

РАДИОФИЗИКА ГЕОКОСМОСА

УДК 550.388.2

А. В. КОЛОСКОВ¹, Ю. М. ЯМПОЛЬСКИЙ¹,
А. В. ЗАЛИЗОВСКИЙ¹, В. Г. ГАЛУШКО¹, А. С. КАЩЕЕВ¹,
С. ЛА ХОЗ², А. БРЕККЕ², В. С. БЕЛЕЙ², М. Т. РИТВЕЛД³

¹ Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: koloskov@rian.kharkov.ua

² Арктический Университет Норвегии (UiT),
N-9037, Тромсё, Норвегия
E-mail: cesar.la.hoz@uit.no

³ Научная Ассоциация EISCAT,
N-9027, Рамфьордмоен, Норвегия
E-mail: mike@eiscat.uit.no

СЕТЬ ИНТЕРНЕТ-УПРАВЛЯЕМЫХ ВЧ ПРИЕМНИКОВ ДЛЯ ИОНОСФЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Приведено описание сети ВЧ приемников, предназначенных для многопозиционного мониторинга ионосферы. В настоящее время она включает девять пунктов наблюдения, расположенных в высоких, средних и низких широтах обоих полушарий Земли. Базовыми элементами сети являются малоразмерные приемно-измерительные комплексы, созданные в Радиоастрономическом институте Национальной академии наук Украины (РИ НАНУ) на базе персонального компьютера, оборудованного серийными цифровыми приемными модулями. Разработанное авторами программное обеспечение позволяет осуществлять удаленное управление комплексами по сети Интернет. В качестве пробного излучения используются ВЧ сигналы специальных передатчиков и широкополосных радиостанций, которые обрабатываются с помощью алгоритмов доплеровской и импульсной селекции. При работе в режиме интернет-управления результаты наблюдений в реальном времени передаются на центральный сервер, где происходит их автоматическая обработка и отображение на веб-странице отдела Радиофизики геокосмоса РИ НАНУ. Приведены примеры использования результатов наблюдений, полученных при помощи сети ВЧ приемников, для диагностики динамических процессов в околоземной плазме. Продемонстрированы преимущества многопозиционного режима проведения исследований. Рассмотрена возможность модернизации приемных комплексов, в результате которой можно будет измерять углы прихода сигналов.

Ключевые слова: интернет-управление, сверхдальнее распространение радиоволн, доплеровское смещение частоты, импульсная селекция, ионосферная турбулентность, бриллюэновское рассеяние

1. Введение

Одним из эффективных способов исследования нестационарных (динамических) процессов в ионосфере является доплеровский метод [1–3]. В Радиоастрономическом институте Национальной академии наук Украины (РИ НАНУ) метод доплеровского зондирования ионосферной плазмы используется уже более 30 лет. С его помощью исследовано поведение спектров высокочастотных сигналов на радиотрассах различной ориен-

тации и протяженности, включая дальние и сверхдальние [4, 5], что позволило изучить характеристики различных естественных ионосферных процессов. К ним относятся перемещающиеся ионосферные возмущения [6, 7], плазменные неоднородности в высоких широтах, стимулированные авроральными активациями, градиенты электронной концентрации, вызванные прохождением солнечного терминатора и лунной тенью во время солнечного затмения [4, 8]. Спектральный анализ ВЧ сигналов на сверхдальней радиолинии позволил обнаружить природный эффект кросс-модуляции пробного излучения и шумановских резонансов СНЧ диапазона [9]. При исследовании

© А. В. Колосков, Ю. М. Ямпольский, А. В. Зализовский,
В. Г. Галушко, А. С. Кашеев, С. Ла Хоз, А. Брекке,
В. С. Белей, М. Т. Ритвелд, 2014

нелинейных эффектов, стимулированных в ионосферной плазме мощным электромагнитным излучением нагревных станций (НС), основное внимание уделялось изучению спектральных особенностей рассеяния ВЧ сигналов областью искусственной ионосферной турбулентности. В результате были изучены динамика стимулированных неоднородностей в режиме стационарного нагрева ионосферной плазмы [10], процессы релаксации, взаимодействие искусственных плазменных образований с крупномасштабными природными волновыми процессами [11]. Впервые были обнаружены и интерпретированы эффекты искусственного возбуждения геомагнитных пульсаций [12], “радиального дрейфа” неоднородностей в области нагрева [13], “саморассеяние” мощного сигнала на им же созданных плазменных возмущениях [14, 15].

Для доплеровской диагностики ионосферы в РИ НАНУ было разработано несколько поколений специальных приемных систем. В восьмидесятих годах прошлого столетия на Радиоастрономической обсерватории (РАО) им. С. Я. Брауде РИ НАНУ была установлена стационарная многоканальная когерентная приемная установка, с помощью которой удалось исследовать динамику многих ионосферных процессов [16]. Позднее было создано несколько мобильных приемных комплексов, успешно зарекомендовавших себя в ходе морской антарктической экспедиции [17] и затем установленных на Украинской антарктической станции (УАС) “Академик Вернадский” [18]. Разработанные в РИ НАНУ методики многопозиционной доплероскопии ионосферы позволяют использовать для диагностики не только специальные передатчики, но и многочисленные ширококвотельные ВЧ станции. По данным Международного союза электросвязи (International Telecommunication Union) в мире функционирует свыше 5000 вкательных передатчиков. Это дает возможность, используя уже существующие источники пробного излучения, проводить доплеровские измерения практически в любом регионе земного шара. Особый интерес представляют исследования в высоких широтах, где ионосфера характеризуется сильной изменчивостью, вызванной высыпаниями потоков высокоэнергичных заряженных частиц из радиационных поясов Земли. Как правило, во время авроральных активаций скорости движений плазменных неоднородностей

сильно возрастают и достигают сотен метров в секунду. Это в свою очередь приводит к значительному расширению доплеровского спектра отраженного или рассеянного пробного ВЧ сигнала. Высокоширотная ионосфера используется многими исследовательскими группами как “природная плазменная лаборатория”. В настоящее время три из пяти действующих НС расположены в полярных областях. Это HAARP (The High Frequency Active Auroral Research Program, мощность 3.6 МВт, координаты 62.4° с. ш., 145.2° з. д., Аляска, США), НС EISCAT (European Incoherent Scatter Scientific Association, мощность 1.2 МВт, 69.6° с. ш., 19.2° в. д., г. Тромсё, Норвегия), SPEAR (Space Plasma Exploration by Active Radar, мощность 190 кВт, 78.2° с. ш., 16.1° в. д., архипелаг Шпицберген). Одна из основных научных задач НС состоит в создании “управляемых” режимов генерации искусственной ионосферной турбулентности. Доплеровский метод ВЧ зондирования является эффективным способом экспериментального изучения динамики искусственной плазменной турбулентности и широко применяется на практике. В качестве зондирующих сигналов используется излучение пробных ВЧ передатчиков [10, 13] и самих НС [14, 15]. Отметим, что информативность доплеровского метода существенно возрастает в случае применения нескольких пространственно-разнесенных приемных пунктов, объединенных в единую сеть. Опыт, накопленный в РИ НАНУ, и возможности современных компьютерных и сетевых технологий позволили разработать оригинальный компактный доплеровский приемно-измерительный комплекс (ПИК) на основе цифрового приемника фирмы WinRadio Communications. Первый опытный образец ПИК начал эксплуатироваться в 2006 г. на УАС. В 2007 г. в рамках программы “Ассоциированного членства Украины в EISCAT” аналогичный ПИК был установлен в обсерватории им. Кйелла Хенриксена (КХО) на острове Свалбард (архипелаг Шпицберген) [19]. В настоящее время создана сеть из девяти пространственно-разнесенных приемных ВЧ комплексов, расположенных в высоких, средних и низких широтах, четыре из которых работают в режиме дистанционного интернет-управления. Результаты наблюдений с помощью этих установок автоматически обрабатываются и отображаются на веб-странице Отдела радиофизики геокосмоса РИ НАНУ [20].

Настоящая работа посвящена описанию аппаратного и программного обеспечения ПИК. Рассмотрены принципы построения сети многопозиционной доплеровской диагностики ионосферы, интернет-управления, трансляции, автоматической обработки и визуализации данных наблюдений. Продемонстрирована возможность применения комплексов для исследования различных природных и искусственно стимулированных динамических процессов в околосферной плазме. Рассмотрены перспективы развития сети, модернизации аппаратуры и методик обработки данных измерений.

2. Аппаратное обеспечение ПИК и программа сбора данных

При создании ПИК учитывались следующие требования. Устройство должно быть малоразмерным и мобильным с небольшим энергопотреблением и сравнительно невысокой стоимостью. Кроме того, необходимо обеспечить реализацию принципов цифрового управления, записи и доступа к данным наблюдений, совместимость с персональным компьютером (ПК) и пригодность для длительной автономной работы. Чтобы удовлетворить этим требованиям, аппаратная часть ПИК была создана на базе стандартного ПК, работающего под управлением операционной системы Windows XP/7/8 и серийно выпускаемых компо-

нентов. Все модули ПИК, кроме приемной антенны, смонтированы внутри системного блока компьютера, что обеспечивает компактность устройства. Возможности цифрового управления, записи и доступа к данным реализованы с помощью программного обеспечения (ПО), разработанного авторами. Регистрацию ВЧ сигналов обеспечивают цифровые приемные модули WR-G313i фирмы WinRadio Communications [21]. В корпус ПК может быть установлено до трех устройств WR-G313i, что позволяет организовать столько же приемных каналов. Аппаратная часть комплекса включает также высокостабильный генератор опорной частоты 10 МГц и систему временной синхронизации данных на базе приемника GPS. Ниже рассмотрим более подробно каждый модуль комплекса.

Приемный модуль WR-G313i представляет собой плату форм-фактора PCI, подключаемую к слоту расширения материнской платы настольного ПК. Функциональная схема WR-G313i представлена на рис. 1. Приемник WR-G313i реализован по супергетеродинной схеме с двумя аппаратными преобразованиями частоты. Третье преобразование является полностью цифровым и осуществляется при помощи встроенного сигнального процессора, предназначенного для демодуляции и передачи волновой формы сигнала в память ПК. Такая схема регистрации не ис-

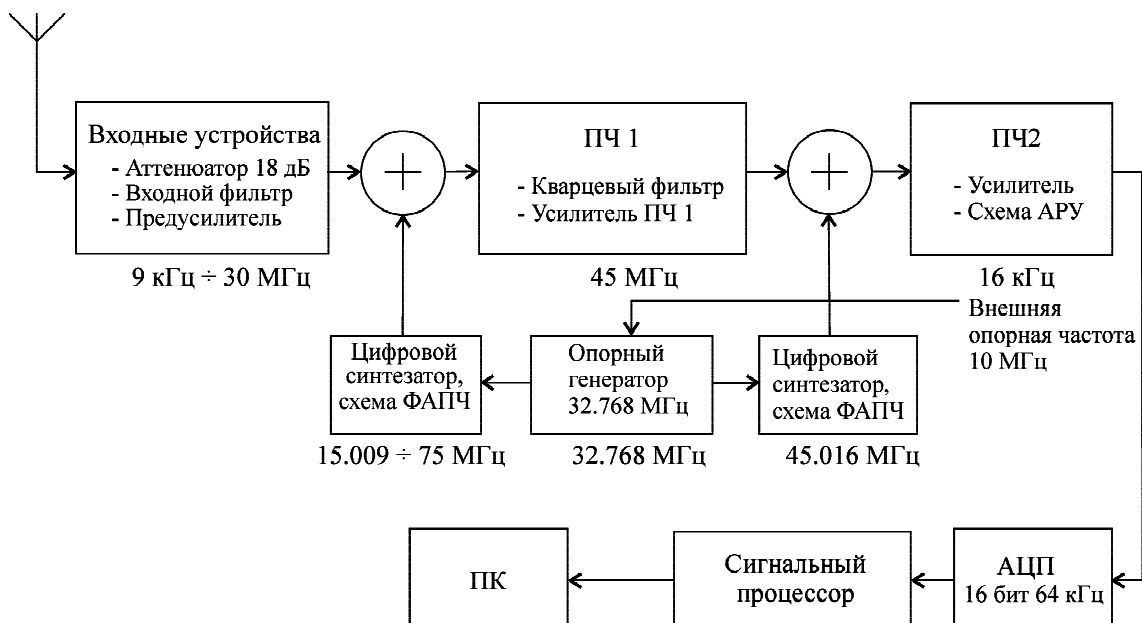


Рис. 1. Функциональная схема цифрового приемного модуля WR-G313i

пользует вычислительные ресурсы компьютера и позволяет реализовать многоканальный ПИК на базе ПК средней производительности. Диапазон рабочих частот приемника $9 \text{ кГц} \div 30 \text{ МГц}$. Основные технические характеристики WR-G313i приведены в табл. 1.

В качестве генератора опорной частоты 10 МГц используется термостабилизированный кварцевый осциллятор ОСХО 131-1000 фирмы Isotemp Research inc., относительная нестабильность которого не хуже 10^{-8} . Более подробно характеристики осциллятора описаны в [22]. Следует отметить, что аналого-цифровой преобразователь (АЦП) приемника WR G-313i не имеет внешнего запуска. Поэтому для временной синхронизации пространственно-разнесенных пунктов и привязки получаемых данных к единой шкале времени была разработана схема записи импульсов точного времени GPS приемника (импульсы PPS) непосредственно в файлы данных. Алгоритм работы системы синхронизации подробно изложен в [23].

В типовом ПИК используется активная рамочная антенна диаметром 1.5 м с широкополосным антенным усилителем. Коэффициент усиления составляет $\sim 20 \text{ дБ}$ в диапазоне частот $3 \div 15 \text{ МГц}$. Рамочная антенна вместе с усилителем выполнена в герметичном варианте, что позволяет ее использовать в сложных климатических условиях. Возможна также установка антенн других типов (горизонтальный диполь, вертикальная штыревая антенна и др.).

Таблица 1. Технические характеристики приемника WR-G313i

Диапазон рабочих частот	$9 \text{ кГц} \div 30 \text{ МГц}$
Точность настройки частоты	1 Гц
Динамический диапазон	90 дБ (108 дБ с учетом аттенюатора)
Чувствительность	0.05 мкВ
Рабочие полосы частот	$0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 22 \text{ кГц}$
Промежуточные частоты:	
ПЧ1	45 МГц
ПЧ2	16 кГц (перестраиваемая $12 \div 22 \text{ кГц}$)
Антенный вход	50 Ом
Форм-фактор	PCI 2.2 совместимая карта
Вес	330 г

Для управления ПИК и сбора данных авторами создано приложение WinRadioMetr, разработанное на языке программирования C++. Приложение поддерживает независимую работу до трех приемных модулей WR-G313i одновременно, управляет частотой настройки (шаг перестройки 1 Гц), включением входного аттенюатора 18 дБ , коэффициентом усиления (диапазон от $+20$ до -90 дБ с шагом в 10 дБ), шириной полосы выходного цифрового фильтра (от 0.5 до 22 кГц) и частотой оцифровки сигнала (допустимые частоты оцифровки $1, 2, 4, 8, 16, 48 \text{ кГц}$). Текущие режимы работы и параметры настройки приемных модулей, а также вид спектра и огибающей сигнала отображаются в основном окне программы.

Приложение WinRadioMetr запускается при старте операционной системы, производит инициализацию приемных модулей и переводит ПИК в режим ожидания команд управления. Последние передаются процедуре из текстовых файлов-расписаний, составляемых оператором, в соответствии с специально разработанным для этой цели протоколом управления. Применение файлов-расписаний позволяет управлять ПИК как с локального компьютера, так и удаленно по сети Интернет. Процедура WinRadioMetr генерирует несколько типов выходных файлов. Основными являются протоколы переключений и файлы данных, которые создаются во время сеанса записи и могут передаваться на удаленный управляющий компьютер по сети Интернет. Протоколы переключений сохраняют историю настроек приемных модулей. Файлы данных делятся на два типа – файлы волновых форм (“сырые” данные, используемые при обработке) и файлы визуализации (применяемые для отображения в сети Интернет компактные файлы, содержащие средние спектры и огибающие сигналов).

В табл. 2 приведены характеристики ПИК действующей сети пунктов наблюдения. Первые четыре установки работают в режиме удаленного интернет-управления. Изложим принципы контроля работы ПИК из единого центра управления (ЦУП), организованного на базе сервера Отдела радиопизики геокосмоса РИ НАНУ. Отметим, что ЦУП выполняет также функции веб-сервера, что упрощает алгоритм публикации данных в сети Интернет. Блок-схема работы ПО всей системы показана на рис. 2. Для удаленного

Таблица 2. Параметры ПИК и их координаты

Расположение ПИК	Координаты	Характеристики ПИК
Обсерватория имени КйеллаХенриксена (КХО), Университетский центр в Свалбарде (UNIS)	78°08'53" с. ш., 16°02'23" в. д., о. Свалбард, Норвегия	двухканальный с интернет-управлением
Факультет науки и технологии, Арктический университет Норвегии (UiT)	69°39'41" с. ш., 18°56'30" в. д., г. Тромсё, Норвегия	двухканальный с интернет-управлением
Низкочастотная обсерватория (НЧО) РИ НАНУ	49°56'01" с. ш., 36°57'10" в. д., с. Мартовое, Украина	одноканальный с интернет-управлением
Лагосский университет	06°26' с. ш., 03°25' в. д., г. Лагос, Нигерия	одноканальный с интернет-управлением
Украинская антарктическая станция (УАС) “Академик Вернадский”	65°14'45" ю. ш., 64°15'27" з. д., о. Галиндес, Антарктика	двухканальный, управляется локально
Радиообсерватория Джикамарка	11°57'05" ю. ш., 76°52'27.5" з. д., Перу	одноканальный, управляется локально
Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН	52°45' ю. ш., 103°49' з. д., г. Иркутск, Россия	одноканальный, управляется локально
ИЗМИРАН	55°28'39" с. ш., 37°18'53" в. д., г. Троицк, Россия	двухканальный, управляется локально
Мурманский государственный технический университет	68°57' с. ш., 33°04' в. д., г. Мурманск, Россия	двухканальный, управляется локально

управления и передачи данных на регистрирующих ПК установлено стандартное клиентское, а на сервере ЦУП – серверное ПО, реализующее протокол sftp. Это позволяет как получать файлы расписания в пунктах наблюдения, так и передавать файлы данных с ПК-клиентов на сервер ЦУП. Файлы расписания для всех пунктов наблюдения (ПН) размещаются в ЦУП, и далее специальное ПО с периодичностью в 5 с перемещает их на каждый из ПИК. Такой алгоритм избавляет оператора от необходимости обслуживать каждый приемный комплекс отдельно. При мониторинге сигналов HC EISCAT и HAARP разработанные авторами процедуры в реальном времени анализируют информацию, размещенную на интернет-серверах стендов и производят настройку ПИК автоматически. Передача данных на сервер ЦУП также автоматизирована. Специальное ПО постоянно синхронизирует текущие протоколы работы приемников и файлы визуализации, генерируемые ПИК, с архивами, которые размещены на сервере ЦУП. Таким образом, оператор сервера ЦУП может анализировать онлайн информацию о работе любого приемного пункта. Кроме того, на сервере ЦУП каждый час происходит стандартная обработка данных, в ходе которой рассчитываются суточные спектрограммы и временные зависимости

амплитуд сигналов, а также создаются таблицы переключений режимов работы ПИК. Эта информация доступна в сети Интернет на веб-сайте РИ НАНУ [20]. Кроме того, каждые сутки специальное ПО выполняет архивацию и передачу файлов волновых форм сигнала в архив ЦУП. Эти записи в последующем используются для детальной обработки.

Рассмотренная выше схема функционирования сети автономных пунктов ВЧ регистрации обеспечивает их автоматическую работу, при которой функции оператора сведены к администрированию сервера ЦУП и генерации на нем файлов расписания работы для предстоящих измерений. Однако при возникновении нештатных ситуаций в ПН оператор имеет возможность перейти в режим удаленного управления регистрирующим компьютером любого ПИК, используя удаленный рабочий стол операционной системы Windows. В зависимости от конфигурации локальной сети ПИК подключение по протоколу RDP осуществляется напрямую либо через VPN туннель, создаваемый между ЦУП и ПИК. Такой подход позволяет, с одной стороны, оперативно устранять последствия возможных сбоев сценариев автоматической работы ПН, а с другой, модифицировать и совершенствовать ПО сети пунктов ВЧ регистрации непосредственно с сервера ЦУП.

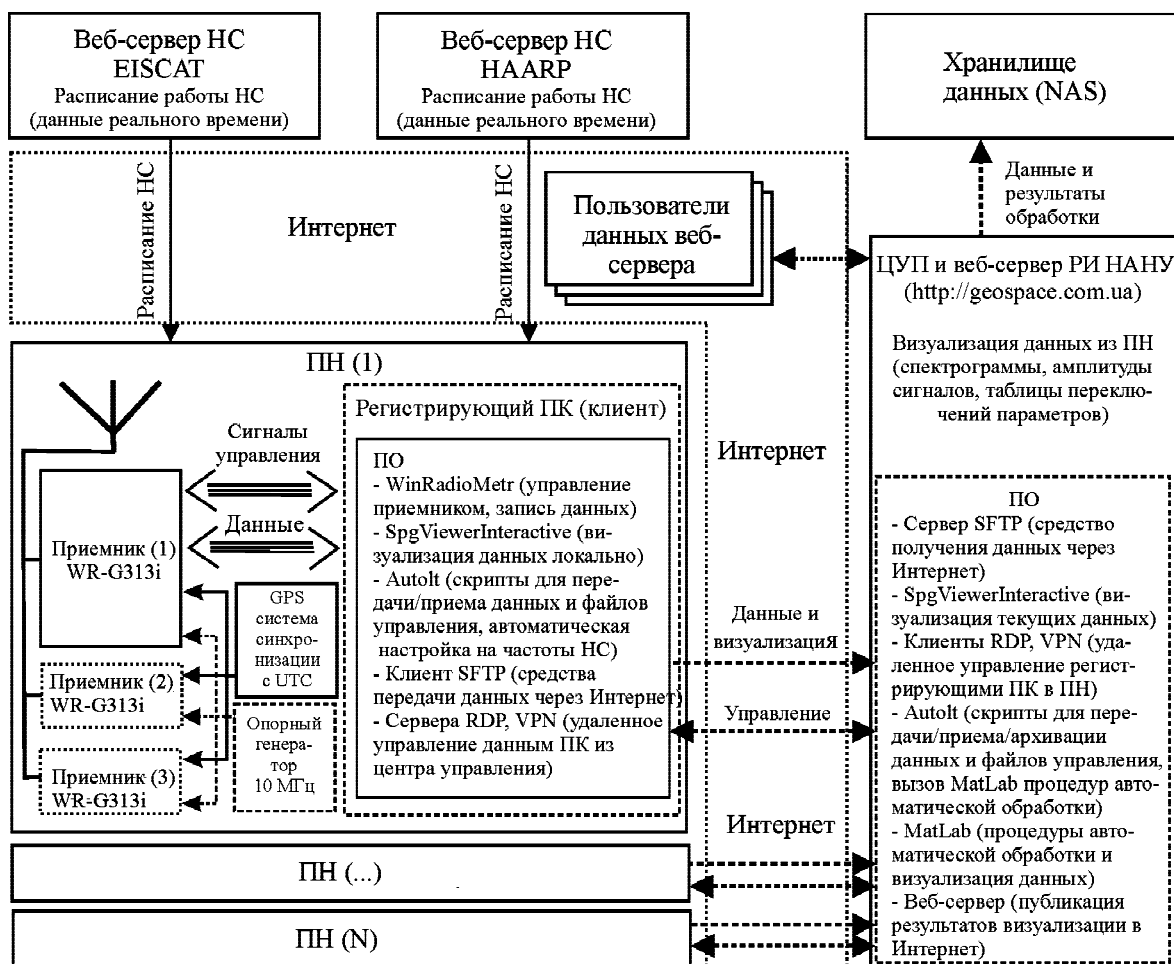


Рис. 2. Блок-схема, иллюстрирующая взаимодействие сети удаленных пунктов ВЧ регистрации с центром управления, веб-сервером РИ НАНУ и серверами НС HAARP и EISCAT

3. Результаты ионосферной диагностики

Как уже отмечалось ранее, одни из первых наблюдений ВЧ сигналов при помощи ПИК были выполнены на УАС. В частности, в июле 2006 г. была проведена специальная измерительная кампания по регистрации сигналов, излучаемых тремя пробными передатчиками Института солнечно-земной физики (ИСЗФ) СО РАН, которые располагались вблизи Иркутска (52.75° с. ш., 103.63° в. д.), Магадана (59.57° с. ш., 150.47° в. д.) и Норильска (69.12° с. ш., 88.17° в. д.). Ее целью являлось исследование условий распространения ВЧ сигналов в диапазоне 5 ÷ 20 МГц на сверхдальних радиопутьях, как прямых, так и обратных. Анализ спектральных характеристик пробного излучения показал, что зависимости амплитуды сигналов от времени суток и частоты при отсутствии

магнитных возмущений качественно совпадают с данными моделирования, полученными в ИСЗФ СО РАН в рамках волноводного механизма распространения ВЧ сигналов для международной справочной модели ионосферы IRI [24]. Результаты этой измерительной кампании подробно представлены в работе [5].

В 2010 г. УАС была оснащена системой синхронизации времени, что позволило проводить систематический мониторинг радиостанции РВМ (Москва, Россия, координаты 56.74951° с. ш., 37.63952° в. д.) на частотах 4.996, 9.996 и 14.996 МГц с использованием методик частотной и импульсной селекции. В результате были изучены и интерпретированы сезонно-суточные вариации характеристик сигналов. В частности, установлены интервалы времени устойчивого распространения пробного излучения по прямой и обратной трассам, а также вдоль траекторий

с отклонениями от дуг большого круга [25]. Основной методикой разделения пространственных компонент являлась импульсная селекция, применение которой иллюстрирует рис. 3. На рис. 3, *a* изображена спектрограмма сигнала станции РВМ, принятого на УАС на частоте 9.996 МГц 10 ноября 2010 г. в интервале 00:00–10:30 UT. Здесь и далее спектральная плотность I показана в оттенках серого. Отмеченные на ней мо-

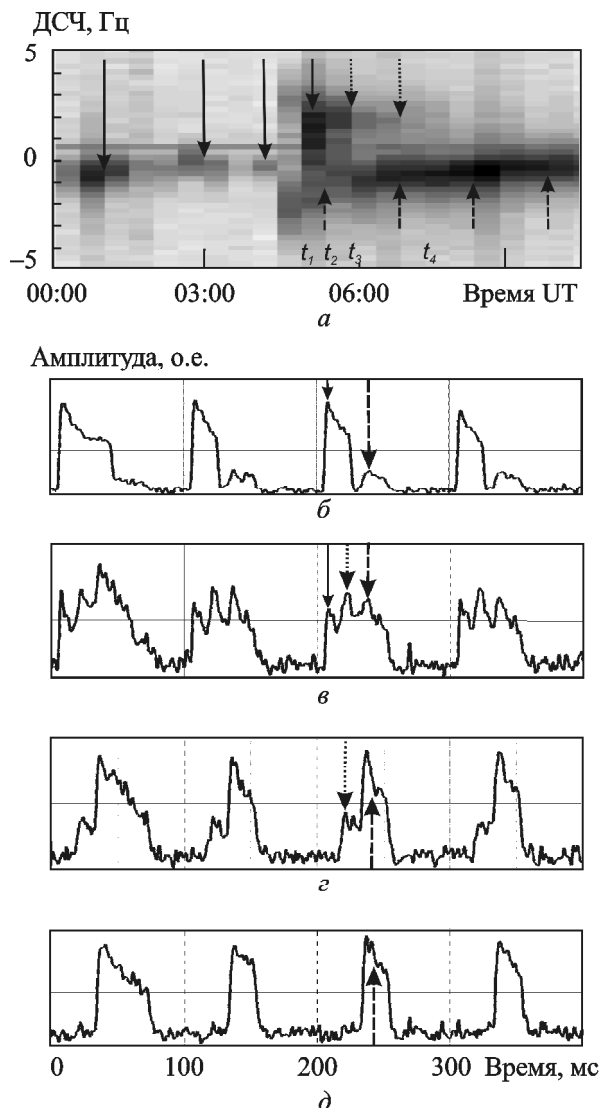


Рис. 3. Спектрограмма сигнала РВМ, принятого на УАС 10 ноября 2010 г. в интервале 00:00–10:30 UT на частоте 9.996 МГц, в логарифмическом масштабе (*a*) и усредненные огибающие импульсов, полученные методом наложения эпох по 120 односекундным интервалам для моментов времени t_1 (*б*), t_2 (*в*), t_3 (*з*) и t_4 (*д*). Здесь и далее стрелками обозначены сигналы, распространяющиеся по различным траекториям: сплошная стрелка – прямой сигнал, штриховая – обратный, пунктирная – рассеянный

менты времени $t_1 - t_4$ соответствуют началам интервалов, для которых на рис. 3, *б–д* изображены усредненные огибающие принятого импульсного сигнала. Усреднение проводилось методом наложения эпох по 120 односекундным интервалам. В 04:54–04:56 UT (рис. 3, *б*) одновременно наблюдаются два импульса: с большей амплитудой, распространяющийся вдоль прямой радиотрассы, и с меньшей, запаздывающий на 27 мс (дополнительный групповой путь 8100 км), что соответствует распространению по обратной трассе. В 05:24–05:26 UT (рис. 3, *в*) появляется еще один импульс, отстающий относительно прямого на 12 мс (дополнительный групповой путь 3600 км), что не может быть объяснено распространением вдоль дуги большого круга. Наиболее вероятным механизмом возникновения этого сигнала является рассеяние на ионосферных неоднородностях в области северного полярного овала, который удален от передающего пункта приблизительно на 1800 км. Затем в 05:54–05:56 UT (рис. 3, *з*) прямой импульс уже не выделяется в шумах, а начиная с 07:24–07:26 UT (рис. 3, *д*) наблюдается только один импульс, распространяющийся вдоль обратной трассы.

Проанализируем теперь особенности распространения пробного излучения на разных частотах. В интервале времени 22:00–03:00 UT сигналы на нижней частоте 4.996 МГц приходят по прямой трассе во все сезоны года (рис. 4, *a*). Кроме того, с сентября по апрель регистрируется мода с задержкой $8.3 \div 15.7$ мс ($2.5 \div 5$ тыс. км) относительно прямого сигнала, которая, вероятнее всего, рассеивается неоднородностями северного полярного овала. Как правило, эта компонента появляется после 03:00 UT, а в интервале 05:00–07:00 UT становится преобладающей. Такое поведение объясняется, по-видимому, тем, что после 05:00 UT прямая трасса находится в освещенных условиях, из-за чего существенно возрастает затухание распространяющихся вдоль нее сигналов. В то же время траектория, проходящая через северный полярный овал, лежит западнее в неосвещенной области, и поэтому затухание здесь остается сравнительно небольшим. Обратные сигналы на частоте 4.996 МГц не регистрируются в течение всего года.

В спектрограммах сигналов РВМ на частоте 14.996 МГц для всех сезонов года выделяются составляющие, соответствующие только прямой

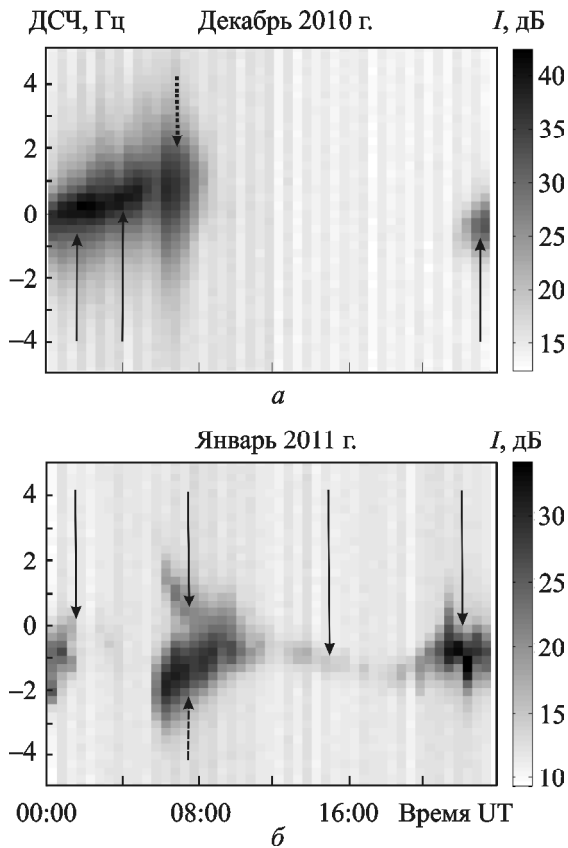


Рис. 4. Усредненные за месяц спектрограммы сигнала РВМ на частоте 4.996 МГц для декабря 2010 г. (а) и для января 2011 г. на частоте 14.996 МГц (б)

и обратной трассам распространения. Например, для января 2010 г. обратный сигнал регистрировался с 06:00 до 11:00 UT, а прямой – в интервале 06:00–02:00 UT (см. рис. 4, б). Следует отметить, что только на данной частоте сигнал иногда приходил в приемный пункт вдоль полностью освещенной радиотрассы.

Более сложное поведение демонстрируют спектрограммы сигнала на частоте 9.996 МГц. Например, в мае и августе устойчивое распространение наблюдается только в вечерние часы, когда вечерний терминатор проходит практически одновременно через передающую и приемную позиции. Сначала в спектрограммах возникает ветвь обратного сигнала, а начиная примерно с 18:00 UT появляется еще и прямой сигнал с отрицательным доплеровским смещением частоты (ДСЧ), который затухает после 24:00 UT (рис. 5, а). В сентябре–марте сигнал с частотой 9.996 МГц наблюдается практически круглые сутки. Так, примерно с 00:00 до 04:00 UT распространение

происходит вдоль прямой радиолинии. В интервале 04:00–07:00 UT существенная часть принимаемой энергии обеспечивается рассеянием от северного полярного овала. В этом случае значение ДСЧ составляет $2 \div 5$ Гц. В это же время появляется сигнал с отрицательным ДСЧ, проходящий по обратной трассе, который регистрируется вплоть до 17:00–18:00 UT. При этом в октябре–феврале в интервале 04:00–06:00 UT все эти сигналы, как правило, наблюдаются одновременно (рис. 5, б). Затем после 19:00 UT распространение происходит вдоль прямой радиотрассы (рис. 5, б). Таким образом, анализ многолетнего массива данных, полученных на УАС, позволил выделить три различных пути распространения сигнала и изучить особенности поведения пробных сигналов на сверхдальних радиолиниях в зависимости от частоты и сезона года.

Как уже отмечалось во вводной части статьи, данные сети ПИК могут быть использованы также для диагностики глобальных ионосферных возмущений, например, таких как солнечное зат-

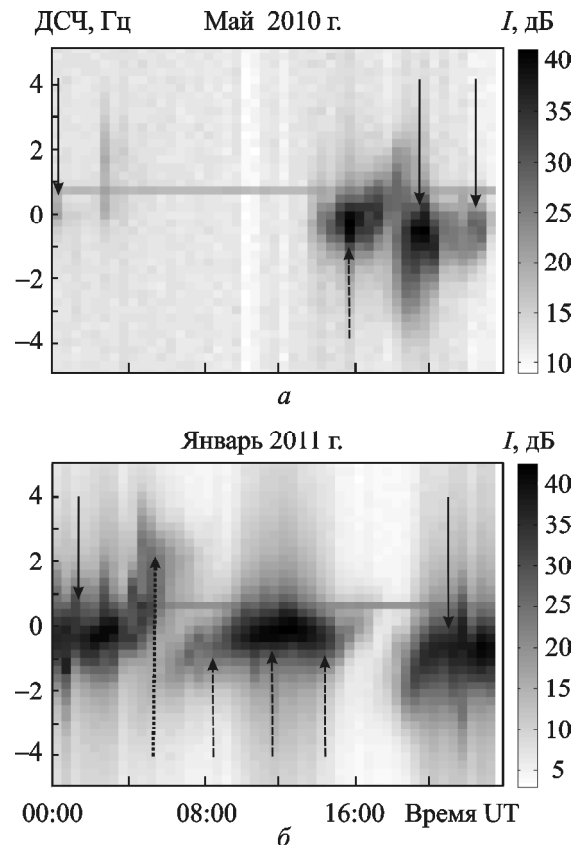


Рис. 5. Усредненные за месяц спектрограммы сигнала РВМ на частоте 9.996 МГц в логарифмическом масштабе: а – май 2010 г. и б – январь 2011 г.

мение. Кратко приведем результаты эксперимента ВЧ зондирования области солнечного затмения 1 августа 2008 г. В качестве пробного излучения использовались ВЧ сигналы трех передатчиков ИСЗФ СО РАН, расположенных вблизи Иркутска, Магадана и Норильска (Россия). Прием сигналов осуществлялся вблизи Харькова в РАО им. С. Я. Брауде РИ НАНУ и на острове Свалбард в КХО (Норвегия). Таким образом, было организовано шесть трасс зондирования, для каждой из которых наблюдались существенные вариации частоты пробных сигналов во время пересечения соответствующей радиолинии лунной тенью. Для всех радиотрасс обнаружены общие закономерности в поведении ДСЧ пробных сигналов. В частности, показано, что сдвиг частоты близок к нулю и обладает наибольшей скоростью изменения в момент максимальной затененности радиолинии. Обнаружено, что ДСЧ сигналов обратно пропорционально рабочей частоте. Это означает, что преобладающим механизмом его формирования во время затмения являлось изменение коэффициента преломления в нижней части ионосферы вдоль трассы распространения. Проведено моделирование вариаций ДСЧ, вызванного изменением интегральной освещенности радиотрасс во время солнечного затмения, результаты которого качественно и количественно совпадают с экспериментальными данными. Более детально эти результаты изложены в работе [8].

Приведем пример использования ПИК для изучения эффектов, возникающих при воздействии на ионосферу мощным ВЧ излучением НС. Для этого проанализируем данные, полученные в измерительной кампании EISCAT 7–12 октября 2011 г., когда были проведены синхронные регистрации сигналов НС EISCAT в приемных пунктах Тромсё (Норвегия), НЧО (Украина) и КХО (о. Свалбард). Разрешение на проведение измерений во время кампании было любезно предоставлено д. ф.-м. н. Н. Ф. Благовещенской (Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, ААНИИ, Россия). Спектральный анализ показал, что в ряде случаев, кроме основной сравнительно узкополосной “зеркальной” компоненты вблизи несущей частоты, наблюдалась составляющая с одинаковым для всех приемных пунктов ДСЧ порядка $-(30 \div 80)$ Гц и спектр, характерным для сигнала, рассеянного на частотах выше максимально приме-

нимой. Анализ отношения мощности “зеркальной” и “рассеянной” (смещенной) компонент показал, что оно разное для различных приемных пунктов. Это позволяет предположить, что смещенный по частоте сигнал не является “паразитным” излучением передатчика, а возникает в ионосфере, например, в результате нелинейного взаимодействия мощного излучения с ионосферной плазмой. Следует также отметить, что иногда мощность этого спектрального сателлита, принимаемого в Тромсё, существенно превышала мощность “зеркальной” составляющей. Кроме того, наблюдались достаточно быстрые флуктуации уровня “рассеянной” составляющей, которые в ряде случаев достигали 50 дБ. В качестве примера на рис. 6 приведены данные синхронных измерений в двух пунктах, выполненных 12 октября 2011 г. в 17:17–17:32 UT. На верхних двух панелях изображены спектрограммы сигналов в Тромсё (рис. 6, а) и НЧО (рис. 6, б), а на нижней (рис. 6, в)

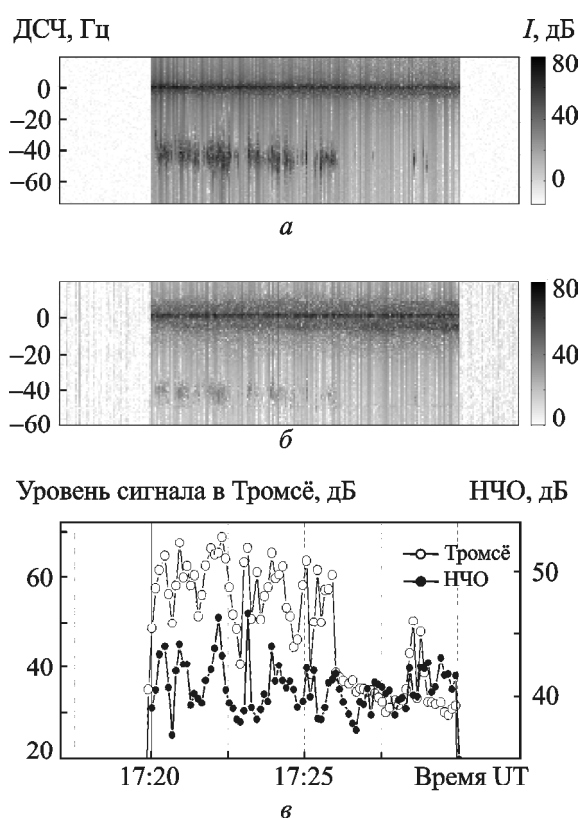


Рис. 6. Построенные в логарифмическом масштабе спектрограммы сигналов НС EISCAT на частоте 5.423 МГц по данным синхронных измерений с 17:17 по 17:32 UT 12 октября 2011 г. в Тромсё (а) и на НЧО (б), а также вариации мощностей сигналов в полосе $-(60 \div 30)$ Гц относительно несущей частоты (в)

показаны вариации мощностей сигналов в полосе частот $-(60 \div 30)$ Гц относительно несущей. Как видно из рисунка, ДСЧ и мощности сигналов ведут себя синхронно в разнесенных пунктах, один из которых расположен практически рядом с НС, а другой удален от него на 2380 км. Поэтому можно предположить, что возникновение “рассеянной” компоненты связано с описанным в литературе стимулированным бриллюэновским рассеянием излучения НС, т. е. является результатом трехволнового взаимодействия падающей волны накачки, ионозвуковой плазменной волны и возникающей в результате нелинейного взаимодействия третьей электромагнитной волны с частотой, на несколько десятков герц отличающейся от частоты нагрева [26]. Следует отметить, что значение ДСЧ в ряде нагревных сеансов существенно изменялось, причем, как правило, во время нагрева наблюдался его рост. Поскольку при бриллюэновском рассеянии сдвиг частоты связан со скоростью распространения ионозвуковой волны, которая в свою очередь зависит от электронной температуры, наши наблюдения подтверждают сделанный в работе [26] вывод о возможности использования такого механизма рассеяния для оценки температуры электронов.

4. Выводы

Описанная в работе сеть когерентных ПИК, оборудованных системами удаленного контроля, сбора, обработки и визуализации данных в глобальной сети Интернет, является законченным аппаратно-программным продуктом для решения задачи многопозиционной доплеровской ВЧ диагностики динамических процессов в ионосфере. Отличительными особенностями сети ПИК являются низкая себестоимость ремонта, обслуживания, модернизации наряду с гибкостью в управлении и возможностью легкого масштабирования, что делает ее дешевле существующих аналогов. Практический опыт эксплуатации сети подтверждает возможность автономной многолетней работы ПИК и дистанционного устранения большинства сбоев в их работе. Как правило, необходимость в выезде оператора в приемный пункт для проведения регламентных работ возникает не чаще одного-двух раз в год. Другим достоинством рассмотренной системы диагностики является применение автоматического режима передачи

данных в центр управления, их предварительной обработки и визуализации на веб-странице. Большинство операций управления ПИК автоматизировано как для стандартного режима мониторинга ионосферы, так и для проведения специальных измерительных кампаний. Это позволяет сосредоточить усилия персонала на обработке и интерпретации получаемых данных. Приведенные в работе примеры использования сети ПИК наглядно показывают, что она является эффективным инструментом для исследования распространения ВЧ сигналов на радиоперелиях разной протяженности, диагностики естественных глобальных плазменных неоднородностей и изучения реакции ионосферы на воздействие излучением мощных НС.

Рассматривая перспективы дальнейшего развития сети ПИК, отметим возможность добавления новых приемных пунктов, совершенствования аппаратного обеспечения приемных комплексов и увеличения числа используемых методик ионосферной диагностики. В настоящее время в РИ НАНУ разрабатывается новый вариант ПИК, который позволит, кроме частотной и импульсной селекции, оценивать также углы прихода принимаемых сигналов [23]. Такая возможность будет реализована за счет применения метода доплеровской интерферометрии [27] (в русскоязычной литературе его принято называть фазовой пеленгацией с доплеровской фильтрацией [3]). Углы прихода сигналов для каждой спектральной компоненты определяются по разности фаз сигналов, принятых тремя малоразмерными пространственно-разнесенными антеннами. Применение частотной, импульсной и угловой селекции сигналов позволит существенно расширить диагностические возможности рассмотренной сети приемных комплексов. Проведение с ее помощью измерений в Северной Скандинавии может оказаться полезным дополнением к данным радара некогерентного рассеяния нового поколения, создаваемого в настоящее время в рамках перспективного проекта EISCAT 3D и ориентированного на восстановление характеристик объемных неоднородностей околосредней плазмы.

В заключение авторы выражают признательность директору геофизической обсерватории Тромсё профессору К. Холлу и директору обсерватории

им. Кйелла Хенриксена, Университетский центр о. Свалбард, UNIS, профессору Ф. Сигернесу за помощь и полезные рекомендации при установке и обслуживании приемных установок в Норвегии и на Шпицбергене. Работа выполнена в рамках “Программы совместных исследований геокосмоса НАНУ–EISCAT на 2012–2015 гг.”, а также в соответствии с рабочими планами ведомственных и конкурсных научно-исследовательских работ НАН Украины “Ятаган-2” (№ госрегистрации 0111U000063), “Шпицберген-2014” (№ госрегистрации 0114U002820), “Лира-2” (№ госрегистрации 0114U002822) и Партнерского проекта УНТЦ Р-524. Создание и обслуживание наблюдательных ВЧ пунктов в г. Тромсё и на о. Свалбард поддержано грантом СРЕА-2012/10021 Норвежского центра международной кооперации в области образования (SIU).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bennett J. A. Doppler shift formulas for waves in the ionosphere // *Radio Sci.* – 1976. – Vol. 11, No. 7. – P. 621–627.
2. Davies K. *Ionospheric Radio.* – London, UK: Peter Peregrinus Ltd, 1990. – 580 p.
3. Афраймович Э. Л. Интерференционные методы радиозондирования ионосферы. – М.: Наука, 1982. – 198 с.
4. Зализовский А. В., Галушко В. Г., Кащеев А. С., Колосков А. В., Ямпольский Ю. М., Егоров И. Б., Попов А. В. Доплеровская селекция КВ-радиосигналов на сверхдальних трассах // *Геоматизм и аэрономия.* – 2007. – Т. 47, № 5. – С. 674–684.
5. Кащеев С. Б., Колосков А. В., Зализовский А. В., Галушко В. Г., Пикулик И. И., Ямпольский Ю. М., Куркин В. И., Литовкин Г. И., Орлов А. И., Петько П. В. Экспериментальные исследования спектральных характеристик КВ сигналов на дальних и сверхдальних трассах // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2009. – Т. 14, № 1. – С. 12–25.
6. Beley V. S., Galushko V. G., and Yampolski Yu. M. Traveling ionospheric disturbances diagnostics using HF signal trajectory parameter variations // *Radio Sci.* – 1995. – Vol. 30, No. 6. – P. 1739–1752.
7. Galushko V. G., Kashcheyev A. S., Kashcheyev S. B., Koloskov A. V., Pikulik I. I., Yampolski Y. M., Litvinov V. A., Milinevsky G. P., and Rakusa-Suszczewski S. Bistatic HF diagnostics of TIDs over the Antarctic Peninsula // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* – 2007. – Vol. 69, No. 4–5. – P. 403–410.
8. Кащеев С. Б., Зализовский А. В., Колосков А. В., Галушко В. Г., Пикулик И. И., Ямпольский Ю. М., Куркин В. И., Литовкин Г. И., Орлов А. И. Вариации частоты КВ сигналов на протяженных трассах во время солнечного затмения // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2009. – Т. 14, № 4. – С. 353–366.
9. Yampolski Y. M., Bliokh P. V., Beley V. S., Galushko V. G., Kascheev S. B. Non-linear interaction between Schumann resonances and HF Signals // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* – 1997. – Vol. 59, No. 3. – P. 335–342.
10. Yampolski Y. M., Beley V. S., Koloskov A. V., Kascheev S. B., Somov G. V., Hysell D. L., Isham B., and Kelley M. C. Bistatic HF radar diagnostics induced field-aligned irregularities // *J. Geophys. Res.* – 1997. – Vol. 102, No. A4. – P. 7461–7467.
11. Hysell D. L., Kelley M. C., Yampolski Y. M., Beley V. S., Koloskov A. V., Ponomarenko P. V., and Tyrnov O. F. HF radar observations of decaying artificial field-aligned irregularities // *J. Geophys. Res.* – 1996. – Vol. 101, No. A12. – P. 26981–26993.
12. Ямпольский Ю. М. Эхо-рассеяние КВ сигналов на искусственной ионосферной турбулентности // *Изв. вузов. Радиофизика.* – 1989. – № 6. – С. 457–461.
13. Koloskov A. V., Leysner T. B., Yampolski Yu. M., and Beley V. S. HF pump-induced large scale radial drift of small scale magnetic field-aligned density striations // *J. Geophys. Res.* – 2002. – Vol. 107, No. A7. – P. SIA 1-1 – SIA 1-10.
14. Зализовский А. В., Галушко В. Г., Кащеев С. Б., Ямпольский Ю. М., Белей В. С., Айшем Б., Ритвелд М. Т., Ла Хоз С., Брекке А., Благовещенская Н. Ф., Корниенко В. А. Спектральные особенности КВ сигнала нагревного стенда EISCAT в Европе и Антарктике // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2004. – Т. 9, № 3. – С. 261–273.
15. Galushko V. G., Koloskov A. V., Paznukhov V. V., Reinish B. W., Sales G. S., Yampolski Y. M., and Zalizovskiy A. V. Self-Scattering of the HF Heater Emissions Observed at Geographically Dispersed Receiving Sites // *IEEE Antennas Propag. Mag.* – 2008. – Vol. 50, No. 6. – P. 155–161.
16. Галушко В. Г., Рабинович Л. М., Ямпольский Ю. М. Измерительный комплекс для исследования флуктуаций КВ радиосигналов: Препр. / ИРЭ АН УССР; № 182. – Харьков: 1981. – 16 с.
17. Кащеев А. С., Кащеев С. Б., Колосков А. В., Пикулик И. И., Брюховецкий А. С., Ямпольский Ю. М. Дистанционное КВ рассеяние взволнованной морской поверхностью. II. Эксперимент // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2003. – Т. 8, № 3. – С. 242–252.
18. Пикулик И. И., Кащеев С. Б., Галушко В. Г., Ямпольский Ю. М. Приемный комплекс для частотно-углового зондирования ионосферных возмущений в Антарктиде // *Украинский антарктический журнал.* – 2003. – № 1. – С. 61–69.
19. Колосков А. В., Галушко В. Г., Кащеев А. С., Пикулик И. И., Ямпольский Ю. М., Белей В. С., Брекке А. Автоматизированный приемный КВ комплекс для дистанционных ионосферных наблюдений в Арктике, Испытания и перспективы использования // 7 Українська конференція з космічних досліджень. Збірник тез. – Крим, Євпаторія, НЦУВКЗ. – 2007. – С. 80.
20. Сайт Отдела радиофизики геокосмоса РИ НАНУ. Данные наблюдений. – <<http://geospace.com.ua/data.html>>
21. Сайт фирмы Win Radio Communications. Описание цифрового приемного модуля WR G-313i. – <<http://www.winradio.com/home/g313i.htm>>
22. Сайт фирмы Isotemp Research inc. Технические характеристики осциллятора ОСХО 131-1000. – <<http://www.isotemp.com/wp-content/uploads/2011/10/131-1000.pdf>>

23. Гадушко В. Г., Кащеев А. С., Кащеев С. Б., Пикулик И. И., Ямпольский Ю. М. Мобильный комплекс для частотно-углового зондирования ионосферы // Радиофизика и радиоастрономия. – 2014. – Т. 19, № 2. – С. 142–150.
24. Сайт международной справочной модели ионосферы IRI. – <<http://iri.gsfc.nasa.gov/>>
25. Зализовский А. В. Сезонно-суточные вариации частотно-импульсных характеристик сигналов на сверхдальних радиолиниях // Электромагнитные методы исследования окружающего пространства [CD диск]: Сб. тез. докл. Первой украинской конференции. – Харьков, 2012. – С. 76.
26. Bernhardt P. A., Selcher C. A., Lehmborg R. H., Rodriguez S., Thomson J., McCarrick M., and Frazer G. Determination of the electron temperature in the modified ionosphere over HAARP using the HF pumped Stimulated Brillouin Scatter (SBS) emission lines // Ann. Geophys. – 2009. – Vol. 27, No.12. – P. 4409–4427.
27. Bible K. and Reinisch B. W. Universal digital ionosonde // Radio Sci. – 1978. – Vol. 13, No. 3. – P. 519–530.

О. В. Колосков¹, Ю. М. Ямпольский¹, А. В. Зализовский¹,
В. Г. Гадушко¹, А. С. Кащеев¹, С. Ла Хоз², А. Брекке²,
В. С. Белси², М. Т. Ривелд³

¹Радиоастрономический институт НАН Украины,
вул. Червонопрапорна, 4, м. Харків, 61002, Україна

²Арктичний Університет Норвегії (UiT),
N-9037, Тромсе, Норвегія

³Наукова Асоціація EISCAT,
N-9027, Рамфьордмоен, Норвегія

МЕРЕЖА ІНТЕРНЕТ-КЕРОВАНИХ ВЧ ПРИЙМАЧІВ ДЛЯ ІОНОСФЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Описується мережа ВЧ приймачів, призначених для багато-позиційного моніторингу іоносфери. Наразі вона налічує дев'ять пунктів спостереження, розташованих у високих, середніх та низьких широтах обох півкуль Землі. Базовими елементами мережі є малорозмірні приймально-вимірювальні комплекси, створені в Радиоастрономическому інституті Національної академії наук України (РІ НАНУ) на базі персонального комп'ютера, обладнаного серійними цифровими приймальними модулями. Розроблене авторами програмне забезпечення дозволяє здійснювати віддалене керування комплексами через мережу Інтернет. У якості пробного випромінювання використовуються ВЧ сигнали спеціальних передавачів та широкоповних радіостанцій, котрі обробляються за допомогою алгоритмів доплерівської та імпульсної селекції. У режимі інтернет-керування результати спостере-

жень в реальному часі передаються на центральний сервер, де вони автоматично обробляються та відображаються на веб-сторінці відділу Радиофізики геокосмосу РІ НАНУ. Наводяться приклади використання результатів спостережень, отриманих за допомогою мережі ВЧ приймачів, для діагностики динамічних процесів у навколосферній плазмі. Продемонстровано переваги багатопозиційного режиму виконання досліджень. Розглянуто можливість модернізації приймальних комплексів, в результаті якої буде можливим вимірювати кути приходу сигналів.

A. V. Koloskov¹, Y. M. Yampolski¹, A. V. Zalizovsky¹,
V. G. Galushko¹, A. S. Kashcheev¹, C. La Hoz², A. Brekke²,
V. S. Belyey², and M. T. Rietveld³

¹Institute of Radio Astronomy, National Academy
of Sciences of Ukraine,
4, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine

²The Arctic University of Norway (UiT),
N-9037, Tromsø, Norway

³EISCAT Scientific Association,
N-9027, Ramfjordmoen, Norway

NETWORK OF INTERNET-CONTROLLED HF RECEIVERS FOR IONOSPHERIC RESEARCHES

A network of HF receivers intended for multi-position monitoring of the ionosphere is described. At present, it includes nine observation sites located at high, middle and low latitudes in both hemispheres of the Earth. The basic element of the network is a small-size receiving and measuring units designed at the Institute of Radio Astronomy (IRA) of the National Academy of Sciences of Ukraine (NASU) on the basis of a personal computer equipped with commercial digital receiving modules. Software packages developed by the authors make it possible to remotely control the facilities via the Internet network. The received emissions are HF signals from special transmitters and broadcast radio stations. These are processed using Doppler and pulse selection algorithms. In the Internet-controlled mode, the observation results are transferred to the main server in real time to be automatically processed and visualized at the web-site of the IRA NASU's Department of Radiophysics of Geospace. Several examples of using the observation results obtained with the HF receiver network for diagnostics of dynamic processes in the near-Earth plasma are presented. The advantages of the multi-position mode of observations are discussed. The possibility of upgrading the HF facilities to provide measuring angles of arrival of signals is considered.

Стаття постуила в редакцію 04.06.2014