

УДК 621.396; 621.371; 550.388

АНАЛОГОВО-ЦИФРОВЫЕ МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ ДОПЛЕРОВСКИХ СПЕКТРОВ ИОНОСФЕРНЫХ КВ-СИГНАЛОВ

А.В. Колосков, Ю.М. Ямпольский

ANALOG-DIGITAL METHODS FOR REGISTRATION OF DOPPLER SPECTRA OF IONOSPHERIC HF SIGNALS

A.V. Koloskov, Yu.M. Yampolski

Регистрация доплеровских спектров КВ-радиосигналов на ионосферных радиопутьях различной протяженности является удобным и весьма распространенным способом изучения динамических процессов в околоземной плазме. В РИНАН Украины на протяжении уже 3-х десятилетий эта методика успешно используется для диагностики регулярных и стохастических ионосферных эффектов. Исследованы: возбуждение и распространение атмосферных гравитационных волн, ракурсное рассеяние пробных сигналов на искусственных и естественных неоднородностях, эффект саморассеяния сигналов нагретых стенов на стимулированной плазменной турбулентности, дальнее и сверхдальнее распространение декаметровых волн, взаимодействие резонансных МГД-процессов с плазменной турбулентностью, эффекты резонансного рассеяния КВ взволнованной морской поверхностью. В работе изложены методики проведения доплеровских измерений. На функциональном уровне представлены несколько поколений доплеровских КВ-установок, созданных в РИНАН. Рассмотрены современные схемы проведения доплеровских измерений, использующие Internet-технологии для дистанционного управления, записи и визуализации данных.

Recording Doppler-shift spectra of the HF radio signals at ionospheric paths of various lengths has been recognized as a convenient and effective (hence, reasonably widespread) method of studying dynamic processes in the geospace plasma. Techniques of the kind have been used at the Institute of Radio Astronomy for about three decades, providing diagnostics of a variety of regular and stochastic effects in the ionosphere. The effects explored include excitation and propagation of atmospheric gravity waves; aspect-sensitive scattering of the probe signal by natural or artificially stimulated irregularities; self-scattering of the radiation from a heating facility by the plasma turbulence excited by that same heater; long- and very long-range propagation of decameter wavelength radio waves; plasma turbulence-MHD wave interaction, and resonance scattering of HF radio waves from the rough sea surface. Presented in the paper are specific measurement techniques for the Doppler domain. Several generations of HF Doppler facilities created at the Institute of Radio Astronomy are described at the functional level. Latest schemes of Doppler domain measurements are discussed, which use Internet technologies for remote control of the facility, data saving and visual presentation.

Одним из эффективных способов ионосферной диагностики является доплеровский метод. Суть метода состоит в регистрации спектров сигналов пробных передатчиков, стабильных по частоте f . Пройдя через ионосферный слой, сигнал приобретает доплеровское смещение частоты (ДСЧ) Δf , которое является основным информативным параметром для диагностики околоземной плазмы. Известно [1], что доплеровское смещение частоты радиоволн вызывается изменением во времени фазового пути P :

$$\Delta f = -\frac{f}{c} \frac{dP}{dt}. \quad (1)$$

Здесь c – скорость света в вакууме, f – частота пробного сигнала. Фазовый путь волны в ионосфере записывается как интеграл от коэффициента преломления n вдоль лучевой траектории S :

$$P = \int_S n \cdot dS. \quad (2)$$

Изменения фазового пути могут быть вызваны двумя причинами:

1. Вариациями показателя преломления вдоль неизменной лучевой траектории. В этом случае Δf обратно пропорционально пробной частоте $\Delta f \sim 1/f$.

2. Изменением самой лучевой траектории. Тогда доплеровское смещение будет прямо пропорционально частоте $\Delta f \sim f$.

Как правило, на практике одновременно реализуются оба механизма изменения фазового пути и

зависимость Δf от частоты оказывается более сложной. Поэтому при выполнении наблюдений желательно осуществлять многочастотную регистрацию, чтобы оценить преобладающий механизм изменения ДСЧ. Если это удастся сделать, то задача восстановления ионосферных характеристик упрощается. Рассмотрим, например, прохождение перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) через среднюю точку наклонной радиопутьи. Если длина волны возмущения больше ионосферного участка траектории, можно считать, что изменение фазового пути вызвано вариациями высоты отражения пробной волны Δh . В этом случае ΔP можно оценить как $\Delta P \approx 2\Delta h \cos \varphi$ (здесь φ – угол падения радиоволны на ионосферу), а для ДСЧ записать выражение

$$\Delta f \approx -2 \cdot \frac{f}{c} \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \cos \varphi = -2 \cdot \frac{f}{c} V \cdot \cos \varphi. \quad (3)$$

Видно, что по наблюдаемым в эксперименте вариациям доплеровской частоты можно оценивать вертикальную компоненту скорости движения точки отражения. В РИНАН Украины разработана методика, позволяющая восстанавливать характеристики ПИВ, используя эти данные совместно с информацией о вариациях углов прихода пробных сигналов [2]. Примеры квазипериодических вариаций ДСЧ, вызванных прохождением ПИВ через среднюю точку радиопутьи, показаны на рис. 1, а. На нем изображена спектрограмма сигнала вещательной радиостанции. По вертикальной оси отложена частота

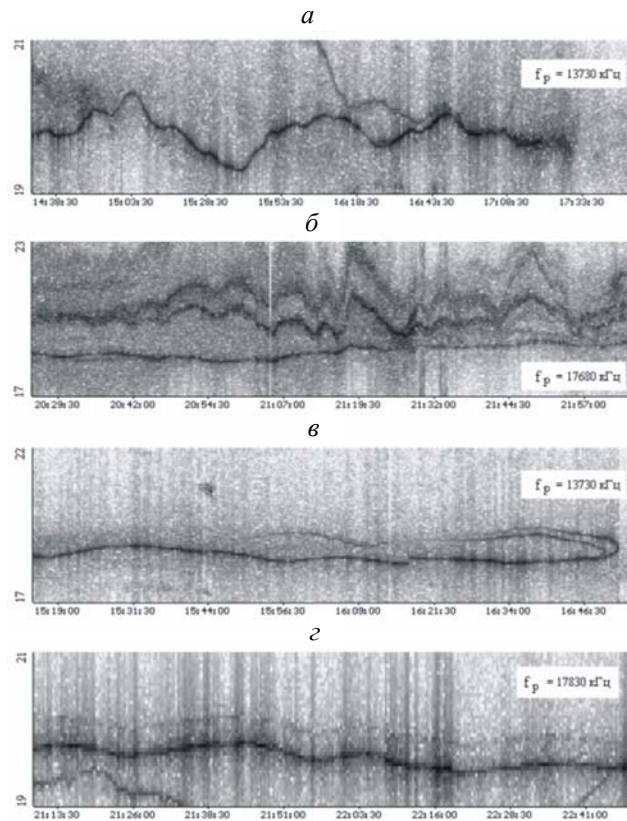


Рис. 1. Доплеровские спектры ионосферных сигналов и сигналов, рассеянных взволнованной морской поверхностью.

сигнала, а по горизонтальной – мировое время. Спектральная интенсивность пропорциональна степени почернения. Записи получены во время трансатлантического перехода из Севастополя в Антарктиду с борта НИС «Горизонт», выполненного в январе 2003 г. Для иллюстрации информативности доплеровского метода далее приведены еще несколько примеров регистраций, полученных в ходе рейса.

На рис. 1, б показана спектрограмма для многомодового сигнала, зарегистрированного вблизи экватора. Поведение различных пространственных компонент сильно отличается, поскольку отражение происходит от различных ионосферных слоев Е и F. Видно, что скорость изменения частоты у некоторых модов временами превосходит 1 Гц/мин.

На рис. 1, в изображен пример прохождения пространственной каустики через приемный пункт (переход рабочей частоты через уровень максимально применимой частоты). Отчетливо видны разнесенные во времени «радиозаходы» обыкновенной и необыкновенной компонент ионосферного сигнала.

Для спокойных ионосферных условий в спектре сигнала, как правило, присутствуют два дополнительных мода с положительным и отрицательным смещением частоты относительно основного «ионосферного» максимума. Эти дополнительные брэгговские максимумы вызваны резонансным рассеянием пробных сигналов взволнованной поверхностью моря [3]. Такие случаи представляют особый интерес, поскольку они пригодны для оценки параметров морского волнения. Путем сопоставления наблюдений с результатами решения модельной задачи рассеяния можно оценивать [4, 5]:

- направление ветра – по соотношению высот главных максимумов;
- скорость поверхностного течения – по величине синхронного сдвига главных максимумов;
- интенсивность морского волнения – по величине дополнительных максимумов.
- величину вертикального угла прихода – по уменьшению расстояния между главными максимумами относительно расчетного. Это позволяет использовать измерения по рассеянию от моря для ионосферной диагностики.

Рассмотрим аппаратуру, применяемую для доплеровских наблюдений, на примере многоканальной установки РИНАН Украины (рис. 2). Все приемные каналы приемного комплекса идентичны. Регистрация осуществляется при помощи стандартных связанных приемников Р399А «Катран». Как видно из приведенных ранее спектрограмм (см. рис. 1), при реализации доплеровского метода необходимо получать спектры с разрешением порядка 0.1 Гц и выше, что требует высокой стабильности частоты приемных устройств. Для ее обеспечения в качестве опорного генератора применен рубидиевый стандарт частоты с относительной нестабильностью частоты $\Delta f/f = 10^{-11}$. В приемник, по сравнению со стандартной схемой, введено дополнительное 3-е преобразование частоты. Сигнал после фильтра 2-й промежуточной частоты (ПЧ, частота 215 кГц) смешивается с опорной частотой 214.990 кГц (т.е. переносится в низкочастотную область на частоту 10 Гц), после чего подается на фильтр-усилитель. Его полоса пропускания составляет 0.1–20 Гц. Далее НЧ-сигнал

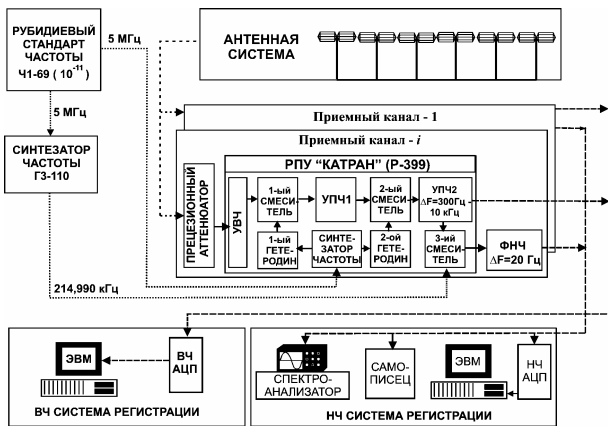


Рис. 2. Структурная схема многоканального доплеровского когерентного комплекса РИНАН Украины.

оцифровывается при помощи АЦП и поступает в персональный компьютер (ПК). Запись, спектральная обработка и визуализация осуществляются в реальном времени. Невысокие частоты оцифровки позволяют применять ПК низкой производительности с небольшими объемами памяти.

Значительное повышение производительности современных компьютеров и АЦП сделало возможным использование другой схемы регистрации, при которой частота оцифровки увеличивается по-сравнению с предыдущим вариантом, но не требуется никакой переделки приемников. В этом случае оцифровка сигнала осуществляется сразу после фильтра 2-й ПЧ, полоса которого ΔF может принимать следующие значения: 300 Гц, 1 кГц, 3 кГц, 4 кГц, 6 кГц, 10 кГц. При выборе частоты оцифровки F_S следует потребовать выполнение 2-х условий:

Во-первых, необходимо выполнить условие теоремы Котельникова

$$F_S \geq 2 \times \Delta F. \quad (4)$$

Во-вторых, после цифрового переноса сигнала в область низких частот (цифрового гетеродинирования) весь интересующий нас частотный диапазон должен передаваться без искажений. Для этого необходимо удовлетворять следующим условиям:

$$n \times F_S \leq F_{ПЧ2} - \Delta F/2 \equiv 215 \text{ кГц} - \Delta F/2, \quad (5)$$

$$n \times F_S + F_S/2 \geq F_{ПЧ2} + \Delta F/2 \equiv 215 \text{ кГц} + \Delta F/2. \quad (6)$$

Здесь n (целое число) – количество цифровых гетеродинирований.

ВЧ-схема регистрации является более универсальной, поскольку позволяет выбрать полосу анализа, исходя из решаемой задачи. С помощью такой схемы регистрации оказалось возможным визуализировать структуру рассеивателей в области искусственной ионосферной турбулентности, создаваемой нагревным стендом (НС) «Сура» [6]. На рис. 3, а, б приведены результаты восстановления. Дальностная селекция обеспечивалась использованием специального импульсного передатчика, а угловая – применением ФАР радиотелескопа УТР-2 [7]. Анализ доплеровских спектров, полученных с различных дальностей, позволил обнаружить эффект радиального дрейфа рассеивателей от центра к периферии возмущенной области [8]. На рис. 3, в изображены усредненные за время стационарного нагрева спектры

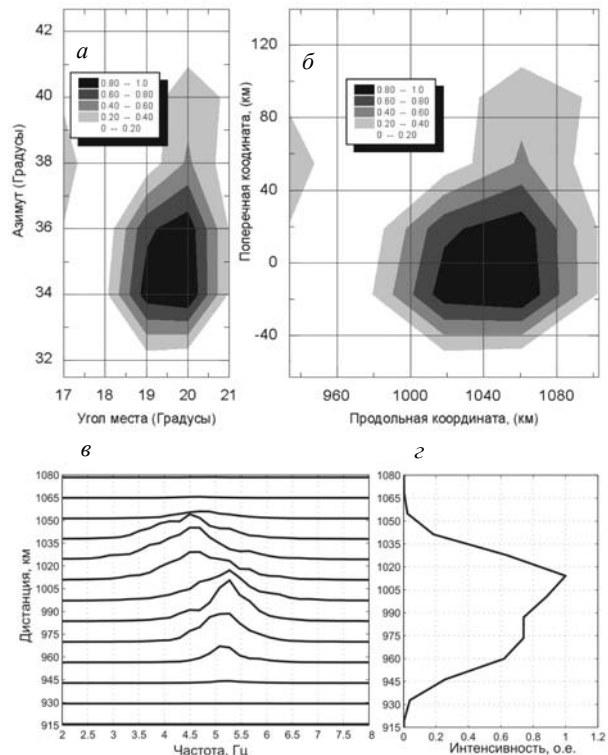


Рис. 3. Распределение мощности рассеивателей в области ИИТ над нагревным стендом «Сура», 30 марта 1995 г., 09:33–09:46 UT: а – в координатах угол места – азимут; б – в линейных координатах. Результаты обработки нагревного сеанса 27 марта 1995 г., 13:52:49–13:54:11 UT: в – зависимость спектров рассеянного сигнала от дистанции; z – интенсивность рассеянного сигнала как функция дистанции.

рассеянного сигнала, построенные в режиме «водопада» в зависимости от дальности. Рисунок 3, z содержит распределение интенсивности рассеяния от дистанции. Видно, что для центральной части области, где рассеиватели при радиальном движении перемещаются как к наблюдателю, так и от него, имеет место расщепление спектров. Для ближнего участка, где неоднородности движутся на наблюдателя, виден один максимум с ДСЧ ~ 5.2 Гц. Для дальнего участка области, где радиальное движение происходит в противоположную сторону, регистрируется пик на меньшей доплеровской частоте ~ 4.7 Гц.

Используя в качестве пробных источников широкоэмитерные радиостанции, которых по данным международного телерадиосоюза (ITU) в мире насчитывается более 5000, можно организовать пункт доплеровской регистрации практически в любой точке земного шара. Кроме того, использование вещательных станций не требует затрат на работу пробных источников. Применение современных приемных устройств и компьютерной техники позволяют сделать доплеровскую установку весьма компактной. Более того, развитие Internet-технологий позволяет вообще обойтись без оператора на приемном конце. С любого компьютера, подключенного к Internet, можно управлять установкой, получать данные и визуализировать результаты измерений в реальном времени. Такой мобильный измерительный доплеровский комплекс, предназначенный для исследований в Арктике, был разработан в РИНАН. Комплекс включает в себя:

- Цифровой приемник WR-G313i фирмы WinRadio, сконструированный в формфакторе PCI-платы для ПК.

- Опорный кварцевый генератор с термостабилизацией, обеспечивающий относительную нестабильность частоты 10^{-9} .

- малоразмерную активную рамочную антенну.

Приемник WR-G313i собран по супергетеродинной схеме с двумя преобразованиями частоты, осуществляемыми аппаратно. Отличительной особенностью приемника является то, что третья ПЧ является полностью цифровой. Ее работу обеспечивает сигнальный процессор. Управление всеми режимами работы приемника осуществляет ПК.

Логика работы и удаленного управления комплексом представлена на рис. 4. Регистрация КВ-сигналов и управление приемником осуществляются приложением WinRadioMetр, разработанным в РИНАН Украины. Программное обеспечение (ПО) написано на языке программирования C++ с использованием Application Program Interface (API) for WR-G313i фирмы WinRadio (http://www.winradio.com/home/g313_sdk.htm). Приложение автоматически стартует при включении компьютера-сервера и далее работает как сервисное приложение MS Windows. В процессе работы ПО проверяет наличие в информационной служебной папке сервера файла с расписанием работы приемника и корректность его формата, после чего запускает расписание в работу. При этом приложение продолжает сканировать служебную папку и отслеживает модификации расписания. Все изменения в работе протоколируются в log-файлах. При включении записи в служебную папку данных записываются как файл исходных данных, так и файл с текущими значениями огибающей сигнала и средних спектров. На компьютере-сервере запускаются службы WWW и FTP сервера, организующие Internet-доступ ко всем служебным папкам и файлам. Это позволяет осуществлять удаленное управление работой установки и доступ к данным с любого компьютера-клиента, подключенного к Internet. Для оперативного контроля за работой комплекса, визуализации сигналов и спектрограмм служит клиентское ПО FTP_wGetter, разработанное в РИНАН. Программа-просмотрщик в реальном времени по ftp-либо http-протоколу получает средние спектры и огибающую сигнала с сервера и отображает их на дисплее ПК-клиента. Скорость передачи данных при удаленном управлении и визуализации не превышает нескольких кБ/с, что позволяет организовать работу комплекса на «медленных» Internet-линиях.

Установка была размещена 11 июня 2007 г. на о. Свалбард (архипелаг Шпицберген, координаты $78^{\circ} 12' 09.3'' \text{N}$, $15^{\circ} 49' 44.2'' \text{E}$) для выполнения рекогносцировочных измерений. За период с июня по сентябрь 2007 г. получено более 1000 ч записей широкоэвентальных радиостанций и специальных передатчиков на радиолиниях различной протяженности (см. таблицу). Среди зарегистрированных эффектов можно выделить случаи наблюдения рассеянной спектральной моды на больших (10 Гц и более) отстройках от несущей частоты. Данный эффект может быть использован для изучения неоднородностей полярной ионосферы. Следует

отметить также регистрации квазипериодических вариации ДСЧ с периодами в несколько десятков секунд. Возможной причиной таких вариаций могут быть распространяющиеся в ионосфере МГД-волны. В дальнейшем также предполагается использовать приемный комплекс для исследования излучения нагревных стенов и взаимодействия пробных КВ-сигналов с областью искусственной ионосферной турбулентности.

Зачастую для ионосферной диагностики, кроме ДСЧ, важно знать углы прихода пробных сигналов. Угломерные измерения можно осуществлять при помощи малоразмерных доплеровских систем с разносенными антеннами. Для определения углов прихода применяется метод фазовой пеленгации с доплеровской фильтрацией (ФПДФ) [9]. Подобный доплеровско-угломерный комплекс создан в РИНАН для измерений в Антарктике [10]. Частотный диапазон устройства составляет 1.0–32 МГц. Комплекс смонтирован в корпусе приемника P-399A и содержит три полностью идентичных канала (см. рис. 5). Каждый приемный канал представляет собой гетеродинный приемник прямого преобразования. Принимаемый сигнал частоты f_0 с выхода антенны поступает через ступенчатый аттенуатор 0–40 дБ на смеситель. На другой вход смесителя подаются колебания местного гетеродина, общего для трех приемных каналов. Частота гетеродина f_e выбирается близкой к частоте сигнала f_0 . На выходе смесителя включен полосовой фильтр, выделяющий разностную частоту F. Полосовой фильтр построен на основе активных RC-фильтров второго порядка. В качестве активных элементов фильтров используются операционные усилители специального назначения с пониженным уровнем собственных шумов фирмы Analog Devices (США). Полоса пропускания фильтра составляет 15–30 Гц. Отфильтрованный таким образом от модуляционных частот сигнал несущей частоты радиовещательной станции усиливается и поступает на вход аналого-цифрового преобразователя системы обработки и визуализации данных, построенной на базе ЭВМ. Смеситель собран по двойной балансной схеме. Это обеспечивает высокую степень развязки цепей сигнала и гетеродина, а также уменьшает эффект прямого детектирования мощных сигналов мешающих станций, что, в конечном счете, снижает уровень шума на выходе смесителя и увеличивает динамический диапазон. Гетеродин создан на базе синтезатора частоты приемника P-399A, который работает в диапазоне 35.785–66.785 МГц с шагом перестройки один герц. Тестовые измерения показали, что нестабильность разности фаз двух любых приемных каналов при $U_c/U_{ш} = 40$ дБ за три часа не превосходит 0.2° , что соответствует требованиям метода ФПДФ. Комплекс установлен на украинской антарктической станции «Академик Вернадский» и используется для мониторинга ПИВ в районе Антарктического полуострова. Получены распределения вероятности регистрации возмущений в зависимости от времени суток, гистограммы распределений для периодов, амплитуд, длин волн и модуля и направления вектора скоростей движения ионосферных неоднородностей.

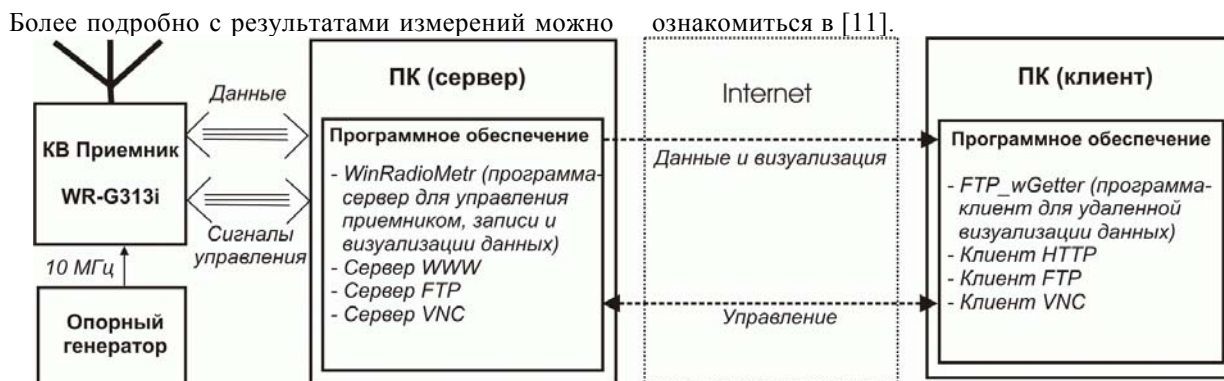


Рис. 4. Блок-схема, Internet-управления мобильным доплеровским КВ комплексом.

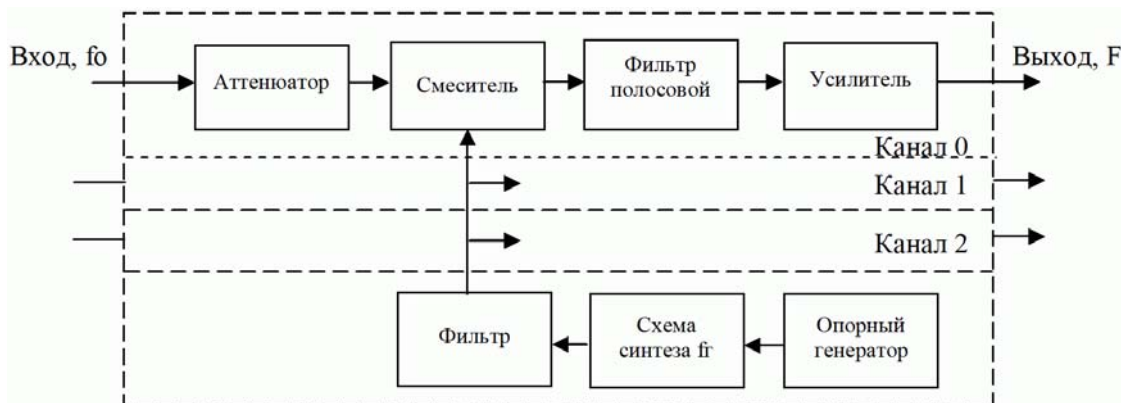


Рис. 5. Структурная схема приемного КВ-комплекса для частотно-углового зондирования ионосферных возмущений в Антарктиде.

Приведенные в работе результаты иллюстрируют большие возможности доплеровских наблюдений для изучения состояния ионосферы. Показано, что измерения могут осуществляться при помощи относительно простых и компактных установок, управляемых дистанционно через сеть Internet и использующих вещательные КВ-радиостанции в качестве источников пробных сигналов. Применение многоканальных систем регистрации, реализующих метод ФПДФ, позволяет осуществлять также и угломерные измерения. Это открывает возможности создания глобальной сети угломерных и доплеровских измерений, что существенно расширяет возможности диагностики ионосферы при помощи доплеровского метода

Данные исследования проведены в рамках НИР «Ионосферно-магнитосферные исследования электромагнитных полей и сигналов СНЧ- и ВЧ-диапазонов в Арктике», которая выполняется в соответствии с постановлением Бюро Президиума НАН Украины № 279 от 27.10.2006 г., а также частично поддерживаны специальным грантом «Антипод» НАНУ и СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Намазов С.А., Новиков В.Д., Хмельницкий И.А. Доплеровское смещение частоты при ионосферном распространении дециметровых радиоволн (Обзор) // Известия вузов. Радиофизика. 1975. Т. 28, № 4. С. 473–500.
2. Белей В.С., Колосков А.В. О восстановлении спектральных характеристик волновых возмущений в ионосферном слое // Известия вузов. Радиофизика. 1992. Т. 35, № 9, 10. С. 753–760.

3. Радиоокеанографические исследования морского волнения / Под ред. С.Я. Брауде. Киев: Изд. АН УССР, 1962. 116 с.
4. Брюховецкий А.С., Кашеев А.С., Кашеев С.Б., Ямпольский Ю.М. Двухпозиционное КВ-рассеяние взволнованной морской поверхностью. Часть 1: Теория // Радиофизика и радиоастрономия. 2003. Т. 8, № 3. С. 235–241.
5. Брюховецкий А.С., Кашеев А.С., Кашеев С.Б. и др. Двухпозиционное КВ-рассеяние взволнованной морской поверхностью. Часть 2: Эксперимент // Радиофизика и радиоастрономия. 2003. Т. 8, № 3. С. 242–252.
6. Колосков А.В. КВ-радиодиагностика крупномасштабных ионосферных процессов: Кандидатская диссертация. Харьков: РИНАН Украины, 1998. 173 с.
7. Брауде С.Я., Мень А.В., Содин Л.Г. Радиотелескоп дециметрового диапазона волн УТР-2 // Антенны. М.: Связь, 1978. Вып. 26. С. 3–15.
8. Koloskov A.V., Leyser T.B., Yampolsky Yu.M., Beley V.S. HF pump-induced large scale radial drift of small scale magnetic field-aligned density striations // J. Geophys. Res. 2002. V. 107, N A7. 1029/2001JA000154.
9. Афраймович Э.Л., Интерференционные методы радиозондирования ионосферы. М.: Наука, 1982. 200 с.
10. Пикулик И.И., Кашеев С.Б., Галушко В.Г., Ямпольский Ю.М. Приемный КВ-комплекс для частотно-углового зондирования ионосферных возмущений в Антарктиде // Украинский Антарктический журнал. 2003. № 1. С. 61–69.
11. Galushko V.G., Kascheyev A.S., Kascheyev S.B., et al. Bistatic HF diagnostics of TIDs over the Antarctic Peninsula // J. Atm. Sol.-Terr. Phys. 2007. V. 69. P. 403–410.

Радиоастрономический институт НАНУ, Харьков, Украина