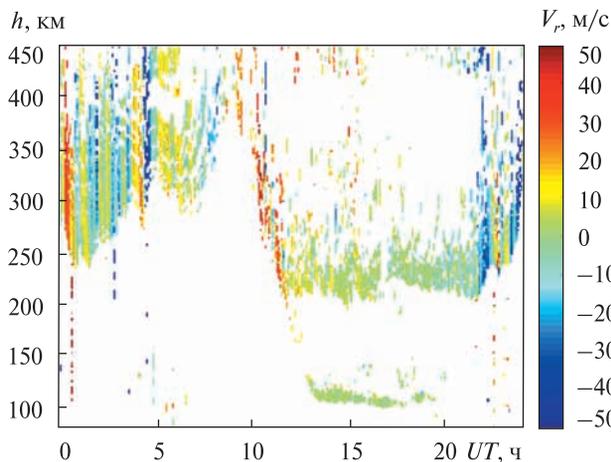
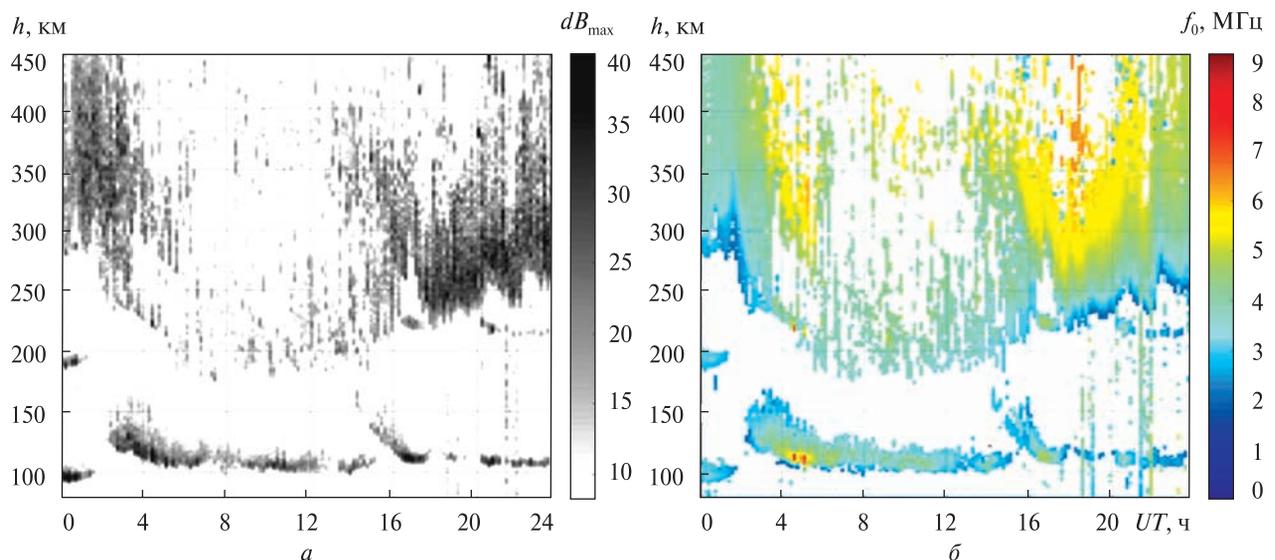


Рис. 5. Доплеровский «sky map», полученный на УАС 8 апреля 2017 г.

Рис. 6. Sky-maps-поведения интенсивности (а, $f_0 = 1...8$ МГц) и плазменных частот f_0 (б, $f_0 = 0...9$ МГц) отраженных сигналов над Харьковской областью 21 июня 2017 г.



выми масштабами, но в разных цветовых гаммах. Результаты совместных измерений продемонстрировали высокую степень подобия ионограмм, полученных с обоих устройств, вне зависимости от состояния ионосферы.

На рис. 3 представлены результаты сопоставления ионограмм для различных ионосферных условий. Ионограммы на рис. 3, *а, б* соответствуют спокойным дневным условиям, рис. 3, *в, г* демонстрируют ВЧХ при наличии экранирующего слоя Es, проявление эффекта F-рассеяния показано на рис. 3, *д, е*. Как наглядно видно из графического сопоставления результатов зондирования двумя устройствами, структуры ВЧХ практически идентичны. Незначительные фрагментарные отличия наблюдаются только для участков резких изменений электронной плотности. Несколько более четкая структура ВЧХ, восстановленная ионозондом IPS-42, объясняется использованием большего числа зондирующих частот (576) по сравнению с испытываемым макетом (200). В то же время видно, что ионозонд РИ НАН Украины позволяет лучше отождествлять ионосферные слои, экранируемые слоем Es, чем IPS-42 (рис. 3, *а—г*). Также следует учитывать, что ионограммы IPS-42 имеют всего две градации чувствительности, поскольку определяется только факт наличия отражения по превышению сигналом заданного порогового уровня.

Макет нового ионозонда измеряет мощность ионосферного сигнала в широком динамическом диапазоне, что позволяет более подробно восстановить высотную структуру отражений.

Таким образом, можно констатировать, что ионозонд разработки РИ НАН Украины при 30-кратном по отношению к IPS-42 уменьшении мощности излучения демонстрирует достаточно высокую эффективность ионосферной диагностики, экономичность изготовления и multifunctionality использования.

Как уже отмечалось, существенным преимуществом разработанного устройства является регистрация мощности отраженного сигнала. Это дает возможность построения высотно-временных зависимостей уровней отражений, так называемых НТИ-диаграмм (height-time-intensity) [8]. Диаграмма строится во всем диапазоне рабо-

чих частот зондирования на заданном временном интервале, например за сутки. Подобные зависимости позволяют обнаруживать квазипериодические вариации высот отражений, и следовательно, идентифицировать волновые возмущения. На рис. 4 показаны НТИ-диаграммы в разных полосах частот.

Как уже отмечалось, принципиальным преимуществом разработанного устройства является возможность определения вертикальных составляющих скорости движения отражающих областей. В качестве примера такого режима на рис. 5 представлено суточное высотно-временное распределение вертикальной скорости (доплеровская «sky map»).

Еще один комплект макета ионозонда прошел полевые испытания на обсерватории Института ионосферы Национальной академии наук Украины и Министерства образования и науки Украины, расположенной вблизи г. Змиев (Харьковская область). Измерения проводились во время летнего солнцестояния 2017 г. в течение трех суток (20, 21 и 22 июня). В качестве антенной системы использовались штатные приемная и передающая антенны серийного ионозонда «Базис». Зондирование выполнялось с шагом по времени 10 мин. Для этого эксперимента также рассчитывались суточные высотно-частотные зависимости ионосферных параметров, представленные на рис. 6. Наглядность такого представления результатов зондирования позволяет качественно анализировать динамические процессы в ионосфере регулярного и случайного характера, в частности выделять проявление эффектов ПИВ, развитие и релаксацию спорадических образований и других ионосферных возмущений.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в Радиоастрономическом институте Национальной академии наук Украины совместно с Международным центром теоретической физики разработан новый портативный когерентный ионозонд. Испытания двух идентичных макетов ионозонда в Антарктиде и в Украине показали надежность и эффективность его использования в полевых условиях. Макет может быть использован в качестве прототипа

при изготовлении малой серии ионозондов с целью их размещения на территории Украины.

Важным преимуществом по сравнению с современными зарубежными аналогами является комплектация приемной и передающей систем ионозонда стандартными серийными устройствами, что значительно уменьшает стоимость изготовления. Следует также отметить существенное снижение энергопотребления такого комплекса, что также является важным достоинством при его постоянной эксплуатации, особенно в Антарктике. Авторам представляется целесообразным оснащение подобными комплексами нескольких обсерваторий в Украине для создания национальных систем подспутникового ионосферного мониторинга и космической погоды.

Основные результаты, представленные в данной статье, получены в соответствии с «Целевой комплексной программой НАН Украины научных космических исследований» в ходе выполнения НИР «Лирус-3» (номер госрегистрации 0117U002393). Приобретение комплектующих для изготовления макета ионозонда и его испытания во время сезонной экспедиции 2017 г. на УАС «Академик Вернадский» были профинансированы Национальным антарктическим научным центром Украины в соответствии с «Государственной целевой научно-технической программой проведения исследований в Антарктике» в рамках НИР «Гелиомакс-17» (номер госрегистрации 0117U006837с). Разработки основных принципов построения ионозонда, пакетов прикладных программ регистрации и обработки данных зондирования выполнены при финансовой поддержке ведомственной НИР НАН Украины «Ятаган-3» (номер госрегистрации 0116U000035).

Авторы признательны сотрудникам Международного центра теоретической физики имени Абдуса Салама (г. Триест, Италия) Бруно Нава и Марко Зеннаро за возможность реализации лабораторного макета ионозонда, помощь в разработке его функциональной схемы, а также ценные консультации в области программных радио.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить зимовщиков 21-й и 22-й Украинской антарктической экспедиции О. В. Буданова и Б. Ю. Гаврилюка за помощь в установке оборудо-

вания на УАС и его техническое обслуживание. Мы также признательны сотрудникам Института ионосферы НАН Украины и МОН Украины, кафедры космической радиофизики Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина за предоставленную возможность испытания макета ионозонда на обсерваториях этих организаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Емельянов Л. Я., Кононенко А. А. Ионозонд «Базис» Института ионосферы как средство для мониторинга состояния ионосферы // Радиотехника. — 2011. — Вып. 167. — С. 30—33.
2. Зализовский А. В., Колосков А. В., Ямпольский Ю. М. Исследования в Антарктике частотно-временных характеристик ВЧ сигналов на сверхдлинных радиолниях // Укр. Антарктический журн. — 2015. — № 14. — С. 124—137.
3. Кащеев С. Б., Зализовский А. В., Сопин А. А., Пикулик И. И. О возможности бистатического ВЧ зондирования ионосферы сигналами точного времени // Радиофизика и радиоастрономия. — 2013. — № 1. — С. 34—42.
4. Beley V. S., Galushko V. G., Yampolski Y. M. Traveling ionospheric disturbance diagnostics using HF signal trajectory parameter variations // Radio Sci. — 1995. — 30, N 6. — P. 1739—1752.
5. Galushko V. G., Beley V. S., Koloskov A. V., Yampolski Yu. M., Reinisch B. W., Paznukhov V. V., Foster J. C., Erickson P. J. Frequency-and-Angular HF Sounding and VHF ISR Diagnostics of TIDs // Radio Sci. — 2003. — 38. — doi:10.1029/2002RS002861.
6. Gillmor C. S. The Big Story: Tuve, Breit, and Ionospheric Sounding, 1923—1928 // Book History of Geophysics: Vol. 5. The Earth, the Heavens and the Carnegie Institution of Washington / Ed. by G. A. Good. — 2013. — P. 133—141. — doi: 10.1029/HG005p0133.
7. Golay M. S. Complementary Codes // IRE Trans. Inform. Theory. — April 1961.
8. Haldoupis C., Meek C., Christakis N., Pancheva D., Bourdillon A. Ionogram height-time intensity observations of descending sporadic E layers at mid-latitude // J. Atmos. Sol. and Terr. Phys. — 2006. — 68. — P. 539—557.
9. HF fall band transceiver IC-718, A5649-1EX-10. — 2017. — 62 p.
10. IPS-42. Operating instructions and technical manual, KEL Aerospace Pty. Ltd. — 1982. — 137 p.
11. Morris A. Design of a flexible and low-power ionospheric sounder: A thesis in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science. — Fairbanks, Alaska, USA: University of Alaska Fairbanks, 2014.
12. Reinisch B. W., Galkin I. A., Khmyrov G. M., Kozlov A. V., Lisysyan I. A., Bibl K., Cheney G., Kitrosser D., Stelmash S., Roche K., Luo Y., Paznukhov V. V., Hamel R. Advancing digisonde technology: the DPS-4D // AIP Conf. Proc. 974. Radio Sounding and Plasma Phys. — 2008. — P. 127—143. — doi:10.1063/1.2885023.

13. Reinisch B. W., Galkin I. A. Global Ionospheric Radio Observatory (GIRO) // *Earth Planets and Space*. — 2011. — 63, N 4. — P. 377—381.
14. Reinisch B. et al. The digisonde portable sounder — DPS. Techn. manual. University of Massachusetts Lowell Center for Atmospheric Research. — 2007. — Version 4.3. — 404 p.
15. Zalizovskii A. V., Galushko V. G., Kashcheev A. S., Koloskov A. V., Yampolski Yu. M., Egorov I. B., Popov A. V. Doppler selection of HF radiosignals on long paths // *Geomagn. and Aeronomy*. — 2007. — 47, N 5. — P. 636—646. — doi: 10.1134/S001679320705012X.

Стаття надійшла до редакції 24.01.18

REFERENCES

1. Emel'yanov L. Y., Kononenko A. A. Ionosonde "Basis" Instituta ionosferi kak sredstvo dlya monitoringa sostojanija ionosferi. *Radiotekhnika*, **167**, 30—33 (2011) [in Russian].
2. Zalizovski A. V., Koloskov A. V., Yampolski Y. M. Studying in Antarctica the time-frequency characteristics of HF signals at the long radio paths. *Ukrainian Antarctic J.*, **14**, 124—137 (2015) [in Russian].
3. Kashcheyev S. B., Zalizovski A. V., Sopin A. A., Pikulik I. I. On the possibility of bistatic HF ionospheric sounding by exact time signals. *Radio Physics and Radio Astronomy*, **18** (1), 34—42 (2013) [in Russian].
4. Beley V. S., Galushko V. G., Yampolski Y. M. Traveling ionospheric disturbance diagnostics using HF signal trajectory parameter variations. *Radio Sci.*, **30** (6), 1739—1752 (1995).
5. Galushko V. G., Beley V. S., Koloskov A. V., Yampolski Yu. M., Reinisch B. W., Paznuhkov V. V., Foster J. C., Erickson P. J. Frequency-and-Angular HF Sounding and VHF ISR Diagnostics of TIDs. *Radio Sci.*, **38** (2003). — doi:10.1029/2002RS002861.
6. Gillmor C. S. History of Geophysics: Vol. 5. The Earth, the Heavens and the Carnegie Institution of Washington. The Chapter: The Big Story: Tuve, Breit, and Ionospheric Sounding, 1923—1928. Ed. by G. A. Good. (2013). — doi: 10.1029/HG005p0133.
7. Golay M. S. Complementary Codes, *IRE Trans. on Information Theory*, April 1961.
8. Haldoupis C., Meek C., Christakis N., Pancheva D., Bourdillon A. Ionogram height-time intensity observations of descending sporadic E layers at mid-latitude. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **68**, 539—557 (2006).
9. HF all band transceiver IC-718, A5649-1EX-10. 62 p. (2017).
10. IPS-42. Operating instructions and technical manual, KEL Aerospace Pty. Ltd. 137 p. (1982).
11. Morris A. Design of a flexible and low-power ionospheric sounder: A thesis in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science. University of Alaska Fairbanks, Fairbanks, Alaska, USA. (2014).
12. Reinisch B. W., Galkin I. A., Khmyrov G. M., Kozlov A. V., Lisysyan I. A., Bibl K., Cheney G., Kitrosser D., Stelmash S., Roche K., Luo Y., Paznuhkov V.V., Hamel R. Advancing digisonde technology: the DPS-4D. *AIP Conf. Proc.* 974. *Radio Sounding and Plasma Physics*, 127—143 (2008). — doi:10.1063/1.2885023.

13. Reinisch B. W., Galkin I. A. Global Ionospheric Radio Observatory (GIRO). *Earth Planets and Space*, **63** (4), 377—381 (2011).
14. Reinisch B. et al. The digisonde portable sounder — DPS. Technical manual. University of Massachusetts Lowell Center for Atmospheric Research. Version 4.3. — 404 p. (2007).
15. Zalizovskii A. V., Galushko V. G., Kashcheev A. S., Koloskov A. V., Yampolski Yu. M., Egorov I. B., Popov A. V. Doppler Selection of HF Radiosignals on Long Paths. *Geomagnetism and Aeronomy*, **47** (5), 636—646 (2007). — doi: 10.1134/S001679320705012X.

Received 24.01.18

А. В. Залізівський¹, А. С. Кащев^{1,2}, С. Б. Кащев¹,
О. В. Колосков¹, В. М. Лисаченко¹, В. В. Пазнухов³,
І. І. Пікулік¹, А. О. Сопін¹, Ю. М. Ямпольський¹

¹ Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України, Харків, Україна

² Міжнародний центр теоретичної фізики імені Абдус Салама, м. Трієст, Італія

³ Дослідницький інститут при Бостон коледжі, штат Массачусетс, США

МАКЕТ ПОРТАТИВНОГО КОГЕРЕНТНОГО ІОНОЗОНДА

Вертикальне зондування іоносфери (ВЗІ) — найстаріший та все ще один з найпоширеніших методів діагностики атмосферної плазми Землі. Сьогодні діє всесвітня мережа зондувальних станцій ВЗІ, розроблених різними дослідницькими групами; однак теперішнього покриття все ще недостатньо для сучасних наукових і експлуатаційних цілей. Це пов'язано, перш за все, з обмеженою часовою та просторовою роздільною здатністю наявних систем ВЗІ. Таким чином, побудова щільної глобальної мережі станцій ВЗІ з покращеними експлуатаційними характеристиками є важливою задачею для іоносферного співтовариства. Як країна з діючою програмою космічних досліджень, Україна матиме значні переваги від можливості отримувати в режимі реального часу дані про стан іоносфери, збурення якої впливають на якість зв'язку з супутниковими системами. На сьогоднішній день на території України немає жодної постійно діючої станції ВЗІ. Тому створення системи іоносферного зондування стане важливим кроком у розвитку національних космічних досліджень. Статтю присвячено розробці та створенню прототипу портативного цифрового іонозонда, який дозволяє провадити безперервну іоносферну діагностику без значних фінансових витрат. Розроблена система базується на технології радіосистем, що керуються програмно. Це надає розробці переваги високої експлуатаційної гнучкості, малого розміру, низького енергоспоживання та вартості. Так, система споживає

менше 50 Вт вхідної потужності. Значною перевагою є також використання фазово-імпульсної модуляції сигналів, що забезпечує додаткове поліпшення відношення сигнал/шум за рахунок використання методики стиснення довгих кодованих імпульсів. Таким чином, було розроблено прототип недорогого малопотужного портативного когерентного іонозонда. Перші лабораторні та польові випробування нового приладу були проведені в Україні та Антарктиці. У квітні 2017 року систему було встановлено на Українській антарктичній станції «Академік Вернадський» (УАС). Порівняння іонограм, отриманих на УАС за допомогою розробленого прототипу та традиційного аналогового іонозонда IPS-42, продемонстрували високу якість та вищу роздільну здатність нового інструмента ВЗІ. Стаття описує принципи роботи, функціональну схему та основні технічні характеристики іонозонда. Наведено також приклади іонограм, добових висотних залежностей плазмових частот іоносфери, доплерівських частотних зсувів та інтенсивностей відбитих сигналів зондування, що було отримано на УАС та поблизу Харкова. Перші результати випробувань двох однакових прототипів систем ВЗІ в Антарктиці та Україні показали надійність та ефективність їхнього застосування для діагностики іоносфери. Розроблена система може бути використана як базовий прототип для виготовлення обмеженої кількості іонозондів та їхньої установки в Україні. Важливими перевагами нової системи є її простота, низька собівартість виробництва та низьке енергоспоживання, що є найважливішим фактором для забезпечення безперервної експлуатації, особливо в таких віддалених місцях, як Антарктида. Автори рекомендують оснастити декілька обсерваторій в Україні розробленою системою зондування як перший крок до створення національної мережі моніторингу іоносферних умов та космічної погоди.

Ключові слова: іоносфера, іонозонд, когерентне ВЧ-зондування.

A. V. Zalizovskiy¹, A. S. Kashcheyev^{1,2}, S. B. Kashcheyev¹,
A. V. Koloskov¹, V. N. Lisachenko¹, V. V. Paznukhov³,
I. I. Pikulik¹, A. A. Sopin¹, Yu. M. Yampolski¹

¹ Institute of Radio Astronomy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

² The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Telecommunication/ICT for Development Laboratory, Trieste, Italy

³ Institute for Scientific Research, Boston College, 140 Commonwealth Ave., Chestnut Hill, MA 02467, US

A PROTOTYPE OF A PORTABLE COHERENT IONOSONDE MODEL

Vertical sounding of the ionosphere (VSI) is the oldest and still one of the most widely used methods of diagnostics of the Earth atmosphere's plasma. Today there exists a worldwide

network of the VSI sounders developed by different research groups; however, the existing coverage is still not sufficient for modern scientific and operational purposes. Primarily this is because of the limited temporal and spatial resolution provided by the available VSI systems. Thus, establishing a denser global network of the VSI stations with better operational characteristics is an important topic in the ionospheric community. Being a country with an active space research program, Ukraine will benefit from having near real-time specification of the state of the ionosphere, through which the communication with satellite systems is performed and which can be affected by the presence of the ionospheric disturbances. As of today, there is not a single routinely operating VSI system in Ukraine. Establishing a system of ionospheric monitoring will be an important step in advancing national space research. This paper deals with developing and prototyping of a portable digital ionosonde that allows carrying out continuous ionospheric diagnostics without significant financial expenditures. The designed system is based on the software-defined radio (SDR) technology which offers benefits of flexibility, small form factor, low power, and low cost. The system consumes less than 50 W of input power. Operation takes advantage of using the long phase coded transmit pulse, which provides additional SNR improvement by implementing a pulse compression technique. As a result, we developed a prototype of a low-cost, low-power portable coherent ionosonde. First laboratory and field tests of the new vertical sounder have been made in Ukraine and Antarctica. In April 2017, the system was installed at the Ukrainian Antarctic station «Akademik Vernadsky» (UAS). A comparison of the ionogram measurements made at the UAS with the developed prototype system and with a conventional analog ionosonde IPS-42 showed a high quality and higher resolution of the new VSI instrument. This paper describes the principles of operation, a functional diagram, and main technical characteristics of the ionosonde. We present also the examples of ionograms and diurnal altitude dependences of ionospheric plasma frequencies, Doppler frequency shifts and intensities of the reflected sounding signals from the measurements made at the UAS and near Kharkiv. The initial tests of two identical VSI system prototypes in Antarctica and Ukraine showed the reliability and efficiency of their application for the diagnostics of the ionosphere. The developed sounder can be used as a base prototype for manufacturing of a limited number of ionosondes and their installation in Ukraine. An important advantage of the new system is its simplicity, low production cost and low power consumption, which are the most critical factors for continuous operation, especially at the remote locations like Antarctica. The authors recommend equipping several observatories in Ukraine with this kind of sounding system as the first step towards establishing the National network for monitoring ionospheric conditions and space weather.

Keywords: ionosphere, ionosonde, coherent HF sounding.