

ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Збірник наукових праць
Тематичний випуск
“Радіофізика та іоносфера”

44’2011

Видання засновано Національним технічним університетом
“Харківський політехнічний інститут” у 2001 році

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з
інформаційної політики України
КВ № 5256 від 2 липня 2001 р.

КООРДИНАЦІЙНА РАДА:

Голова

Л.Л. Тovaжнянський, д-р техн. наук, проф.

Секретар

К.О. Горбунов, канд. техн. наук, доц.;

А.П. Марченко, д-р техн. наук, проф.;

Є.І. Сокол, д-р техн. наук, проф.;

Є.Є. Александров, д-р техн. наук, проф.;

Л.М. Бесов, д-р техн. наук, проф.;

А.В. Бойко, д-р техн. наук, проф.;

Ф.Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.;

М.Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.;

А.І. Грабченко, д-р техн. наук, проф.;

В.Г. Данько, д-р техн. наук, проф.;

В.Д. Дмитриченко, д-р техн. наук, проф.;

І.Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.;

В.В. Єпифанов, канд. техн. наук, проф.;

Ю.І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.;

П.О. Качанов, д-р техн. наук, проф.;

В.Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.;

С.І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.;

В.М. Кошельник, д-р техн. наук, проф.;

В.І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.;

Г.В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.;

В.С. Лупіков, д-р техн. наук, проф.;

О.К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.;

В.І. Николаско, канд. іст. наук, проф.;

П.Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.;

В.О. Пуляєв, д-р техн. наук, проф.;

М.І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.;

В.Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.;

Г.М. Сучков, д-р техн. наук, проф.;

Ю.В. Тимофіїв, д-р техн. наук, проф.;

Н.А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Відповідальний редактор:

В.О. Пуляєв, д-р техн. наук, проф.

Відповідальний секретар:

М.В. Ляшенко, канд. фіз.-мат. наук

Д.А. Дзюбанов, канд. фіз.-мат. наук, с.н.с.;

І.Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.;

Ф.В. Ківва, д-р фіз.-мат. наук, проф.;

О.С. Мазманішвілі, д-р фіз.-мат. наук, проф.;

Є.В. Рогожкін, д-р фіз.-мат. наук, проф.;

В.І. Таран, д-р фіз.-мат. наук, проф.;

Г.С. Хрипунов, д-р техн. наук, проф.;

Л.Ф. Черногор, д-р фіз.-мат. наук, проф.;

І.В. Яковенко, д-р фіз.-мат. наук, проф.

Адреса редколегії:

61002, м. Харків, МСП,

вул. Червонопрапорна, 16

тел. (057) 707-65-27

e-mail: iion@kpi.kharkov.ua

Харків 2011

ISSN 2078-9998

Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Радіофізика та іоносфера. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2011. – № 44. – 148 с.

В збірнику представлені теоретичні та практичні результати наукових досліджень та розробок, що виконані викладачами вищої школи, аспірантами, науковими співробітниками різних організацій та установ.

Для викладачів, наукових співробітників, спеціалістів.

В сборнике представлены теоретические и практические результаты исследований и разработок, выполненных преподавателями высшей школы, аспирантами, научными сотрудниками различных организаций и учреждений.

Для преподавателей, научных сотрудников, специалистов.

**Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ “ХПІ”,
протокол № 10 від 1 листопада 2011 р.**

© Національний технічний університет “ХПІ”, 2011

Л.Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, канд. физ.-мат. наук, зав. отделом, Институт ионосферы, Харьков

Т.Г. ЖИВОЛУП, канд. физ.-мат. наук, н.с., Институт ионосферы, Харьков

ИНСТИТУТ ИОНОСФЕРЫ НАН И МОН УКРАИНЫ. КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Розглянуто етапи становлення та розвитку Інституту іоносфери Національної академії наук України і Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, який в 2011 р. відмічає свій 20-річний ювілей. Показано основні напрями науково-технічної діяльності Інституту, його зв'язки з вітчизняними та зарубіжними науковими організаціями, основні наукові досягнення.

Рассмотрены этапы становления и развития Института ионосферы Национальной академии наук Украины и Министерства образования и науки, молодежи и спорта Украины, который в 2011 г. отмечает свой 20-летний юбилей. Показаны основные направления научной и технической деятельности Института, его связи с отечественными и зарубежными научными организациями, основные научные достижения.

The stages of formation and development of the Institute of Ionosphere of the National Academy of Sciences of Ukraine and Ministry of Education, Youth and Sports of Ukraine, which celebrates its 20 anniversary in 2011 are considered. The main directions of scientific and technical activities of the Institute, its relations with domestic and foreign scientific institutions, major scientific achievements are demonstrated.

Інституту іоносфери исполнилось 20 лет. Но история Института началась задолго до его создания.

В конце 1940-х – начале 1950-х гг. стремительно начали развиваться радиолокация, радионавигация и другие отрасли науки, связанные с радиофизикой, радиотехникой и радиоэлектроникой, что было вызвано необходимостью укрепления обороны страны, развитием радиоэлектронной промышленности и началом космических исследований. Этим было обусловлено открытие в 1946 г. в Харьковском электротехническом институте (ХЭТИ) (с 1949 г. – Харьковский политехнический институт, ХПИ) радиотехнического факультета (РТФ).

С 1950 г. развернулись работы, связанные с исследованиями ионосферы: разработка ионосферной станции (под руководством С. Я. Брауде). С 1954 г. сотрудниками РТФ ХПИ начались работы по изучению среднеширотной ионосферы.

В 1963 г. на РТФ ХПИ была создана научно-исследовательская лаборатория ионосферы (НИЛИ), которую возглавил В. И. Таран, в будущем д.ф.-м.н., профессор. Эта лаборатория начала заниматься работами, направленными на проведение исследований новым многообещающим



Профессор В. И. Таран

методом – методом некогерентного рассеяния (НР) радиоволн.

Вблизи г. Змиёва (около 50 км от г. Харькова) начала создаваться уникальная, единственная в Советском Союзе обсерватория с эталонными научными инструментами – специализированными радаром НР. В первую очередь были возведены здания, в которых устанавливалась аппаратура, водонапорная башня, проведены гидротехнические сооружения и мощные коммуникации электроснабжения. К этим работам привлекалось множество организаций.

Министерством обороны было передано радиотехническое оборудование, которое стало основой радаров НР. В демонтаже оборудования, перевозке и монтаже на экспериментальной базе в г. Змиеве принимали участие десятки сотрудников. Специфические для метода НР узлы радаров разрабатывались и изготавливались нашими сотрудниками.

На протяжении многих лет десятками учёных, инженеров, техников, обслуживающим персоналом была проделана огромная работа по созданию высокопотенциальных радаров НР, специализированных систем обработки информации, эффективных методик зондирования ионосферы, приёма НР сигнала и его обработки.

В 1968 г. была введена в эксплуатацию автоматическая ионосферная станция (АИС), которая в дальнейшем была модернизирована и эксплуатировалась до 1980-х годов. Большой вклад в интерпретацию данных об ионосфере, полученных методом вертикального зондирования, внесли Е. И. Григоренко и Т. Г. Живолуп.

В 1971 г. в ХПИ была создана общетехническая кафедра «Радиоэлектроника», которую возглавил В. И. Таран. В 1989 г. кафедра приступила к подготовке и выпуску инженеров-радиофизиков.

С 1971 г. НИЛИ преобразовывалась в научно-исследовательскую лабораторию кафедры «Радиоэлектроника» (НИЛ РЭ), Отдельное, а затем и Особое конструкторское бюро радиофизических исследований ионосферы (ОКБ РФИИ).

Первые результаты методом НР были получены в 1972 г. с помощью радара с неподвижной параболической антенной диаметром 30 м.



Радар НР с параболической антенной диаметром 100 м

В дальнейшем был значительно повышен потенциал радара. Опытным заводом ХПИ была создана уникальная наибольшая в Европе зенитная двухзеркальная параболическая антенна диаметром 100 м. Внедрено новое более надёжное и чувствительное радиоприёмное устройство. На их базе создан радар НР метрового диапазона

волн, который позволил исследовать ионосферу на высотах 100–1500 км методом НР и проводить систематические измерения основных параметров ионосферы (электронной концентрации, температур электронов и ионов, скорости движения ионосферной плазмы, относительной концентрации молекулярных и атомарных ионов). Такого набора данных невозможно получить другими методами исследования ионосферы.

В 1975 г. начали проводиться регулярные исследования ионосферы с помощью коррелометра, разработанного под руководством Е. В. Рогожкина.

В 1983 г. под руководством к.т.н. Н. П. Маглеванного были проведены первые эксперименты с кодированными сигналами и получены новые научные результаты.

В 1985 г. была введена в эксплуатацию автоматическая ионосферная станция «Базис», которая и в настоящее время используется для калибровки радара НР и исследования ионосферы методом вертикального зондирования.

В 1985 г. были проведены первые эксперименты с возмущениями ионосферной плазмы мощным ВЧ излучением с помощью введенного к этому времени декаметрового нагревного стенда. В этих работах принимали участие А. Н. Смирнов, В. К. Боговский, Л. Я. Емельянов, А. П. Богдан, В. В. Дивавин. Впоследствии к выполнению этих работ были привлечены Л. П. Гончаренко и В. Н. Лысенко.



Ионозонд «БАЗИС»

В 1986–1989 гг. под руководством Е. В. Рогожкина был введен в эксплуатацию многофункциональный коррелометр «СКИФ». Под руководством Л. Я. Емельянова была разработана и внедрена многофункциональная многоканальная приёмно-задающая система. Эти структурные элементы радара НР значительно расширили его возможности.

В 1989 г. под руководством Я. Н. Чепурного была введена в эксплуатацию полноповоротная антенна диаметром 25 м. С её помощью были получены первые уникальные результаты по пространственному исследованию ионосферы методом НР.

Кроме этого, проводились исследования тонкой структуры нижней части ионосферы с помощью радара НР дециметрового диапазона волн (С. В. Черняев, В. Н. Лысенко, В. Н. Авдеев).

Под руководством В. Н. Лысенко были разработаны и внедрены системы обработки нового поколения.

17 апреля 1991 г. постановлением Совета Министров УССР № 139-р на базе ОКБ РФИИ был создан Институт ионосферы НАН и МОН Украины. Директором Института ионосферы стал проф. В. И. Таран.



Обсерватория Института ионосферы

С момента создания Института ионосферы продолжалось развитие экспериментальной базы, в частности, радиопередающих, радиоприёмных и обрабатывающих систем, совершенствовались методы обработки информации.



Профессор И. Ф. Домнин

В целом, получен большой объём экспериментальных данных в течение трёх циклов солнечной активности.

В 2001 г. научный центр, именуемый «Ионосферный зонд», был признан объектом Национального достояния Украины.

С 2009 г. Институт ионосферы НАН и МОН Украины возглавил д.т.н, проф. И. Ф. Домнин. Он провёл комплекс работ по совершенствованию научно-экспериментальной базы Института, развитию сотрудничества с отечественными и зарубежными учёными и научными организациями. Большое внимание проф. И. Ф. Домнин уделяет молодым учёным, аспирантам и, в частности, подготовке магистров и специалистов по специальности «Радиофизика и электроника», возглавляя с 2008 г. кафедру «Радиоэлектроника» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» (НТУ «ХПИ»). Институт ионосферы пополняют наиболее перспективные выпускники этой кафедры, а

также радиофизического факультета Харьковского национального университета (ХНУ) имени В. Н. Каразина. Успешно защищаются диссертации.

Ниже приведен краткий перечень ряда основных работ, отражающих достижения института. Общее руководство осуществляли д.ф.-м.н., проф. В. И. Таран (до марта 2009 г.) и д.т.н., проф. И. Ф. Домнин (с апреля 2009 г.).

– Разработка радиотехнических систем радаров НР метрового диапазона волн, их модернизация и экспериментальные исследования.

– Внедрение аппаратуры и экспериментальные работы на радаре НР дециметрового диапазона.

– Строительство фазированной антенной решётки размерами $300 \times 300 \text{ м}^2$ и внедрение аппаратуры нагревного стенда ВЧ диапазона.

– Ввод и эксплуатация вычислительных средств.

– Разработка, внедрение и модернизация специализированных устройств обработки.

– Разработка алгоритмов и программ обработки НР сигнала.

– Обработка данных и интерпретация измеренных параметров ионосферы.

– Разработка и развитие ионосферных моделей.

– Исследование быстропротекающих процессов в ионосфере (реакция ионосферы на запуски космических аппаратов, мощные взрывы, волновые процессы в ионосфере).

– Исследование влияния геокосмических бурь и солнечных затмений.

– Техническое обеспечение работ на экспериментальной базе в г. Змиёве.

Значительный вклад в эти работы внесли: Е. В. Рогожкин, В. И. Головин,

В. И. Лиокумович, Е. И. Григоренко, И. Н. Пресняков, О. А. Соляник, С. Д. Андренко, А. С. Ефременко, Ю. Г. Гукасов, Ф. А. Маенко, В. Н. Лысенко, Л. Я. Емельянов, В. П. Курисько, М. Н. Паун, А. Н. Смирнов, И. Б. Скларов, Е. И. Стаховская, Я. Н. Чепурной, Г. М. Тиняков, Н. А. Смагло, А. Д. Коваль, В. А. Лазарев, В. И. Волошин, С. В. Черняев, В. И. Евченко, А. А. Загорин, В. Н. Авдеев, В. М. Белоус, В. К. Боговский, А. П. Богдан, В. В. Дивавин, А. И. Поливаний, А. Н. Хлебников, В. А. Пуляев, М. Н. Забирко, Н. Ф. Шаталова, Н. П. Маглеванный, А. Е. Андреев, Л. А. Петров, А. Ф. Кононенко, Н. И. Палий, С. Я. Тимонин, В. А. Филоненко, В. Г. Замковой, В. П. Лукьяненко, В. И. Ващенко, Е. Г. Жилияков, А. В. Болибок, Е. В. Попкова, Г. П. Роменская, С. Р. Третьяков, Д. А. Дзюбанов, Л. Ф. Черногор, Ю. И. Подьячий, Т. Г. Живолуп, Л. П. Гончаренко, Ф. Б. Чёрный, С. В. Гринченко, Т. В. Толстова, М. В. Лященко, В. П. Бурмака, С. А. Пазюра, Д. В. Котов, А. В. Богомаз, В. В. Барабаш, Е. И. Замула, Н. Ф. Гринько, В. В. Краснокутский, Н. Н. Шевченко.



Элементы антенны нагревного стенда

Большой вклад в планирование научно-технических работ Института, установление связей с заказчиками, заключение договоров и координацию взаимодействия с внешними организациями внёс А. Н. Гридин.

В настоящее время в состав Ионосферной обсерватории в г. Змиёве входят:

- радар НР метрового диапазона с неподвижной антенной вертикального излучения диаметром 100 м;
- радар НР метрового диапазона с полноповоротной антенной диаметром 25 м;
- нагревной стенд декаметрового диапазона;
- ионозонд вертикального зондирования.

С 1991 г. началось регулярное сотрудничество с учёными США из лаборатории Хейстек Массачусетского технологического института (МТИ). В 1992 г. делегация американских учёных посетила Институт ионосферы и его обсерваторию, был проведен научный семинар. Сотрудники Института ионосферы были приглашены в США для совместных исследований. В 1993 г. лабораторию Хейстек посетил В. Н. Лысенко. С октября 1994 по январь 1995 г. проф. В. И. Таран, проф. Е. В. Рогожкин и Л. П. Гончаренко работали в лаборатории Хейстек МТИ и на радиотелескопе Корнельского университета в Аресибо (Пуэрто-Рико, США). В январе 1995 г. состоялась презентация Института ионосферы в Национальном научном фонде США в Вашингтоне.

В связи с высоким международным авторитетом Института ионосферы 14–18 августа 1995 г. в Институте была проведена рабочая группа Международного радиосоюза URSI по некогерентному рассеянию, в работе которой принимали участие ведущие российские ученые: д.ф.-м.н. А. В. Михайлов, к.ф.-м.н. А. В. Ташилин, ведущие ученые США по исследованию ионосферы методом НР д-р Д. Фостер, д-р Д. Келли, д-р С. Гонзалес и учёные Института ионосферы.

В 1998 и 1999 гг. Институт ионосферы проводил исследования вариаций легких ионов гелия и водорода в рамках Гранта, выделенного Национальным научным фондом США. Результаты этих исследований получили высокую оценку учёных зарубежных стран.

Совместные исследования ионосферы с обсерваториями Хэйстек и Аресибо, проводимые с 1996 г. согласно Международному геофизическому календарю, позволили обнаружить долготные и широтные вариации концентрации ионов водорода.

В 1999 г. зав. отделом Института ионосферы к.т.н. В. А. Пуляев посетил лабораторию Хейстек МТИ и международный центр атмосферных данных NCAR в Национальном центре атмосферных исследований (Боулдер, США).



Радар НР
с полноповоротной
антенной

В течение последнего десятилетия сотрудничество с зарубежными учёными успешно продолжается и развивается. В частности, Институт ионосферы и его экспериментальную обсерваторию посетили учёные из Европейской научной ассоциации по некогерентному рассеянию (EISCAT)



Директор EISCAT Е. Турунен и д-р К. Кауристи с учёными Института ионосферы

(в 2003 г. профессор Университета Уэльса (Великобритания) Ф. Уильямс, председатель научного консультативного комитета ассоциации EISCAT, член Национальной ассамблеи Уэльса, в 2010 г. – директор EISCAT Е. Турунен, проф. А. Брекке и д-р К. Кауристи). Учёные высоко оценили экспериментальные средства и результаты научных исследований, представленные сотрудниками Института ионосферы. В 2009 г. Ю. В. Черняк участвовал в работе 14-й

Международной рабочей группы EISCAT (Норвегия). В сентябре 2010 г. зам. директора Института д.ф.-м.н., проф. В. А. Пуляев участвовал в заседании Научного наблюдательного совета ассоциации EISCAT (С.-Петербург), в которой Украину представляет Национальная академия наук.

Институт ионосферы участвует в международной кооперации COST (Европейское сотрудничество в области научных и технических исследований) по программе COST Action ES0803 – Развитие европейской службы прогнозирования космической погоды.

Институт активно сотрудничает с научными организациями и университетами Украины, в первую очередь с НТУ «ХПИ», Радиоастрономическим институтом НАН Украины, ХНУ имени В. Н. Каразина, Институтом радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова, Институтом геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины (Киев), Институтом космических исследований НАНУ и НКАУ (Киев и Львов), Харьковским университетом воздушных сил имени Ивана Кожедуба Министерства обороны Украины. Развиваются научные связи Института ионосферы с Институтом солнечно-земной физики СО РАН (Иркутск), Научно-исследовательским радиофизическим институтом (НИРФИ) (Н. Новгород), Институтом ионосферы Республики Казахстан (Алма-Ата) и др., проводятся совместные эксперименты.

На базе Института ионосферы и кафедры космической радиофизики радиофизического факультета ХНУ имени В. Н. Каразина с целью повышения эффективности совместных исследований атмосферы и геокосмоса создана Межведомственная научно-исследовательская лаборатория радиофизических исследований атмосферы и геокосмоса.

Совместно с НТУ «ХПИ» создан Научно-учебный центр дистанционного радиозондирования ионосферы «ИОН», осуществляющий теоретические и экспериментальные исследования, направленные на совершенствование существующих радиофизических методов исследования геокосмоса.

Результаты научных исследований Института ионосферы апробируются практически на всех тематических конференциях, симпозиумах и семинарах, проводимых в СНГ (до 1991 г. – в СССР), а также на многих международных форумах.

Множество печатных трудов сотрудников Института представлено в отечественных и зарубежных научных изданиях. Ежегодно издаётся сборник «Радиофизика и ионосфера» Вестника НТУ «ХПИ» с результатами научных достижений Института. В Вестнике публикуются учёные, специалисты, а также аспиранты, магистры и студенты.

Благодаря ведущей роли Института ионосферы в исследовании геокосмоса на базе Института с 2010 г. совместно с НТУ «ХПИ» проводится конференция молодых учёных «Дистанционное радиозондирование ионосферы» («ИОН»), в которой принимают участие представители молодого поколения учёных Украины и других стран.

Деятельность Института ионосферы тесно связана с учебным процессом и подготовкой специалистов на кафедре «Радиоэлектроника» НТУ «ХПИ». Участие в учебном процессе ведущих учёных Института ионосферы, использование уникального научно-исследовательского комплекса в г. Змиёве для студенческих практикумов и выполнение дипломных проектов по научной тематике Института позволили существенно повысить уровень подготовки выпускников кафедры.

Научная деятельность Института неоднократно поощрялась. Наиболее весомые поощрения: премия Совета Министров СССР (1989 г., 5 сотрудников), премия Президента Украины для молодых учёных (2006 и 2010 гг., 5 сотрудников), а также стипендии Кабинета министров Украины, знак отличия „За наукові досягнення” МОН Украины, почётные грамоты НАНУ и МОНУ, грамоты Президиума НАНУ и Харьковского областного Совета. Молодые учёные неоднократно являлись победителями ежегодного областного конкурса „Найкращий молодий науковець Харківщини”.

В настоящее время Институт ионосферы успешно проводит исследования геокосмоса в спокойных гелиогеофизических условиях, а также во время уникальных событий в околоземной среде – геокосмических бурь, солнечных затмений и др. Проводятся работы по исследованию волновых процессов в плазме от источников естественного и искусственного происхождения, развитие региональной модели ионосферы по данным харьковского радара НР. Свои работы Институт ионосферы координирует с зарубежными научными организациями, которые активно ведут ионосферные исследования.

Поступила в редколлегию 29.06.2011

С.В. ГРИНЧЕНКО, н.с., Институт ионосферы, Харьков

ПОСТРОЕНИЕ ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ОБЛАСТЕЙ E, F1, F2 ПО ХАРАКТЕРНЫМ ТОЧКАМ МАКСИМУМОВ СЛОЁВ И ДОЛИН

Використання в аерономічних обчисленнях експериментальних даних електронної концентрації, представлених у вигляді значень на дискретних висотах, потребує їх попереднього згладжування і безперервної апроксимації. Для розв'язання цієї задачі запропоновано алгоритм побудови профілю електронної концентрації за його характерними параметрами.

Использование в аэрономических расчётах экспериментальных данных электронной концентрации, представленных в виде значений на дискретных высотах, требует их предварительного сглаживания и непрерывной аппроксимации. Для решения этой задачи предложен алгоритм построения профиля электронной концентрации по его характерным параметрам.

Using of experimental data of electron density, presented in the form of values at discrete heights, for aeronomy calculations demands their preliminary smoothing and continuous approximation. To solve this problem the algorithm of construction of electron density profile under its characteristics is offered.

Постановка задачі. Для решения ряда прикладных геофизических задач необходимо сглаживание экспериментальных профилей электронной концентрации $n_e(h)$ дифференцируемыми функциями. Сглаженные значения $n_e(h, t)$ должны быть непрерывно изменяющимися не только по высоте, но и во времени. Высотно-временные изменения электронной концентрации должны иметь физический характер: на определённых высотных участках и временных интервалах функции должны сохранять монотонность, а при некоторых заранее определённых значениях h и t должны иметь экстремумы.

Целью данной работы является создание алгоритма построения высотного профиля электронной концентрации в диапазоне 90 – 400 км, охватывающего E, F1 и F2-слои.

Обзор литературы. Построению профиля электронной концентрации выше области F2 посвящена работа [1]. Особенность профиля электронной концентрации $n_e(h)$ внешней ионосферы заключается в изменении с высотой шкалы высот – величины H , характеризующей экспоненциальную зависимость $n_e(h)$.

При описании профиля в окрестности максимума электронной концентрации в прикладных задачах распространения радиоволн часто используют уравнение параболического слоя [2]:

$$n_e(h) = n_{em} F2 \left[1 - \left(\frac{h - h_m F2}{H} \right)^2 \right], \text{ где } H - \text{ полутолщина параболы, т.е.}$$

половина расстояния между высотами, на которых электронная концентрация равна нулю; $n_{em}F2$ – значение электронной концентрации на высоте h_mF2 максимума области F2.

Для описания эмпирической модели ионосферы области F2 в ГОСТах СССР [3, 4, 5] используется формула

$$n_e(h) = n_{em}F2 \exp\left(1 + \frac{h_mF2 - h}{H} - \exp\frac{h_mF2 - h}{H}\right).$$

Можно показать, что при больших значениях h формула имеет экспоненциальное распределение, характеризующееся постоянной шкалой высот H .

В [3, 4, 5] также приведена формула для описания профиля электронной концентрации при наличии E, F1, F2-слоёв:

$$\begin{aligned} n_e(h) = & n_{em}F2 \exp\left(1 + \frac{h_mF2 - h}{H} - \exp\frac{h_mF2 - h}{H}\right) + \\ & + n_{em}F1 \exp\left(0.5 + \frac{h_mF1 - h}{68} - 0.5 \exp\frac{h_mF1 - h}{34}\right) + \\ & + n_{em}E \exp(0.5 + 0.05(h_mE - h) - 0.5 \exp[0.1(h_mE - h)]). \end{aligned}$$

Отметим, что в этой формуле числовые коэффициенты $n_{em}F2$, h_mF2 , $n_{em}F1$, h_mF1 , $n_{em}E$, h_mE вовсе не являются значениями электронной концентрации и высоты максимума слоёв F2, F1 и E, а вычисляются согласно сложным эмпирическим формулам, приведенным в ГОСТах СССР.

Анализ формулы электронной концентрации $n_e(h)$ области F2 ГОСТ СССР. Проанализируем формулу

$$n_e(h) = n_{em}F2 \exp\left(1 + \frac{h_mF2 - h}{H} - \exp\frac{h_mF2 - h}{H}\right),$$

или

$$\ln n_e(h) = \ln n_{em}F2 + 1 + \frac{h_mF2 - h}{H} - \exp\frac{h_mF2 - h}{H}.$$

На высоте $h=h_mF2$ главного максимума логарифм электронной концентрации $\ln n_e(h_mF2) = \ln n_{em}F2 + 1 + 0 - 1 = \ln n_{em}F2$. Производная

$\frac{d}{dh} \ln n_e(h) = \frac{1}{H} \left(\exp\frac{h_mF2 - h}{H} - 1 \right)$. Так как при $h = h_mF2$ производная

$$\frac{d}{dh} \ln n_e(h) = 0, \quad \text{при} \quad h > h_mF2 \quad \frac{d}{dh} \ln n_e(h) < 0, \quad \text{при} \quad h < h_mF2$$

$\frac{d}{dh} \ln n_e(h) > 0$, то значение $h = h_m F2$ является высотой максимума функции $n_e(h)$.

При $h \gg h_m F2$ функция $\ln n_e(h) \cong \ln n_{em} F2 + 1 - \frac{h}{H}$, т.е. распределение $n_e(h)$ имеет экспоненциальный характер.

Величину H называют полутолщиной слоя F2. Для того, чтобы выяснить смысл величины H , проведём следующие элементарные вычисления. На высоте $h = h_m F2 + H$ получаем:

$$\begin{aligned} \ln n_e(h_m F2 + H) &= \ln n_{em} F2 + 1 - \exp(-1) = \ln n_{em} F2 - e^{-1}; \\ \ln n_{em} F2 - \ln n_e(h_m F2 + H) &= e^{-1} \approx 0.3679; \\ \frac{n_{em} F2}{n_e(h_m F2 + H)} &= e^{e^{-1}} \approx 1.4447. \end{aligned}$$

На высоте $h = h_m F2 - H$ ниже высоты главного максимума:

$$\begin{aligned} \ln n_e(h_m F2 - H) &= \ln n_{em} F2 + 1 + 1 - \exp(1) = \ln n_{em} F2 + 2 - e; \\ \ln n_{em} F2 - \ln n_e(h_m F2 - H) &= e - 2 \approx 0.7183; \\ \frac{n_{em} F2}{n_e(h_m F2 - H)} &= e^{e-2} \approx 2.0509. \end{aligned}$$

Таким образом,

$$\begin{aligned} \lg n_{em} F2 - \lg n_e(h_m F2 + H) &= \frac{e^{-1}}{\ln 10} \approx 0.1598, \\ \lg n_{em} F2 - \lg n_e(h_m F2 - H) &= \frac{e-2}{\ln 10} \approx 0.3119. \end{aligned}$$

Как видим, верхняя часть построенного профиля электронной концентрации шире нижней части.

Обобщение формулы $n_e(h)$ области F2. Так как величина H не позволяет отдельно описывать полутолщины верхней и нижней частей профиля электронной концентрации области F2, опишем профиль $n_e(h)$ формулой более общего вида:

$$n_e(h) = n_{em} F2 \exp\left(A + \frac{h_m F2 - h}{B} - C \exp\frac{h_m F2 - h}{D}\right),$$

$$\text{или } \ln n_e(h) = \ln n_{em} F2 + A + \frac{h_m F2 - h}{B} - C \exp\frac{h_m F2 - h}{D}.$$

В этом случае $\ln n_e(h_m F2) = \ln n_{em} F2 + A + 0 - C = \ln n_{em} F2$, следовательно, $A=C$ и формула принимает вид:

$$n_e(h) = n_{em} F2 \exp\left(A + \frac{h_m F2 - h}{B} - A \exp\frac{h_m F2 - h}{D}\right),$$

или $\ln n_e(h) = \ln n_{em} F2 + A + \frac{h_m F2 - h}{B} - A \exp\frac{h_m F2 - h}{D}$.

Производная $\frac{d}{dh} \ln n_e(h) = -\frac{1}{B} + A \exp\frac{h_m F2 - h}{D} \frac{1}{D}$. Так как при

$h = h_m F2$ производная $\frac{d}{dh} \ln n_e(h) = -\frac{1}{B} + \frac{A}{D} = 0$, то $A \cdot B = D$. Тогда

$$\begin{aligned} \ln n_e(h) &= \ln n_{em} F2 + A + A \frac{h_m F2 - h}{D} - A \exp\frac{h_m F2 - h}{D} = \\ &= \ln n_{em} F2 + A \left(1 + \frac{h_m F2 - h}{D} - \exp\frac{h_m F2 - h}{D}\right), \\ n_e(h) &= n_{em} F2 \exp\left(A \left(1 + \frac{h_m F2 - h}{D} - \exp\frac{h_m F2 - h}{D}\right)\right). \end{aligned}$$

Полученная формула является более общей для описания профиля электронной концентрации главного максимума. В этой формуле присутствует 4 коэффициента: $h_m F2$, $n_{em} F2$, A и D . Два из них являются геометрическими параметрами профиля $n_e(h)$: $h_m F2$ – высота главного максимума, $n_{em} F2$ – значение электронной концентрации в максимуме слоя. Введём в рассмотрение верхнюю полутолщину t_u , под которой будем понимать изменение высоты вверх от $h_m F2$, при котором концентрация электронов уменьшается в 2 раза, и соответственно нижнюю полутолщину t_l . Значения коэффициентов A и D определяются уравнениями:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{n_{em} F2}{n_e(h_m F2 + t_u)} = 2 \\ \frac{n_{em} F2}{n_e(h_m F2 - t_l)} = 2 \end{array} \right. , \text{ т.е. } \left\{ \begin{array}{l} A \left(1 - \frac{t_u}{D} - \exp\left(-\frac{t_u}{D}\right)\right) = -\ln 2 \\ A \left(1 + \frac{t_l}{D} - \exp\frac{t_l}{D}\right) = -\ln 2 \end{array} \right. .$$

Отсюда $1 - \frac{t_u}{D} - \exp\left(-\frac{t_u}{D}\right) = 1 + \frac{t_l}{D} - \exp\frac{t_l}{D}$, $\exp\frac{t_l}{D} - \exp\left(-\frac{t_u}{D}\right) = \frac{t_l}{D} + \frac{t_u}{D}$,

$$e^{\frac{t_l}{D}} - e^{-\frac{t_u}{D}} = \frac{t_l + t_u}{D} .$$

Для вычисления коэффициента D решим уравнение $f(D) = e^{\frac{t_l}{D}} - e^{-\frac{t_u}{D}} - \frac{t_l + t_u}{D} = 0$. Согласно метода касательных решение найдём по

итерационной формуле: $D_{k+1} = D_k - \frac{f(D_k)}{f'(D_k)}$, где производная

$$f'(D) = e^{\frac{t_l}{D}} \left(-\frac{t_l}{D^2} \right) - e^{-\frac{t_u}{D}} \frac{t_u}{D^2} + \frac{t_l + t_u}{D^2} = -\frac{t_l}{D^2} e^{\frac{t_l}{D}} - \frac{t_u}{D^2} e^{-\frac{t_u}{D}} + \frac{t_l + t_u}{D^2}.$$

Начальное приближение D_0 найдём, используя степенные разложения:

$$e^{\frac{t_l}{D}} = 1 + \frac{t_l}{D} + \frac{t_l^2}{2D^2} + \frac{t_l^3}{6D^3} + \dots, \quad e^{-\frac{t_u}{D}} = 1 - \frac{t_u}{D} + \frac{t_u^2}{2D^2} - \frac{t_u^3}{6D^3} + \dots$$

Подставляя эти разложения в уравнение $e^{\frac{t_l}{D}} - e^{-\frac{t_u}{D}} = \frac{t_l + t_u}{D}$, получаем:

$$\left(1 + \frac{t_l}{D_0} + \frac{t_l^2}{2D_0^2} + \frac{t_l^3}{6D_0^3} \right) - \left(1 - \frac{t_u}{D_0} + \frac{t_u^2}{2D_0^2} - \frac{t_u^3}{6D_0^3} \right) = \frac{t_l + t_u}{D_0},$$

$$\frac{t_l^2}{2D_0^2} + \frac{t_l^3}{6D_0^3} - \frac{t_u^2}{2D_0^2} + \frac{t_u^3}{6D_0^3} = 0, \quad t_l^2 + \frac{t_l^3}{3D_0} - t_u^2 + \frac{t_u^3}{3D_0} = 0,$$

$$\frac{t_l^3 + t_u^3}{3D_0} = t_u^2 - t_l^2, \quad \text{отсюда } D_0 = \frac{t_l^3 + t_u^3}{3(t_u^2 - t_l^2)}.$$

Таким образом, коэффициенты A и B являются функциями параметров t_u и t_l : $A = A(t_u, t_l)$, $B = B(t_u, t_l)$. На рис. 1 приведен пример построения профиля электронной концентрации при $h_m F2 = 260$ км, $\lg n_{em} F2 = 5.75$ ($[n_{em} F2] = \text{см}^{-3}$), $t_u = 90$ км и $t_l = 70$ км.

Построение профиля электронной концентрации, содержащего F2, F1, E-слои. Рассмотрим задачу построения высотного профиля электронной концентрации нижней части ионосферы по высотам $h_m E$, $h_m F1$, $h_m F2$ максимумов концентрации электронов слоёв E, F1, F2, высотам $h_v E$, $h_v F1$ минимумов электронной концентрации долин слоёв E, F1, а также соответствующим значениям $n_{em} E$, $n_{em} F1$, $n_{em} F2$, $n_{ev} E$, $n_{ev} F1$ концентрации электронов. Для описания профиля электронной концентрации воспользуемся формулой вида

$$n_e(h) = n_{em} F2 \exp \left(1 + \frac{h_m F2 - h}{HF2} - \exp \frac{h_m F2 - h}{HF2} \right) +$$

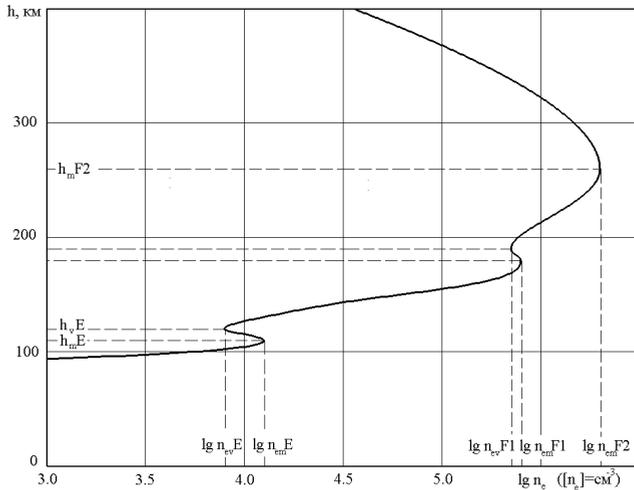


Рис. 2. Характерные точки профиля электронной концентрации, содержащего E, F1 и F2-слои

Выводы. Для сглаживания экспериментальных профилей электронной концентрации области F2 целесообразно использовать предложенный алгоритм построения профиля по его геометрическим параметрам: h_mF2 , $n_{em}F2$, t_u и t_l . Для сглаживания профиля электронной концентрации, имеющего помимо главного максимума (слоя F2) E и F1-слои, можно воспользоваться предложенным алгоритмом построения профиля по характеристикам его слоёв и долин. Принципиальное отличие предложенных алгоритмов построения профилей электронной концентрации $n_e(h)$ от известных заключается в том, что параметры, задающие профиль $n_e(h)$, являются визуально наглядными и легко определяются из экспериментальных данных.

Список литературы: 1. Гринченко С.В. Построение профиля электронной концентрации по его геометрическим параметрам при моделировании области F2 и внешней части ионосферы // Космічна наука і технологія. – 2010 – 16, № 5. – С. 38 – 45. 2. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. – М.: Мир, 1973. – 504 с. 3. Ионосфера Земли. Динамическая модель электронной концентрации на высоких широтах. ГОСТ 25645.140-86. Государственный комитет СССР по стандартам. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 8 с. 4. Ионосфера Земли. Динамическая модель электронной концентрации на средних и низких широтах. ГОСТ 25645.141-86. Государственный комитет СССР по стандартам. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 20 с. 5. Ионосфера Земли. Модель глобального распределения электронной концентрации. ГОСТ 25645.142-86. Государственный комитет СССР по стандартам. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 13 с.

Поступила в редколлегию 04.06.2011

Т.Г. ЖИВОЛУП, канд. физ.-мат. наук, н.с., Институт ионосферы, Харьков
Л.Ф. ЧЕРНОГОР, д-р физ.-мат. наук, проф., ХНУ имени В.Н. Каразина

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОЗМУЩЕНИЙ В ИОНОСФЕРЕ, ВЫЗВАННЫХ СТАРТАМИ РАКЕТ “ПРОТОН” И “СОЮЗ”

Представлено результати спостережень за збуреннями в іоносфері, що виникали під час старту та польоту ракет “Протон” та “Союз”. Старти ракет з космодрому Байконур мали місце в 22:31 UT 29 березня 2005 р. та 12:34 UT 25 травня 2004 р. Знайдено часи запізнення та швидкості хвиль, що відповідають за перенесення збурень. Такі швидкості мають повільні МГД або магнітоградієнтні хвилі та внутрішні гравітаційні хвилі. При стартах ракет “Протон” і “Союз” близькими виявилися швидкості поширення збурень.

Представлены результаты наблюдений за возмущениями в ионосфере, которые возникали во время старта и полета ракет “Протон” и “Союз”. Старты ракет с космодрома Байконур произошли 29 марта 2005 г. в 22:31 UT и 25 мая 2004 г. в 12:34 UT. Найдены времена запаздывания и скорости волн, ответственных за перенос возмущений. Такие скорости имеют медленные МГД или магнитоградиентные волны и внутренние гравитационные волны. При стартах ракет “Протон” и “Союз” близкими оказались скорости распространения возмущений.

The results of observations of the disturbances in the ionosphere which arose during launching from Baikonur site and flight of rockets “Proton” and “Soyuz” are presented. The launching from Baikonur site occurred at 22:31 UT on 29 March 2005 and 12:34 UT on 25 May 2004. It is found times of delays and speeds of waves which are responsible for carry of disturbances. Such speeds could be attributed to slow MHD or magneto-gradient waves and internal gravitational waves. At starts of rockets “Proton” and “Soyuz” speeds of the disturbances propagation are almost equal.

Постановка задачі. Ефекти в іоносфері, що виникають при стартах і польотах потужних ракет з працюючими двигачами, відрізняються багатоманітністю, залежать від типу ракети і інших факторів. Загалом кажучи, не існує двох однакових реакцій на старт двох однакових ракет. Тому дослідження реакції середовища на старти і польоти ракет залишається актуальною задачею. Особливо цікаво порівняльний аналіз іоносферних ефектів при старті двох різних ракет: “Протон” і “Союз”.

Аналіз літератури. Ефекти стартів ракет (СР) вивчаються давно (см., наприклад, монографії [1, 8, 9]). Незважаючи на це, до сих пор до кінця не зрозумілі механізми виниклих збурень, не побудовані моделі фізичних процесів, що відбуваються на значительних (~ 1000 – 10000 км) відстанях від космодромів. Не до кінця виявлена роль взаємодії підсистем в системі Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера [5, 7]. Недостатньо вивчена залежність ефектів СР від стану космічної погоди і ступеня збуреності геокозмічної середовища.

В роботі [4] проведено порівняльний аналіз іоносферних ефектів СР “Союз”. При цьому один із стартів мав місце в спокійних умовах, а другий – в магнітозбурених. В [4] підтверджено, що навіть помірні

магнитная буря может существенно маскировать ионосферные эффекты СР. Не исключается и синергетическое взаимодействие эффектов СР и ионосферных бурь, их взаимное усиление или ослабление.

В данной работе проведен сравнительный анализ ионосферных эффектов при старте двух разных ракет: “Протон” и “Союз”. Как известно, ракета “Протон” примерно в два раза мощнее ракеты “Союз”.

Старты ракет “Протон” и “Союз” с космодрома Байконур произошли 29 марта 2005 г. в 22:31 и 25 мая 2004 г. в 12:34 (здесь и далее время UT).

Первый из них имел место на фоне весьма умеренной (по классификации [5, 7]) магнитной бури, а второй – в относительно спокойных условиях.

Цель статьи – изложение результатов сравнительного анализа ионосферных эффектов, сопровождавших старты ракет “Союз” и “Протон” в спокойных и слабо возмущенных условиях.

Гелиогеофизическая обстановка. День старта ракеты “Союз”, 25 мая 2004 г., был спокойным. Это обстоятельство существенно облегчало выделение возмущений, связанных со стартом ракеты.

Значения индекса AE не превышали 175 нТл. Индекс $D_{stmin} \approx -9.5$ нТл. Значения индекса K_p не превышали 2.

Изменения компоненты B_z межпланетного магнитного поля были в пределах ± 5 нТл.

Увеличение концентрации (от $2 \cdot 10^6$ до $6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$), температуры (от 10^5 до $2.4 \cdot 10^5$ К), скорости (от 350 до 550 км/с) и давления (от 1 до 2.5 нПа) солнечного ветра было незначительным. Значения функции Акасофу изменялись от 1 до 9 ГДж/с.

Остальные параметры, описывающие космическую погоду (P_{pr} , P_e , B_t , и H_p) изменялись незначительно.

В качестве фонового дня выбран день 19 мая 2004 г. В день, 19.05.2004 г., состояние космической погоды характеризовалось как спокойное. В частности, индекс K_p принимал значения 1 и 2.

В день старта ракеты “Протон” 29 марта 2005 г. около 18:00 имело место внезапное начало магнитной бури, главная фаза которой продолжалась примерно с 21:00 29 марта до 04:00 31 марта [3].

Буре предшествовало увеличение концентрации частиц, температуры и давления солнечного ветра соответственно от $2 \cdot 10^6$ до $6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$, от $5 \cdot 10^4$ до $1.5 \cdot 10^5$ К, от 0.1 до 0.2 нПа. Значения функции Акасофу увеличились до 10 ГДж/с. Компонента B_z межпланетного магнитного поля стала отрицательной примерно в момент наступления внезапного начала. Остальные параметры, описывающие космическую погоду (P_{pr} , P_e , B_t , и H_p) изменились незначительно.

Значения индексов было следующим: $AE_{max} \approx 300$ нТл, $D_{stmin} \approx -30$ нТл, $K_{pmax} = 4$.

Старт ракеты “Протон” пришелся на первые часы главной фазы магнитной бури. Учитывая, что согласно классификации, эта буря относилась к весьма умеренным, можно надеяться, что она не повлияла существенно на состояние ионосферы. Это облегчило поиск и идентификацию эффектов, связанных со стартом ракеты “Протон”.

В качестве фоновых суток выбраны сутки 28 марта. В ночь с 28 на 29 марта состояние космической погоды характеризовалось как спокойное. В частности, индекс K_p принимал значения 0 и 1.

Средства и методы наблюдения. Наблюдение за состоянием ионосферы осуществлялось при помощи модифицированного ионозонда “Базис”. Ионозонд Института ионосферы НАН и МОНМС Украины расположен в ионосферной обсерватории ($49^\circ 36'$ с.ш., $36^\circ 18'$ в.д.) вблизи г. Харькова. При вертикальном зондировании диапазон частот составляет 0.3 – 2.0 МГц, выходная мощность – 10 кВт, длительность излучаемых импульсов – 100 мкс, частота следования импульсов – 3.125 – 25 Гц. Ионограммы снимались с частотой 1 ионограмма в 15 мин. Погрешность отсчета критических частот F-области ионосферы ($f_{o,x}F2$) – 0.05 МГц.

Результаты наблюдений. Анализ *f*-графиков, полученных 29 – 30 марта 2005 г. Временные зависимости критических частот $f_oF2(t)$ и $f_xF2(t)$ показаны на рис. 1 и 2. Из рис. 1 видно, что за сутки до СР в ночь с 28 на 29 марта 2005 г. значения f_oF2 в интервале времени 21:00 – 01:00 изменялись незначительно. С 01:00 до 02:30 имело место падение f_oF2 , а затем ее рост. Это связано с предвосходными и восходными эффектами в ионосфере.

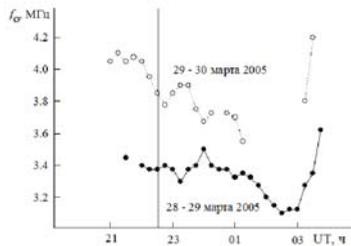


Рис. 1. Зависимость f_oF2 от времени в фоновый период (точки) и в период СР (кружки). На этом и следующих рисунках вертикальной линией показан момент запуска ракеты

В ночь с 29 на 30 марта 2005 г., т.е. в период СР, поведение f_oF2 было иным (см. рис. 1). Непосредственно перед СР наблюдалось некоторое (примерно на 0.2 МГц) уменьшение f_oF2 . Оно продолжалось и первые 15 мин после СР. Затем начался рост f_oF2 от 3.75 до 3.9 МГц. Рост продолжался в течение 45 мин. После 23:30 он сменился непродолжительным (около 30 мин) уменьшением f_oF2 . Далее в течение 30 мин наблюдалось уменьшение

f_oF2 от 3.9 до 3.7 МГц. За ним опять последовало увеличение f_oF2 примерно на 0.05 МГц. Затем в течение 45 мин течение f_oF2 оставалось почти неизменным, после этого наблюдалось уменьшение f_oF2 на 0.15 МГц. Далее из-за диффузности следа для О-волны определение f_oF2 в течение двух часов было невозможным.

Поведение $f_xF2(t)$ в интервале времени 21:00 – 01:15 было примерно таким же, как и поведение $f_oF2(t)$ (см. рис. 2). Определение f_xF2 оказалось возможным и в интервале времени 01:15 – 03:15.

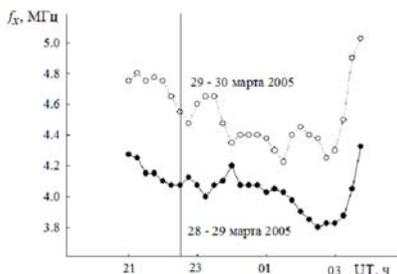


Рис. 2. Зависимость f_xF2 от времени в фоновый период (точки) и в период CP (кружки)

Вариации $f_xF2(t)$ в контрольные сутки были почти такими же, как и вариации $f_oF2(t)$.

Таким образом, анализ f -графиков показал, что временные изменения $f_{o,x}F2$ в контрольный интервал времени и в период CP существенно отличались. Изменения во временном ходе наступали с запаздываниями 14 – 29, 90 – 105 и 180 – 195 мин (напомним, что ионограммы снимались через каждые 15 мин).

Анализ f -графиков, полученных 19 и 25 мая 2004 г. Зависимость критической частоты О-волны f_oF2 от времени для 25 мая 2004 г. приведена на рис. 3. Из рис. 3 видно, что 19 мая 2004 г. с 11:45 до 14:00 f_oF2 монотонно уменьшалась с 6.95 до 6.2 МГц, с 14:00 до 15:00 f_oF2 монотонно возросла снова до 6.95 МГц и с 15:00 до 16:00 f_oF2 снова монотонно уменьшилась до 6.6 МГц.

25 мая 2004 г. с 11:45 до 16:00, особенно после 12:34 (т.е. в период старта и полета ракеты), вариации f_oF2 существенно отличались от вариаций f_oF2 19 мая 2004 г. 25 мая 2004 г. перед CP вариации f_oF2 были незначительными. С 12:15 до 13:15 значение f_oF2 уменьшилось с 6.9 до 6.2 МГц. После 13:15 началось увеличение f_oF2 . С 13:15 до 13:45 значение значения f_oF2 увеличилось до 6.6 МГц. После этого с 13:45 до 14:15 имело

место незначительное уменьшение f_0F2 (на 0.1 МГц), а затем – волнообразное увеличение f_0F2 от 6.5 до 7.3 МГц.

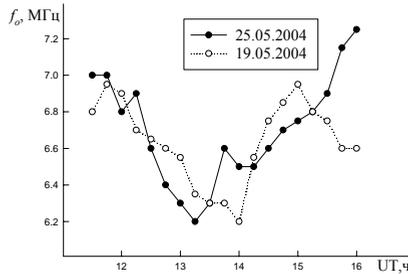


Рис. 3. Зависимость f_0F2 от времени в фоновый период 19 мая 2004 г. (кружки) и в период СР 25 мая 2004 г. (точки)

Результаты спектрального анализа. Временные зависимости $f_0F2(t)$ подверглись спектральному анализу при помощи оконного преобразования Фурье (ОПФ), адаптивного преобразования Фурье (АПФ) и вейвлет-преобразования (ВП).

Необходимость применения системного спектрального анализа, использующего ОПФ, АПФ и ВП, обоснована в [2, 6]. Дело в том, что эти преобразования хорошо дополняют друг друга, компенсируя недостатки одного преобразования достоинствами другого. Кроме того, при конечном времени обработки совместное применение этих преобразований позволяет получить с большей точностью данные о время-периодной локализации искомого волнового процесса на фоне шумов.

Результаты спектрального анализа для 25 мая 2004 г. Временная зависимость $f_0F2(t)$ для 25 мая 2004 г. подверглась спектральному анализу при помощи оконного преобразования Фурье (ОПФ), адаптивного преобразования Фурье (АПФ) и вейвлет – преобразования (ВП).

Сначала из зависимости $f_0F2(t)$ удалялся тренд $\langle f_0F2(t) \rangle$, вычисленный на интервале времени $T_t = 195$ мин с шагом скольжения $\Delta T_t = 15$ мин. Затем вычислялся временной ряд $\Delta f_0F2(t) = f_0F2(t) - \langle f_0F2(t) \rangle$, который и подвергался спектральному анализу в диапазоне периодов от 30 до 195 мин. Кроме спектров, вычислялись энергограммы, представляющие собой среднее распределение энергии колебаний по периодам.

Временная зависимость Δf_0F2 и спектрограммы для 25 мая 2004 г. приведены на рис. 4. Из рисунка видно, что перед СР имело место квазипериодическое колебание с квазипериодом $T \approx 30$ мин $\Delta f_0F2 \approx 0.05 - 0.10$ МГц. Примерно через 26 мин после СР оно подавляется. В интервале времени 13:30 – 13:45 возникает новый квазипериодический процесс с $T \approx 100 - 120$ мин и $\Delta f_0F2 \approx 0.10 - 0.15$ МГц. Его продолжительность составляла не менее 2 – 2.5 часов. При этом $\delta_N \approx 3 - 5 \%$.

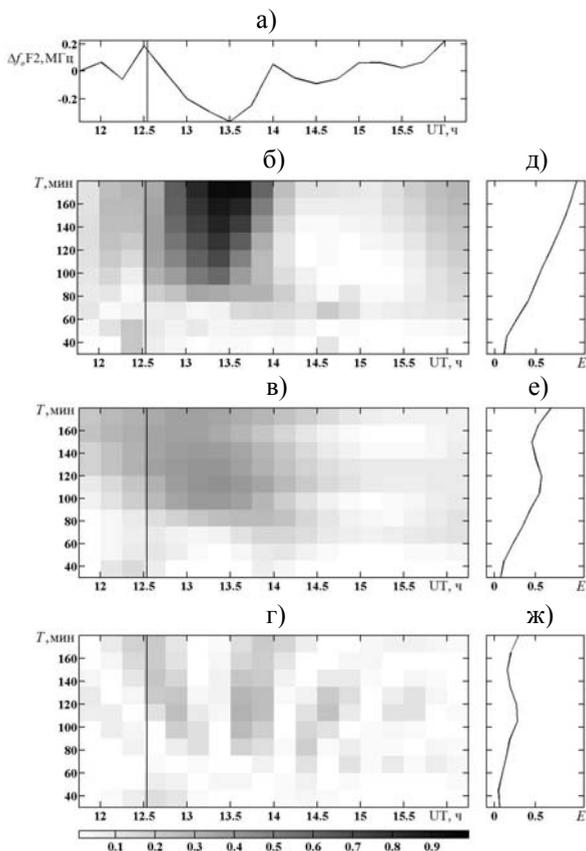


Рис. 4. Результаты спектрального анализа вариаций $\Delta f_0 F_2(t)$ для 25 мая 2004 г.: а) – исходная зависимость; б), в) и г) – спектрограммы, т. е. зависимости квадратов модуля спектральной плотности от периода, (в относительных единицах) соответственно ОПФ, АПФ и ВП; д), е) и ж) – энергограммы (в относительных единицах) соответственно для ОПФ, АПФ, и ВП в диапазоне периодов 30 – 180 мин. Интервал вычисления тренда составлял 195 мин

Результаты спектрального анализа для 29 – 30 марта 2005 г.
 Временная зависимость $f_0 F_2(t)$ для 29 – 30 марта 2005 г. подверглась спектральному анализу при помощи оконного преобразования Фурье (ОПФ), адаптивного преобразования Фурье (АПФ) и вейвлет – преобразования (ВП).

Сначала из зависимости $f_0 F_2(t)$ удалялся тренд $\langle f_0 F_2(t) \rangle$, вычисленный на интервале времени $T_t = 105$ мин с шагом скольжения $\Delta T_t = 15$ мин. Затем вычислялся временной ряд $\Delta f_0 F_2(t) = f_0 F_2(t) - \langle f_0 F_2(t) \rangle$, который и подвергался спектральному анализу в диапазоне периодов от 30 до 105 мин.

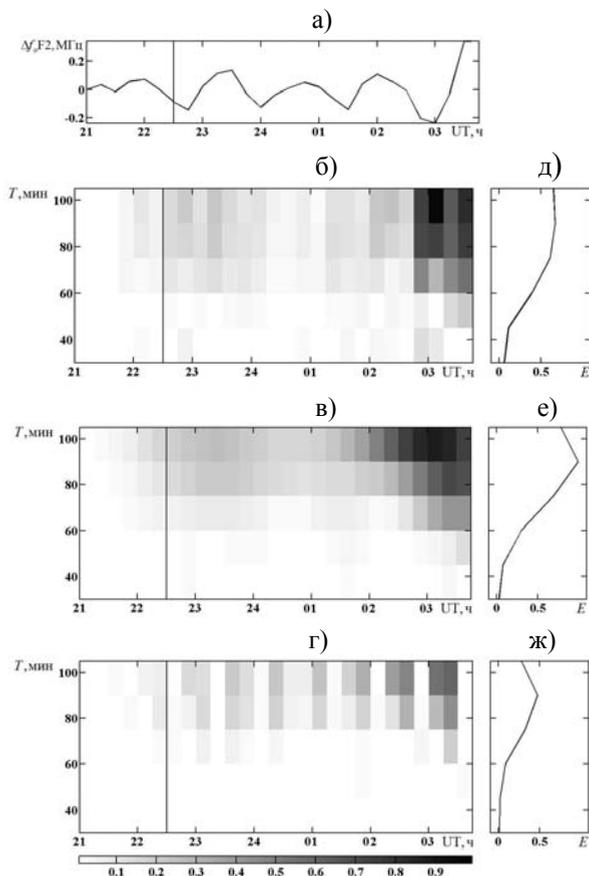


Рис. 5. Результаты спектрального анализа вариаций $\Delta f_0 F2(t)$ для 29–30 марта 2005 г.: а) – исходная зависимость; б), в) и г) – спектрограммы (в относительных единицах) соответственно ОПФ, АПФ и ВП; д), е) и ж) – энергограммы (в относительных единицах) соответственно для ОПФ, АПФ, и ВП в диапазоне периодов 30 – 105 мин. Интервал вычисления тренда составлял 105 мин.

Временная зависимость $\Delta f_0 F2$ и спектрограммы для 29 – 30 марта 2005 г. приведены на рис. 5. Из рисунка видно, что до СР в ионосфере существовали слабые неперіодические колебания с $\Delta f_0 F2 \approx 0.05 - 0.10$ МГц. После СР стали наблюдаться четко выраженные квазипериодические колебания $\Delta f_0 F2$ с $T \approx 90$ мин и $\Delta f_0 F2 \approx 0.10 - 0.2$ МГц. Его продолжительность составляла не менее 4 часов. При этом $\delta_N \approx 2.5 - 5\%$.

Обсуждение. Не вызывает сомнений тот факт, что характер ионограмм и f -графики в контрольный интервал времени до СР и в период СР существенно отличались.

Старт ракеты “Протон”. Квазипериодические вариации $f_{o,x}F2$ вызываются прохождением ВГВ, которые модулируют N . Если эти вариации вызваны СР “Протон”, то по запаздыванию вариаций $f_{o,x}F2$ можно определить время распространения возмущений. Они оказались близки к 14 – 29, 90 – 105 и 180 – 195 мин. Точнее эти времена определить не удастся из-за низкой частоты регистрации ионограмм.

Легко показать, что при дискретности временных отсчетов $\tau = 15$ мин и равномерном законе распределения момента появления реакции на СР, средняя квадратическая ошибка определения задержки Δt реакции ионосферы составляет $\sigma_t = \tau / \sqrt{12} \approx 4.3$ мин.

Учитывая, что время движения ракеты “Протон” до области эффективной генерации ВГВ (около 120 – 130 км) составляет примерно 3 мин, скорректированные запаздывания составляют около 11 – 26, 87 – 102 и 177 – 192 мин. Им соответствуют кажущиеся скорости распространения возмущений от места генерации до места регистрации волн (расстояние между ними около 2300), равные 1.5 – 3.5 км/с, 375 – 440 и 200 – 220 м/с.

Скорость $v_1 = 1.5 - 3.5$ км/с (среднее значение $v_1 \approx 2.5$ км/с) неоднократно нами наблюдалась при изучении эффектов СР доплеровским методом, методом некогерентного рассеяния, магнитометрическим методом (см., например, [8] и ссылки там). Эту скорость имеют медленные магнитогидродинамические (ММГД) волны, а также магнитоградиентные (МГ) волны.

Скорость $v_2 \approx 375 - 440$ м/с свойственна ВГВ. Эти волны наблюдались различными методами практически после каждого СР (см., например, [8, 9] и ссылки там). Разумеется, проявления возмущений в каждом из методов обладает своей спецификой. Поэтому привлечение различных методов позволяет лучше понять сложную и многообразную картину физических явлений, сопровождающих СР.

Величина периода T при этом составляла около 90 мин, а длина волны – около 2000 – 2400 км. Такие периоды и длины волн, действительно, свойственны ВГВ.

Старт ракеты “Союз”. Со стартом ракеты, по-видимому, связано уменьшение f_oF2 , которое наступило примерно через 26 мин после старта и наложилось на естественный ход f_oF2 . Скорее всего, пришла отрицательная полуволна возмущения, вызванного стартом и полетом ракеты.

При $\sigma_t \approx 4.3$ мин имеем $\Delta t_1 \approx 26 \pm 4$ мин.

Следующее изменение во временной зависимости $f_oF2(t)$ имело место в 13:30. При этом $\Delta t_2 = 71 \pm 4$ мин. Время Δt_0 движения ракеты “Союз” до области эффективной генерации ионосферных возмущений (высоты 120 –

130 км) составляет около 3 мин. Ракета при этом находится на расстоянии около 2300 км от места наблюдения. Тогда скорректированные задержки составляли 23 ± 4 и 68 ± 4 мин. Им соответствовали скорректированные скорости $v_1' \approx 1.7 \pm 0.3$ км/с и $v_2' \approx 560 \pm 30$ м/с.

Выводы. 1. Старт мощной ракеты “Протон” сопровождался возникновением в F-области ионосферы двух типов возмущений. Они сопровождалась появлением наклонных отражений зондирующего сигнала, свидетельствующие о “взволнованности” области отражения радиоволны. Скорости распространения возмущений составляли 1.5 – 3.5 км/с и 375 – 440 м/с. Такие скорости свойственны ММГД или МГ волнам ВГВ соответственно.

Период, длина волны и относительная амплитуда волновых возмущений концентрации электронов, связанных с ВГВ, составляли 90 мин, 2000 – 2400 км и 2.5 – 5 %.

Возникшая примерно через 3 часа после СР диффузность в F-области ионосферы, скорее всего, является результатом воздействия на ионосферу геокосмической бури.

2. При старте ракеты “Союз” выявлены две группы возмущений, имевшие скорости распространения около 2 км/с и 600 м/с. Такие скорости, неоднократно наблюдаемые ранее, свойственны медленным МГД волнам и ВГВ соответственно.

Относительная амплитуда возмущений концентрации электронов достигала 5 – 7 %, а величина квазипериода – около 2 – 3 час.

3. В целом эффекты СР “Протон” и “Союз” подобны, близкими оказались скорости распространения возмущений.

Список литературы: 1. *Афраймович Э.Я., Первалова Н.П.* GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. – Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАН, 2006. – 480 с. 2. *Бурмака В.П., Панасенко С.В., Черногор Л.Ф.* Современные методы спектрального анализа квазипериодических процессов в геокосмосе // Успехи современной радиоэлектроники. – 2007. – № 11. – С. 3 – 24. 3. *Живолуп Т.Г., Черногор Л.Ф.* Ионосферные эффекты в течение полета ракеты “Протон”: результаты вертикального зондирования // Космічна наука і технологія. – 2010. – Т. 16, № 3. – С. 15 – 21. 4. *Живолуп Т.Г., Черногор Л.Ф.* Ионосферные эффекты в течение полетов ракеты “Союз” в спокойных и магнитовозмущенных условиях // Космічна наука і технологія. – 2010. – Т. 16, № 3. – С. 22 – 31. 5. *Черногор Л.Ф.* Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, № 1. – С. 59 – 106. 6. *Черногор Л.Ф.* Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов // Геомагнетизм и аэрономия. – 2008. – Т. 48, № 5. – С. 681 – 702. 7. *Черногор Л.Ф.* О нелинейности в природе и науке: Монография. – Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2008. – 528 с. 8. *Черногор Л.Ф.* Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет: Монография. – Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2009. – 386 с. 9. Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую природную среду / Под общей редакцией Адушкина В.В., Козлова С.И. и Петрова Д.В. – М.: Анкил, 2000. – 640 с.

Поступила в редакцию 29.06.2011

Л.Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, канд. физ.-мат. наук, зав. отделом, Институт ионосферы, Харьков

А.А. КОНОНЕНКО, м.н.с., Институт ионосферы, Харьков

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ИОНОСФЕРНАЯ СТАНЦИЯ “БАЗИС” КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ИОНОСФЕРЫ

Наведено основні параметри іонозонду обсерваторії Інституту іоносфери та результати порівняння іонограм, отриманих методом вертикального зондування трьома станціями: іонозондом “Базис” (Харків), дігізондами DPS-4 в Прухонице (Чехія) та в Москві (Росія).

Приведены основные параметры ионозонда обсерватории Института ионосферы и результаты сравнения ионограмм, полученных методом вертикального зондирования тремя станциями: ионозондом “Базис” (Харьков), дигизондами DPS-4 в Прухонице (Чехия) и в Москве (Россия).

The basic parameters of the ionosonde of the Institute of ionosphere are presented, and the results of comparison of ionograms, obtained by a method of vertical sounding using three stations: ionosonde “Bazis” (Kharkiv), digisondes DPS-4 in Pruhonice (Czech Republic) and in Moscow (Russia), are presented.

Постановка задачі. Іоносферні станції (іонозонди) являються одним із найбільш розповсюджених інструментів дослідження іоносфери і дозволяють ефективно проводити моніторинг її стану. Дані, отримані з їх допомогою, використовуються для рішення практичних задач (рахунок умов розповсюдження радіоволн для цілей КВ і УКВ радіосвязи і др.) і теоретичних досліджень іоносфери. Методи і результати досліджень з допомогою іонозондів описані в багаточисленних працях, наприклад, [1 – 3].

В Інституті іоносфери використовується автоматична іоносферна станція “Базис”, яка знаходиться поблизу г. Харків (49.6° с.ш., 36.3° в.д.) і дозволяє проводити вертикальне, нахилне і трансіоносферне імпульсне зондування [4]. Станція застосовується в складі радару некогерентного розсіяння для його калібрування, а також для визначення основних параметрів іоносфери (електронної концентрації, висоти максимуму іонізації і др.). Використання станції для моніторингу іоносфери в складі мережі іонозондів має велике практичне і наукове значення.

Ціль статті – дослідження ефективності використання автоматичної іоносферної станції “Базис” для моніторингу іоносфери і виявлення широтних і довготних ефектів при відсутності возмущень в іоносфері.

Основні технічні характеристики іонозонда “Базис”:

- діапазон робочих частот в режимі вертикального зондування 1 – 20 МГц;

- закон изменения частот – линейно возрастающий с одним из дискретных шагов в интервале 1 – 100 кГц;
- количество рабочих частот – 400;
- разрешающая способность по высоте – 3 км;
- частота повторения импульсов – 100 Гц;
- длительность импульса – 100 мкс;
- импульсная мощность передатчика не менее 15 кВт;
- антенны – ромбические с вертикальным излучением: приёмная и передающая антенны идентичны и расположены ортогонально;
- отображение информации – на электрохимической бумаге и в цифровом виде с возможностью сохранения данных на жёстком диске персонального компьютера.

Сравнение ионограмм. Сопоставление полученных в цифровом виде ионограмм станции “Базис” (рис. 1) с ионограммами [5] (рис. 2) дигизонда DPS-4 в Прухонице (Чехия, 50.0° с.ш., 14.6° в.д.), расположенного на широте близкой к широте харьковской станции, показало, что при спокойном состоянии ионосферы ионограммы находятся в хорошем согласии при учёте разницы местного времени, которая составляет приблизительно 1 час (на рис. 1 и 2 время ЕЕТ и СЕТ соответственно).

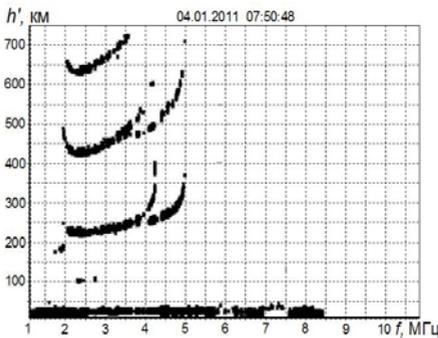


Рис. 1. Ионограмма
ионозонда “Базис”, Харьков

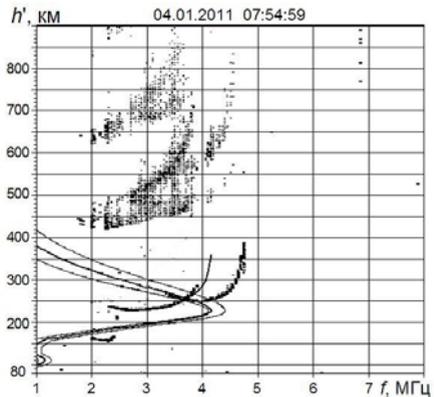


Рис. 2. Ионограмма дигизонда
DPS-4, Прухонице

Временные вариации критической частоты. На рис. 3 представлены временные вариации критических частот слоя F2 (f_oF_2) 25–27 марта 2011 г. (для Харькова и Москвы время ЕЕТ, Прухонице – СЕТ).

Результаты измерений в течение 4-х суток показали, что при спокойном состоянии ионосферы ионограммы станции “Базис” и

дигизонда в Прухонице находятся в хорошем согласии при учёте разницы местного времени, которая составляет приблизительно 1 час.

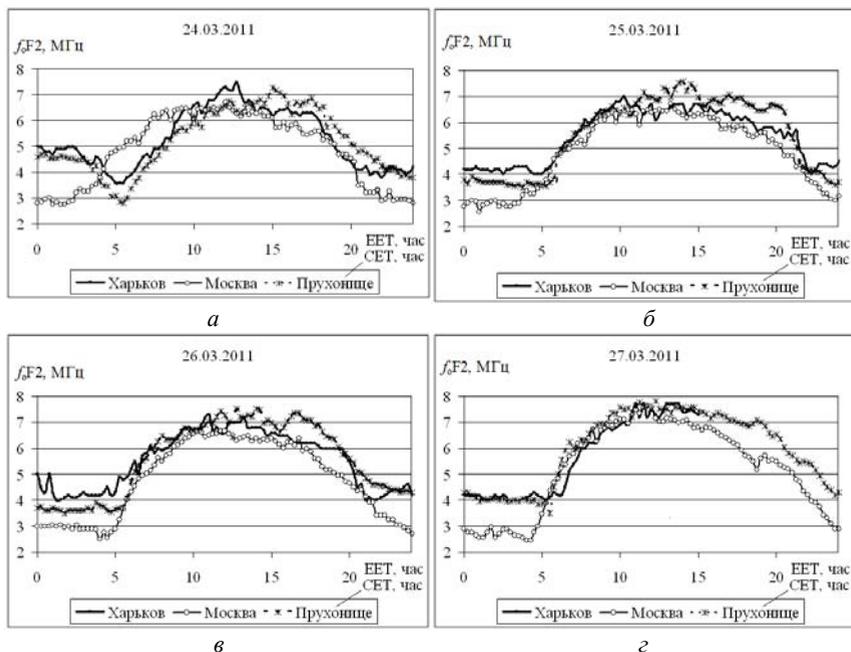


Рис. 3. Временные вариации критической частоты, полученные 24, 25, 26 и 27 марта 2011 г. ионозондами в Харькове, Москве и Прухонице

В результате сравнения данных харьковской станции с данными дигизонда DPS-4 [6], расположенного в Москве (Россия, 55,5° с.ш., 37,3° в.д.), выяснено, что вариации критической частоты имеют ряд отличий, связанных, очевидно, с широтными эффектами в ионосфере, в частности, с различным зенитным углом Солнца и с различием в расположении магнитосопреженных областей для Харькова и Москвы.

Корреляционный анализ. На рис. 4 приведены нормированные взаимные корреляционные функции критических частот f_0F2 , измеренных в Харькове и Прухонице (линия 1), а также в Харькове и Москве (линия 2).

Из рис. 4 видно, что вид нормированных взаимных корреляционных функций близок к гармоническому, период корреляционной функции составляет 24 часа.

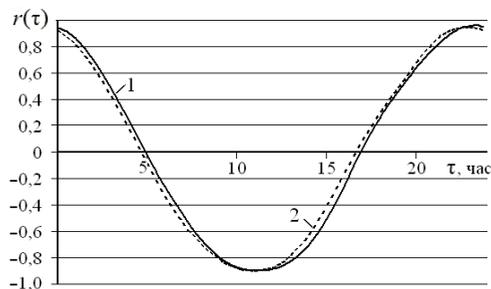


Рис. 4. Взаимные корреляционные функции критических частот, измеренных 25 марта 2011 г. ионозондами в Харькове – Прухонице (1) и Харькове – Москве (2)

Выводы. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Ионосферная станция “Базис” может работать как в составе радара некогерентного рассеяния для его калибровки, так и в автономном режиме для мониторинга ионосферных процессов в течение продолжительного периода времени (не потребляя значительных энергетических ресурсов).

2. При спокойном состоянии ионосферы ионограммы ионозондов Харькова и Прухонице находятся в хорошем согласии при учёте разницы местного времени.

3. Выявлена высокая корреляция в вариациях критической частоты на ионозондах Харькова, Прухонице и Москвы при отсутствии возмущений в ионосфере.

4. Ионосферная станция “Базис” позволяет эффективно проводить мониторинг ионосферы, работая в сети ионозондов.

Список литературы: 1. Галкин А.И. Ионосферные измерения / А.И. Галкин, Н.М. Ерофеев, Э.С. Казимировский, В.Д. Кокоуров. – М.: Наука, 1971. – 174 с. 2. Reinisch B.W. Recent advances in real time analysis of ionograms and ionospheric drift measurements with digisondes / B.W. Reinisch, X.Huang, I.A. Galkin et al. // J. Atmos. Terr. Phys. – 2005. – Vol. 67, № 12. – P. 1054 – 1062. 3. Ратовский К.Г. Современный цифровой ионозонд DPS-4 и его возможности / К.Г. Ратовский, А.П. Потехин, А.В. Медведев, В.И. Куркин // Солнечно-земная физика. – 2004. – Т. 118, № 5. – С. 102 – 104. 4. Барабаш В.В. Станция вертикального зондирования института ионосферы / В.В. Барабаш, И.Б. Склярков // Вестник НТУ “ХПИ”. – 2010. – № 23. – С. 7 – 12. 5. Pruhonice / Digisonde-4D / Czech Republic. – <http://147.231.47.3>. 6. Moscow / Digisonde DPS-4/ Russia – <http://dps.izmiran.ru>.

Поступила в редколлегию 30.06.2011

Л.Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, канд. физ.-мат. наук, зав. отделом, Институт ионосферы, Харьков

Л.Ф. ЧЕРНОГОР, д-р физ.-мат. наук, проф., ХНУ имени В.Н. Каразина

ВАРИАЦИИ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ВО ВРЕМЯ ЧАСТНОГО СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 4 ЯНВАРЯ 2011 г.

Розглянуто особливості вимірювання та наведено результати спостережень варіацій вертикальної складової швидкості руху іоносферної плазми за допомогою радару некогерентного розсіяння під час часткового (близько 0.78) сонячного затемнення 4 січня 2011 р. поблизу м. Харкова. Проведено порівняння результатів спостережень у день затемнення з результатами, отриманими в контрольні дні. Показано, що затемнення викликало процеси перебудови іоносфери, подібні наступу короточасної ночі.

Рассмотрены особенности измерения и приведены результаты наблюдений вариаций вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы с помощью радара некогерентного рассеяния во время частного (около 0.78) солнечного затмения 4 января 2011 г. вблизи г. Харькова. Проведено сравнение результатов наблюдений в день затмения с результатами, полученными в контрольные дни. Показано, что затмение вызвало процессы перестройки ионосферы, подобные наступлению кратковременной ночи.

The features of measurement of vertical component of the ionospheric plasma drift velocity by means of incoherent scatter radar and the results of observations of velocity variations during the partial (about 0.78) solar eclipse on January 4, 2011 near Kharkiv are presented. A comparison of results of observations in the day of eclipse with results obtained in other days is carried out. It is shown that the eclipse caused restructuring of the ionosphere similar to short-term coming of night.

Постановка задачі. Солнечное затмение (СЗ) относится к высокоэнергетическим источникам. Оно приводит к существенному изменению параметров околоземной среды и взаимодействий между подсистемами системы Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера. Одним из основных процессов, характеризующих состояние и динамику ионосферы является движение ионосферной плазмы. Изучение вариаций скорости движения ионосферной плазмы во время относительно редкого природного явления – СЗ – является важной и актуальной задачей, позволяющей усовершенствовать региональные модели ионосферы.

Анализ літератури. Изучению воздействия СЗ на среду посвящено значительное количество работ (см., например, [1, 2]). Наиболее полную информацию в широком диапазоне высот получают при помощи метода некогерентного рассеяния (НР) [3]. Метод позволяет получить сведения о параметрах плазмы и её движении. В работах [4 – 7] представлены наблюдения параметров ионосферы в период СЗ в условиях средней и относительно высокой солнечной активности.

Цель статьи – изложение особенностей измерения вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы и результатов наблюдения за переносом плазмы в области F ионосферы в период частного СЗ вблизи г. Харькова 4 января 2011 г. и в контрольные дни в условиях относительно низкой солнечной активности.

Общие сведения о солнечном затмении. В месте проведения измерений (вблизи г. Харькова) СЗ началось в 07:29:39, а закончилось в 10:28:36, главная фаза имела место в 8:58:30 (здесь и далее время UT). Максимальная затенённая площадь диска составляла около 70.8 %.

Состояние космической погоды. День СЗ 4 января 2011 г., как и фоновые дни, были спокойными. В частности, 4 января индекс магнитной активности $A_p = 4$, а в фоновые дни 22 декабря и 5 января $A_p = 0$ и 2 соответственно. Это обстоятельство облегчало выделение возмущений, связанных с затмением. Индекс солнечной активности $F_{10.7}$ 22 декабря, 4 и 5 января составлял 78, 91 и 88 соответственно.

Средства и методы. Измерения осуществлялись с помощью радара НР Института ионосферы (49°36' с.ш., 36°18' в.д.). Его основные параметры: импульсная мощность радиопередающего устройства – 2 МВт, эффективная площадь антенны – около 3700 м², частота следования зондирующих импульсов – 24.4 Гц. Шумовая температура радиоприемного устройства (РПРУ) равна 120 К. Эффективная шумовая температура системы составляет 470 – 980 К. Зондирование ионосферы осуществлялось составным радиоимпульсным двухчастотным сигналом, один из элементов которого имел длительность 650 мкс и несущую частоту $f_0 = 158$ МГц, а второй – длительность 130 мкс и частоту $f_1 = f_0 + 0.1$ МГц. В РПРУ осуществлялась частотная селекция некогерентно рассеянных эхо-сигналов и выделение квадратурных сигналов для каждого из элементов с помощью синхронного детектирования. В результате приёма и обработки рассеянного ионосферой сигнала от первого элемента определялись электронная концентрация N_e , температуры ионов T_i и электронов T_e , вертикальная скорость движения плазмы V_z и ионный состав для ряда высот вблизи и выше максимума ионизации с разрешением по высоте около 120 км. Отклик от второго элемента использовался для определения высотного профиля мощности НР сигнала в диапазоне высот 100 – 550 км с разрешением по высоте 20 км.

Методика определения скорости ионосферной плазмы. Вертикальная составляющая скорости движения ионосферной плазмы V_z определялась одновременно для ряда высот ионосферы по квадратурным составляющим комплексной корреляционной функции (КФ) НР сигнала:

$$V_z(h_j) = -\frac{\lambda}{4\pi} \frac{\sum_{k=1}^n \left\{ \arctg \left[\frac{r_{\text{Im}}(t_j, \tau_k)}{r_{\text{Re}}(t_j, \tau_k)} \right] \right\} r^2(t_j, \tau_k) \tau_k}{\sum_{k=1}^n r^2(t_j, \tau_k) \tau_k^2},$$

где λ – длина волны радара, n – количество используемых значений КФ, $r_{\text{Im}}(t_j, \tau_k)$ и $r_{\text{Re}}(t_j, \tau_k)$ – квадратурные составляющие нормированной КФ для задержки распространения сигнала t_j , соответствующей высоте h_j , $h_j = ct_j/2$, $\tau_k = k\Delta\tau$, k – номер значения КФ, $k = 1..9$, $\Delta\tau = 61$ мкс – шаг сдвига КФ, $r^2(t_j, \tau_k) = r_{\text{Re}}^2(t_j, \tau_k) + r_{\text{Im}}^2(t_j, \tau_k)$.

Обработка данных включает в себя определение значений мощности и КФ НР сигнала для каждого дискретного времени запаздывания t_j при фиксированных задержках τ_k в виде разности оценок статистических параметров смеси сигнал+шум и шума, усредненных по ряду замеров в конце развертки дальности, где уровень НР сигнала пренебрежимо мал, коррекцию результатов обработки и нормирование КФ.

В результате первичной обработки в реальном времени для каждой высоты $h_j = ct_j/2$ определяются базовые оценки статистических характеристик НР сигнала при временном накоплении, равном 1 мин.

Вторичная обработка включает в себя отбраковку данных, подверженных искажениям, усреднение статистических характеристик НР сигнала по высоте (с учетом трапециoidalного усреднения КФ НР сигнала [8]) и по времени и, наконец, вычисление скорости V_z . Отбраковка данных осуществляется при наличии помех. Чаще всего, помехи вызваны отражением зондирующего сигнала от космических аппаратов, космического мусора, метеороидов и т.п. Отбраковка такой помехи не представляет особой сложности, поскольку она легко проявляется на фоне шума из-за большой её интенсивности при отражении от точечной цели (в отличие от слабого сигнала НР), её длительность, равная длительности зондирующего радиосигнала, и КФ (спектр) известны, а продолжительность не превышает нескольких секунд. Сложнее обстоит дело с помехами радиолокационных станций, но в настоящее время они проявляются относительно редко. Интервал усреднения по времени для определения V_z устанавливается в зависимости от условий измерений и обычно равен 15 мин.

Среднеквадратическая погрешность определения скорости изменялась от 3 м/с (на высотах в районе максимума ионизации) до 20 м/с (при 15-минутном накоплении и отношении сигнал/шум q выше 0.2).

Особенностью измерений являлись пониженные значения q , что вызвано низкой солнечной активностью, а также малая (характерная для зимнего сезона) толщина области F ионосферы. В связи с этим возникла необходимость особо тщательной отбраковки данных измерений КФ, подверженных воздействию помех.

Результаты наблюдений. Во время СЗ наблюдалось увеличение абсолютных значений скорости нисходящего ($V_z < 0$) движения ионосферной плазмы с последующим их восстановлением (рис. 1, 2). Изменение скорости симметрично относительно главной фазы затмения (см. рис. 1). Наибольшее

отклонение скорости наблюдалось при максимальном покрытии Солнца и составляло 9, 18, 34, 54 м/с на высотах 250, 300, 350, 400 км соответственно, а высотный профиль V_z был подобен ночному профилю (на всех высотах $V_z < 0$) (см. рис. 2).

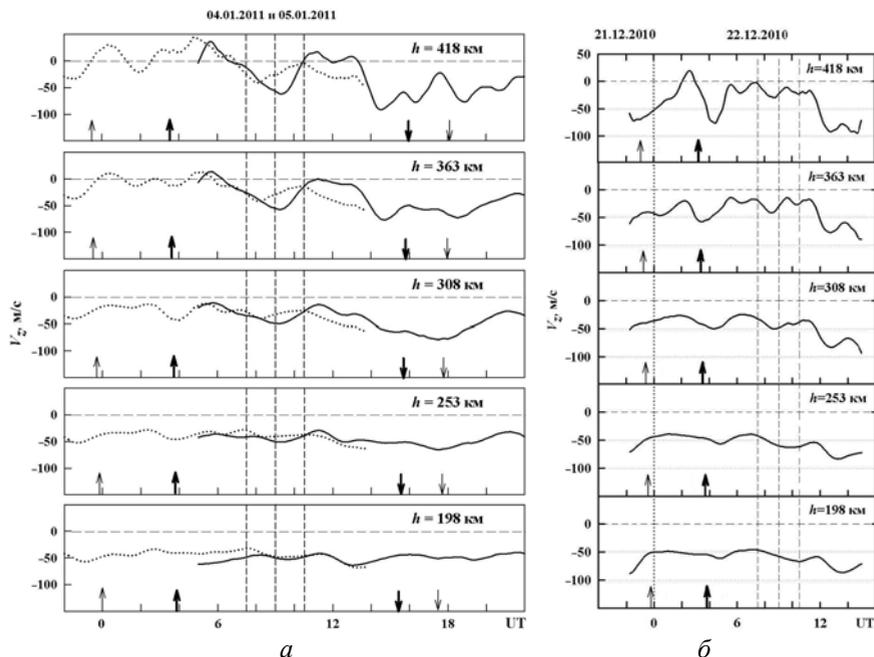


Рис. 1. Временные вариации вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы V_z в день затмения 4 января (на рис. *a* – линии) и в контрольные дни 5 января (точки) 2011 г. и 22 декабря 2010 г. (*б*) для фиксированных высот при интервале накопления 105 мин. Стрелками обозначены моменты восхода и захода Солнца на соответствующих высотах в Харькове (жирные) и магнитоспряжённой точке (тонкие). Вертикальные пунктирные линии обозначают моменты, соответствующие началу, главной фазе и окончанию СЗ

В контрольные дни 22 декабря 2010 г. и 5 января 2011 г. в интервале времени с 7:00 до 10:00 отмечалось изменение V_z , но его характер, положение на временной оси и амплитуда значительно отличались от вариаций V_z 4 января (см. рис. 1).

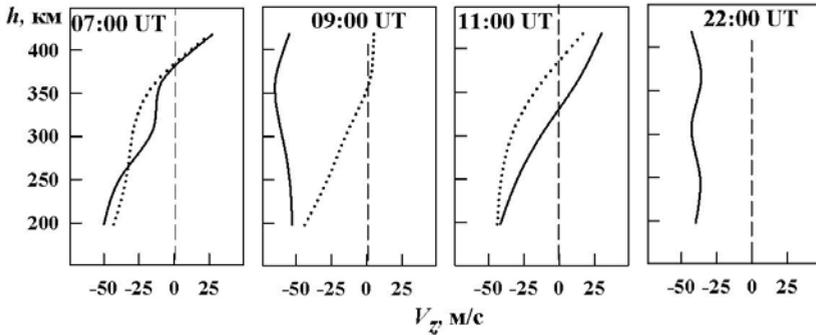


Рис. 2. Высотные профили вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы V_z в характерные моменты времени: до начала, в максимальной фазе, после окончания солнечного затмения и ночью 4 января 2011 г. (непрерывные линии) и в те же моменты в контрольный день 5 января 2011 г. (точки). Интервал накопления 15 мин. Время на графиках – UT

Выводы. Во время главной фазы солнечного затмения характер переноса ионосферной плазмы подобен ночному. Солнечное затмение приводит к перемене направления движения плазмы с восходящего на нисходящее и к увеличению абсолютного значения скорости нисходящего движения ионосферной плазмы. Максимальное изменение скорости достигается в момент, близкий к главной фазе затмения Солнца, и увеличивается с высотой (с 15 – 20 до 60 – 80 м/с). В этом заключаются основные особенности вариаций скорости.

Список литературы: 1. Jones T.B. The detection of atmospheric waves produced by the total solar eclipse 11 August 1999 / T.B. Jones, D.M. Wright, J. Milner et al. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. – 2004. – V. 66, № 5. – P. 363 – 374. 2. Черногор Л.Ф. Эффекты солнечных затмений в приземной атмосфере / Черногор Л.Ф. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 44, № 4. – С. 467 – 482. 3. Evans J.V. Ionospheric movements measured by incoherent scatter: A review / J.V. Evans // J. Atmos. Terr. Phys. – 1972. – V. 34. – P. 175 – 209. 4. Бурмака В.П. Радарные наблюдения эффектов в геокосмосе, вызванных частным солнечным затмением 29 марта 2006 г. / В.П. Бурмака, Е.И. Григоренко, Л.Я. Емельянов и др. // Успехи современной радиоэлектроники. – 2007. – № 3. – С. 38 – 53. 5. Дзюбанов Д.А. Динамика плазмы ионосферы над Харьковом в период солнечного затмения 1 августа 2008 г. / Д.А. Дзюбанов, Л.Я. Емельянов, Л.Ф. Черногор // Космічна наука і технологія. – 2009. – Т. 15, № 3. – С. 62 – 69. 6. Емельянов Л.Я. Эффекты в геокосмической плазме во время частного затмения Солнца 1 августа 2008 г. над Харьковом. 1. Результаты наблюдений / Л.Я. Емельянов, М.В. Ляшенко, Л.Ф. Черногор // Космічна наука і технологія. – 2009. – Т. 15, № 3. – С. 70 – 81. 7. Taran V.I. Investigation of circumterrestrial space by means of incoherent scatter radar / V.I. Taran, V.K. Bogovsky, V.N. Lyusenko et al. // Космічна наука і технологія, Space Plasma physics (додаток до журналу). – 2001. – Т. 7, № 2. – С. 36 – 41. 8. Holt J.M. Optimal analysis of incoherent scatter radar data / J.M. Holt, D.A. Rhoda, D. Tetenbaum, A.P. van Eyken // Radio Sci. – 1992. – V. 27, № 3. – P. 435 – 447.

Поступила в редколлегию 30.06.2011

А.Е. ЧАГАН, магистр, НТУ “ХПИ”, Харьков

В.А. ПУЛЯЕВ, д-р техн. наук, проф., Институт ионосферы, Харьков

ВОПРОСЫ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИОНОСФЕРНОЙ ИНФОРМАЦИИ В БАЗУ ДАННЫХ

У статті розглядається приклад розробки пристрою для організації цифрового радіоканалу, який передбачено використовувати з метою прискорення обробки радіолокаційних даних.

В статье рассматривается пример разработки устройства для организации цифрового радиоканала, который предусмотрено использовать с целью ускорения обработки радиолокационных данных.

The article deals with an example of developing a device for organizing digital radio channel used to accelerate the processing of radar data.

Постановка задачі. С целью ускорения процесса обработки ионосферной информации, получаемой с помощью радиолокационных систем [1] некогерентного рассеяния (НР), необходима реализация такого устройства, которое бы использовалось в радаре для передачи оцифрованных принятых сигналов. Его задача будет состоять в передаче сигналов из ионосферной Обсерватории (г. Змиев) в центр обработки сигналов, расположенный в Харькове.

Таким образом, исходя из географического расположения данных пунктов, можно сформулировать следующие требования к устройству для реализации радиоканала:

1. Дальность связи 34 км, а скорость передачи не менее 10 Гбайт в день.

3. Возможность синхронизации режимов передачи и приема с работой радара НР.

4. Простое подключение к компьютеру и низкая стоимость деталей.

Анализ последних исследований и публикаций. Аналогичная задача рассмотрена в [2]. Однако в этой работе предложены к использованию устаревшие серии микросхем, к тому же для реализации радиоканала используется УВЧ диапазон, что затрудняет повышение скорости передачи данных.

Целью данной статьи является рассмотрение возможности использования на радаре НР более современной системы передачи ионосферных данных, т.е. результатов измерения параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн.

Анализ и решение проблемы. На данный момент полученные экспериментальные результаты передаются в г. Харьков на переносных накопителях информации. Так как получаемые данные оцифрованы [3], то можно применить методы эфирной передачи результатов, используя

бинарное кодирование числовых массивов. Для этой цели предлагается использовать подключаемый к ПК радиомодем, имеющий структурную схему, изображенную на рис.

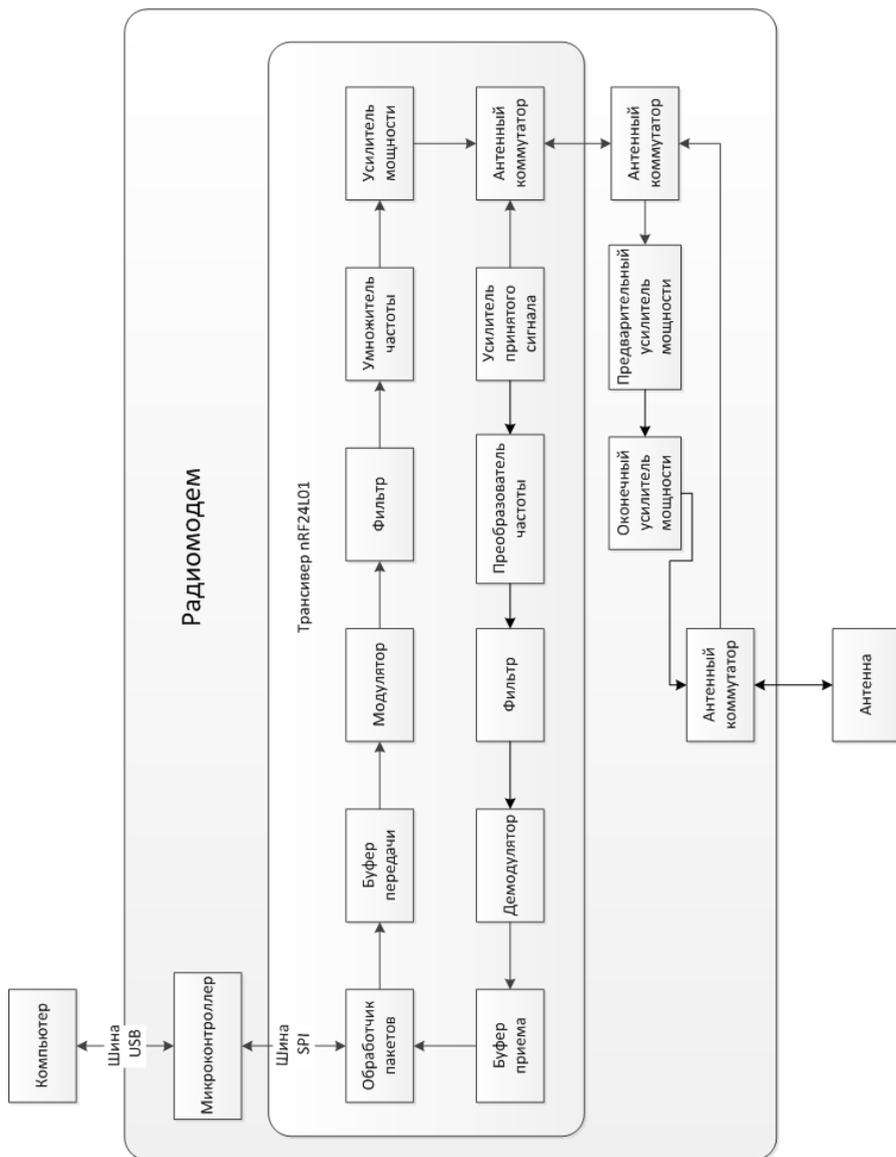


Рис. Структурная схема радиомодема

Технические характеристики радиомодема следующие:

1. Частота несущей – 2400 – 2485 МГц.
2. Скорость передачи – 2 Мбит/с.
3. Мощность передатчика – 1 Вт.
4. Класс излучения – 2M00F1D.
5. Тип модуляции – GFSK.

Чтобы упростить принципиальную схему, повысить надежность и уменьшить стоимость радиомодема, желательно использовать микросхемы большой интеграции [4].

При такой реализации через порт USB ПК соединяется с микроконтроллером типа AT90USB82. Микроконтроллер в свою очередь, передает управляющие сигналы и данные трансиверу nRF24L01. Трансивер имеет собственный механизм обработки пакетов. Он получает данные и параметры конфигурации через шину SPI. Через неё имеется доступ к тройным буферам приема и передачи данных, а также регистрам конфигурации, таким как PRIM_RX, RX_ADDR_P0 и SETUP_RETR. В трансивере встроены модулятор и демодулятор GFSK, фильтры и преобразователи частоты. Для усиления принятого сигнала имеется маломощный усилитель. А для получения уровня выходного сигнала, необходимого для предварительного усилителя, встроены управляемый усилитель мощности с максимальной выходной мощностью 10 мВт. Уровень усиления программно задаётся с помощью регистров конфигурации.

С трансивера входной и выходной сигналы передаются по одному выводу, поэтому для разделения пути следования радиосигнала используются два управляемых антенных коммутатора. Первый коммутатор переключает сигнал между двумя усилителями радиочастоты во время процедуры передачи, а второй коммутатор – во время процедуры приема.

Радиосигнал от трансивера через коммутатор проходит через первый усилитель мощностью 100 мВт, а затем на втором усилителе увеличивается до 1 Вт. От последнего усилителя сигнал через второй антенный коммутатор поступает в антенну. Во время приема сигнал из антенны через два коммутатора проходит на трансивер.

Порядок работы заключается в следующем: микроконтроллер после подключения схемы к порту USB проводит инициализацию контроллера USB. Закончив собственную настройку, он начнет выступать в роли преобразователя шин USB – SPI. Программное обеспечение на компьютере работает с трансивером по виртуальной шине SPI. Сначала программа на компьютере передает трансиверу данные исходной конфигурации и устанавливает его в режим приема с помощью установки бита PRIM_RX в ноль.

В режиме приема трансивер ожидает появления преамбулы. После успешного ее распознавания начинается декодирование полученного пакета в буфер – сигнал от демодулятора формирует полученный пакет в буфере приема. Когда пакет будет демодулирован, трансивер проверяет его адрес и

контрольную сумму. Если адрес совпадает с адресом, указанным в регистре RX_ADDR_P0, и контрольная сумма верна, пакет разбирается и принятая информация попадает в буфер FIFO приемника. После этого трансивер автоматически отправляет пакет АСК, который сообщает трансиверу о том, что передача прошла успешно. Вместе с этим трансивер генерирует прерывание, сигнализирующее микроконтроллеру, что есть принятые данные. Микроконтроллер по этому сигналу загружает принятую информацию к себе и помещает её в буфер конечной точки. Компьютерная программа принимает эти данные и соединяет их с данными, принятыми в предыдущих пакетах. После окончания приема блока проверяется его контрольная сумма и передается сообщение об успешном приеме.

В процессе передачи данных компьютерная программа после получения информации конфигурирует трансивер в режим передачи при помощи установки бита PRIM_RX в ноль. Далее происходит занесение данных в буфер FIFO. После заполнения буфера трансивер формирует пакет с преамбулой, адресом, управляющими данными и контрольной суммой. Во время передачи сформированный пакет по битам подается в модулятор. После окончания передачи трансивер ожидает подтверждения, что передаваемый пакет принят успешно в течение времени, заданного в регистре SETUP_RETR. Если подтверждение не принято, то происходит повторная передача пакета столько раз, сколько указано в регистре SETUP_RETR битами 3:0. После получения подтверждения об успешном принятии пакета трансивер переходит в режим ожидания новых данных на передачу или переходит в режим приема.

Выводы. Таким образом, используя современную элементную базу с высокой степенью интеграции, можно получить простой и дешевый радиоканал для автоматической и своевременной передачи данных. В данном случае в качестве данных выступают принятые радиолокационным комплексом, обработанные и оцифрованные сигналы некогерентного рассеяния. Такая процедура передачи сокращает время получения параметров ионосферы, позволяя тем самым обеспечить высокую эффективность радара НР.

Список литературы: 1. *Рогожкин Е.В., Пуляев В.А., Лысенко В.Н.* Зондирующие сигналы для исследования ионосферы методом НР. Монография. – Х.: НТУ “ХПИ”, 2008. – 256 с. 2. *Чеган А.Е., Пуляев В.А.* Передача ионосферной информации по радиоканалу // Вестник НТУ “ХПИ”: Радиофизика и ионосфера. – 2010. – № 48. – С. 110 – 113. 3. *Федорков Б.Г., Телец В.А.* Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с. 4. AT90USB82: 8-bit Microcontroller with 8/16 K Bytes of ISP Flash and USB Microcontroller. – http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc7707.pdf.

Поступила в редколлегию 01.06.2011

С.В. ПАНАСЕНКО, канд. физ.-мат. наук, н.с., Институт ионосферы, Харьков

ФИЛЬТРАЦИЯ ВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЙ МОЩНОСТИ НЕКОГЕРЕНТНО РАССЕЯННОГО СИГНАЛА ПРИ НАЛИЧИИ НЕРЕГУЛЯРНЫХ ПОМЕХ И СБОЕВ АППАРАТУРЫ

Виділено основні типи нерегулярних завад і збоїв апаратури, що впливають на часові ряди, отримані методом некогерентного розсіяння. Розроблено алгоритми та реалізовано комп'ютерну програму фільтрації потужності некогерентно розсіяного сигналу з використанням методів статистичного аналізу. Показано ефективність запропонованих алгоритмів, їх спроможність зробити сигнал придатним для подальшої обробки.

Выделены основные типы нерегулярных помех и сбоев аппаратуры, влияющих на временные ряды, полученные методом некогерентного рассеяния. Разработаны алгоритмы и реализована компьютерная программа фильтрации мощности некогерентно рассеянного сигнала с использованием методов статистического анализа. Показана эффективность предложенных алгоритмов, их способность сделать сигнал пригодным для дальнейшей обработки.

The main types of irregular interferences and equipment failures that affect the time series obtained by incoherent scatter technique were distinguished. The algorithms have been developed and computer program has been implemented for filtering the power of incoherent scattered signal using the methods of statistical analysis. The efficiency of the proposed algorithms was demonstrated; their ability to make the signal suitable for further processing was showed.

Введение. Метод некогерентного рассеяния (НР) позволяет получать параметры волновых возмущений концентрации и температуры электронов в широком диапазоне высот (100 – 600 км) (см., например, [1]). При этом временные зависимости мощности НР сигнала подвергаются влиянию шумов различной природы, нерегулярных помех и сбоев аппаратуры, которые существенно искажают восстанавливаемые параметры ионосферной плазмы. Неучет их влияния при анализе волновых возмущений приводит к значительным погрешностям при расчете параметров этих возмущений, а также к появлению ложных аperiodических и периодических вариаций сигнала. Поэтому задача восстановления минимально искаженных помехами временных зависимостей мощности НР сигнала является актуальной.

Радишумы, постоянно присутствующие в канале распространения, представляют собой смесь шумов приемника, а также космических, атмосферных, промышленных и обусловленных работой большого числа радиостанций шумов [2]. Такой шум часто можно считать гауссовским и нескоррелированным с сигналом НР. Для его устранения применяется вычитание мощности шума из мощности смеси шума и НР сигнала.

Целью работы является изложение и анализ результатов фильтрации, полученных с помощью разработанных алгоритмов и программ устранения влияния нерегулярных помех и сбоев аппаратуры.

Типы нерегулярных помех и сбоев аппаратуры. Способы их устранения. В процессе анализа и обработки экспериментальных данных были выявлены следующие типы нерегулярных помех и сбоев аппаратуры.

1. *Резкий скачок уровня сигнала* возникает при изменении усиления или выходе из строя одного из элементов приемо-передающей системы. Такая “помеха” может быть смоделирована в виде близкого к прямоугольному импульса.

2. *Внешние импульсные помехи* часто имеют место во время грозы либо связаны с приемом сигналов близко расположенных мощных радиостанций. Они проявляются в виде длительного (около 10 – 60 мин) увеличения уровня принимаемого сигнала.

3. *Когерентные отражения* связаны с отражением излученного сигнала от космических аппаратов или фрагментов космического мусора. Они представляют собой кратковременные (длительность меньше минуты) всплески уровня НР сигнала.

Для решения задачи фильтрации были разработаны алгоритмы, реализованные в компьютерной программе. Они позволяют скорректировать уровень сигнала и отфильтровать помехи на основе статистических методов анализа временных рядов [3, 4].

Для устранения резкого скачка уровня сигнала предложено определять среднее значение мощности внутри и вне скачка, а затем рассчитывать корректирующий коэффициент k . Результаты коррекции отображены на рис. 1,а. На этом рисунке представлен временной интервал, соответствующий выходу из строя одного из передатчиков харьковского радара НР и, следовательно, уменьшению мощности излучаемого радиосигнала в два раза (с 1.8 до 0.9 МВт).

Анализ данных показал, что корректирующий коэффициент в общем случае зависит от высоты (см. рис. 1,а). Его значения для ряда высот приведены в таблице. Из таблицы видно, что значение k вначале возрастает, достигает максимума на высотах 250 – 260 км, а затем убывает. Такое поведение обусловлено тем, что в диапазоне высот 170 – 400 км преобладает эффект Фарадея, заключающийся, как известно, в повороте плоскости поляризации радиосигнала при его прохождении через магнитоактивную среду (ионосферную плазму), а на меньших и больших высотах в вечернее и ночное время мощность шума превышает мощность НР сигнала (отношение сигнал / шум становится меньше единицы).

Таблица

Зависимость корректирующего коэффициента от высоты при устранении резкого изменения уровня сигнала

| | | | | | | |
|----------|------|------|------|------|------|------|
| h , км | 162 | 212 | 263 | 313 | 363 | 413 |
| k | 1.28 | 2.32 | 2.80 | 2.40 | 2.03 | 1.79 |

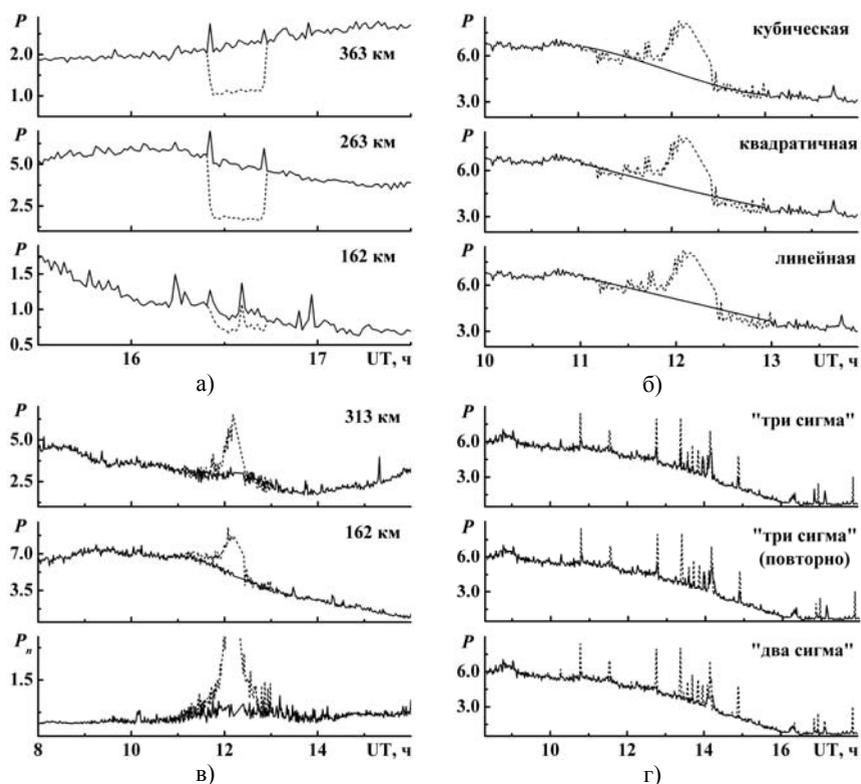


Рис. 1. Исходные (штриховая линия) и отфильтрованные (сплошная линия) временные зависимости мощности смеси НР сигнала с шумом P и шума P_n : а – устранение резкого изменения уровня сигнала на различных высотах; б – кубическая, квадратичная и линейная аппроксимация сигнала; в – кубическая аппроксимация и добавление гауссовского шума; г – фильтрация когерентных отражений с использованием критериев “два сигма” и “три сигма”.

При наличии мощных импульсных помех исходный сигнал не подлежит восстановлению. Было предложено аппроксимировать соответствующие временные интервалы полиномами первой – третьей степени по методу наименьших квадратов с добавлением сгенерированного гауссовского шума. Дисперсия шума рассчитывалась как среднее арифметическое дисперсий сигнала до начала и после окончания помехи. Результаты коррекции сигнала без добавления шума представлены на рис. 1,б, а с его добавлением – на рис. 1,в. Этот же алгоритм может быть применен в случае отсутствия сигнала, вызванном выходом из строя радиоустройств, отключением электроэнергии, или другими причинами.

Для фильтрации когерентных отражений устанавливались пороговые значения на уровне $v\sigma$, где $v > 0$ – действительное число, σ – среднеквадратичное отклонение. При этом процедура фильтрации повторялась несколько раз. Значения, превышающие пороговый уровень, заменялись либо средним арифметическим двух соседних значений мощности, либо средним значением мощности на заданном интервале. Результаты фильтрации когерентных отражений приведены на рис. 1,г. Продемонстрировано, что при выборе значений $v \geq 3$ часть достаточно слабых когерентных отражений отфильтровать не удается, а при $v \leq 2$ возможно искажение истинного сигнала. Поэтому выбор порогового значения осуществляется, исходя из конкретной задачи.

Обсуждение. Воздействие помех и сбоев аппаратуры на параметры НР радиосигнала негативно сказывается также при восстановлении параметров геокосмической плазмы (концентрации электронов, температуры ионов и электронов, ионного состава и др.). Для устранения их влияния на данные, полученные с помощью харьковского радара НР, используются различные алгоритмы фильтрации, подробно описанные в работе [5]. Фильтрация обычно проводится в области высот, а временные интервалы, где присутствуют помехи или сбои, исключаются из последующей обработки. Основное внимание при этом уделяется устранению когерентных отражений [5, 6]. Такой подход мало пригоден при анализе волновых возмущений. Для определения их параметров необходимо использовать классические и современные методы спектрального оценивания [7], пригодные только для анализа дискретных рядов с постоянным шагом по времени. Кроме того, наличие импульсных помех и сбоев аппаратуры может привести к появлению ложных гармонических составляющих при привлечении различных линейных и нелинейных преобразований.

Поэтому для решения таких задач необходима фильтрация во временной области с использованием описанных в данной работе алгоритмов. Эффективность их совместного применения продемонстрирована на рис. 2. Как видно из рисунка, отфильтрованные ряды соответствуют результатам теоретических, модельных и экспериментальных исследований временных зависимостей радишума, а также временных и высотных зависимостей НР сигнала (см., например, [5]). С одной стороны, временные зависимости являются сравнительно плавными, что необходимо для восстановления регулярных параметров ионосферной плазмы, а с другой – испытывают квазипериодические вариации, вызванные волновыми возмущениями различных масштабов, практически всегда присутствующими в ионосфере.

Выводы.

1. На основе анализа большого массива экспериментальных данных выявлены и классифицированы основные типы нерегулярных помех и сбоев аппаратуры, воздействующих на временные вариации мощности некогерентно рассеянного сигнала.

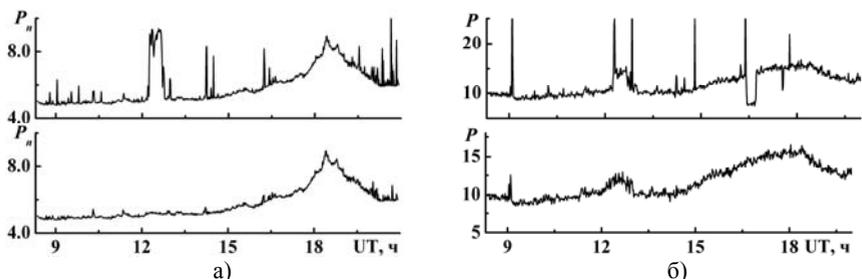


Рис. 2. Временные зависимости мощности шума (а) и НР сигнала на высоте 418 км (б) На верхней панели показаны исходные зависимости, на нижней – отфильтрованные с использованием описанных алгоритмов.

2. Разработаны алгоритмы устранения сбоев аппаратуры, внешних продолжительных импульсных помех, а также когерентных отражений на основе статистических методов анализа временных рядов. Реализована компьютерная программа, позволяющая проводить фильтрацию мощности в полуавтоматическом режиме.

3. Показано, что резкий скачок уровня сигнала может быть устранен путем введения зависящего от высоты корректирующего коэффициента, при отсутствии сигнала или наличии мощных продолжительных помех необходимо применять полиномиальную аппроксимацию временных рядов, а для фильтрации когерентных отражений задаются пороговые значения на уровне нескольких среднеквадратических отклонений.

4. Приведены результаты фильтрации мощности некогерентно рассеянного сигнала и мощности шума. Показано, что предварительная фильтрация позволяет сделать принимаемый сигнал пригодным для последующей обработки и анализа, в частности, при использовании классических и современных методов спектрального оценивания.

Список литературы: 1. Бурмака В.П. Результаты исследования волновых возмущений в ионосфере методом некогерентного рассеяния / Бурмака В.П., Таран В.И., Черногор Л.Ф. // Успехи современной радиоэлектроники. – 2005. – № 3. – С. 4 – 35. 2. Черногор Л.Ф. Дистанционное радиозондирование атмосферы и космоса / Черногор Л.Ф. – Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2009. – 500 с. 3. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов / Андерсон Т. – М.: Мир, 1976. – 760 с. 4. Худсон Д. Статистика для физиков / Худсон Д. – М.: Мир, 1970. – 298 с. 5. Пуляев В.А. Определение параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн / Пуляев В.А., Дзюбанов Д.А., Домнин И.Ф. – Х.: Підручник, 2011. – 240 с. 6. Богомаз А.В. Оптимизация параметров фильтрации когерентных помех при анализе данных некогерентного рассеяния / Богомаз А.В. // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ – 2011». Матеріали 7-ої міжнародної молодіжної науково-технічної конференції, Севастополь 11 – 15 квітня 2011 р. – Севастополь: СевНТУ, 2011. – С. 315. 7. Бурмака В.П. Современные методы спектрального анализа квазипериодических процессов в геокосмосе / Бурмака В.П., Панасенко С.В., Черногор Л.Ф. // Успехи современной радиоэлектроники. – 2007. – № 11. – С. 3 – 24.

Поступила в редакцию 29.06.2011

М.В. ЛЯШЕНКО, канд. физ.-мат. наук, учёный секретарь, Институт ионосферы, Харьков

ЭФФЕКТЫ ЧАСТНОГО ЗАТМЕНИЯ СОЛНЦА 4 ЯНВАРЯ 2011 г. В ВАРИАЦИЯХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ИОНОСФЕРЕ

Представлено результаты моделирования вариаций параметров тепловых процессов у геокосмичной плазмі під час затемнення Сонця (ЗС) 4 січня 2011 р. Показано, що ЗС істотно впливає на тепловий режим іоносфери. Приведено результати порівнювального аналізу ефектів ЗС у варіаціях параметрів теплових процесів у геокосмосі в період з 1999 по 2011 рр., які зареєстровано за допомогою харківського радара некогерентного розсіяння.

Представлены результаты моделирования вариаций параметров тепловых процессов в геокосмической плазме во время затмения Солнца (ЗС) 4 января 2011 г. Показано, что ЗС существенно повлияло на тепловой режим ионосферы. Приведены результаты сравнительного анализа эффектов ЗС в вариациях параметров тепловых процессов в геокосмосе в период с 1999 по 2011 гг., зарегистрированных с помощью харьковского радара некогерентного рассеяния.

Modeling results of thermal processes parameters variations in geospace plasma during solar eclipse (SE) on 4 January 2011 are presented. It is shown that SE has essentially affected a thermal mode of an ionosphere. Comparative analysis results of the SE effects in variations of thermal processes parameters in geospace for the period 1999–2011, registered by means of the Kharkov incoherent scatter radar are given.

Введение. Затмения Солнца (ЗС) представляют собой одно из уникальных явлений в геокосмосе. Во время ЗС происходит заметная перестройка структуры околоземной среды, подобная той, что имеет место во время захода и восхода Солнца. Солнечные затмения оказывают существенное влияние на поведение подсистем в нелинейной открытой системе Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера (ЗАИМ) [1]. В ионосфере, как одной из подсистем ЗАИМ, эффекты затмений заметно проявляются в вариациях параметров динамических и тепловых процессов геокосмической плазмы. Ранее с помощью радара некогерентного рассеяния (НР) в Харькове были выполнены наблюдения нескольких ЗС в период с 1999 по 2008 гг. Получена уникальная геофизическая информация о поведении основных параметров ионосферы, физических процессов в геокосмической среде в течение ЗС [2 – 9].

Целью данной работы является изложение результатов моделирования параметров тепловых процессов в геокосмической плазме во время частного затмения Солнца 4 января 2011 г.

Общие сведения о затмении Солнца. ЗС 4 января 2011 г. было частным. Затмение над Харьковом наблюдалось с 07:29 UT до 10:28 UT. Максимальное покрытие солнечного диска имело место в 08:58 UT. Покрытие диска Солнца по площади составило 0.71, по диаметру – 0.78.

Освещенность поверхности Земли и околоземной среды в момент главной фазы ЗС уменьшилась почти в 4 раза. Общая продолжительность солнечного затмения составила 2 ч 59 мин.

Исходные теоретические соотношения. Для расчета параметров тепловых процессов в геокосмической плазме используем известные теоретические соотношения приведенные ниже.

Энергия, подводимая к электронному газу. В области F ионосферы частота столкновений электронов с нейтралами становится меньше, чем с ионами. В этом случае основными механизмами охлаждения электронного газа являются потеря тепла при столкновениях электронов с ионами, возбуждение тонкой структуры атомов кислорода и теплопроводность электронного газа [10]. Имеет место перенос фотоэлектронов и связанный с этим переносом нелокальный нагрев электронного газа.

На высотах $z \leq 350$ км теплопроводностью электронного газа можно пренебречь и уравнение баланса энергии электронов в стационарном случае в системе СИ имеет вид [10]

$$Q = L_{ei} + L_e,$$

$$L_{ei} = 8 \cdot 10^{-32} N^2 (T_e - T_i) T_e^{-3/2},$$

$$L_e = 6.4 \cdot 10^{-37} N N(O) (T_e - T_i) T_n^{-1},$$

где Q – энергия, передаваемая тепловым электронам при кулоновских столкновениях с фотоэлектронами; L_{ei} – энергия, теряемая при электрон-ионных столкновениях; L_e – энергия, затрачиваемая на возбуждение тонкой структуры атомов кислорода; N – концентрация электронов; $N(O)$ – концентрация атомов кислорода; T_e и T_i – температура электронов и ионов соответственно. Температура нейтралов T_n и концентрация $N(O)$ рассчитывалась с привлечением модели NRLMSISE-00 [11].

Поток тепла, переносимого электронами. Тепловой баланс электронного газа зависит от величины потока тепла, переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу. Тепло в плазмосфере накапливается за счет сверхтепловых электронов, убегающих из места своего образования во внешнюю ионосферу. Часть электронов теряют свою энергию в кулоновских соударениях с тепловыми электронами и ионами. Другая часть электронов попадает в магнитную силовую трубку. В силовой магнитной трубке захваченные электроны термализуются в процессе многократных отражений от концов трубки. Таким образом, в плазмосфере имеет место накопление тепла, которое поступает обратно в ионосферу посредством теплопроводности электронного газа [10, 12, 13].

Тепловой поток можно определить из кинетического уравнения с учетом переноса сверхтепловых электронов. Выражение для расчёта

величины плотности потока тепла, поступающего из плазмосферы в вертикальном направлении, имеет вид [12, 13]:

$$\Pi_T = -\kappa_e \sin^2 I \frac{\partial T_e}{\partial z}, \quad (1)$$

где $\kappa_e = 2.08 \cdot k^2 NT_e / mv_{ei}$ – продольная составляющая тензора теплопроводности электронного газа, k – постоянная Больцмана, m – масса электрона.

Частоту соударений электронов с ионами O^+ для расчёта величины продольной составляющей тензора теплопроводности в (1) можно найти, используя выражение вида [2, 3, 14]:

$$v_{ei} \approx 5.5 \cdot 10^{-6} NT_e^{-3/2} \ln(2.2 \cdot 10^4 T_e N^{-1/3}).$$

Результаты расчётов. *Подвод энергии к электронам.* На рис. 1 приведены временные вариации величины энергии, подводимой к электронам Q/N во время затмения и контрольный день на фиксированных высотах. Как видно из рисунка, эффекты ЗС в вариациях Q/N проявились достаточно заметно. Солнечное затмение привело к значительному уменьшению величины Q/N в диапазоне высот 210 – 290 км. Значения Q/N до ЗС составляли $2.75 \cdot 10^{-21}$, $1.3 \cdot 10^{-21}$ и $0.5 \cdot 10^{-21}$ Дж·с⁻¹ на высотах 210, 240 и 290 км соответственно. Во время затмения Q/N уменьшилась до значений $1.5 \cdot 10^{-21}$, $0.7 \cdot 10^{-21}$ и $0.2 \cdot 10^{-21}$ Дж·с⁻¹ на высотах 210, 240 и 290 км соответственно. Таким образом, в максимальную фазу затмения падение Q/N составило примерно 45 – 60 % в рассматриваемом диапазоне высот.

Потоки тепла из плазмосферы. На рис. 2 представлены вариации плотности потока тепла, переносимого из плазмосферы в ионосферу в день ЗС 4 января 2011 г. и контрольные сутки 5 января 2011 г. на фиксированных высотах.

Как видно из рис. 2, в период затмения имело место уменьшение Π_T модулю примерно на 60 – 70 % в диапазоне высот 290 – 410 км.

В целом, ЗС 4 января 2011 г. привело к существенной перестройке теплового режима ионосферы.

Обсуждение полученных результатов. *Подвод энергии к электронному газу.* Солнечное затмение 4 января 2011 г. существенно повлияло на параметры тепловых процессов в геокосмической плазме. Во время ЗС имела место перестройка теплового режима ионосферы. Как показали расчеты, затмение привело к уменьшению величины энергии, подводимой к электронам. Уменьшение Q/N в диапазоне высот 210 – 290 км составило 45 – 60 %.

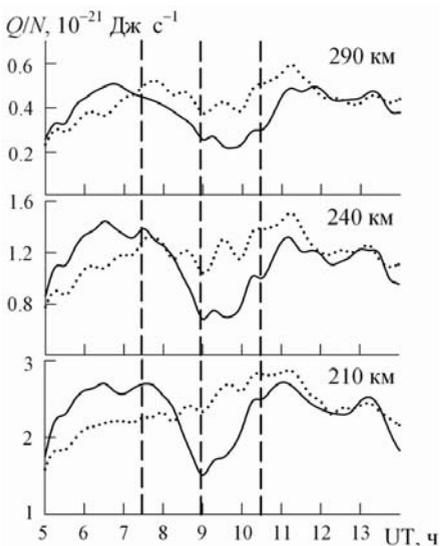


Рис. 1. Временные вариации величины энергии, подводимой к электронам Q/N во время ЗС 4 января 2011 г. (сплошная) и контрольный день 5 января 2011 г. (точки) на фиксированных высотах. Вертикальными линиями отмечены моменты начала, максимальной фазы и окончания ЗС

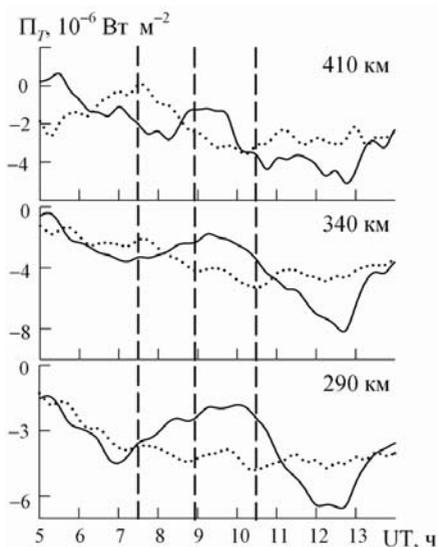


Рис. 2. Временные вариации плотности потока тепла, переносимого электронами P_T во время ЗС 4 января 2011 г. (сплошная) и контрольный день 5 января 2011 г. (точки) на фиксированных высотах

Следует отметить, что вариации Q/N во время ЗС качественно отражали вариации температуры электронов [15]. Уменьшение величины энергии, подводимой к электронному газу, можно объяснить тем, что в период затмения имеет место уменьшение удельной энергии, передаваемой фотоэлектронами электронам на высотах $z < 350$ км [12, 13].

Потоки тепла. Хорошо известно, что при наличии разности температур в среде от слоя с более высокой температурой к слою с более низкой температурой устанавливается тепловой поток. В ионосфере обычно $\partial T_e / \partial z > 0$ и $P_T < 0$. Это означает, что поток тепла направлен вниз в ионосферу. Температура электронов в момент максимального покрытия диска Солнца уменьшилась примерно на 130 – 370 К в диапазоне высот 190 – 410 км [15]. Уменьшение (по модулю) P_T вблизи главной фазы затмения составило примерно 60 – 70 % в диапазоне высот 290 – 410 км. Это связано, главным образом, с охлаждением электронного газа ($P_T \propto T_e^{5/2} \partial T_e / \partial z$). Таким

образом, эффекты ЗС 4 января 2011 г. заметно проявились и в вариациях плотности потока тепла, переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу.

Сравнение эффектов ЗС 11 августа 1999 г., 31 мая 2003 г., 3 октября 2005 г., 29 марта 2006 г., 1 августа 2008 г. и 4 января 2011 г. В работах [2 – 9, 15] представлены результаты наблюдений эффектов в околоземной среде во время частных ЗС 11 августа 1999 г., 31 мая 2003 г., 3 октября 2005 г., 29 марта 2006 г., 1 августа 2008 г. и 4 января 2011 г., зарегистрированных с помощью радара НР в Харькове.

В табл. 1 представлены основные характеристики частных ЗС над Харьковом в 1999 – 2011 гг., а именно время начала T_1 , главной фазы T_{\max} и окончания T_2 ЗС, значения функции покрытия солнечного диска по площади (A) и диаметру (D/D_0). В таблице также приведена информация о солнечной и геомагнитной активности для рассматриваемых дат.

В табл. 2 приведены данные об относительном изменении параметров тепловых процессов ($\Delta(Q/N)$ и $\Delta\Pi_T$) для каждого из рассматриваемых затмений в соответствующем диапазоне высот.

Из табл. 1 видно, что наиболее подходящими для сравнения являются ЗС 11 августа 1999 г. и 29 марта 2006 г. Для указанных ЗС значения функций покрытия диска Солнца A и время наступления максимальной фазы практически совпадали. Геомагнитная обстановка для рассматриваемых периодов была спокойной. Следует также отметить, что затмение 11 августа 1999 г. имело место в период максимума солнечной активности (СА), а солнечное затмение 29 марта 2006 г. в период минимума СА.

Эффекты ЗС в 1999 и 2006 гг. достаточно уверенно наблюдались в вариациях величины энергии, подводимой к электронному газу. Так, во время затмений 11 августа 1999 г. и 29 марта 2006 г. величина Q/N уменьшилась примерно на 20 – 30 % в диапазоне высот 290 – 340 км. Для затмения 3 октября 2005 г., максимальная фаза которого не превышала 15 %, уменьшение Q/N составило около 20 – 40 % в рассматриваемом высотном диапазоне. Для затмения 4 января 2011 г., фаза которого была близка по величине фазам ЗС 11 августа 1999 г. и 29 марта 2006 г., но само затмение имело место вблизи местного полдня, уменьшение Q/N составило 45 – 60 % в диапазоне высот 210 – 410 км.

Вариации плотности потока тепла, переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу для всех ЗС качественно подобны. Во всех случаях наблюдается уменьшение модуля Π_T в момент максимального покрытия диска Солнца. Во время затмения 11 августа 1999 г. уменьшение плотности потока пепла (по модулю) составило около 50 % на высоте 310 км (см. табл. 2). В период затмения 29 марта 2006 г. Π_T уменьшилась примерно на 17 – 37 % в диапазоне высот 290 – 340 км. Для затмения 3 октября 2005 г. уменьшение Π_T составило около не более 17 % в рассматриваемом диапазоне

высот. Как показали расчеты, во время ЗС 4 января 2011 г. имело место уменьшение Π_T примерно на 60 – 70 % в диапазоне высот 210 – 410 км.

Таблица 1
Основные сведения о ЗС и гелиогеофизической обстановке в период с 1999 по 2011 гг.

| Дата | T_1 , UT | T_{\max} , UT | T_2 , UT | A | D/D_0 | $F_{10.7}$ | $\bar{F}_{10.7}$ | A_p |
|-------------|------------|-----------------|------------|-------|---------|------------|------------------|-------|
| 11.08.99 г. | 09:57:32 | 11:15:40 | 12:29:27 | 0.746 | 0.794 | 131 | 158 | 6 |
| 31.05.03 г. | 02:16:08 | 03:14:34 | 04:17:27 | 0.658 | 0.740 | 113 | 125 | 49 |
| 03.10.05 г. | 08:41:40 | 09:41:57 | 10:42:34 | 0.153 | 0.263 | 74 | 79 | 7 |
| 29.03.06 г. | 10:02:47 | 11:12:59 | 12:21:59 | 0.724 | 0.774 | 82 | 78 | 6 |
| 01.08.08 г. | 09:11:28 | 10:15:41 | 11:17:47 | 0.329 | 0.439 | 66 | 66 | 3 |
| 04.01.11 г. | 07:29:36 | 08:58:30 | 10:28:36 | 0.709 | 0.780 | 91 | 83 | 4 |

Таблица 2
Вариации параметров тепловых процессов

| Дата | z , км | $\Delta(Q/N)$, % | $\Delta\Pi_T$, % |
|-------------|-----------|-------------------|-------------------|
| 11.08.99 г. | 308 | 30 | 50 |
| 31.05.03 г. | 270 | 30 | 48 |
| 03.10.05 г. | 290 – 340 | 20 – 40 | 13 – 17 |
| 29.03.06 г. | 290 – 340 | 20 – 25 | 17 – 37 |
| 01.08.08 г. | 210 – 340 | 12 | 9 – 16 |
| 04.01.11 г. | 210 – 410 | 45 – 60 | 60 – 70 |

Сравнительный анализ показал, что для каждого из затмений наблюдается качественное подобие эффектов в вариациях параметров тепловых процессов в геокосмосе. Количественные различия в вариациях параметров ионосферы и динамических процессов, в большей степени, могут быть объяснены различным уровнем солнечной и геомагнитной активности, а также величиной фазы ЗС.

Выводы. Эффекты затмения Солнца 4 января 2011 г. уверенно наблюдались в вариациях параметров тепловых процессов в геокосмической плазме. Результаты моделирования показали следующее.

1) Затмение Солнца привело к уменьшению величины энергии, подводимой к электронному газу примерно на 45 – 60 % в диапазоне высот 210 – 290 км.

2) Во время затмения имело место уменьшение модуля плотности потока тепла, переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу примерно на 60 – 70 % в диапазоне высот 290 – 410 км.

3) Эффекты ЗС 4 января 2011 г. в вариациях плотности потока тепла и энергии качественно подобны вариациям Q/N и Π_T во время ЗС в 1999 – 2008 гг., наблюдаемых над Харьковом с помощью радара НР.

Список литературы: 1. Черногор Л.Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, № 1. – С. 56 – 104.
2. Акимов Л.А., Григоренко Е.И., Таран В.И., Тырнов О.Ф., Черногор Л.Ф. Комплексные

радиофизические и оптические исследования динамических процессов в атмосфере и геокосмосе, вызванных солнечным затмением 11 августа 1999 года // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 2002. – № 2. – С. 25 – 63.

3. Акимов Л.А., Боговский В.К., Григоренко Е.И., Таран В.И., Черногор Л.Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты солнечного затмения 31 мая 2003 года в Харькове // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2005. – Т. 45, № 4. – С. 526 – 551.

4. Бурмака В.П., Григоренко Е.И., Емельянов Л.Я., Лысенко В.Н., Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф. Радарные наблюдения эффектов в геокосмосе, вызванных частным солнечным затмением 29 марта 2006 г. // Успехи современной радиоэлектроники. – 2007. – № 3. – С. 38 – 53.

5. Бурмака В.П., Лысенко В.Н., Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты частного солнечного затмения 3 октября 2005 г. в Харькове. 1. Результаты наблюдений // Космічна наука і технологія. – 2007. – Т. 13, № 6. – С. 74 – 86.

6. Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты частного солнечного затмения 3 октября 2005 г. в Харькове. 2. Моделирование и обсуждение результатов // Космічна наука і технологія. – 2008. – Т. 14, № 1. – С. 57 – 64.

7. Емельянов Л.Я., Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф. Эффекты в геокосмической плазме во время частного затмения Солнца 1 августа 2008 г. над Харьковом. 1. Результаты наблюдений // Космічна наука і технологія. – 2009. – Т. 15, № 3. – С. 70 – 81.

8. Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф. Эффекты в геокосмической плазме во время частного затмения Солнца 1 августа 2008 г. над Харьковом. 2. Результаты расчетов и обсуждение // Космічна наука і технологія. – 2009. – Т. 15, № 4. – С. 3 – 11.

9. Chernogor L.F., Grigorenko Ye.I., Lyashenko M.V. Effects in the geospace during partial solar eclipses over Kharkiv // International Journal of Remote Sensing. – 2011. – V. 32, № 11. – P. 1 – 11.

10. Эванс Дж. Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн // ТИИЭР. – 1969. – Т. 57, № 4. – С. 139 – 177.

11. Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // J. Geophys. Res. – 2002. – V. 107, № A12. – P. SIA 15 1 – 16.

12. Schunk R.W., Nagy A.F. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry. – Cambridge atmospheric and space science series, 2000. – 555 p.

13. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. – М.: Наука, 1988. – 528 с.

14. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. – М.: Наука, 1967. – 564 с.

15. Домнин И.Ф., Емельянов Л.Я., Ляшенко М.В. Вариации параметров ионосферной плазмы в течение солнечного затмения 4 января 2011 г. // 11-th Ukrainian Conference on Space Research (August 29 – September 2, 2011, Yevpatoria, Ukraine). – 2011. – P. 21.

Поступила в редколлегию 30.06.2011

А.И. ЛЯЛЮК, м.н.с., Институт ионосферы, Харьков

Е.В. РОГОЖКИН, д-р физ.-мат. наук, проф., проф., НТУ “ХПИ”, Харьков

ОСОБЕННОСТИ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ МЕТОДОМ НР

Розглядаються питання аналізу характеристик та особливостей сигналу некогерентного розсіяння. Представлена еволюція методів отримання параметрів іоносферної плазми. Наводяться варіанти аналого-цифрового перетворення при вимірюванні параметрів іоносфери методом некогерентного розсіяння.

Рассмотрены вопросы анализа характеристик и особенностей сигнала некогерентного рассеяния. Представлена эволюция методов получения параметров ионосферной плазмы. Приведены варианты аналого-цифрового преобразования при измерении параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния.

Questions of the analysis of characteristics and features of the incoherent scattering signal are considered. Forward for the evolution of methods to obtain the parameters of the ionospheric plasma. The options presented are analog-digital signal conversion in the measurement of parameters of the ionosphere by the incoherent scattering.

Введение. Метод некогерентного рассеяния (НР) основан на том, что при использовании частот выше критической распространяющаяся в плазме радиоволна рассеивается на пространственных неоднородностях. Вызываемых изменением коэффициента преломления, причиной чему является тепловое движения частиц. В метровом диапазоне радиоволн спектр сигнала рассеяния – соответственно и его автокорреляционная функция (АКФ) – определяются коллективными свойствами плазмы: кинетическими температурами электронов и ионов, кулоновским взаимодействием между ионами и электронами, ионным составом и воздействием внешних сил. При импульсном зондировании ионосферы, которое в настоящее время используется на всех действующих радиолокаторах НР, информативность сигнала рассеяния определяется также и характеристиками зондирующего сигнала. Использование аналого-цифрового преобразования при измерениях параметров ионосферы методом НР также имеет особенности, которые необходимо учитывать.

Анализ литературы. Спектр рассеяния привлекает наглядностью и простотой интерпретации процессов в ионосфере, особенно в периоды аномальных возмущений. В тоже время системы обработки сигналов большинства действующих радиолокаторов НР построены на использовании цифровых коррелометров [1, 2].

Сигнал НР имеет нормальный закон распределения и вследствие большого количества независимых рассеивающих элементов описывается многомерным случайным вектором с независимыми компонентами [1, 3]. Фаза принятого сигнала НР является случайной и равномерно распределена

в интервале $[0; 2\pi]$. Если интервал между его отсчётами больше интервала корреляции, то разность фаз равновероятна в том же интервале. Вследствие этого для уменьшения статистической погрешности при синхронном детектировании применяют два квадратурных канала, или используют обработку сигнала на промежуточной частоте с использованием соответствующих режимов аналого-цифрового преобразования [1 – 3].

Ионосфера представляет среду со сложным высотным строением. Это отражается и на характере сигнала НР. В качестве примера приводим табл. 1, в которой, как один из примеров, отражено высотное строение ионосферы для низкой солнечной активности [1].

Таблица 1
Высотное строение ионосферы для минимума солнечной активности

| Лето, полдень | | | | | | | | | |
|---------------|--------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-------------|--------------|
| h_s , км | n_e , см ⁻³ | D_0 , км | T_e , К | T_i , К | O^+ , % | H^+ , % | He^+ , % | O_2^+ , % | NO_2^+ , % |
| 1500 | 650 | 790 | 2420 | 3650 | | 100 | | | |
| 1000 | 1580 | 520 | 2930 | 3200 | 50 | 45 | 5 | 0 | 0 |
| 700 | 23300 | 300 | 2030 | 2900 | 80 | 18 | 2 | 0 | 0 |
| 500 | 67800 | 110 | 1430 | 2700 | 96 | 4 | 0 | 0 | 0 |
| 300 | 342875 | 90 | 975 | 2600 | 99 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 200 | 351100 | 90 | 800 | 1470 | 23 | 0 | 0 | 21 | 56 |
| Зима, полночь | | | | | | | | | |
| 1500 | 5600 | 830 | 960 | 1600 | 0 | 95 | 5 | 0 | 0 |
| 1000 | 7400 | 500 | 890 | 1550 | 7 | 83 | 10 | 0 | 0 |
| 700 | 11100 | 220 | 890 | 1500 | 35 | 58 | 7 | 0 | 0 |
| 500 | 34400 | 80 | 890 | 1370 | 80 | 18 | 2 | 0 | 0 |
| 300 | 81146 | 100 | 750 | 1230 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 200 | 2700 | | 650 | 800 | 78 | 0 | 0 | 4 | 18 |

Цель статьи – анализ особенностей аналого-цифрового преобразования при измерениях параметров ионосферы методом НР.

Ионный состав и отношение температур T_e/T_i существенно влияют на форму спектра и АКФ сигнала рассеяния. В работах [1, 2] даны оценки ширины спектра $2\Delta f$ (на уровне – 10 дБ) и интервала корреляции $\tau_{\text{корр}}$.

$$2\Delta f \approx \frac{1.24}{\lambda_0} \sqrt{T_i/\bar{m}_i}, \text{ кГц}, \tau_{\text{корр}} \approx 4.5\lambda_0 \sqrt{\bar{m}_i/T_e}, \text{ мс}, \quad (1)$$

где \bar{m}_i – масса доминирующих ионов в единицах атомного веса; T_e , T_i – кинетические температуры электронов и ионов в К; λ_0 – рабочая длина волны, в метрах.

В третьей колонке таблицы в качестве оценки формы высотного распределения мощности сигнала НР приведен интервал высот D_0 , на котором при вертикальном зондировании мощность регулярной составляющей меняется в e раз.

Формулы (1) для длины волны 2 м дают предельные значения, которые сведены в табл. 2.

Таблица 2

Предельные значения параметров сигнала рассеяния

| Интервал корреляции, мкс | | Ширина спектра, кГц | |
|--------------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Максимум для 200 км | Минимум для 1500 км | Максимум для 1500 км | Минимум для 200 км |
| 1700 | 150 | 36 кГц | 3 кГц |

Если воспользоваться рекомендациями, которые ориентируются на интерполяционные формулы Ньютона [5, 6], и согласно которым для допустимой ошибки интерполяции менее 2 % необходимо иметь около двух десятков точек, то для измерений ниже максимума ионизации допустимым является шаг по задержке $\tau \approx 70$ мкс, а в области выше максимума достаточным является шаг до 10 мкс.

Приведенные выше результаты рассчитаны для монохроматического зондирования. При зондировании импульсами с идеально прямоугольной формы огибающей длительностью T возникают естественные для некогерентного рассеяния ограничения:

$$R_{\text{изм}}(\tau) = f(x) = \begin{cases} R_{\text{нр}}(\tau)(1 - \tau/T), & \tau \leq T, \\ 0, & \tau > T. \end{cases} \quad (2)$$

Отметим, что длительность простого зондирующего импульса для получения достаточно полного объёма информации должна быть сопоставимой с интервалом корреляции или больше его.

В тех случаях, где использование простых импульсов вступает в противоречие с требуемым высотным разрешением, используют, например, режим зондирования сдвоенными импульсами малой длительности, следующих с переменным интервалом τ , величина которого изменяется дискретно в пределах от 0 до интервала корреляции.

Помимо ограничений, которые накладываются на характеристики зондирующего сигнала, необходимо отметить то обстоятельство, что с увеличением высоты и расширением спектра рассеяния наблюдается существенное уменьшение отношения сигнал/шум.

Для неискажённых измерений локальных параметров ионосферной плазмы придерживаются того критерия, что полоса пропускания приёмного тракта должна быть шире спектра сигнала НР с учётом его свёртки со спектром зондирующего импульса. Вынужденный выбор полосы пропускания, удовлетворяющий используемому критерию для верхней границы исследуемого интервала, неоправданно увеличивает статистическую погрешность измерений на более низких ионосферных

высотных уровнях. В практике измерений выход из положения находят в использовании переключения аналоговых фильтров с разной полосой.

Однако такое переключение только улучшает соотношение сигнал/шум, но не решает аппаратных вопросов для получения соответствующего разрешения по частоте при измерениях спектров и выбору шага по задержке и количеству измеряемых ординат при определении АКФ сигнала рассеяния. Параллельное использование нескольких, оптимальных для каждого из высотных уровней устройств обработки сигнала или ПК с соответствующим программным обеспечением сталкивается с проблемой их совместного функционирования при заключительном анализе результатов наблюдений при определении высотного распределения ионосферных параметров.

Возникает естественное предложение – запись без потери информации в режиме *on-line* сигналов на выходе радиоприёмного устройства, и только затем их корреляционная или спектральная обработка.

Естественно, что в современных условиях такая запись сигнала уже возможна при его цифровом представлении, при чём с требуемой разрядностью. Важным является и то, чтобы записанная информация, во-первых, уже имеет минимально необходимые объёмы, и, во-вторых, соответствует имеющимся в вычислительной технике возможностям средств записи и хранения информации, ёмкость которых достигает десятков гигабайт.

В настоящее время существуют как минимум три технических решения, позволяющих представить сигнал НР в цифровой форме. Согласно [7], его парные отсчёты, представляемые каждый байтом, формируются на выходах квадратурных каналов после синхронного детектирования с фиксированным шагом дискретизации 30.55 мкс, что позволяет с таким же шагом определять АКФ сигнала рассеяния вдоль всей радиолокационной развёртке дальности.

Согласно другому решению [4], сигнал подвергается аналого-цифровому преобразованию непосредственно на промежуточной частоте 10 МГц с шагом, равным четверти её периода.

В работе [2] описан реализованный в коррелометре КМ-73 [6] и системе обработки сигналов СКИФ [6] принцип дискретизации, согласно которому частота f_q , с которой происходит аналого-цифровое преобразование и промежуточная частота $f_{пч}$, на которой производится обработка, связаны отношением целых чисел

$$f_q / f_{пч} = m/n. \quad (3)$$

При такой связи, которая достаточно просто реализуется в радиолокаторах, построенных по когерентной схеме, появляется возможность измерять весьма малые доплеровские сдвиги, которые в реальных условиях могут составлять величину порядка одной тысячной и меньше от ширины спектра рассеяния, и определять огибающую

автокорреляционной функции $R_{\text{ПЧ}}(\tau)$, которая на промежуточной частоте в отсутствие дрейфа плазмы описывается выражением:

$$R_{\text{ПЧ}}(\tau) = R_0(\tau) \cos[2\pi f_{\text{ПЧ}}(\tau)], \quad (4)$$

где $R_0(\tau)$ функция, поведение которой определяется локальными параметрами ионосферной плазмы и формой зондирующего импульса.

Выводы. Рассмотренные варианты преобразования имеют характерные достоинства и недостатки. Так, использование квадратурных каналов при синхронном детектировании позволяет минимизировать количество операций при обработке и объёмы используемой аппаратуры, однако требует высокой идентичности каналов, в каждый из которых входят фильтры нижних частот, другие аналоговые элементы и АЦП.

В других технических решениях используется единственный АЦП, и происходит ориентация на использование цифровые коррелометры, которые с единым алгоритмом за время радиолокационной развёртки работают с достаточно большим количеством отсчетов. Достоинство такого подхода заключается в том, что объёмы итоговой информации слабо зависят от длительности сеанса измерений.

Общим недостатком рассмотренных технических решений является использование сигнальных процессоров с фиксированным алгоритмом работы. Это не позволяет модифицировать алгоритмы обработки в зависимости от условий измерений на выделенных высотных уровнях и от конкретной задачи ионосферных измерений. Например, в случае изменения шага по задержкам при измерениях АКФ сигнала НР, при наблюдение и интерпретация процессов в ионосфере при аномальных её возмущениях по результатам спектрального анализа [5] и др.

Из рассмотренного выше следует вывод, что устранение отмеченного недостатка может быть осуществлено при такой записи и хранении оцифрованных значений, последующее использование которых позволяло бы применять альтернативные варианты обработки. Вопрос состоит в организации такого процесса записи оцифрованных значений смеси сигнал+шум, который сохранял бы всю информацию о локальных характеристиках ионосферной плазмы при минимальных объёмах записей и минимальных количествах используемых аналоговых элементов.

Решение этой задачи открывает и возможность использования цифровой фильтрации [8, 9], что позволяет добиться наилучшего соотношения сигнал/шум на всех ионосферных уровнях.

Список литературы: 1. *Рогожкин Е.В., Пуляев В.А., Лысенко В.Н.* Зондирующие сигналы для исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния: монография. – Х.: НТУ «ХПИ», 2008. – 256 с. 2. *Рогожкин Е.В.* Измерение параметров ионосферной плазмы по корреляционной функции сигнала некогерентного рассеяния / Ионосферные исследования № 27. – М.: Сов. радио, 1979. – С. 46 – 59. 3. *Рогожкин Е.В.* О представлении сигнала некогерентного рассеяния многомерным случайным вектором // Ионосфера. Сборник

научных трудов. – 1992. – Вып. 2. **4.** *Folkestad K.* EISCAT: An updated description of technical characteristics and operational capabilities // *Radio Sci.* – 1983. – V. 18. – P. 867 – 879. **5.** *Грибанов Ю.И., Мальков В.Л.* Спектральный анализ случайных процессов. – М.: Энергия, 1974. – 240 с. **6.** *Рогожкин Е.В.* Сложные зондирующие сигналы для исследования структуры и динамики ионосферы методом некогерентного рассеяния // Диссерт. на соиск. уч. степ. докт. физ.-мат. наук. – Х.: ИРЭ. – 1992. **7.** *Лысенко В.Н., Черняк Ю.В.* Методика корреляционной обработки сигналов, некогерентно рассеянных ионосферной плазмой // *Радиотехника.* – 2006. – № 146. – С. 178 – 186. **8.** *Хемминг Р.В.* Цифровые фильтры. – М.: Сов. радио, 1980. – 224 с. **9.** *Глинченко А.С.* Цифровая обработка сигналов.– Красноярск: КГТУ, 2001. – 199 с.

Поступила в редколлегию 29.06.2011

С.В. ХАРИТОНОВА, м.н.с., Институт ионосферы, Харьков
Л.Ф. ЧЕРНОГОР, д-р физ.-мат. наук, проф., ХНУ имени В.Н. Каразина

ЭФФЕКТЫ СЛАБОЙ ГЕОКОСМИЧЕСКОЙ БУРИ 20 – 21 ЯНВАРЯ 2010 г.

Наведено результати аналізу варіацій параметрів іоносферної плазми у період вельми помірної магнітної бурі 20 – 21 січня 2010 р. Магнітна буря супроводжувалася іоносферним збуренням з негативною фазою. Спостереження проведені за допомогою радару некогерентного розсіяння в Харкові. Знайдено кількісні показники збурень.

Приведены результаты анализа вариаций параметров ионосферной плазмы в период весьма умеренной магнитной бури 20 – 21 января 2010 г. Магнитная буря сопровождалась ионосферным возмущением с отрицательной фазой. Наблюдения проводились при помощи радару некогерентного рассеяния в Харькове. Найдены количественные показатели возмущений.

Analysis results of variations of ionospheric plasma parameters for the highly moderate magnetic storm on January 20 – 21, 2010 are presented. The magnetic storm was accompanied by ionosphere storm with negative phase. The observations were performed out by the Kharkiv incoherent scatter radar. Numerical indices of perturbations are received.

Введение. О воздействии геокосмических бурь (ГБ) на технические, природные и биологические объекты известно давно. То разнообразие глобальных процессов, которые ГБ приносит с собой на нашу планету, делает её интересной и актуальной для научного исследования. Геомагнитные возмущения сопровождаются возмущениями в верхней атмосфере, ионосфере и электрическом поле различного происхождения. В результате ГБ могут возникнуть сбои в работе систем навигации и радиосвязи, средств телекоммуникации, мощных энергосистем и др. Многообразие физических и химических процессов в периоды ГБ и сложность их взаимодействия затрудняют прогнозирование состояния возмущенной ионосферы. По существу, каждая буря является индивидуальной. Классификация бурь проводится по их интенсивности, характеру и величине относительных возмущений параметров среды [3, 4, 6, 7].

Радар в Харькове является единственной установкой некогерентного рассеяния (НР) в среднеширотной Европе и предназначен для измерения параметров ионосферы в различных условиях. Уже на протяжении трех циклов солнечной активности (СА) на этом радаре проводятся наблюдения состояния ионосферной плазмы и космической погоды [2, 3].

Как известно, умеренные ионосферные бури (ИБ) возникают значительно чаще, чем сильные, но остаются менее изученными. Сильные ИБ происходят сравнительно редко (как правило, вблизи периода максимальной

СА и вскоре после него). Их исследованию уделялось и уделяется основное внимание. Эффекты умеренных ИБ остаются малоизученными.

Целью работы является изложение результатов наблюдений вариаций параметров динамических процессов в ионосфере в течение весьма умеренной магнитной бури (МБ) 20 – 21 января 2010 г.

Состояние космической погоды. МБ 20 – 21 января 2010 г. интересна тем, что она имела место вскоре после продолжительного минимума СА. До 20 января геомагнитное поле Земли было спокойным. Скорость солнечного ветра не превышала 350 км/с, индекс K_p не превышал 2, а D_{st} флуктуировал около нуля, оставаясь преимущественно положительным. 20 января, около полудня, концентрация солнечного ветра начинает резко увеличиваться, скорость и температура постепенно повышаются, динамическое давление резко достигает 10 нПа. В это время B_z -компонента ММП резко поворачивает на юг и достигает максимального отклонения -8.3 нТл в 13:30, а энергии ϵ , передаваемая солнечным ветром магнитосфере Земли, достигает 20 ГДж/с. Результатом этих событий стало возникновение весьма умеренной МБ 20 – 21 января около 13:30 с экстремальными значениями индексов $AE = 680$ нТл, $K_p = 4$ и $D_{st} = -38$ нТл. Главная фаза продолжалась до 22:30 20 января, а фаза восстановления наблюдалась до конца периода измерений.

Экспериментальные результаты. В данной работе были подробно исследованы вариации основных параметров нейтральной атмосферы N, T_e, T_i .

На рис. 1 изображены сглаженные временные вариации критической частоты f_oF2 и электронной концентрации N_mF2 в максимуме слоя $F2$ в течение 20 – 21 января 2010 г. Видно, что с 20 на 21 января над Харьковом наблюдалось отрицательное ионосферное возмущение, во время которого значения концентрации электронов N_mF2 уменьшились примерно на 34 %. При этом, максимальное относительное отклонение критической частоты составило около 17 %. 20 января, когда началась МБ, зафиксировано уменьшение N_mF2 до 30 %. 21 января уже наблюдается восстановление.

В свою очередь, измерения радаром НР в диапазоне высот $h = 200 - 600$ км, показали, что в ночь с 20 на 21 января на высотах 200 – 250 км (где в это время находился максимум слоя $F2$) уменьшение концентрации электронов составило 32 – 37 %. Однако, выше максимума слоя $F2$ вариации концентрации были выражены слабее из-за возрастающего влияния процессов диффузии на этих высотах.

Уменьшение концентрации электронов во время отрицательного ионосферного возмущения сопровождалось незначительным нагревом плазмы. На рис. 2 представлены временные вариации температур электронов и ионов. Ночью с 20 на 21 января на высоте 200 км изменение температуры электронов находилось в пределах погрешности. Максимальное увеличение на 200 К составило на высоте 750 км. Видно, что отрицательное ионосферное

возмущение отразилось и на поведении температуры ионов, но ее изменение находилось в пределах погрешности.

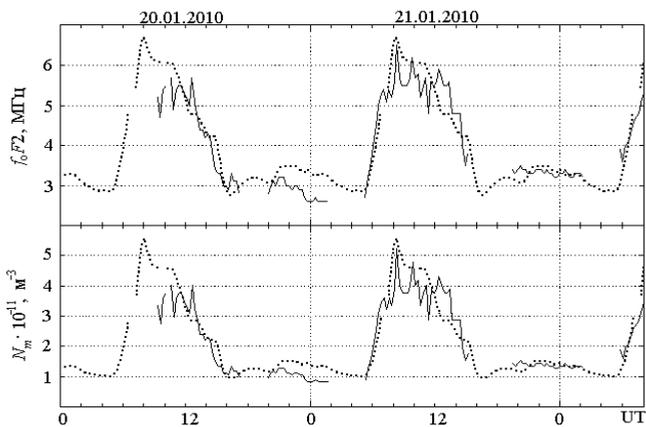


Рис. 1. Вариации критической частоты f_oF2 и концентрации электронов N_mF2 в максимуме слоя $F2$ в течение 20 – 21 января 2010 г. (линия) и в контрольный день (точки), полученные при усреднении данных за 13 – 14 декабря 2009 г.

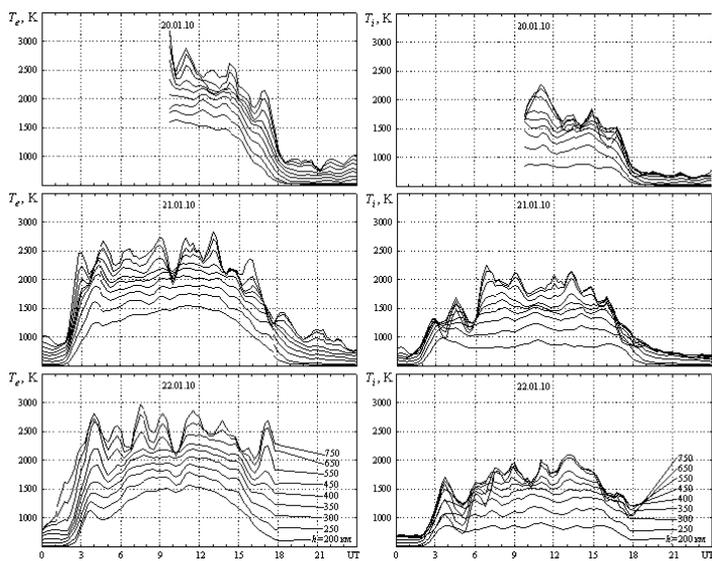


Рис. 2. Сравнение поведения температур электронов T_e (слева) и ионов T_i (справа) в период с 20 по 22 января 2010 г. (скользящее усреднение на интервале 75 мин с шагом 15 мин)

Моделирование процессов. На основании N_e , T_e , T_i , используемых для расчетов, нами проведено моделирование процессов, сопутствовавших МБ.

Уравнение баланса энергии электронов в стационарном случае для диапазона высот 200 – 350 км в системе СИ имеет вид [8]:

$$Q = L_{ei} + L_e,$$

$$L_{ei} = 8 \cdot 10^{-32} N_e^2 (T_e - T_i) T_e^{-3/2}, \quad L_e = 6.4 \cdot 10^{-37} N_e N(O) (T_e - T_i) T_n^{-1},$$

где Q – энергия, передаваемая тепловым электронам при кулоновских столкновениях со сверхтепловыми электронами, L_{ei} – энергия, теряемая при столкновении электронов с ионами, L_e – энергия, затрачиваемая на возбуждение тонкой структуры атомов кислорода, $N(O)$ – концентрация этих атомов.

Результаты расчетов энергии Q/N_e , подводимой к электрону в единицу времени, и составляющих потерь энергии электронного газа в процессе теплообмена с ионами L_{ei}/N_e и нейтралами L_e/N_e представлены на рис. 3. При расчетах использовались значения температур электронов T_e и ионов T_i , концентрации электронов N_e , полученные методом НР. Температура нейтралов T_n и $N_e N(O)$ были взяты из модели NRLMSISE-00 [9].

Вклад составляющих L_{ei}/N_e и L_e/N_e в процесс охлаждения электронного газа был разным для каждого дня. 21 января, когда уже закончилась главная фаза МБ и началась фаза восстановления, вблизи местного полудня наблюдалось небольшое уменьшение (до 1.2 раз) L_e/N_e . В результате чего подвод энергии к электронному газу Q/N_e тоже немного уменьшился, что характерно для всего диапазона высот в этот день. Тогда же, в дневное время, на высоте $h = 250$ км превышение составляющей L_e/N_e над L_{ei}/N_e уменьшилось по сравнению с предыдущим и последующим днями. Вообще такое преобладание происходит за счет высокой разности температур $(T_e - T_i)$ при малых значениях N_e , что характерно для условий невысокой СА. В это же время на высоте $h = 300$ км L_{ei}/N_e стали преобладать над L_e/N_e , хотя 20 и 22 января вклад этих двух механизмов был практически равен за счет падения с высотой концентрации атомов кислорода $N(O)$ и увеличения L_{ei}/N_e . На высоте $h = 350$ км составляющая L_{ei}/N_e явно преобладает над составляющей L_e/N_e , только для 21 января все параметры немного меньше, чем в остальные дни.

Нейтральная атмосфера оказывает влияние на поведение ионосферной плазмы, как в спокойных, так и в возмущенных условиях. Процессы, которые происходят в ионосфере (перенос плазмы, фотоионизация, изменение концентрации электронов N_e), зависят и определяются именно составом нейтральной атмосферы. На рис. 4 приведены вариации концентрации основных компонент нейтральной атмосферы: молекулярного азота $N(N_2)$, атомарного $N(O)$ и молекулярного кислорода $N(O_2)$ и параметра $p = N(O)/(N(N_2)+N(O_2))$, который характеризует соотношение процессов образования и потерь ионов O^+ и пропорционален N_e в области F ионосферы.

20 января, когда началась ИБ, изменение концентрации $N(O_2)$, $N(N_2)$ и $N(O)$ не наблюдалось. Но во время отрицательного возмущения (в минимуме провала) отмечалось падение $N(N_2)$ и $N(O_2)$ всего лишь на 13 % и 11 % соответственно. Результатом этих событий стало увеличение параметр p на 7 % в это же время. Концентрация $N(O)$ на протяжении этого периода изменилась очень слабо.

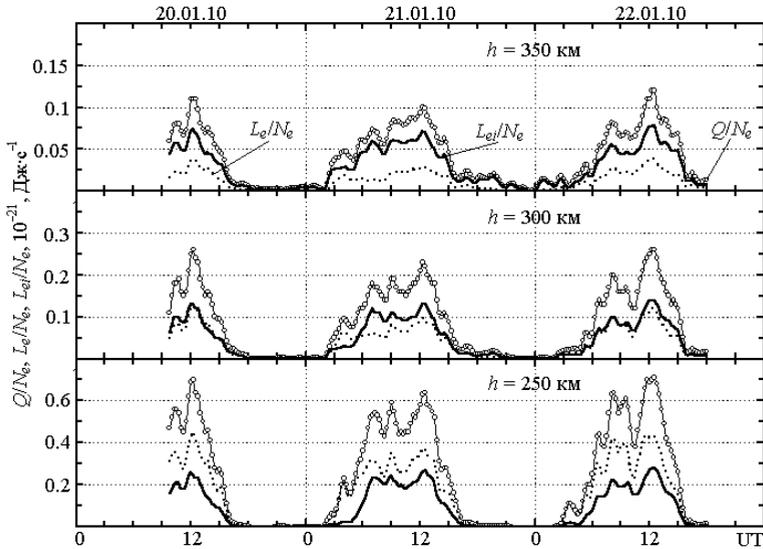


Рис. 3. Временные вариации скоростей нагрева электронного газа Q/N_e и теплообмена электронов с ионами L_{ei}/N_e и атомами кислорода L_e/N_e в период 20 – 22 января 2010 г. (скользящее усреднение на интервале 45 мин с шагом 15 мин)

Нагрев нейтрального газа является одним из эффектов термосферных возмущений, сопровождающий МБ. В процессе исследований было выявлено, что, как и во время отрицательной фазы возмущения, так и после нее, значения дневных и ночных температур нейтралов T_n оставались практически одинаковыми. Поэтому можно утверждать, что слабое отрицательное возмущение не повлияло на поведение T_n .

Обсуждение. Исследование сильных ГБ показало существование тесной взаимосвязи МБ с явлениями на Солнце, в ближнем космосе, ионосфере и термосфере [1, 2, 5, 8]. Они вызывают существенные возмущения в среднеширотной ионосфере и атмосфере и ряд необычных для средних широт явлений. МБ по категории классификации могут быть одинаковыми, но при этом отличаться друг от друга своей интенсивностью [1, 2, 5, 8].

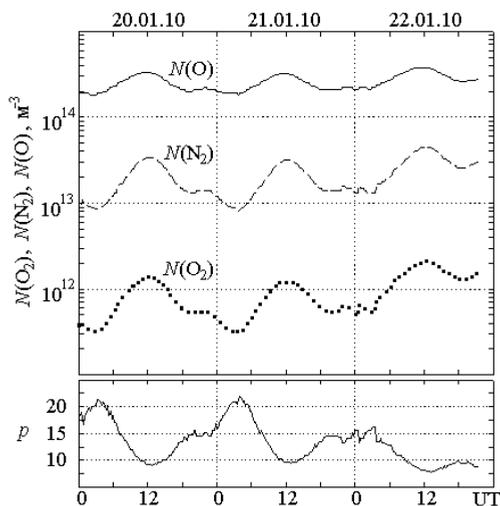


Рис. 4. Временные вариации концентрации основных компонент нейтральной атмосферы и параметра $p = N(O)/(N(N_2)+N(O_2))$ на высоте 300 км в период 20 – 22 января 2010 г. (из расчета по модели NRLMSISE-00)

Параметры, описывающие космическую погоду в течение весьма умеренной МБ 20 – 21 января 2010 г. и сильнейших ГБ значительно отличаются. Во время весьма умеренной МБ максимальное значение K_p -индекса достигало 4, D_{st} отклонилось только до -38 нТл, а B_z – до -8.3 нТл. Уменьшение концентрации электронов в максимуме области $F2$ было незначительно (всего лишь в 1.6 – 1.7 раза) по сравнению с сильнейшими бурями (уменьшение в 3 – 7 раз). Изменения T_e и T_i были зафиксированы в пределах погрешности, тогда как при сильных МБ оно составляло до 1000 К (и более) и 900 К соответственно, т. е. умеренная МБ повлияла на поведение температур, но эти изменения были не значительны, как при сильных МБ, которые, в свою очередь, вызвали ряд интересных эффектов в ионосфере.

Выводы. В ходе работы получены следующие результаты:

1. Обнаружено, что 20 – 21 января 2010 г. над Харьковом наблюдалось слабое отрицательное ионосферное возмущение с максимальным отклонением критической частоты до 17 %.

2. Зарегистрировано уменьшение концентрации электронов N_mF2 до 34 % в период отрицательного возмущения. В начале МБ уменьшение N_mF2 составило около 30 %, а уже 22 января началась фаза восстановления.

3. Изменение температуры электронов T_e и ионов T_i находилось в пределах погрешности. Максимальное увеличение T_e на 200 К обнаружено на высоте 750 км.

4. Установлено, что слабое отрицательное ионосферное возмущение не повлияло на поведение температуры нейтрального газа T_n .

5. Моделирование показало, что во время слабого отрицательного возмущения концентрации молекулярного азота $N(N_2)$ и кислорода $N(O_2)$ немного уменьшились (примерно на 13 % и 11 % соответственно), а параметр p увеличился приблизительно на 7 %.

6. Расчеты теплового режима ионосферы показали, что днем 21 января на высоте $h = 300$ км преобладают потери энергии электронов в кулоновских соударениях с ионами над потерями, связанными со столкновениями электронов с нейтралами. 22 января (после бури) вклад двух механизмов охлаждения электронов сравнялся. 21 января скорости нагрева электронного газа и теплообмена электронов с ионами и атомами кислорода уменьшились.

Список литературы: 1. Григоренко Е.И., Емельянов Л.Я., Пазюра С.А., Черногор Л.Ф. Ионосферные процессы в течение сильнейшей геокосмической бури 7 – 10 ноября 2004 г. 1. Результаты наблюдений // Космічна наука і технологія. – 2007. – Т. 13, № 4. – С. 62 – 76. 2. Григоренко Е.И., Пазюра С.А., Черногор Л.Ф. Ионосферные процессы в течение сильнейшей геокосмической бури 7 – 10 ноября 2004 г. 2. Результаты расчетов и обсуждений // Космічна наука і технологія. – 2007. – Т. 13, № 4. – С. 77 – 90. 3. Григоренко Е.И., Лысенко В.Н., Таран В.И., Черногор Л.Ф. Анализ и классификация ионосферных бурь в средних широтах Европы. 1 // Космічна наука і технологія. – 2007. – Т. 13, № 5. – С. 58 – 76. 4. Григоренко Е.И., Лысенко В.Н., Таран В.И., Черногор Л.Ф. Анализ и классификация ионосферных бурь в средних широтах Европы. 2 // Космічна наука і технологія. – 2007. – Т. 13, № 5. – С. 77 – 96. 5. Григоренко Е.И., Пазюра С.А., Таран В.И., Черногор Л.Ф. Сильнейшая геокосмическая буря 30 – 31 мая 2003 г.: результаты измерений и моделирования // Космічна наука і технологія. – 2005. – Т. 11, № 3/4. – С. 56 – 67. 6. Черногор Л.Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, № 1. – С. 59 – 106. 7. Черногор Л.Ф. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 2 // Нелинейный мир. – 2007. – Т. 5, № 4. – С. 198 – 231. 8. Chernogor L.F., Grigorenko Ye.I., Lazorenko S.V., Taran V.I. Wave Disturbances in the Ionosphere Accompanying the Solar Flare and the Strongest Magnetic Storm of September 25, 1998 // Geomagnetism and Aeronomy. – 2003. – V. 43, № 6. – P. 718 – 735. 9. Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issues // J. Geophys. Res. – 2002. – V. 107, № 12. – P. 1468 – 1483.

Поступила в редколлегию 01.07.2011

Н.А. ПИДРУЧНАЯ, студентка, НТУ “ХПИ”, Харьков

В.А. ПУЛЯЕВ, д-р техн. наук, проф., зам. директора, Институт ионосферы, Харьков

РАЗРАБОТКА СХЕМЫ КОНТРОЛЯ И РЕЗЕРВИРОВАНИЯ БЛОКОВ ПИТАНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ АППАРАТУРЫ

Розглянуто розв'язання задачі підвищення рівня безвідмовної роботи технічних блоків радіолокаційної станції (РЛС) за рахунок полегшеного резервування джерел живлення по відношенню до найбільш відповідальних ділянок електричних ланцюгів і за рахунок контролю рівнів напруги живлення. Запропоновано функціональну схему пристрою.

Рассмотрено решение задачи повышение уровня безотказной работы технических блоков радиолокационной станции (РЛС) за счет облегченного резервирования источников питания по отношению к наиболее ответственным участкам электрических цепей и за счет контроля уровней напряжения питания. Предложенная функциональная схема устройства.

The decision of task of increase of level of faultless work of technical blocks of the radio-location station by the control and hot backuping of power supplies in the most responsible areas of electric chains is considered. The functional chart of the developed device is offered.

Постановка задачі. Работоспособность радиоэлектронной аппаратуры во многом зависит от исправности источников питания. Особенностью же работы РЛС при мониторинге ионосферы является то, что наблюдаемые события не могут быть повторены по желанию исследователей, не допустимы даже случайные остановки и сбои в работе аппаратуры.

При исследовании ионосферы методом некогерентного рассеяния происходит обработка шумоподобных сигналов, по которым затруднительно в реальном времени, без статистического накопления данных, оценивать правильность расчетов и выносить решение о безаварийной работе питающих устройств в текущий момент, то и с этой точки зрения также есть необходимость в применении схемы, которая бы позволила контролировать уровни питающих напряжений, и в случае поломки производила бы переключения с аварийного источника питания на работоспособный.

Анализ літератури. В [1 – 3] описано функционирование РЛС, в том числе получение и обработка данных при исследовании ионосферы методом некогерентного рассеяния. При этом указано, что работоспособность технических блоков РЛС обеспечивается функционированием нескольких десятков источников питания. Информация при этом об обеспечении контроля питающих напряжений устройств РЛС в них отсутствует.

Цель статьи – разработка схемы контроля и резервирования блоков питания специализированной аппаратуры, функционирующей в составе радиолокационной станции.

Общие понятия о резервировании. Одним из важных показателей качества работы радиоэлектронных устройств является их надежность и своевременное диагностирование [4, 5]. Под надежностью понимают свойство устройства сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции, причем в заданных режимах и условиях применения. Надежность является комплексным свойством, которое может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохранность или определённые сочетания этих свойств. Работоспособность систем без резервирования требует высокой надежности эксплуатации всех элементов системы. Однако опыт работы показывает, что в случае использования сложных технических устройствах без резервирования никогда не удастся достичь высокой надежности даже тогда, когда используются элементы с высокими показателями безотказности.

Резервирование – эффективный метод повышения характеристик надёжности технических устройств или поддержания этой надежности на требуемом уровне. Это достигается введением аппаратной избыточности за счет включения запасных (резервных) элементов и связей. Резервирование в технологических системах классифицируют по ряду признаков, основные из которых – уровень резервирования, кратность резервирования, состояние резервных элементов до момента включения их в работу, возможность совместной работы основных и резервных элементов с общей нагрузкой, способ соединения основных и резервных элементов между собой.

Резервирование замещением. При резервировании замещением схема проектируется таким образом, чтобы при появлении отказа она смогла перестроиться и восстановить свою работу путем замещения отказавшего элемента резервным. При таком резервировании применяют переключатели, реле, контакторы и другие коммутаторы для отключения поврежденного элемента и включения резервного.

Использование облегченного или ненагруженного резерва в этом случае даёт возможность снизить расход энергии, потребляемой системой, и увеличить надежность аппаратуры, так как надёжность резервных блоков выше, чем основных. Следует учитывать, что перерыв на переключение с основного устройства на резервное допустим не во всех схемах.

Для повышения надёжности работы РЛС предложен вариант использования однократного облегченного резервирования источников питания замещением. При этом резервный источник питания включён в сеть, а его подключение к нагрузке в случае выхода из строя основного блока питания осуществляется с помощью реле. Таким образом, задержка в работе определяется только временем переключения контактов реле. Для случая, когда применяется только временное накопление результатов, при кратковременной остановке логических блоков потери в общем результате накопления данных скажутся в минимальной мере.

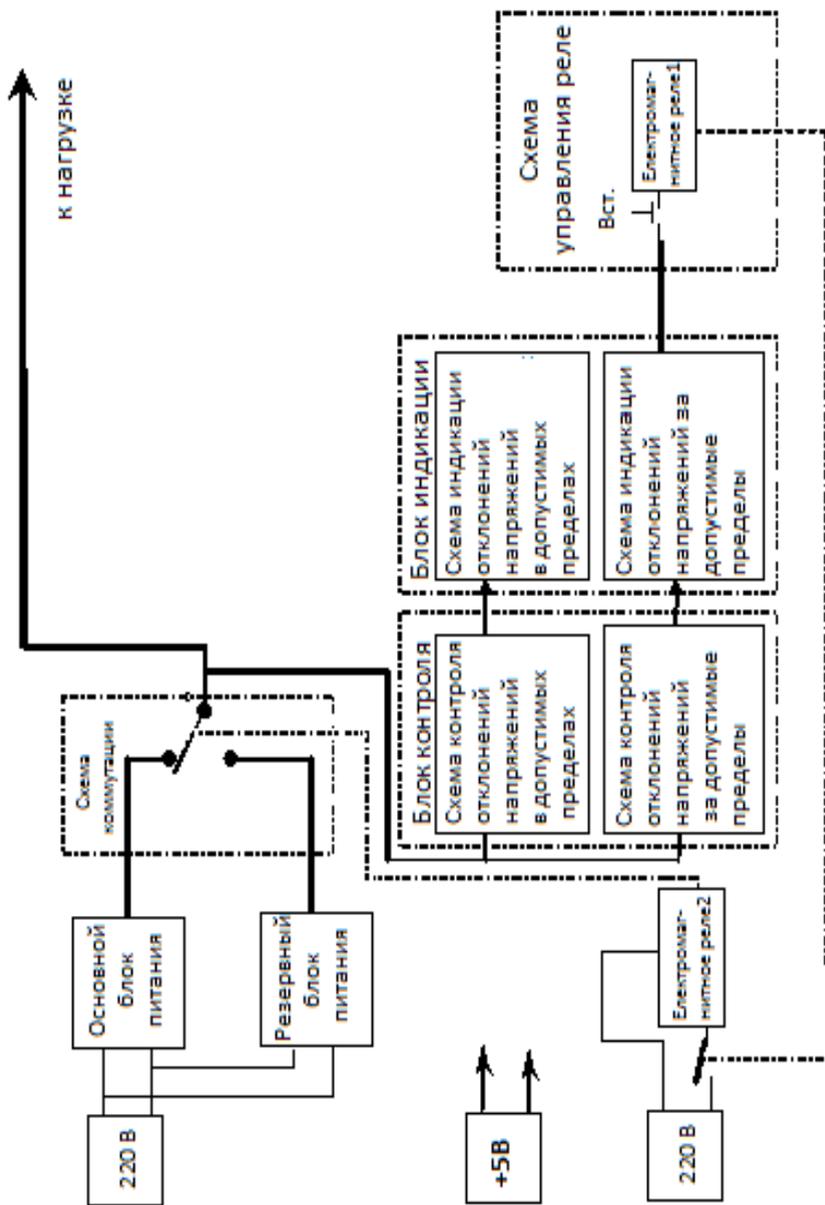


Рис. Функциональная схема контроля и резервирования блоков питания устройств РЛС

Описание работы функциональной схемы. На рис. представлена функциональная схема устройства контроля и резервирования блоков питания части устройств радиолокационной станции Института ионосферы (г. Харьков). В данном случае выбран вариант, когда при облегченном резервировании как основной, так и резервный блоки питания подключены к сети, но нагрузка и непосредственно сама схема контроля подключены только к основному блоку питания.

Первая схема блока контроля проверяет отклонение всех видов напряжений блоков питания в допустимых пределах ($\pm 5\%$). При превышении этих пределов срабатывает схема контроля с выдачей сигналов на блок звуковой и световой сигнализации.

Вторая схема блока контроля проверяет выход напряжений за допустимые пределы ($\pm 10\%$). В случае такой аварийной ситуации срабатывает схема сигнализации, но одновременно с этим с помощью электромагнитных реле схема управления реле переключает нагрузку на резервные блоки питания. О подключении резервного блока свидетельствует индикация на панели управления схемы коммутации.

В то время, пока подключены резервные блоки питания, обслуживающий персонал может производить замену основных блоков. После устранения неполадок происходит переключение нагрузки и схемы контроля на основной блок питания нажатием кнопки восстановления ”Вст.“.

Предложенная схема достаточно просто реализуется на базе цифровых интегральных и аналоговых элементов. В качестве элементов, с помощью которых осуществляется контроль достижения пороговых уровней напряжений, выбраны цифровые инверторы с резистивными делителями на входах, подстройкой которых производится юстировка величины порога переключения.

Выводы. Предложенное устройство позволит повысить надёжность функционирования радиолокационной станции за счёт облегченного резервирования источников питания по отношению к наиболее ответственным участкам электрических цепей и за счет контроля уровней питающих напряжений.

Список литературы: 1. *Таран В.И.* Измерительный комплекс некогерентного рассеяния Харьковского политехнического института // Радиотехника и электроника. – 1976. – Т. 21, № 1. – С. 3 – 12. 2. *Рогожкин Е.В., Пуляев В.А., Лысенко В.Н.* Зондирующие сигналы для исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн. – Х.: НТУ “ХПИ”, 2008. – 256 с. 3. *Рогожкин Е.В., Пуляев В.А.* Система обработки некогерентно рассеянного сигнала // Вестник ХПИ: Исследование ионосферы методом некогерентного рассеяния. – 1989. – № 276, вып. 7. – С. 24 – 30 4. *Шишонко Н.А., Репкин В.Ф., Барвинский Л.Л.* Основы теории надёжности и эксплуатации радиоэлектронной техники. – М.: Сов. радио, 1964. – 551 с. 5. *Лихтциндер Б.Я.* Внутрисхемное диагностирование узлов радиоэлектронной аппаратуры. – К.: Техника, 1989. – 168 с.

Поступила в редколлегию 23.06.2011

А.С. КОПТЯЕВА, магистр, НТУ “ХПИ”, Харьков

В.А. ПУЛЯЕВ, д-р техн. наук, проф., зам. директора, Институт ионосферы, Харьков

ВЫБОР РАЗРЯДНОСТИ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

Аналізуються похибки, які виникають при аналого-цифровому перетворенні шумоподібного сигналу та залежать від кількості розрядів АЦП на виході радіоприймального пристрою радіолокатора некогерентного розсіяння.

Анализируются погрешности, возникающие при аналого-цифровом преобразовании шумоподобного сигнала и зависящие от числа разрядов АЦП на выходе радиоприемного устройства радиолокатора некогерентного рассеяния.

Errors that arise up at analog-digital transformation of incoherent scatter signal are examined, dependency upon the amount of digits of ADC on the exit of receiver device of incoherent scatter radar.

Постановка задачи. Расчет корреляционных функций сигнала, некогерентно рассеянного ионосферой [1], предваряется операцией квантования в АЦП поступающего напряжения. Выбор количества уровней и частоты квантования сигналов при цифровой обработке осуществляется с учетом того, что распределение мощности сигнала вдоль развертки дальности (высоты) меняется в большом диапазоне. При этом шаг по уровню и период квантования задают сложность корреляционных устройств радиолокатора, а также его возможность обработки данных в реальном масштабе времени.

В настоящее время цифровая обработка производится с помощью быстродействующих вычислительных средств – препроцессоров, скорость преобразования данных в которых существенным образом замедляется при увеличении разрядности поступающих данных.

Цифровые препроцессоры – коррелометры – использовались ранее и сейчас используются в системе обработки радара некогерентного рассеяния (НР) Института ионосферы [2]. Их эксплуатация требует тщательного контроля ряда параметров, связанных с метрологическими характеристиками АЦП. Эти характеристики связаны с эффектами, возникающими при квантовании входного сигнала, в результате чего появляются шумы квантования. Также может оказаться несоответствующей амплитуда сигнала по отношению к величине разрядной сетки АЦП, произойти изменение со временем величины этой разрядной сетки.

Таким образом, **целью статьи** является рассмотрение ошибок при выборе количества уровней квантования сигнала некогерентного рассеяния, а именно такого количества уровней, когда при минимально возможных разрядностях данных (а значит – при небольших объемах корреляционной системы обработки) отсутствовали бы значительные статистические погрешности накопления результатов во времени.

Решение задачи. Так как при цифровой обработке [3, 4] к вопросам, возникающим при аналого-цифровом преобразовании сигнала на выходе радиоприёмного устройства является способ преобразования этого сигнала. Так как от решения этого вопроса существенно зависит структура устройств обработки в целом, рассмотрим особенность сигнала рассеяния, принимаемого на фоне шумов.

Соотношение сигнал/шум зависит от состояния ионосферы и помеховых составляющих, интенсивность которых определяется состоянием антенны и наличием внешних, не ионосферных источников. Распределение мощности сигнала по развертке дальности таково, что отношение $P_c/P_{ш}$ меняется в большом диапазоне, от 0,01 до 10 и больше. Это обстоятельство главным образом и определяет количество уровней при преобразовании сигнала. Обычно число уровней для сигнала, принимаемого в конце радиолокационной развертки дальности, выбирается количеством $n = 50$ и больше. При этом для сигнала рассеяния, поступающего с максимума ионизации, число уровней может достигать значений $n = 1000$. Частота квантования в это время определяется необходимой скоростью преобразования данных и связана с количеством ординат корреляционной функции (обычно их около 20), которые должны быть равномерно распределены на интервале задержек τ от 0 до 600 мкс. В результате период следования тактовой частоты, предназначенной для АЦП, выбирают длительностью около 30 мкс [5, 6].

На рис. 1а на примере моделирования процедуры преобразования гармонического сигнала показано изменение его формы при аналого-цифровом преобразовании с разным количеством уровней (2, 3, 9 и 17).

Можно видеть, что погрешности преобразования сигнала при таком варианте оцифровки из-за проявляющих свой характер нелинейных областей динамической характеристики АЦП тем больше, чем меньше используемых уровней квантования. И хотя при небольшом количестве уровней квантования интерпретация результатов измерений спектра или корреляционных функций сигнала НР усложняется, но с другой стороны, появляются возможности значительных аппаратурных упрощений структуры процессора.

Способ уменьшения количества уровней квантования целесообразен в следующем случае.

Так как сигнал НР представляет собой случайную функцию времени, то для его обработки используются статистические методы анализа. Исходя из этого, более правомерным является подход, когда рассматривается не

степень искажения формы сигнала, а приближение результатов его корреляционной обработки к некоторым теоретическим показателям.

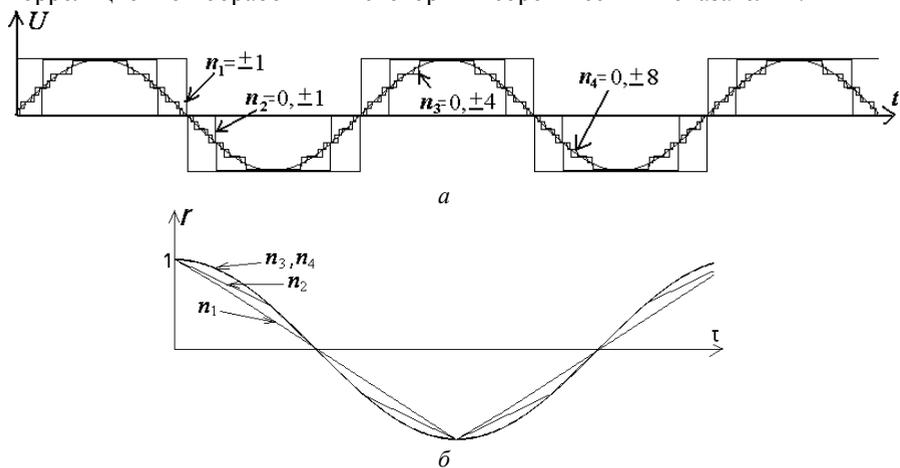


Рис. 1. Изменение формы гармонического сигнала при различных вариантах его цифрового преобразования (а) и ошибки последующей корреляционной обработки (б)

Естественным условием измерений оценок случайных стационарных процессов является использование значительного по продолжительности времени наблюдения процесса. Обработка сигнала – нахождение его корреляционных характеристик – происходит на протяжении некоторого времени, соответствующего длительности сеанса накопления корреляционных данных (вплоть до 15 мин).

На рис. 1б показаны результаты моделирования [7] такой корреляционной процедуры по отношению к гармоническому сигналу, преобразованному в разных АЦП, имеющих отличающееся количество уровней дискретизации. С целью минимизации погрешностей задано длительное время накопления информации. Как можно видеть, искажение формы сигнала за счет малого количества уровней не вызывает заметного искажения корреляционных функций даже в случае уменьшения значений уровня до $n_3 = 9$.

Чтобы проверить поведение корреляционной системы в случае обработки шумоподобного сигнала, на рис. 2 представлено искажение формы реального сигнала рассеяния (а) при разных вариантах преобразовании его в цифровой вид, а также корреляционные функции (б) для периода накопления, соответствующего времени работы коррелятора на протяжении сеанса длительностью 5 мин. Можно отметить, что и для такой формы входного сигнала и при имеющих место неточностях его цифрового преобразования при получении конечного результата в виде корреляционных функций погрешности достаточно малы.

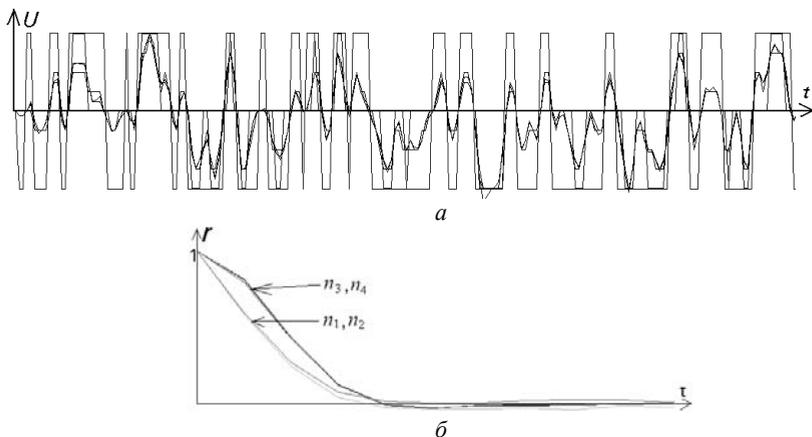


Рис. 2. Сигнал рассеяния на выходе радиоприемного устройства (а) и его корреляционные функции (б) при разном количестве уровней аналого-цифрового преобразования

Выводы. Статистический метод обработки дает возможность сокращения количества разрядов, используемых во время цифрового преобразования сигналов, в том числе при обработке шумоподобного сигнала рассеяния. Потеря точности последующего корреляционного представления этого сигнала при рациональном выборе числа уровней преобразования может быть незначительной, поэтому на выходе радиоприемного устройства вполне можно использовать АЦП с числом разрядов до $n = 100$. Как результат, резко сокращается общий объем информации, которая должна быть обработана в корреляционной системе, а значит – упрощается ее структура и появляется возможность расчета параметров ионосферной плазмы в реальном масштабе времени.

Список литературы: 1. Рогожкин Е.В., Пуляев В.А., Лысенко В.Н. Зондирующие сигналы для исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния. Монография. – Х.: НТУ “ХПИ”, 2008. – 256 с. 2. Рогожкин Е.В., Пуляев В.А. Система обработки некогерентно рассеянного сигнала // Вестник ХПИ: Исследование ионосферы методом некогерентного рассеяния. – 1989. – № 276, вып. 7. – С. 24 – 30. 3. Гитис Э.И., Пискунов Е.А. Аналого-цифровые преобразователи. Учебное пособие для ВУЗов. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 360 с. 4. Аналого-цифровое преобразование / <http://ru.wikipedia.org/wiki>. 5. Коптяева А.С., Пуляев В.А. Особенности цифрового преобразования ионосферных сигналов // Сб. тезисов конф. молодых ученых “Дистанционное радиозондирование ионосферы”. – 2010. – С. 18. 6. Коптяева А.С., Пуляев В.А. Учет функциональных особенностей аналого-цифрового преобразования сигнала некогерентного рассеяния // Вестник НТУ “ХПИ”: Радиофизика и ионосфера. – 2010. – № 48. – С. 106 – 109. 7. Коптяева А.С., Пуляев В.А. Выбор разрядности аналого-цифрового преобразования сигнала некогерентного рассеяния // Сб. тезисов конф. молодых ученых “Дистанционное радиозондирование ионосферы”. – 2011. – С. 24.

Поступила в редколлегию 01.07.11

Д.А. СЛИНЬКО, магистр, НТУ “ХПИ”, Харьков

В.А. ПУЛЯЕВ, д-р техн. наук, проф., зам. директора, Институт ионосферы, Харьков

УЧЕТ ИСКАЖЕНИЙ, СВЯЗАННЫХ С ЭФФЕКТОМ ИМПУЛЬСНОГО СГЛАЖИВАНИЯ СИГНАЛА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

У статті розглядаються спотворення, які пов'язано з ефектом згладжування даних при імпульсному зондуванні іоносфери. Це згладжування викликається тим, що по імпульсному об'єму при прийомі відбувається усереднення інформації, яке може приводити до неправильної інтерпретації результатів.

В статье рассматриваются искажения, связанные с эффектом сглаживания данных при импульсном зондировании ионосферы. Это сглаживание вызвано тем, что по импульсному объему при приеме происходит усреднение информации, которое может приводить к неправильной интерпретации результатов.

The distortions related to the effect of the impulsive smoothing of data are examined in a lecture. This smoothing is caused by that as a result of action of long sounding impulse at a reception takes place distortion of information that leads in misinterpretation of results.

Постановка задачі. В методі некогерентного розсіяння (НР) радіоволн [1] характеристики зондируючого сигналу визначаються заданим висотним діапазоном досліджень. Крім того, в отличие от радиолокації, где в конечном итоге обработка принятого отклика сводится к определению по отраженному сигналу координат и скорости облучаемого объекта, в данном методе к этому добавляется необходимость детального анализа спектров или корреляционных функций сигнала вдоль всей радиолокационной развертки дальности, причем для разных комбинаций излучаемых импульсов.

В связи с этим на практике используются несколько вариантов зондирующих сигналов [2] и ряд алгоритмов их многоканальной обработки [3, 4]. Среди них существует режим обработки, когда для исследования состояния плазмы вдоль протяженного высотного диапазона h применяется довольно протяженный радиоимпульс. В этом случае возникают искажения, особенно по отношению к области максимума электронной концентрации, которые напрямую трансформируются в погрешности измерений параметров ионосферы. Вот поэтому в методе НР актуальной задачей является получение максимально точного значения профиля мощности сигнала рассеяния не зависимо от длительности зондирующего импульса.

Целью данной статьи является анализ искажений, связанных с эффектом импульсного сглаживания профиля мощности сигнала рассеяния, а

также возможность его восстановления с учетом параметров сигнала, применяемого для зондирования ионосферы.

Решение задачи. Рассмотрим процесс преобразования формы профиля, полученного в виде высотного распределения мощности $P_c(h)$ сигнала НР, информация с которого необходима для расчёта профиля электронной концентрации $N_e(h)$.

На рис. 1а приведен пример модельного представления высотного профиля сечения рассеяния $P_{Ne}(h)$, $h = \overline{h_0, h_j}$, который соответствует некоторому варианту распределения концентрации электронов вдоль направления зондирования. На его фоне изображен профиль мощности $P_c(h)$, смоделированный как результат получения информации о $P_{Ne}(h)$ в канале коррелятора, осуществляющего вычисление мощности принимаемого сигнала. В процессе моделирования подразумевалось, что рассеяние $P_c(h)$ образовывается как результат импульсного облучения ионосферы зондирующим сигналом длительностью $T_{\text{и}}$.

На примере приведенного моделирования можем наблюдать, как в результате воздействия относительно длинного (по отношению к толщине ионосферного слоя F2) зондирующего импульса возникает эффект сглаживания данных, приводящий к искажению полученных результатов. А значит – с района максимума слоя F2 будут получены значения мощности P_c , на 10 – 20 % меньшие от истинной величины P_{Ne} . Кроме того, из-за подобного эффекта почти неразличимы сигнал P_S от спорадического слоя в начале развертки и сигнал $P_{\text{п}}$ импульсной помехи.

Чтобы иметь возможность по преобразованию $P_c(h)$ в оценку искомого профиля $P_{Ne}^*(h)$, максимально близкую к $P_{Ne}(h)$, рассмотрим процедуру, во время которой соблюдаются следующие условия.

Период дискретизации сигнала в АЦП устанавливается таким образом, что по отношению к длительности зондирующего импульса строго придерживалась кратность величины τ_q , т.е. $T_{\text{и}} = n\tau_q$ (n – целое). При этом действительны некоторые математические зависимости, связывающие между собой информацию о $P_c(h)$ и $P_{Ne}^*(h)$ [5]:

$$P_{Ne}^*(h_j) = 0,$$

$$P_{Ne}^*(h_{j-1}) = 0,$$

$$P_{Ne}^*(h_{j-2}) = 0,$$

$$P_{Ne}^*(h_{j-3}) = 0,$$

$$P_{Ne}^*(h_{j-4}) = 7 \cdot P_c(h_{j-1}),$$

$$P_{Ne}^*(h_{j-5}) = 7 \cdot P_c(h_{j-2}) - P_{Ne}^*(h_{j-4}),$$

$$P_{Ne}^*(h_{j-6}) = 7 \cdot P_c(h_{j-3}) - P_{Ne}^*(h_{j-5}) - P_{Ne}^*(h_{j-4}),$$

$$P^*_{Ne}(h_{j-7}) = 7 \cdot P_c(h_{j-4}) - P^*_{Ne}(h_{j-6}) - P^*_{Ne}(h_{j-5}) - P^*_{Ne}(h_{j-4}),$$

$$P^*_{Ne}(h_0) = 7 \cdot P_c(h_3) - P^*_{Ne}(h_1) - P^*_{Ne}(h_2) - P^*_{Ne}(h_3) - P^*_{Ne}(h_4) - P^*_{Ne}(h_5) - P^*_{Ne}(h_6).$$

Данные выражение приведены для случая $n = 7$ (т.е. для условия, когда длительность зондирующего импульса охватывает высотный интервал, равный семи отсчетам на выходе АЦП) и рассматриваемого диапазона высот $[h_0, h_1, \dots, h_j]$.

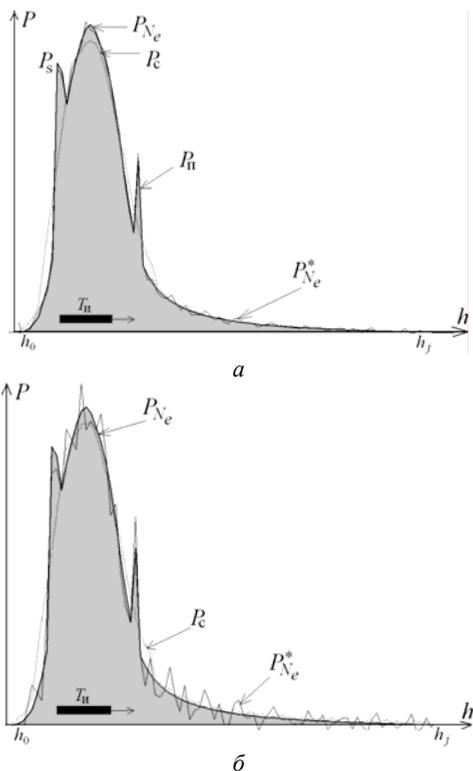


Рис. Моделирование процесса получения профиля мощности сигнала НР и процесса его преобразования в профиль сечения рассеяния для случая отношений сигнал/шум $q = 20$ (а) и $q = 1$ (б)

Расчет начинается с решения первых 4-х уравнений.

В качестве стартового всегда выбирается верхний участок h_j , на котором по мере уменьшения вдоль высотной шкалы значений принятой мощности $P_c(h_j)$ впервые будет зафиксировано ее нулевое значение. Этот случай дает нам основание все 7 охватываемых импульсом слагаемых из профиля $P^*_{Ne}(h)$,

которые в том числе относятся к участкам h_j , h_{j-1} , h_{j-2} и h_{j-3} , также считать нулевыми. Начиная же с участка h_{j-4} и ниже последующими уравнениями можно получить уже ненулевые значения $P_{Ne}^*(h)$, постепенно перемещаясь к первому участку на высоте h_0 .

Такая процедура расчёта исходных данных ”с конца“ позволяет, используя несложные математические преобразования, приблизиться к высотному разрешению, которое бы обеспечил укороченный в n раз зондирующий импульс. В результате действия этой процедуры происходит полное восстановление исходного результата с получением искомого профиля $P_{Ne}^*(h)$, а значит – есть возможность контрастного выделения структуры спорадических ионосферных слоёв, импульсной помехи, подробной детализации отражений от летательных объектов и т.д.

Данная процедура работает тем точнее, чем меньшим статистическим разбросом характеризуется полученный во время эксперимента высотный профиль мощности $P_c(h)$. Так, на рис. 1а показан случай восстановления информации о профиле мощности для случая, когда отношение сигнал/шум q подразумевалось достаточно большим ($q = 20$). Иной случай изображен на рис. 1б, где профиль принятой мощности представляет собой смесь полезного сигнала и некоторого существенного уровня шумовой составляющей, вызвавшей уменьшение отношения сигнал/шум до $q = 1$. В этом случае из-за появления флуктуаций на профиле мощности процесс восстановления исходных данных может привести к значительным погрешностям вычисления $P_{Ne}^*(h)$.

Выводы. Предложенная процедура восстановления профиля сечения рассеяния по принятой информации о мощности сигнала НР, когда известны и могут быть учтены параметры зондирующего импульса, даёт принципиальную возможность получения истинных значений этого профиля. Однако следует учесть, что величина погрешностей такого преобразования тем меньше, чем незначительней на исходных данных искажения, влияние которых определяется отношением сигнал/шум.

Список литературы: 1. *Рогожкин Е.В.* Измерение параметров ионосферной плазмы по корреляционной функции сигнала некогерентного рассеяния // *Ионосферные исследования*. – М.: Высш. шк. – № 27. – 1979. – С. 46 – 59. 2. *Рогожкин Е.В., Пуляев В.А., Лысенко В.Н.* Зондирующие сигналы для исследования ионосферы методом НР. Монография. – Х.: НТУ ”ХПИ”, 2008. – 256 с. 3. *Слинько Д.А., Пуляев В.А.* Вопросы идентичности многоканального преобразования данных радаров НР // Сб. тезисов конф. молодых ученых ”Дистанционное радиозондирование ионосферы”. – 2010. – С. 21. 4. *Слинько Д.А., Пуляев В.А.* Вопросы идентичности преобразования информации в многоканальном блоке АЦП радара НР // *Вестник НТУ ”ХПИ”*: Радиофизика и ионосфера. – 2010. – № 48. – С. 102 – 105. 5. *Слинько Д.А., Пуляев В.А.* Учет искажений, связанных с эффектом импульсного сглаживания сигнала некогерентного рассеяния // Сб. тезисов конф. молодых ученых ”Дистанционное радиозондирование ионосферы”. – 2011. – С. 27.

Поступила в редколлегию 01.07.2011

Д.В. КОТОВ, н.с., Институт ионосферы, Харьков

ОЦЕНИВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ, СВЯЗАННЫХ С НЕУЧЕТОМ КОНЕЧНОСТИ ВЕЛИЧИНЫ ДЕБАЕВСКОГО РАДИУСА ЭКРАНИРОВАНИЯ

За результатами моделювання розв'язання прямої та зворотної задач радіофізики оцінено методичні похибки визначення параметрів іоносферної плазми, які пов'язані з неврахуванням кінцевої величини дебаєвського радіусу екранування. Зроблено висновок про те, що у загальному випадку найбільші систематичні похибки виникають при визначенні концентрації електронів. Менш значні похибки притаманні оцінкам температури електронів. Додаткові похибки визначення температури іонів та відносного вмісту іонів є незначними.

По результатам моделирования решения прямой и обратной задач радиофизики оценены методические погрешности определения параметров ионосферной плазмы, связанные с неучетом конечности дебаевского радиуса экранирования. Сделано вывод о том, что в общем случае максимальные систематические погрешности возникают при определении концентрации электронов. Оценки температуры электронов характеризуются меньшими значениями погрешностей. Дополнительные погрешности определения температуры ионов и относительного содержания ионов незначительны.

Methodological error of the ionospheric plasma parameters determining associated with neglecting finite size of Debye length are estimated as a result of modeling of direct and inverse radiophysical problems. It was concluded that in general the largest systematic errors arise in the electron density determining. Less significant errors inherent in estimates of electron temperature. Additional error of determining the ion temperature and ion fractions is negligible.

Введение. Известно [1], что форма спектра некогерентно рассеянного (НР) сигнала зависит не только от значений основных параметров плазмы (концентрации электронов N , температуры ионов T_i и электронов T_e , относительного содержания ионов различных сортов и т. д.), но и от соотношения значений дебаевского радиуса экранирования и длины используемой радиоволны. Дебаевский радиус увеличивается с уменьшением N и ростом T_e [1], что приводит к искажению оценок параметров плазмы, определяемых по измеренному спектру НР сигнала или по его автокорреляционной функции (АКФ). Общий характер таких искажений для радара НР Института ионосферы был исследован в [2] для отдельно взятого случая, когда были заданы высотные распределения параметров плазмы, соответствующие некоторым гелиогеофизическим условиям. Дальнейшее развитие методик анализа экспериментальных данных, обусловившее значительное снижение вклада других составляющих в общее смещение получаемых оценок параметров плазмы, сделало целесообразным проведение более детального анализа характера и величин погрешностей, возникающих вследствие недооценки величины дебаевского радиуса.

Цель статьи – оценивание погрешностей определения параметров ионосферной плазмы, дополнительно возникающих вследствие неучёта конечности величины дебаевского радиуса, и построение зависимостей таких погрешностей от величины концентрации электронов при существенно различных состояниях ионосферы.

Моделирование. Значения параметров плазмы, для которых проводилось решение прямой (с учётом конечности дебаевского радиуса) и обратной (полагая, что длина волны значительно превосходит дебаевский радиус, как это принимается при анализе экспериментальных данных) радиофизических задач, выбирались с учётом их граничных величин, определённых по результатам исследований и предоставляемых моделями ионосферы.

Моделирование АКФ проводилось по формуле, которая используется в стандартном пакете обработки данных GUISDAP Европейской ассоциации по некогерентному рассеянию EISCAT [3]. Данная формула, в отличие от использовавшейся в работе [2], является более общей и даёт более точные результаты при наличии в плазме лёгких ионов (гелия и водорода), что характерно для рассматриваемой области – внешней ионосферы.

В результате моделирования были получены зависимости абсолютных погрешностей определения температур ионов ΔT_i и электронов ΔT_e , относительного содержания ионов гелия $N(\text{He}^+)/N$ и водорода $N(\text{H}^+)/N$ от величины концентрации электронов в диапазоне от $5 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$ до $2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$.

На рисунке представлены полученные зависимости погрешностей. Значения параметров T_i , T_e , $N(\text{He}^+)/N$ и $N(\text{H}^+)/N$, для которых проводились расчёты, соответствуют характерным условиям для ночной и дневной внешней ионосферы.

Дополнительно была получена формула, позволившая рассчитать зависимости отношения оценки N^* к истинному значению N :

$$\frac{N^*}{N} = \frac{\left(1 + T_e^*/T_i^*\right) \int_0^{\infty} W(\omega, N) d\omega}{\left(1 + T_e/T_i\right) \int_0^{\infty} W(\omega, N_0) d\omega}.$$

Здесь T_i^* , T_e^* – оценки температур ионов и электронов, $W(\omega, N)$ – энергетический спектр НР сигнала, N_0 – значение концентрации электронов, при котором дебаевский радиус может считаться пренебрежимо малым по сравнению с длиной волны.

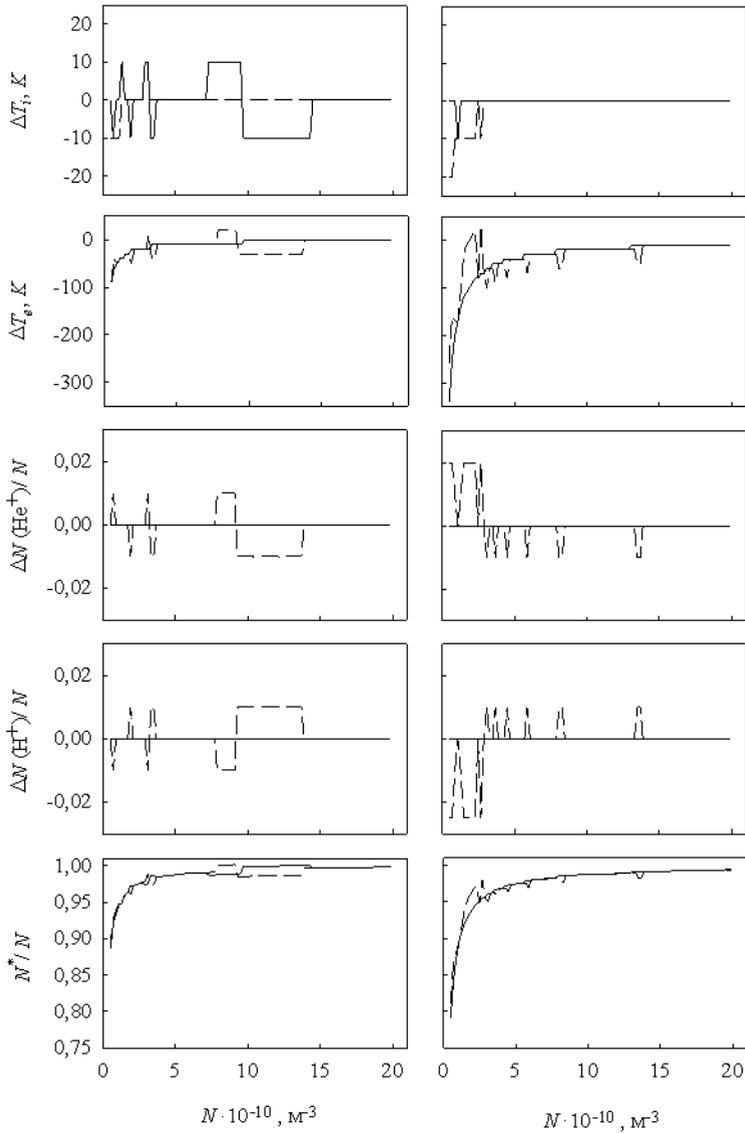


Рис. Зависимости погрешностей основных параметров ионосферной плазмы от значений концентрации электронов N при величине $N(\text{He}^+)/N = 0.1$ для значений температур $T_i = 1500 \text{ K}$, $T_e = 1500 \text{ K}$ (графики слева) и $T_i = 1500 \text{ K}$, $T_e = 3000 \text{ K}$ (графики справа). Сплошные кривые соответствуют значениям $N(\text{H}^+)/N = 0.2$, пунктир – $N(\text{H}^+)/N = 0.8$.

Обсуждение результатов. Детальное рассмотрение результатов моделирования позволяет сделать следующие основные выводы.

Для всех рассмотренных условий погрешности определения температуры ионов, дополнительно возникающие из-за недооценки величины дебаевского радиуса, пренебрежимо малы (не более 1 %). Эти результаты хорошо согласуются с данными, полученными в работе [2].

Дополнительные погрешности оценок температуры электронов также качественно и количественно подобны полученным в работе [2]. Хорошо видно, что величина ΔT_e увеличивается с ростом T_e . Таким образом, относительная погрешность определения T_e примерно постоянна, практически не зависит от ионного состава и достигает 10 % при величине $N = 5 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$.

Погрешности определения относительных содержаний ионов не превышают 2.5 % и в несколько раз меньше оценок, полученных в работе [2], хотя значения концентрации электронов, используемые при расчётах в [2], везде превышают величину $5 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$. Можно предположить, что расхождения в оценках погрешностей объясняются тем, что мы использовали более корректную формулу [3].

Таким образом, оценки параметров $N(\text{He}^+)/N$ и $N(\text{H}^+)/N$, получаемые в предположении пренебрежимой малости дебаевского радиуса, в большей части диапазона возможных значений N и T_e можно считать несмещёнными.

Иначе обстоит дело с абсолютными концентрациями ионов, которые определяются как произведение относительного содержания и концентрации электронов. Очевидно, что оценки $N(\text{He}^+)$ и $N(\text{H}^+)$, как и соответствующие оценки N , занижены до 20 % по сравнению с истинными значениями.

Выводы. Полученные по результатам моделирования зависимости погрешностей оценок основных параметров ионосферной плазмы позволяют оценить степень смещённости этих оценок в условиях текущих измерений. Априорная информация о качественных и количественных характеристиках смещений позволит принять решение о целесообразности внесения соответствующих поправок в полученные оценки, либо же о необходимости повторного расчёта параметров с учётом зависимости нормированной АКФ НР сигнала от величины концентрации электронов.

Список литературы: 1. Эванс Дж.В. Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн // ТИИЭР. – 1969. – Т. 57, № 4. – С. 139 – 175. 2. Гринченко С.В. Определение ионосферных параметров по автокорреляционной функции некогерентно рассеянного сигнала при учёте конечности дебаевского радиуса // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – 2000. – Вып. 103. – С. 20 – 23. 3. Dougherty J.P., Farley D.T. A theory of incoherent scatter of radio waves by a plasma // Journal of Geophysical Research. – 1963. – V. 66, № 19. – P. 5473 – 5486.

Поступила в редакцию 29.06.2011

М.Н. СЮСЮК, магистр, НТУ “ХПИ”, Харьков
Д.В. КОТОВ, н.с., Институт ионосферы, Харьков
А.В. БОГОМАЗ, м.н.с., Институт ионосферы, Харьков

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУМЕРНОЙ ФУНКЦИИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ДЛЯ СЛУЧАЯ РАБОТЫ РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

Двомірна функція невизначеності дозволяє врахувати деякі суттєві особливості параметрів досліджуваного середовища та апаратні характеристики радару. Врахування цієї функції необхідно для отримання достовірних значень параметрів іоносферної плазми, що визначаються за допомогою методу некогерентного розсіяння. Зроблено висновок про те, що використання двомірної функції невизначеності дозволить підвищити точність аналізу експериментальних даних та істотно поліпшити розрізнявальну спроможність за висотою.

Двумерная функция неопределенности позволяет учитывать некоторые существенные особенности параметров исследуемой среды и аппаратные характеристики радару. Учет этой функции необходим для получения достоверных значений параметров ионосферной плазмы, определяемых с помощью метода некогерентного рассеяния. Сделан вывод о том, что использование двумерной функции неопределенности позволит повысить точность анализа экспериментальных данных и существенно улучшить разрешение по высоте.

A two-dimensional function of uncertainty takes into account some the essential features of the medium and the instrumental characteristics of the radar. Accounting for this function is necessary to obtain reliable values of the parameters of the ionospheric plasma, determined by the method of incoherent scattering. It is concluded that the use of two-dimensional ambiguity function will increase the accuracy of the analysis of experimental data and improve the resolution of the height.

Введение. Известно, что при исследованиях ионосферы методом некогерентного рассеяния (НР) параметры ионосферной плазмы получают путём решения обратной радиофизической задачи [1]. Поскольку аналитического решения такой задачи не существует, она заменяется многократным решением прямой радиофизической задачи при различных заданных значениях параметров плазмы и сравнением экспериментальной АКФ НР сигнала с теоретическими АКФ. В качестве измеренных параметров плазмы принимают значения, соответствующие теоретической АКФ, наиболее близкой к экспериментальной [1].

При использовании современного подхода к анализу данных метода НР, такого как “full-profile” алгоритм [2 – 4], открываются новые возможности для более точного определения параметров ионосферной плазмы. Это связано с тем, что метод подразумевает, что прямая радиофизическая задача решается не для точечных значений параметров, а для целых высотных профилей параметров.

В процессе обработки данных с использованием “full-profile” алгоритма принципиально необходимо использование так называемой

двумерной функции неопределенности (ДФН), которая показывает относительный вклад различных пространственных областей плазмы и значений АКФ при разных задержках [2].

Цель статьи – представить результаты моделирования двумерной функции неопределенности для действующих режимов работы радара НР Института ионосферы.

Алгоритмы моделирования. Для обеспечения практической возможности использования данного метода было проведено моделирование ДФН. При этом учитывались реальные характеристики радара НР Института ионосферы, а также все существенные аппаратурные и методические преобразования, которые имеют место в реальных условиях проведения эксперимента.

Для моделирования использовалась следующая формула [2]:

$$W_{t,t'}(\tau, r) = \int_{-\infty}^{\infty} dv W_t^A(v, r) \overline{W_{t'}^A(v - \tau, r)},$$

где

$$W_t^A(\tau, r) = h(t - \tau) P \left(\tau - \frac{2r}{c} \right),$$

h – импульсная характеристика приёмного устройства,

P – огибающая зондирующего импульса,

τ – время задержки,

r – расстояния до области рассеяния.

Были получены ДФН для двух режимов работы радара НР: с использованием длинного и короткого импульса зондирования.

Рассмотрим режим с использованием длинного импульса. В этом случае используется ФНЧ с полосой пропускания 19 кГц и длительностью огибающей зондирующего импульса 663 мкс. На рис. 1 представлены результаты моделирования ДФН для мощности сигнала НР. Можно видеть, что в итоговое значение мощности P вносят вклад также и значения мощности и АКФ, соответствующие другим высотам и задержкам. Относительный вклад таких значений зависит от вида импульсной характеристики ФНЧ, огибающей импульса и высотного распределения параметров ионосферной плазмы.

На рис. 2, изображены ДФН для ненулевых задержек τ , а именно 0, 200, 400 и 600 мкс. Видно, что с увеличением задержки уменьшается область высот, которая участвует в образовании соответствующего значения АКФ.

Рассмотрим режим с использованием короткого импульса. В таком режиме используется ФНЧ с полосой пропускания 11 кГц и длительностью огибающей зондирующего импульса 130 мкс.

Так как данный режим используется только для измерения профиля мощности, приведем здесь только графики ДФН для такой мощности (рис. 3).

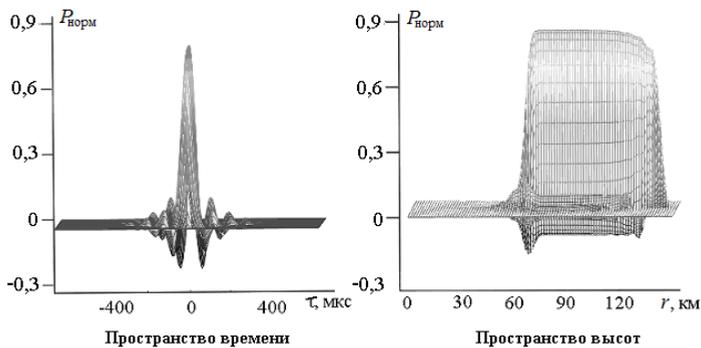


Рис. 1. Результаты моделирования ДФН во всех сечениях прослоек для режима с использованием длинного импульса

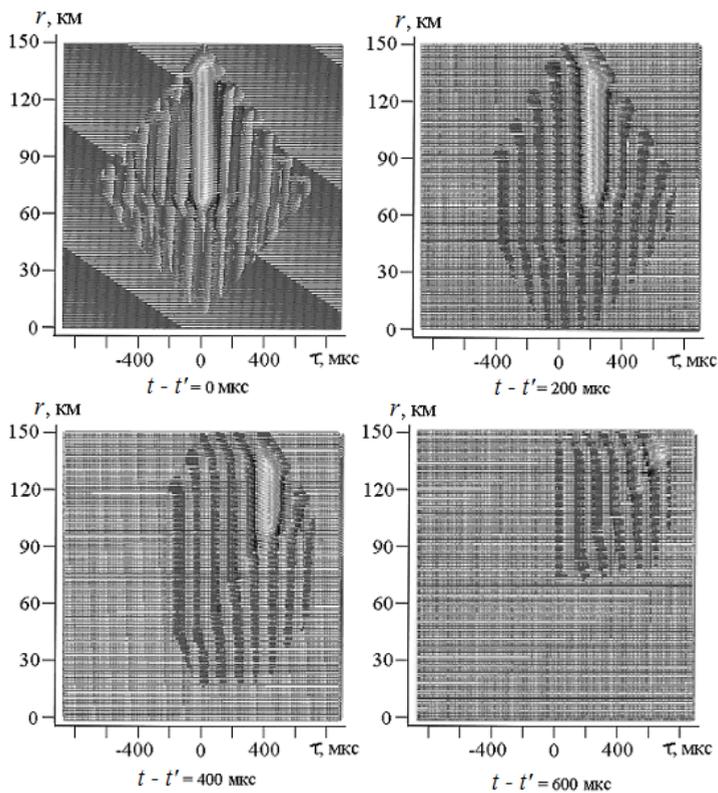


Рис. 2. Изображение ДФН для разных видов задержки

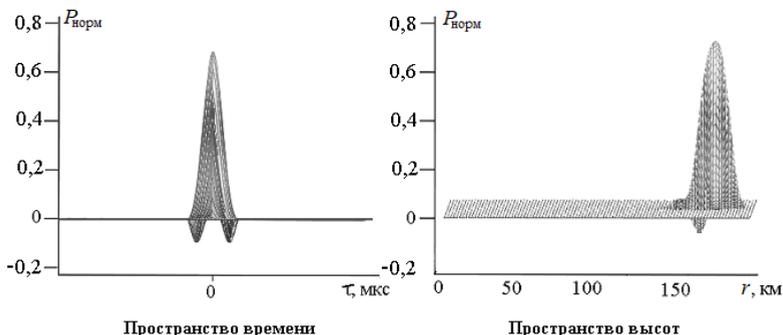


Рис. 3. Результаты моделирования ДФН во всех сечениях прослоек для режима с использованием короткого импульса

Обсуждение результатов. Проведенное моделирование и анализ полученных результатов позволяют сделать следующие основные выводы.

1. Получены ДФН, которые готовы к использованию в процессе обработки данных, полученных с помощью радара НР Института ионосферы.

2. Установлено, что в значение АКФ, измеряемой для заданной высоты и задержки $t' - t$, вносят вклад и значения АКФ, соответствующие другим высотам и задержкам. Относительный вклад таких значений зависит от вида импульсной характеристики ФНЧ приемного устройства радара НР, формы и длительности огибающей зондирующего импульса и высотного распределения параметров ионосферной плазмы.

Учёт ДФН позволит существенно повысить точность анализа экспериментальных данных и, используя «full-profile» алгоритм, улучшить разрешение по высоте.

Список литературы: 1. Пуляев В.А., Дзюбанов Д.А., Домнин И.Ф. Определение параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн: монография. – Х.: Підручник: НТУ «ХПІ», 2010. – 240 с. 2. Holt J.M., Rhoda D.A. Optimal analysis of incoherent scatter radar data // Radio Science. – 1992. – P. 435 – 447. 3. Lehtinen M.S., Huuskonen A., Pirttila J. First experiences of full-profile analysis with GUIDAP // Ann. Geophysicae. – 1996. – V. 14. – P. 1487 – 1495. 4. Hysell D.L., Chau J.L., Huba J.D. Topside measurements at Jicamarca during solar minimum // Ann. Geophysicae. – 2009. – V. 27. – P. 427 – 439.

Поступила в редакцию 29.06.2011

А.А. КОЛЧЕВ, канд. физ.-мат. наук, доц., МарГУ, Йошкар-Ола, Россия
А.О. ЩИРЫЙ, канд. техн. наук, МарГУ, Йошкар-Ола, Россия

МОДЕЛЬ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КВ РАДИОЛИНИЙ В ГЕОМЕТРООПТИЧЕСКОМ ПРИБЛИЖЕНИИ ПО ДАННЫМ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

В работе разработана и реализована модель для вычисления амплитудно-частотных характеристик коротковолновых радиолоний по результатам зондирования широкополосным сигналом с линейной частотной модуляцией. Модель предполагает приближение геометрической оптики. Адекватность модели подтверждена экспериментальными исследованиями.

We developed and implemented a model to calculate the amplitude-frequency characteristics of the shortwave radio on the results of probing a broadband signal with linear frequency modulation. The model assumes the approximation of geometric optics. The adequacy of the model is confirmed by experimental studies.

Постановка задачи. Коротковолновым (КВ) ионосферным радиолониям протяженностью сотни-тысячи километров присуща многолучевость распространения радиосигнала. Использование узкополосных каналов в традиционных системах связи не позволяет разделять по задержке принимаемые парциальные моды, соответствующие разным лучам, и они интерферируют между собой, в результате амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) линии связи становится изрезанной. Ей присущи подъемы, соответствующие полосам конструктивной интерференции, и провалы, обусловленные деструктивной интерференцией. Для устойчивой работы радиотехнической системы её радиоканал должен быть вложен в полосу конструктивной интерференции. Таким образом, возникает проблема определения АЧХ линии связи с высоким частотным разрешением, а также исследования характеристик АЧХ радиолонии: глубин провалов и частотных полос конструктивной интерференции.

Использование широкополосных сигналов (в широкополосных каналах) позволяет разделить принимаемые моды и, кроме того, предполагает оптимальную обработку сигнала в приемнике. При этом оптимизация осуществляется по отношению к излучаемому сигналу. Однако при распространении в ионосферном радиоканале, амплитуды и фазы спектральных составляющих парциальных мод сигнала искажаются, в результате чего оптимальность приема утрачивается. Для компенсации искажений широкополосных радиосигналов также должна быть решена задача определения АЧХ радиолонии.

Существующие подходы к решению задачи измерения АЧХ радиолинии и её характеристик можно разделить на две группы:

- 1) непосредственное измерение;
- 2) использование радиофизических моделей.

Так форму амплитудно-частотной характеристики различных радиолиний традиционно определяют путем непосредственного измерения коэффициентов передачи в требуемом диапазоне частот (например [1 – 3]).

Анализ литературы. Известны результаты определения статистических характеристик АЧХ с помощью гармонического сигнала, когда экспериментальные законы распределения аппроксимировались известными (нормальный, Релея, Райса, Накагами, см. например [4 – 6]).

Для непосредственного измерения коэффициента передачи обычно в качестве зондирующего используется гармонический сигнал. Примером устройств этого класса может служить “Невод-200” [2, 3].

При таком измерении коэффициентов передачи радиолинии первая проблема заключается в наличии помех: в ДКМ диапазоне станционными помехами (которые невозможно отличить от гармонического пробного сигнала) может быть “забит” практически весь частотный диапазон прохождения радиоволн. Для исключения влияния постоянно работающих мощных радиостанций, предлагаемое в [2, 3] усреднение по времени не поможет, а значит в каналах, занятых мощными радиостанциями, коэффициент передачи измерить нельзя. Таким образом, этот подход можно использовать только для диагностики радиолинии на фиксированных частотах, при условии, что эти частоты с высокой вероятностью свободны от станционных помех (т.к. эти частоты выделенные). Однако, существуют непреднамеренные и индустриальные помехи, которыми могут быть забиты любые каналы. Поэтому (и это вторая проблема), невозможно получить панораму АЧХ радиолинии.

По этим причинам для исследования свойств АЧХ многолучевой КВ радиолинии используют радиофизические модели. Однако, чаще всего целью таких исследований ставится не моделирование “тонких” эффектов многолучевого распространения, а получение АЧХ с низким разрешением – порядка 1 МГц [7 – 9]. К этой же группе моделирования “нетонкой” структуры АЧХ можно отнести и методы моделирования напряженности поля в точке приема (например, [10]).

В отечественной литературе задача оценки тонкой структуры АЧХ многолучевой КВ радиолинии была поставлена в работе [11], там же предложены некоторые возможные подходы к решению. Однако, эти рекомендации построены на основе предположений и допущений, недостаточно подкрепленных экспериментальными данными. О неверности этих допущений можно судить, сравнивая полученные авторами работ результаты с данными зондирования ионосферы.

Таким образом, даже в тех случаях, когда ставилась [11] задача исследования тонкой структуры АЧХ многолучевой КВ радиолинии, она решалась на основе упрощенных, и даже неверных положений. Поэтому, АЧХ многолучевой КВ радиолинии должна вычисляться по таким характеристикам радиолинии, которые можно непосредственно измерить.

В работах [12, 13] была решена задача определения комплексных передаточных функций парциальных мод распространения КВ радиосигнала на основе данных наклонного зондирования КВ радиолиний линейно-частотно модулированным (ЛЧМ) сигналом.

Выбранный в качестве зондирующего ЛЧМ сигнал, благодаря своим свойствам [14], и в отличие от гармонического сигнала, может быть выделен из сосредоточенных помех.

Цель статьи – построение модели для вычисления АЧХ КВ радиолинии.

Математическая модель. Применение ЛЧМ сигнала в качестве зондирующего, позволяет разделить при приеме парциальные моды распространения КВ радиосигнала и измерить их характеристики. Для оценки с высоким частотным разрешением АЧХ многолучевой КВ радиолинии с помощью ионозонда наклонного зондирования ионосферы (НЗИ), использующего сигналы с ЛЧМ, была построена математическая модель, суть которой заключается в следующем.

В приемнике ЛЧМ-ионозонда происходит сжатие принятого сигнала в частотной области, состоящее в его умножении на сигнал гетеродина, комплексно-сопряженный излучаемому сигналу и дальнейшему спектральному анализу сигнала разностной частоты, в результате чего дискретные моды распространения сигнала разделяются по задержке. Результатом работы ионозонда является ионограмма, характеризующая зависимость амплитуды сигнала от частоты f и времени группового запаздывания $\tau(f)$.

В приближении геометрической оптики передаточную функцию радиоканала с дискретной многолучевостью можно представить в виде суммы передаточных функций m отдельных лучей $H_j(f)$:

$$H(f, t) = \sum_{j=1}^m H_j(f, t). \quad (1)$$

Передаточную функцию отдельного луча с амплитудой $|H_{j, f}|$ и фазой $\varphi_j(f)$ можно записать в виде:

$$H_j(f, t) = |H_j(f)| e^{-i\varphi_j(f, t)}. \quad (2)$$

Известно, что при полосе канала $\Delta f \ll f_p$ (f_p – рабочая частота) и для интервалов времени Δt порядка длительности посылки амплитуду детерминированной части можно считать постоянной и отнести к рабочей частоте канала, а фазу можно разложить в ряд Тейлора:

$$\varphi_j(f, t) \approx \varphi_j(f_p, t_0) + 2\pi\tau_j(f_p)\Delta f + 2\pi F_d \Delta t. \quad (3)$$

Также в выражении фазы учитывается вклад доплеровского смещения частоты F_d [13]. Оно влияет не на форму АЧХ, а на ее дрейф по оси частот.

Следует отметить, что приведенные выражения не учитывают рассеяние луча при отражении, вызывающее диффузность трека моды на ионограмме.

Для получения аналитического выражения $\tau_j(f)$ на ионограмме наклонного ЛЧМ-зондирования радиолинии выделяются треки парциальных мод КВ радиосигнала (рис. 1). Ионозонд дает дискретные числовые значения $\tau_j(f)$ и $|H_f, f|$ через 20 – 100 кГц (рис. 2а, б). Для реализации предлагаемого подхода необходимы их непрерывные модели. Для построения непрерывной модели $\tau_j(f)$ производится аппроксимация полиномами n -ой степени ($n = 1..4$ и зависит от протяженности радиолинии и порядка моды). Амплитуда $|H_f, f|$ для удаления одиночных выбросов подвергается медианной фильтрации (на рис. 2б показан пример АЧХ моды до медианной фильтрации тонкая линия, после – толстая). Апертура медианного фильтра $N = 6$ (для сглаживания одно- и двухточечных выбросов). Далее для построения непрерывной модели $|H_f, f|$ производится кусочно-линейная аппроксимация.

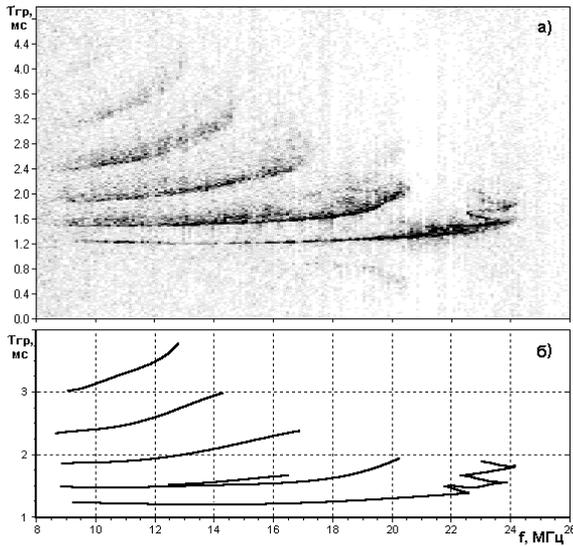


Рис. 1. Ионограмма (а) и выделенные треки парциальных мод (б)

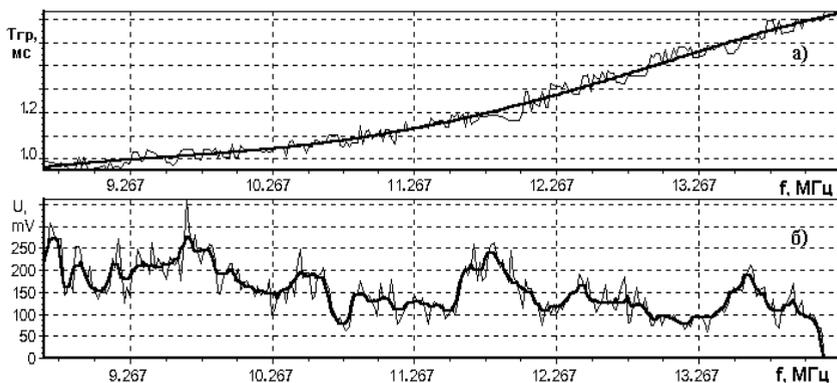


Рис. 2. Траектория моды, сглаженная полиномом (а) и АЧХ этой моды до (тонкая линия) и после (толстая) медианной фильтрации

В результате, получается следующее выражение для оценки АЧХ многолучевой ионосферной КВ радиолнии [2]:

$$|H(f, t)| = \left| \sum_{j=1}^m |H_j(f)| e^{-i \left(\varphi_j(f, t_0) + 2\pi \sum_{k=0}^{\infty} \frac{a_{jk}}{k+1} ((f+\Delta f)^{k+1} - f^{k+1}) + 2\pi F_j \Delta t \right)} \right| \quad (4)$$

Параметрами используемой модели АЧХ являются амплитуды мод КВ радиосигнала и межмодовые задержки (разности времен их группового запаздывания). Пример фрагмента вычисленной АЧХ многолучевой КВ радиолнии показан на рис. 3.

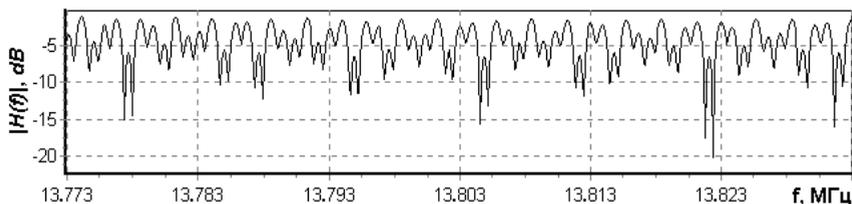


Рис. 3. Фрагмент вычисленной АЧХ

Известно что, огибающая временного ряда сигнала разностной частоты ЛЧМ ионозонда подобна АЧХ многолучевой КВ радиолнии при условии отсутствия помех. Было проведено сравнение вида огибающей указанного сигнала с полученной АЧХ радиолнии для соответствующего частотного диапазона [15]. Для этого брались участки ионограмм без стационарных

помех и с четкими не диффузными треками. Фрагментов ионограммы, удовлетворяющих таким условиям, относительно мало. Если бы они составляли существенную часть ионограммы, задача оценки АЧХ КВ радиолинии, могла бы быть сведена к отысканию огибающей временного ряда сигнала разностной частоты. Результаты сопоставления [15] подтвердили адекватность построенной модели.

Выводы. Разработана модель для вычисления АЧХ многолучевых ионосферных КВ радиолиний по данным НЗИ, позволяющая получать панораму АЧХ с высоким частотным разрешением.

Список литературы: 1. А.с. 1305880 СССР, МПК Н04В 3/46. Способ измерения характеристики группового времени замедления и амплитудно-частотной характеристики канала связи / *А.Д. Зорев* (СССР). – 4475118/24-09; Заявлено 08.08.88; Опубл. 07.10.90; Бюл. № 37. – 4 с.; ил. 2. *Брянцев В.Ф.* К методике измерений средних характеристик радиосигналов на трассах наклонного зондирования / *В.Ф. Брянцев, А.И. Ежов, Л.М. Красильникова, Ю.Г. Тихонов* // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца – М., 1984. – Вып.67. – С. 188 – 196. 3. *Брянцев В.Ф.* Измерения АЧХ при наклонном зондировании ионосферы широкополосными сигналами / *В.Ф. Брянцев, А.С. Стародубровский* // Труды всероссийской научной конференции “Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике”, Муром. – Муром, 2003. – С. 263 – 266. 4. *Nokagami M.* Statistic Methods in Radio Wave Propagation. – Pergamon Press, 1960. 5. *Алимов В.А., Ерухимов Л.М.* К вопросу о глубоких замираниях КВ сигналов / *В.А. Алимов, Л.М.Ерухимов* // Изв. вузов. Радиофизика. – 1975. – Т. 18. № 7. – С. 948 – 957. 6. *Вовк В.Я.* Измерение амплитудных характеристик многомодового сигнала при НЗ на субвормальной радиолинии / *В.Я. Вовк, И.А. Шумилов* // Тр. Аркт. и Антаркт. НИИ. – 1991. – № 427. – С. 131 – 138. 7. *Барабашев Б.Г.* Динамическая адаптивная структурно-физическая модель ионосферного радиоканала / *Б.Г. Барабашев., Г.Г. Вертоградов* // Математическое моделирование. – 1996. – Т. 8, № 2. – С. 3 – 18. 8. *Куницын В.Е.* Амплитудно-и фазочастотные характеристики вертикального радиозондирования магнитоактивной ионосферы / *В.Е. Куницын, А.Б. Усачев* // Радиотехника. – 1991. – № 1. – С. 8 – 10. 9. *Анишин М.М.* Моделирование и исследование полей декаметровых волн: Автореф... канд. техн. наук / *М.М. Анишин* // РГУ. – Ростов-на-Дону, 2003. – 22 с. 10. Документы XI Пленарной Ассамблеи МККР: В 5-ти т., Осло, 1966. Пер. с англ. – М.: Связь, 1968. 11. *Терехов Л. С.* Повышение точности радиозондирования ионосферы / *Л. С. Терехов, В.А. Шапцев* – Новосибирск: Изд. СО РАН, 1997. – 131 с. 12. *Колчев А.А.* Исследование ионосферных каналов распространения ДКМВ для сигналов с расширенным спектром: Дис. ... канд. физ.-мат. наук / *А.А. Колчев* // КГУ. – Казань, 1996. 13. *Иванов В.А.* Определение передаточной функции широкополосного КВ – радиоканала для отдельных мод распространения / *В.А. Иванов, А.А. Колчев, В.В. Шумаев* // Проблемы дифракции и распространение волн: Межвед. сб. – М.: МФТИ, 1995. – С. 122 – 131. 14. *Колчев А.А.* Режекция сосредоточенных по спектру помех при ЛЧМ зондировании ионосферы / *А.А. Колчев, А.О. Щирый* // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2006. – Т. XLIX, № 9. – С. 751 – 759. 15. *Колчев А.А.* Сопоставление огибающей сигнала разностной частоты на выходе ЛЧМ-ионозонда с АЧХ КВ радиолинии, вычисленной на основе полумпирической модели / *А.А. Колчев, В.В. Шумаев, А.О. Щирый* // Материалы VI Всерос. науч.-техн. конф. “Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике”. – 2006. – С. 336 – 340.

Поступила в редколлегию 06.09.2011

А.А. КОЛЧЕВ, канд. физ.-мат. наук, доц., МарГУ, Йошкар-Ола, Россия
А.Е. НЕДОПЕКИН, аспирант, МарГУ, Йошкар-Ола, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ АПРИОРНОЙ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ ДЛЯ СИГНАЛА ЛЧМ-ИОНОЗОНДА В СПЕКТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ

В работе проведено исследование статистических характеристик амплитуд спектральных отсчетов зондирующего ЛЧМ сигнала для трасс различной протяжённости и направления. Проанализированы преобладающие законы распределения для шума и для смеси сигнал-шум. Установлена высокая статистическая изменчивость, свидетельствующая об априорной непараметрической неопределенности. Предложен метод обнаружения сигнала в спектральной области.

In work research of statistical characteristics for spectral samples amplitudes of ionosonde chirp-signal is completed. Distributions laws of noise and signal are analyzed. High statistical variability, indicating an a priori non-parametric uncertainties is established. New method of detecting a signal in the spectral region is proposed.

Постановка задачи. В настоящее время широкое применение в ионосферных исследованиях получили ионозонды с линейной частотной модуляцией сигнала. При приёме сигнал, прошедший ионосферу, подвергается сжатию в частотной области с последующей фильтрацией низкочастотной составляющей – разностного сигнала, который оцифровывается и поступает для обработки в частотной области. По спектрам элементов разностного сигнала строится ионограмма – зависимость времени группового запаздывания от частоты зондирования. При автоматической программной обработке таких сигналов в спектральной области становится актуальной комплексная задача обнаружения и выделения частотных отсчетов для последующей идентификации мод распространения, определения критических частот, АЧХ и ФЧХ канала, построения оптимального фильтра. Её решение опирается на статистические свойства обнаруживаемого сигнала.

Анализ литературы. Для узкополосного случая известно следующее. В [1] из предположения, что шум является белым, делается вывод о том, что смесь сигнал-шум на выходе приемника имеет распределение Накагами-Райса, а при уменьшении отношения сигнал-шум стремится к рэлеевскому распределению. Этот подход в целом применяется и в работе [2], посвящённой случаю ЛЧМ сигналов, где указывается, что закон распределения шумов близок к нормальному.

Элемент же зондирующего ЛЧМ сигнала занимает широкую полосу частот, поэтому узкополосные радиотехнические устройства, работающие в данном диапазоне, выступают в качестве сосредоточенных помех, которые

существенно влияют на статистическое распределение отсчетов сигнала на выходе приёмника [3]. Режекция сосредоточенных помех во временной области [4] не всегда дает удовлетворительный результат. Сам канал распространения является нестационарным, а обработка принятого сигнала методом сжатия в частотной области, осуществляемая для выделения квазигармонических сигналов зондирования, также видоизменяет статистическое распределение. Поэтому, строго говоря, нельзя считать утверждения, справедливые для поведения спектра сигнала в узкополосном канале с течением времени, обоснованными применительно к спектру разностного сигнала шириной в сотни Гц, полученному из полосы в сотни кГц.

Цель работы – исследование статистических характеристик сигнала ЛЧМ зондирования ионосферы в спектральной области и построение методики обнаружения на основе полученных характеристик.

Статистическое исследование. Работа проводилась с использованием результатов зондирования по нескольким трассам разного направления, протяжённости, с разными скоростями перестройки частоты.

Использовались результаты многочастотного доплеровского радиозондирования периодическим ЛЧМ сигналом [5] на трассе Нижний-Новгород – Йошкар-Ола (220 км). Рассматривались данные, полученные усреднением спектров элементов зондирования в течение 10 с.

По критерию Пирсона на уровне значимости 95 % около 40 % шумовых спектров оказались одновременно принадлежащими к нормальному закону и закону модуля гауссовой величины, причём в большинстве случаев к положительно определённой их части, так как шумовые выборки имели отличную от нуля асимметрию: в среднем около 1.4. К логнормальному закону было отнесено около 60 %, к обобщённому экспоненциальному [6] — около 30%, к распределению Райса — 28 %. Из-за того, что часто одна выборка удовлетворяла нескольким законам распределения всего удалось идентифицировать около 70 % шумовых выборок. Для выборок сигнала доля однозначно идентифицированных оказалась ещё меньшей: распределение Рэлея – 0.2 %, Райса – 0 %, модуль гауссовой случайной величины – 2 %, нормальный закон – 0 %, логнормальный – 12 %, обобщённый экспоненциальный – 22 %.

Таким образом, было установлено, что для шума и для суммы сигнала и шума нет преобладающего закона.

Кроме этого, были обработаны данные наклонного зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ сигналом на 4-х трассах в различных геофизических условиях: Франция – Йошкар-Ола – 51 сеанс, скорость перестройки частоты 100 кГц/с, протяжённость 3100 км; Инскип – Йошкар-Ола – 15 сеансов, скорость 100 кГц/с, протяжённость 3150 км.; Норильск – Йошкар-Ола – 72 сеанса, скорость 500 кГц/с, протяжённость 2500 км; Хабаровск – Йошкар-Ола – 36 сеансов, скорость 500 кГц/с, протяжённость

5500 км. Были выбраны сеансы, содержащие данные, характерные для данных трасс, временной охват составил период 2009 – 2010 гг. Каждому сеансу с принятым зондирующим сигналом ставился в соответствие соседний сеанс на этой же трассе, содержащий только шумы и отстоящий по времени от сеанса с сигналом на 5 – 15 мин.

Для статистического описания были использованы несколько классификаций, включающие критерий Пирсона на уровне значимости 95%, кривые Пирсона (3 основных типа, см. табл. 1), кривые Джонсона [7], используемые для аппроксимации эмпирических законов распределения, топографическая классификация по энтропийному коэффициенту k и контрэкссессу χ [8].

Таблица 1
Принадлежность сигнала и шума к типам кривых Пирсона

| Тип выборки | Тип кривых Пирсона | | |
|------------------------|--------------------|---------------|---------------|
| | <i>I тип</i> | <i>IV тип</i> | <i>VI тип</i> |
| Франция – Йошкар-Ола | | | |
| Шум | 94.4 % | 0.45 % | 5.2 % |
| Сигнал | 9.9 % | 41.3 % | 48.8 % |
| Инскип – Йошкар-Ола | | | |
| Шум | 90.8 % | 1.7 % | 7.5 % |
| Сигнал | 24.8 % | 22.8 % | 52.4 % |
| Норильск – Йошкар-Ола | | | |
| Шум | 92.7 % | 0.7 % | 6.6 % |
| Сигнал | 36.1 % | 18.5 % | 45.4 % |
| Хабаровск – Йошкар-Ола | | | |
| Шум | 90.7 % | 0.9 % | 8.4 % |
| Сигнал | 28.0 % | 14.1 % | 57.9 % |
| В среднем по 4 трассам | | | |
| Шум | 93.2 % | 0.7 % | 6.1 % |
| Сигнал | 18.9 % | 31.7 % | 49.4 % |

Также была использована топографическая классификация, дополненная асимметрией с учётом несимметричности распределений. Рассматривались следующие статистические параметры: асимметрия, контрэкссесс, энтропийный коэффициент, квантиль 95%. Контрэкссесс, принимающий значения от 0 до 1, получается из эксцесса ε путём нормировки:

$$\chi = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}}. \quad (1)$$

Для вычисления энтропийного коэффициента по эмпирической функции плотности использовалась формула:

$$k = \frac{hn}{2\sigma} \cdot 10^{-\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m n_i \lg(n_i)}, \quad (2)$$

где h – ширина столбца гистограммы, n – объём выборки, m – число столбцов гистограммы, n_i – число элементов в i -м столбце гистограммы.

Типы кривых Пирсона являются достаточно широкими классами распределения, но выборки сигнала не обнаруживают преимущественной принадлежности к какому-либо классу. Использование топографической классификации [8] подразумевает отнесение к одному из трёх широких классов: обобщённый экспоненциальный, уплощённая композиция обобщённого экспоненциального и равномерного, двумодальная композиция дискретного двузначного и экспоненциального. Обобщённый экспоненциальный закон имеет следующий вид:

$$p(x) = \frac{\alpha}{2\lambda\sigma\Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right)} \exp\left(-\left|\frac{x-x_{\text{ц}}}{\lambda\sigma}\right|^{\alpha}\right), \lambda = \sqrt{\Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right)/\Gamma\left(\frac{3}{\alpha}\right)}, \quad (3)$$

где $x_{\text{ц}}$ – центр распределения, α – показатель степени, λ – масштабный множитель. Обобщённый экспоненциальный закон распределения является симметричным, поэтому принадлежность к нему рассматривалась как принадлежность к положительно определенной его части. К обобщённому экспоненциальному закону относится от 90 до 97 % выборок сигнала, однако при этом показатель степени изменяется в широких пределах от 0.2 до 1. Поведение статистических параметров на примерах двух трасс на плоскостях (χ, k) и (χ, a) изображено на рис. 1. Крупные точки соответствуют шуму. Видно, что у сигнала параметры меняются в очень широком диапазоне значений. Причём для разных трасс сходным образом. Области, занимаемые сигналом, плавно перетекают в области, занимаемые шумом, что не дает возможности однозначно разделить области занятые отсчетами сигнала и отсчетами шума.

Для всех рассматриваемых трасс проводилась классификация по типам кривых Джонсона: S_U , S_L и S_B [7]. Кривые Джонсона получаются преобразованиями плотности нормального распределения. Правило классификации имеет вид:

$$\begin{aligned} S_U : \varepsilon_B &> 3(1 + 0.641a_B^2); \\ S_L : \varepsilon_B &\approx 3(1 + 0.641a_B^2); \\ S_B : \varepsilon_B &< 3(1 + 0.641a_B^2); \end{aligned} \quad (4)$$

где ε_B и a_B являются выборочным эксцессом и асимметрией соответственно. Если $\varepsilon_B < 1 + a_B$, то кривые Джонсона неприменимы.

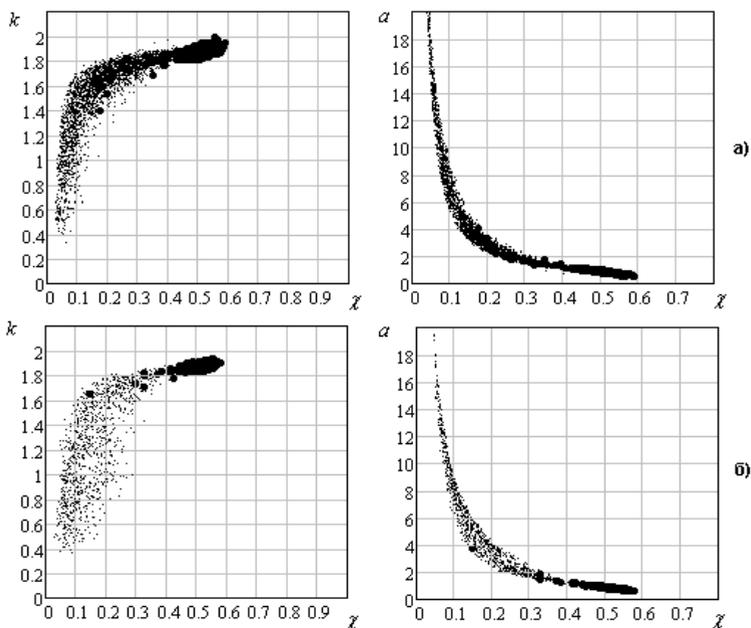


Рис. 1. а) Франция – Йошкар-Ола (100 кГп/с); б) Норильск – Йошкар-Ола (500 кГп/с)

Для шумов 97 – 99 % выборок принадлежат к типу S_B . Для трассы Инскип – Йошкар-Ола принадлежность к типу S_U отсчетов сигнала составила 49.7%, S_B – 50.3%. Для трассы Франция – Йошкар-Ола: S_U составила 72.8 %, для S_B – 27.2 %. Для трассы Хабаровск – Йошкар-Ола: для S_U – 36.2 %, для S_B – 63.8 %. Для трассы Норильск – Йошкар-Ола: для S_U – 38.0 %, для S_B – 62.0 %. Принадлежность к S_L для всех спектральных выборок на всех трассах составила 0 %.

Использование критерия согласия Пирсона на уровне значимости 95 % позволило установить, что на всех трассах к гамма-распределению относится в среднем 25 % (минимум 6 % и максимум 44 %) выборок сигнала. К распределению Рэля из выборок сигнала относится менее 1 %. Спектральные выборки с шумами не подтвердили своей принадлежности к нормальному закону (0 %), к рэлеевскому закону относится 4.5 %, к гамма-распределению – 24 %. В среднем по четверти и сигнальных и шумовых спектров принадлежит гамма-распределению. Для определения принадлежности выборок распределению Райса проводилось математическое моделирование случайной величины, распределённой по закону Райса, в среде Mathcad, а затем находилась доля точек сигнала и шума на плоскости (χ , α), пересекающих область, соответствующую распределению Райса.

Принадлежность выборок с шумами распределению Райса составило от 44 % до 67 %, принадлежность выборок с сигналом распределению Райса – 0 %.

Обнаружение сигнала. Для обнаружения сигнала – определения спектральных амплитудных выборок, содержащих отсчеты, соответствующих ионосферным модам распространения малопригодны критерии, основывающиеся на априорных предположениях о виде закона распределения. Неопределенность по виду закона распределения и его параметрам присуща как спектральным выборкам, содержащим полезный сигнал, так и содержащим только шум.

Для обнаружения необходимо исследование эмпирических данных на предмет поиска параметра или даже нескольких параметров, по которым возможно разделение выборок с сигналом от выборок с шумом.

Для определения такого параметра необходимо всестороннее исследование большого числа выборок, содержащих только шум, и выборок содержащих смесь шума и полезного сигнала, причём при различном отношении сигнал/шум. Подбор выборок вручную при просмотре спектров или ионограмм представляется малопроизводительным, к тому же “на глаз” можно определить только достаточно сильные сигналы, оставляя вне поля зрения выборки с отношением сигнал шум менее 8 – 10 дБ. Статистика при этом будет неполной, а выводы – неточными или ошибочными.

Решение проблемы исследования выборок заключается в следующем. В сеансе зондирования выбираются элементы анализа длительностью 1 с, для спектров которых бесспорно присутствие полезного сигнала, что соответствует отношению сигнал/шум 11 – 12 дБ и выше (рис. 2а). Затем происходит выделение сигнала при помощи грубого порогового критерия по квантили 95 – 97 %, который оставляет некоторую часть шумов, но практически полностью сохраняет моды сигнала (рис. 2б). После чего комплексный спектр грубо очищенного элемента (“образец”) складывается с комплексным спектром шумов, взятых из соседнего сеанса, полученная сумма – рис. 2в). При этом шумы умножаются на некоторый случайный коэффициент усиления, распределённый по случайному закону. При создании “образца” становятся известными частоты, на которых присутствует сигнал. Это позволяет после сложения “образца” с шумом точно определить отношение сигнал/шум созданной смеси.

Всего было получено более 19000 выборок с различными вариациями размеров и уровня шумов. Выборки нормировались собственным максимальным значением, и для них вычислялись параметры: групповое среднее M , среднеквадратическое отклонение σ , медиана $x_{0.5}$, энтропийный коэффициент k , асимметрия a , контрэксцесс χ , квантили 0.6, 0.7, 0.75, 0.8, 0.9, 0.95 ($x_{0.95}$), 0.99 %, знаковая статистика F_S .

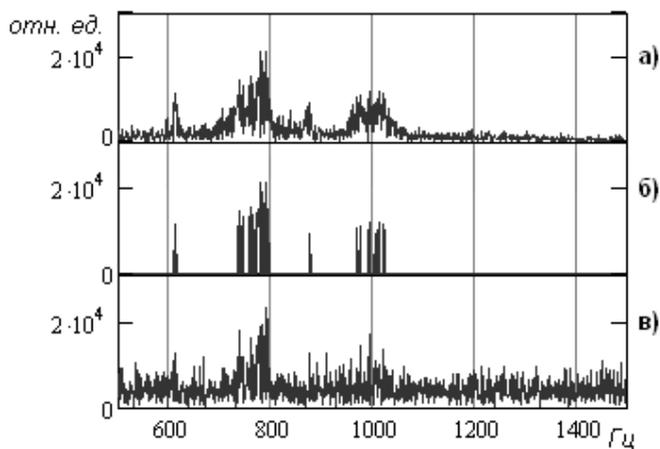


Рис. 2. Конструирование модельной выборки: а) исходная выборка; б) выделенный мощный сигнал; в) новая выборка

Вид статистики F_S , использующей разности группового среднего выборки и ее отсчета:

$$F_S = \frac{l-r}{r+1}, \quad (5)$$

где l – число ненулевых разностей, r – число положительных разностей.

Нормирование выборки дало возможность анализировать такие ненормированные в обычных условиях параметры, как групповое среднее, квантили и среднеквадратическое отклонение. Все параметры, кроме асимметрии, с ростом отношения сигнал/шум SN убывают.

Исходным условием, определяющим наличие сигнала в выборке, является величина SN . По рис. 3 видно, что существует отношение сигнал/шум, начиная с которого вклад сигнала (который есть в каждой выборке) становится существенным и меняется поведение рассматриваемого статистического параметра. Тогда считается, что все точки, изображённые на координатной плоскости левее граничного значения сигнал/шум $SN_{ГР}$, принадлежат шуму, а правее – сигналу. Необходимо отобразить критерий принадлежности точки сигналу по значению мощности в критерий по значению параметра. Таким образом, образуется перекрестие, разбивающее плоскость на четверти. При условии убывания параметра первой четверти будет соответствовать ошибка первого рода, а третьей четверти – второго рода. При условии возрастания параметра, соответственно: ошибке первого рода – четвертая, ошибке второго рода – вторая. Критическое значение параметра при данном $SN_{ГР}$ выбирается таким, чтобы гарантировать равные ошибки первого и второго рода.

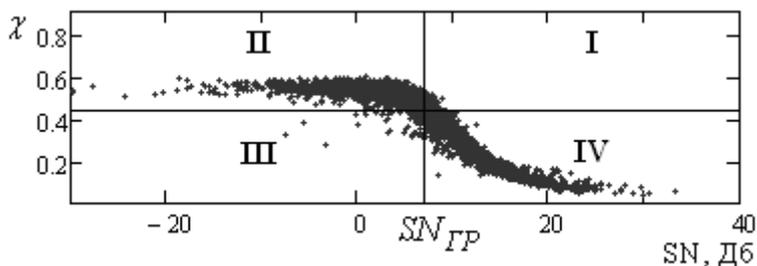


Рис. 3. Пример расчета ошибок первого и второго рода

Результаты исследования параметров для всех выборок в совокупности при величине порога $SN_{ГР}$ равного 8 дБ представлены в табл. 2. В ней отображены коэффициенты корреляции параметров с отношением сигнал/шум, критические значения, гарантирующие равновероятную ошибку δ и сами значения ошибок. Кроме этого рассматривалась устойчивость оценок критических значений, где под устойчивостью понимается малое изменение ошибок первого и второго рода при малом изменении критического значения параметра.

Таблица 2

Ошибки обнаружения для исследованных параметров

| Параметр | Корреляция параметра с SN | Критич. значение | δ | Ошибки при вариации критического значения +5 % | |
|------------|---------------------------|------------------|----------|--|------------------|
| | | | | ошибка 1-го рода | ошибка 2-го рода |
| a | 0.793 | 1.097 | 7.3 % | 9.2 % | 5.8 % |
| χ | -0.890 | 0.416 | 6.0 % | 3.4 % | 9.2 % |
| k | -0.802 | 1.8561 | 10.5 % | 0 % | 99 % |
| σ | -0.874 | 0.125 | 5.6 % | 2.4 % | 10 % |
| $x_{0,5}$ | -0.898 | 0.206 | 5.4 % | 2.5 % | 8.1 % |
| $x_{0,95}$ | -0.897 | 0.444 | 5.2 % | 2.7 % | 8.2 % |
| $x_{0,99}$ | -0.832 | 0.617 | 8.9 % | 5.6 % | 14.3 % |

Рассмотренная знаковая статистика дала равновероятную ошибку 26.5 %. Наилучшие значения по корреляции с отношением сигнал/шум показали квантили $x_{0,5}$ и $x_{0,95}$, гарантирующие, как следствие, наилучшие равновероятные ошибки. Наименьшую равновероятную ошибку 5.2 % гарантирует нормированная квантиль $x_{0,95}$ при критическом значении 0.444, то есть при значениях $x_{0,95}$, полученных для нормированных максимальным значением выборок и меньших 0.444 с вероятностью 5.2 % можно не обнаружить зондирующий сигнал и с такой же вероятностью можно произвести ложное обнаружение. Для проверки устойчивости найденных

критических значений проводилось изменение найденного критического значения на 5 % как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения. В таблице представлены получающиеся при этих измерениях ошибки первого и второго рода. Лучшие результаты по устойчивости показали контрэксцесс, $\chi_{0,5}$ и $\chi_{0,95}$.

Выводы. В случае обработки сжатием в частотной области широкополосного сигнала ионосферного распространения наблюдается не только высокая переменчивость параметров законов распределения, но и высокая переменчивость самих законов распределения. Отсутствие одного точно известного закона распределения для сигнала, а также одновременная принадлежность сигнала и шума к одним законам распределения свидетельствует о том, что обработка ЛЧМ сигнала проходит в условиях априорной непараметрической неопределённости. В этих условиях для обнаружения неоправданно использование не только критериев, основывающихся на априорных предположениях о виде закона распределения, но и непараметрических критериев

Список литературы: 1. *Стейн С.* Принципы современной теории связи и их применение к передаче дискретных сообщений / *С. Стейн, Дж. Джонс.* – М.: Связь, 1971. – 376 с. 2. *Егошин А.Б.* Автоматическое обнаружение сигнала на выходе системы сжатия ЛЧМ ионозонда / *А.Б. Егошин, Н.В. Рябова* // Радиолокация, навигация, связь: Труды IX-й научно-техн. конф. – Воронеж, 2003. – Т. 2. – С. 940 – 951. 3. *Колчев А.А.* Статистические распределения сигналов ионосферного ЛЧМ зондирования / *А.А. Колчев, А.Е. Недопекин* // Конференция “Дистанционное зондирование ионосферы” (ИОН-2011), г. Харьков, 12 – 15 апреля 2011 г. Сборник тезисов. – 2011. – С. 41. 4. *Колчев А.А.* Режекция сосредоточенных по спектру помех при ЛЧМ-зондировании ионосферы / *А.А. Колчев, А.О. Щирый* // Известия вузов. Радиофизика. – 2006. – Т. 49, № 9. – С. 751 – 759. 5. *Колчев А.А.*, Измерение доплеровского смещения частоты отдельных лучей с помощью ЛЧМ-ионозонда / *А.А. Колчев, В.И. Батухтин., В.А. Иванов, С.З. Розанов* // Известия ВУЗов: Радиофизика. – 2000. – Т. XLIII, № 12. – С. 1044 – 1054. 6. *Назаров И.А.* К вопросу о предельных значениях энтропийного коэффициента / *И.А. Назаров* // Известия ЛЭТИ. – 1965. – Вып. 66, ч. 1. – С. 23 – 25. 7. *Кобзарь А.И.* Прикладная математическая статистика / *А.И. Кобзарь.* – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с. 8. *Новицкий П.В., Зограф И.А.* Оценка погрешностей результатов измерений / *П.В. Новицкий.* – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние., 1991. – 304 с.

Поступила в редколлегию 06.09.2011

С.И. РЫМАРЬ, аспирант, НТУ “ХПИ”, Харьков

Ю.В. ГОНЧАРЕНКО, канд. физ.-мат. наук, Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков

В.Н. ГОРОБЕЦ, канд. физ.-мат. наук, Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков

Ф.В. КИВВА, д-р физ.-мат. наук, Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков

А.Л. КОВОРТНЫЙ, инженер, Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков

ОСОБЕННОСТИ СУШКИ СОРБЕНТОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Розглянута технологія підготовки сорбентів, що використовуються для регенерації трансформаторних масел.

Рассмотрена технология подготовки сорбентов, применяемых для регенерации трансформаторных масел.

The technology of preparation of sorbents used for regeneration of transformer oils is reviewed.

Введение. В течение последнего десятилетия проведены систематические исследования особенностей воздействия электромагнитных полей (ЭМП) на сорбенты разных классов, включая цеолиты и силикагели, широко применяемые в электроэнергетике для регенерации трансформаторных масел в силовых трансформаторах и переключателях тока.

Эти исследования проведены совместно ИРЭ им. А.Я. Усикова НАН Украины, ООО НПФ “Сетра ЛТД” и НТУ “ХПИ” в объеме, предусмотренном договором о научно-техническом сотрудничестве. Они направлены на подготовку сорбентов к использованию посредством безопасных и ресурсосберегающих технологий.

Предложена конструкция установки для подготовки сорбентов, содержащих воду в химически связанном и свободном состоянии. Описана технология их подготовки путем воздействия на них электромагнитного излучения ВЧ диапазона.

Анализ литературы. В электроэнергетике широко используют трансформаторы, в которых в качестве теплоотводящей и изолирующей сред используются трансформаторные масла [1]. В процессе эксплуатации в них образуются различные продукты окисления и обмена с окружающей средой, которые снижают их эксплуатационные характеристики и подлежат удалению. Одной из наиболее опасных примесей в трансформаторном масле является вода, которая проникает в масло при его контакте с атмосферой. Превышение содержания воды может приводить к

электрическому пробую, а одним из основных требований, предъявляемых к трансформаторным маслам, является их высокая электрическая прочность. В связи этим возникает вопрос замены масла на новое или восстановления его эксплуатационных характеристик путем регенерации. Удаление продуктов старения масла может производиться постоянно в процессе эксплуатации оборудования, либо периодически при достижении эксплуатационными характеристиками предельно допустимых значений. Наибольшее распространение для регенерации трансформаторных масел получили термосифонные фильтры и адсорберы. Принцип действия этих устройств основан на поглощении продуктов старения масел поверхностно-активными веществами – сорбентами [1].

В качестве сорбентов применяются природные и синтетические цеолиты и силикагели.

Наиболее широкое применение получили три метода подготовки сорбентов: выжигание в высокотемпературной печи (при $t = 400 - 600$ °С), продувка сухим горячим воздухом и сушка термовакuumным способом с использованием точечных нагревателей. Основными недостатками этих методов является большая длительность процесса и высокие затраты энергии.

Постановка задачи. При негерметичном хранении сорбентов в них проникает влага из окружающей среды, вследствие чего их сорбционная емкость значительно снижается. Представляется целесообразным изучить и реализовать на практике возможность восстановления их сорбционной емкости, а при возможности и ее увеличения наиболее экономичным с энергетической точки зрения способом. В связи с постоянным ростом цен на сорбенты (в том числе и цеолиты) и ужесточением экологического контроля при их утилизации возникает вопрос о высококачественной и энергоэффективной их регенерации.

Особенности поведения сорбентов в ЭМП. За последнее время возрос интерес к технологиям, которые основаны на взаимодействии электромагнитного поля с веществом [2 – 5]. Это обусловлено рядом преимуществ, возникающих при нагреве и сушке в электромагнитном поле (ЭМП).

В основу технологии положены частотные особенности диэлектрических свойств сорбентов, в частности, их действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости, которые следуют из соотношений Крамерса-Кронига [6].

Так, во всём радиодиапазоне, включая СВЧ и КВЧ, воздействие электромагнитного поля на вещество является неионизирующим, а основные эффекты воздействия обусловлены поляризацией вещества и объемным рассеянием энергии ЭМП в веществе вследствие конечных значений комплексной диэлектрической проницаемости ϵ'_2 и ϵ''_2 . При таких условиях подводимая к веществу энергия ЭМП вследствие объемного рассеяния превращается в тепло, причём основными “мишенями”

воздействия является сорбент и влага, заполняющая поры сорбента. Передача тепла от сорбента к влаге и наоборот происходит за счёт теплопроводности. Нагрев поглощённой сорбентом влаги в электромагнитном поле ВЧ диапазона также обусловлен наличием токов проводимости и поляризацией её молекул.

Нагреваясь до критических значений при заданном давлении (рис. 1), вода, кроме расширения, начинает испаряться, мигрируя по микропорам сорбента до его поверхности и далее в направлении потока, создаваемого вакуумным насосом.

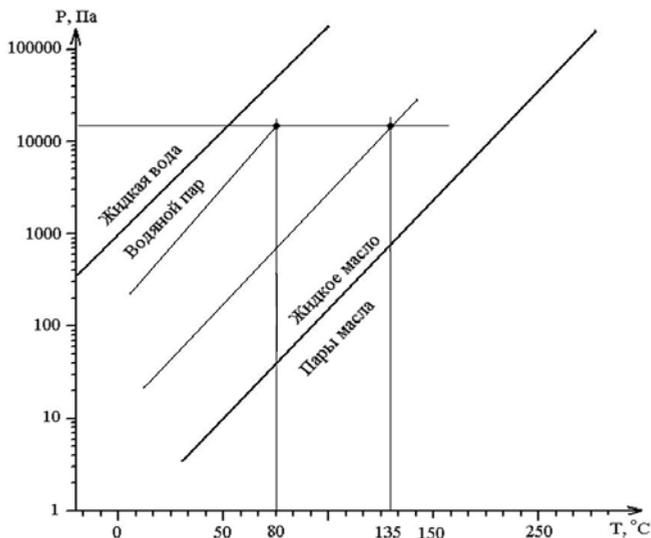


Рис. 1. Диаграмма вакуумной подготовки трансформаторных масел

Рассмотрение кинетики удаления влаги из объёма сорбента показывает, что вакуумная сушка в комбинации с объёмным нагревом сорбента в поле КВ диапазона обладает оптимальными свойствами по производительности процесса сушки и длительности сохранения адсорбционных свойств сорбентов.

Анализ диффузии воды в цеолитах [7] показывает, что предельная мощность ЭМП, используемая для нагревания цеолитов, не может быть слишком большой, поскольку размеры микропор в цеолитах конечны, а силы межмолекулярных связей в воде могут превосходить силы связи между водой и стенками пор цеолитов. Это означает, что в широком диапазоне температур (вплоть до $200 - 300^{\circ}\text{C}$ и более) молекула воды движется по одному и тому же строго заданному структурой кристалла диффузионному пути, что порождает (при увеличении мощности ЭМП) градиенты давления, которые могут превосходить пределы механической

прочности цеолитов. Во-вторых, несмотря на относительно низкотемпературную подвижность, высокие температуры дегидратации сорбентов сохраняются. Природа высокотемпературного гидратированного состояния цеолитов объясняется “двухфазным” строением цеолитной воды. Оказалось, что диффузия молекул воды в цеолитных каналах не мешает некоторой части этих молекул быть жестко связанной в цеолитных каналах. При этом полная дегидратация имеет место при 300 °С и выше.

Выбор температурного режима подготовки и регенерации сорбентов. Выбор температурного режима десорбции цеолитов определяется снизу минимальной температурой, которая обеспечивает быстрое удаление адсорбата, и сверху – термической стойкостью сорбента и материала адсорбера. Кроме того, выбор температуры определяется условиями проведения процесса десорбции, а именно – величиной разрежения, создаваемого в адсорбере.

Для цеолитов минимальная температура, при которой возможно полное удаление адсорбата (в данном случае свободной воды), составляет 140 – 160 °С. При этом в сорбенте (цеолите) остаётся около 5 % влаги. Это химически связанная вода, которая испаряется при температурах 300 °С и выше.

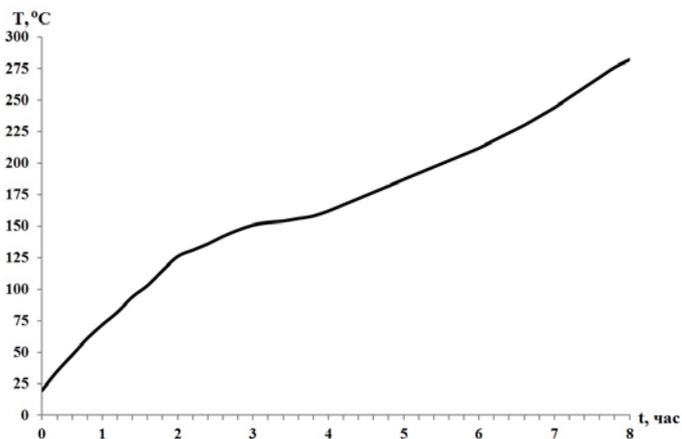


Рис. 2. Изменение температуры сорбента внутри адсорбера

Максимальная температура, которая определяется термической стойкостью цеолитов, составляет 500 – 600 °С. Они переносят продолжительный нагрев под разрежением при температуре 300 – 500 °С без заметных структурных изменений.

Условия проведения процесса десорбции накладывают свои ограничения на выбор оптимальной температуры. В первую очередь необходимо учитывать степень разреженности, создаваемую внутри

адсорбера, а также тот факт, что цеолит находится в масляной среде. При больших температурах происходит сначала испарение воды, затем масла, а также его коксование на гранулах цеолита, что ведёт к понижению адсорбционной емкости. Оптимальный рабочий диапазон находится между кривыми испарения воды и масла (рис. 1).

Одним из основных факторов, определяющих длительность регенерации, является время нагрева сорбента до заданной температуры.

С одной стороны – для увеличения скорости нагрева требуется увеличение мощности нагревателей, с другой – существуют ограничения по механическим свойствам цеолитов: скорость нагрева не должна превышать 5 – 6 °С/мин.

Равномерность температурного поля внутри адсорбера в первую очередь определяется скоростью нагрева сорбента. Все применяемые ранее нагреватели для нагрева сорбентов достаточно больших объемов (30 – 50 кг) представляют собой точечные нагреватели. Тепло от локально нагретого сорбента, непосредственно прилегающего к нагревателю, поступает к участкам, удалённым от нагревателя. Теплопередача в системе сорбент-масло происходит за счёт теплопроводности самих частиц сорбента и масла между этими частицами. Так как теплопроводность этих материалов достаточно низкая, между центральными и периферийными участками создаётся большой температурный градиент (десятки градусов). Увеличение мощности нагрева, которое необходимо для уменьшения времени выхода устройства на рабочий режим, приводит к тому, что температурный градиент внутри адсорбера превышает предельно допустимые изменения температуры, тем самым, накладывая ограничения на увеличение скорости нагрева сорбента.

Перечисленные выше факторы имеют важное значение для проведения качественной подготовки сорбентов. При этом они зачастую вступают в противоречие между собой. Решить эти противоречия призвана технология объёмного нагрева сорбента с помощью ЭМП.

Установка по подготовке сорбентов. Установка по подготовке и регенерации сорбентов [8 – 10] функционально состоит из четырёх частей: генератора высокой частоты (I), адсорбера (II), вакуумно-гидравлической системы (III) и пульта управления (IV), ее функциональная схема приведена на рис. 3. Установка состоит из следующих основных узлов: генератора высокой частоты 1 с блоком питания 2, адсорбера 3, индикатора визуального контроля 5, контрольного теплообменника 6, ресивера, конструктивно связанного с теплообменником, 7, блока управления 8 вакуумного насоса 11 и сборника конденсата 12, а также вентилей 4, 9, 10. Установка по подготовке сорбентов предназначена для удаления влаги из адсорбера. Адсорбер функционально размещается отдельно или в составе маслоочистительной цеолитовой установки МЦУ-7.

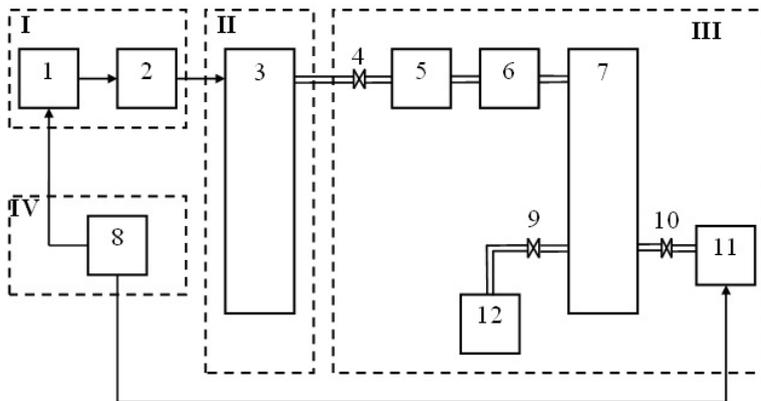


Рис. 3. Функциональная схема установки

На рис. 4 показан временной ход процесса подготовки сорбента. Рост отраженной мощности связан с изменением суммарной комплексной диэлектрической проницаемости системы сорбент-вода вследствие удаления влаги.

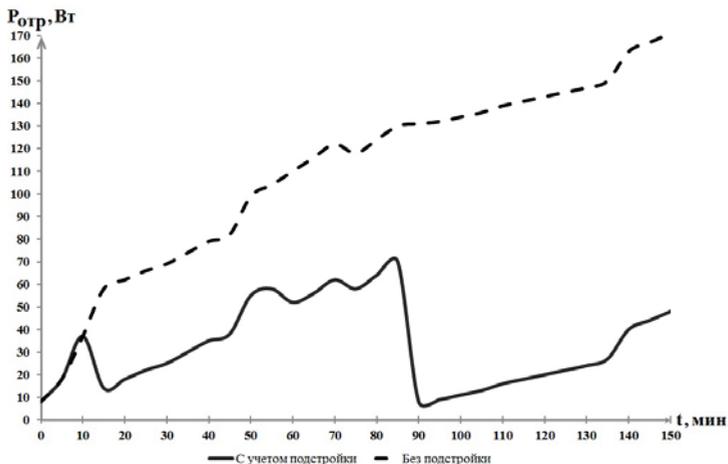


Рис. 4. Временной ход процесса подготовки сорбента

Практические результаты. Исследования по подготовке сорбента с помощью СВЧ нагрева показали, что СВЧ ($f = 2450$ МГц) нагрев недостаточно эффективен для подготовки цеолита. При заданной конструкции адсорбера и заданных объемах сорбента происходит локальный перегрев вблизи ввода, который не позволял достигнуть низкого

градиента температуры. Поэтому для достижения равномерного нагрева всего объема сорбента рабочая частота была существенно уменьшена и составила $f = 13,65$ МГц.

Усовершенствованная установка по подготовке и регенерации сорбентов разработана в двух модификациях: вариант 1 – установка предназначена для работы совместно с установкой для регенерации масла МЦУ-7 с двумя адсорберами вместимостью 35 кг каждый и вариант 2 – для работы с автономно установленным адсорбером вместимостью 180 кг.

Выводы. Таким образом, проведенные исследования и разработка установки для подготовки сорбентов с учетом предложенных изменений [8 – 10] позволили решить конкретные практические вопросы в технологии подготовки сорбентов:

- применение описанной технологии позволяет восстановить сорбционную емкость цеолитов (сорбционная емкость цеолитов в исходном состоянии составляет 20 – 25 %);

- прокаливание сухих и чистых цеолитов в электромагнитном поле коротковолнового диапазона до температуры 300 – 400 °С увеличивает абсолютное значение их сорбционной емкости дополнительно на 10 – 15 %;

- установка может быть использована в широком диапазоне температур (диапазон внешних температур, при котором возможна эксплуатация установки, расширился в область низких температур до –10 °С).

Список литературы: 1. *Монастырский А.Е.* Регенерация, сушка и дегазация трансформаторного масла. Учебное пособие. – С-Петербург, 1997. – с. 42. 2. *Кивва Ф.В., Горобец В.Н., Зотов С.М. и др.* Новые технологии обработки сорбентов // Новини енергетики. – 2003. – № 1 – 2. – С. 26 – 31. 3. *Головко М.И., Гончаренко Ю.В., Горобец В.Н. и др.* Установка для регенерации сорбентов в электромагнитном поле // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2005. – № 5(59). – С. 49 – 51. 4. *Кивва Ф.В., Горобец В.Н., Головко М.И. и др.* Устройство для регенерации сорбентов электромагнитным полем // Наука та інновації. – 2010. – Т. 6, № 3. – С. 12 – 19. 5. Отчет по НИР “Октан”. Разработка и изготовление устройства для ускоренной регенерации сорбента. Научный руководитель д.ф.-м.н. Ф.В. Кивва. – Х.: ИРЭ им. А.Я. Усикова НАН Украины, 2002. – 101 с. 6. *Забиякин Ю.Е.* Проверка дисперсионных соотношений Крамерса-Кронига в широком интервале температур // Оптика и спектроскопия. – 1968. – Т. 24. – С. 828 – 829. 7. *Габуда С.П.* Связанная вода. Факты и гипотезы. – Новосибирск: Наука, 1982. – 158 с. 8. ПАТЕНТ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ № 55254. Пристрій для сушіння сипучих дисперсних матеріалів. 9. ПАТЕНТ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ № 55348. Пристрій для сушіння сипучих дисперсних матеріалів. 10. ПАТЕНТ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ № 56705. Пристрій для сушіння сипучих дисперсних матеріалів.

Поступила в редколлегию 31.05.2011

Л.Ф. ЧЕРНОГОР, д-р физ.-мат. наук, проф., ХНУ имени В.Н. Каразина
В.В. БАРАБАШ, м.н.с., Институт ионосферы, Харьков

ЭФФЕКТЫ СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 4 ЯНВАРЯ 2011 г., НАБЛЮДАЕМЫЕ ПРИ ПОМОЩИ ИОНОЗОНДА

Викладено результати спостереження ефектів в іоносфері, що викликані сонячним затемненням 4 січня 2011 року за допомогою методу вертикального зондування. Показано особливості зміни основних параметрів іоносфери.

Изложены результаты наблюдения эффектов в ионосфере, вызванные затмением 4 января 2011 г. с помощью метода вертикального зондирования. Показаны особенности изменения основных параметров ионосферы.

The results of observing of the effects in the ionosphere caused by solar eclipse January 4, 2011, by the method of vertical sounding are presented. Changes of the basic parameters of the ionosphere are shown.

Постановка задачі. Измерительный комплекс харьковского Института ионосферы создавался на рубеже 1960 – 1970-х гг. Основным измерительным инструментом является радар некогерентного рассеяния (НР). В 1967 г. в комплекс была включена автоматическая ионосферная станция (АИС), а в 1985 г. она была заменена на станцию “Базис” [1]. Принцип действия ионосферных станций основан на методе вертикального зондирования. Станция “Базис”, в отличие от АИС, обладает более широким спектром возможностей, такими как наклонное и трансionoсферное зондирование.

Радар НР дает возможность получать полную информацию в диапазоне высот 150 – 1000 км [2, 3, 5 – 7]. Основную же информацию о состоянии ионосферы ниже максимума ионизации получают при помощи ионозондов – станций вертикального зондирования [8].

Научный интерес при исследовании состояния и поведения ионосферы представляют ее отклики на природные и техногенные события. Общеизвестными примерами таких событий являются старты ракет, магнитные бури, солнечные затмения и др. (см., например, [4]).

Важными событиями, которые изменяют состояние ионосферы, являются солнечные затмения (СЗ). Изучение эффектов СЗ актуальны тем, что каждое из них происходит при определённых гелиофизических условиях и отклики ионосферы на затмения могут заметно отличаться.

Целью статьи является изложение результатов наблюдения эффектов в ионосфере над Харьковом, вызванных СЗ 4 января 2011, при помощи метода вертикального зондирования (ВЗ).

Солнечное затмение 4 января 2011 г. Это затмение существенно отличается от других затмений, наблюдаемых в Харькове, тем, что оно имело место на стадии роста солнечной активности, в утреннее время и

продолжалось около трех часов (другие затмения длились около двух часов). Затмение было частным. Оно наблюдалось в северной Африке, в Европе, на Ближнем Востоке и в Средней Азии. СЗ 4 января 2011 г. началось в 06:40:11 UT, максимальная фаза наступила в 08:50:35 UT над северной Швецией. Окончание частного солнечного затмения имело место в 11:00:52 UT.

На рис. 1 представлены характерные ионограммы, полученные перед началом, в период и после окончания СЗ 4 января 2011 г., а на рис. 2 – ионограммы, полученные в те же моменты времени в контрольный день 5 января 2011 г., когда отсутствовали значительные возмущения в ионосфере. На вертикальной оси, как обычно, обозначены действующие высоты отражения зондирующего сигнала, на горизонтальной – несущая частота радиосигнала.

Отметим, что 4 и 5 января 2011 г. на протяжении практически всех измерений регистрировался слой E_s , частично экранировавший исследуемую область ионосферы. Тем не менее, полученные ионограммы позволили с достаточной точностью выявить отклики средней ионосферы на СЗ.

До наступления СЗ ионосфера была спокойной. Об этом можно судить из рис. 1а. Для Харькова основная часть СЗ припадает на околополуденные часы (по местному времени). Так, начало затмения было в 07:30, главная фаза наступила в 09:59, а окончание в 10:29.

На высотно-частотных характеристиках, полученных до начала СЗ, наблюдался незначительный рост критической частоты f_oF2 и незначительные колебания значений высоты слоя $F2$, что характерно для утреннего времени.

В течение затмения четко видны изменения ионограмм. С 08:30 до 09:15 высотно-частотным характеристикам были присущи диффузные отражения практически во всем диапазоне частот и высот.

В течение СЗ в диапазоне высот 100 – 150 км присутствовал мощный прерывистый отражающий слой, подобный слою E_s . Критическая частота этого слоя достигала 8.4 МГц. Наблюдался след, который можно назвать двукратным для слоя E_s . Его действующая высота изменялась от 210 до 240 км.

Отражение от слоя E наблюдалось нечетко. Минимальное значение критической частоты f_oE_{\min} оказалось близким к 2.2 МГц.

В день СЗ и в контрольный день слой $F1$ не регистрировался.

На ионограммах, полученных в момент главной фазы СЗ, наблюдались наклонные отражения. Также отмечен рост действующей высоты, который в среднем составил около 70 км. Значение f_oF2 при этом уменьшилось приблизительно на 1.9 МГц.

Кроме основного следа, от области F ионосферы зафиксирован след, имеющий действующие высоты 275 – 440 км с критической частотой не превышающей 4 МГц. Такой след имел место в интервале времени с 07:35 до 10:00 UT.

По мере открывания солнечного диска отмечалось увеличение критической частоты F_2 . В момент окончания СЗ (10:29) значение f_oF_2 почти достигло значения, наблюдавшегося до начала затмения. Действующая высота после ее увеличения в период затмения уменьшилась, и практически стала равна невозмущенному значению (в 11:00 отличие составляло не более 1 – 3 км).

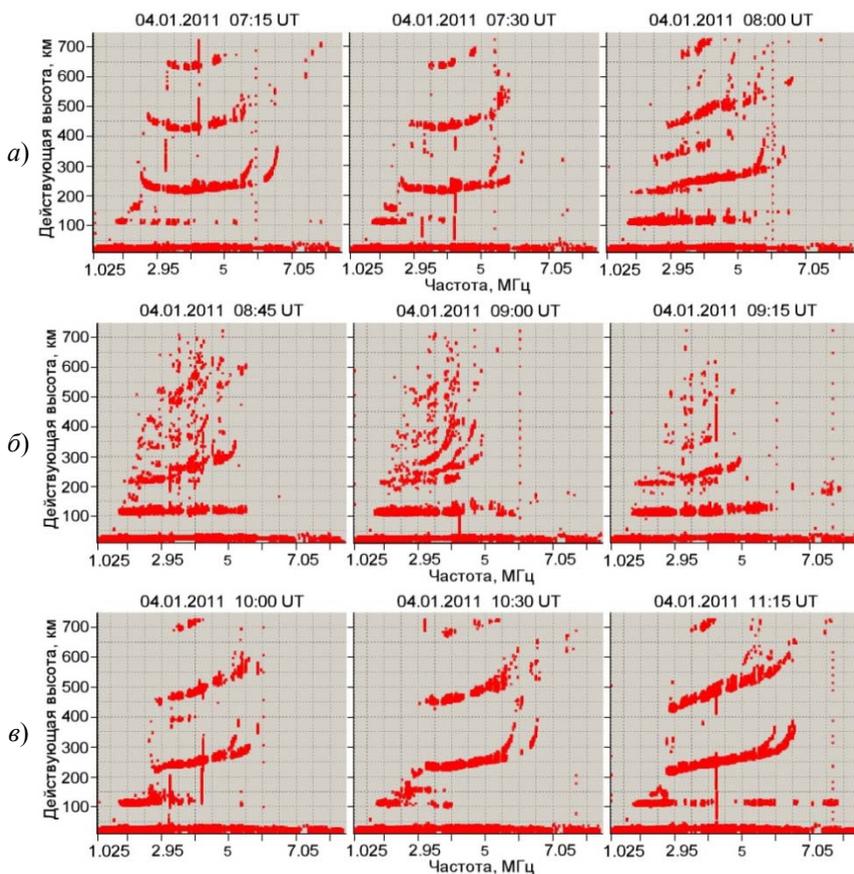


Рис. 1. Ионограммы до начала (а), в период (07:30 – 10:30) (б) и после окончания (в) солнечного затмения 4 января 2011 г.

Ионограмма, полученная в 11:15, свидетельствует о том, что через 45 мин после окончания СЗ вид ионограммы и ее параметры вернулись к состоянию, предшествующему моменту начала затмения.

На рис. 2 представлены ионограммы, полученные в контрольный день 5 января 2011 г. Их можно условно разделить на две группы. Ионограммы в

первой группе имели характерный для околорассветного времени вид. Во второй группе на ионограммах наблюдался след с действующей высотой 300 – 400 км. Отметим, что появление слоя не было таким регулярным как в день СЗ. Достаточно уверенно он фиксировался лишь на отдельных ионограммах (07:15, 07:30, 09:30, 10:30, 10:45).

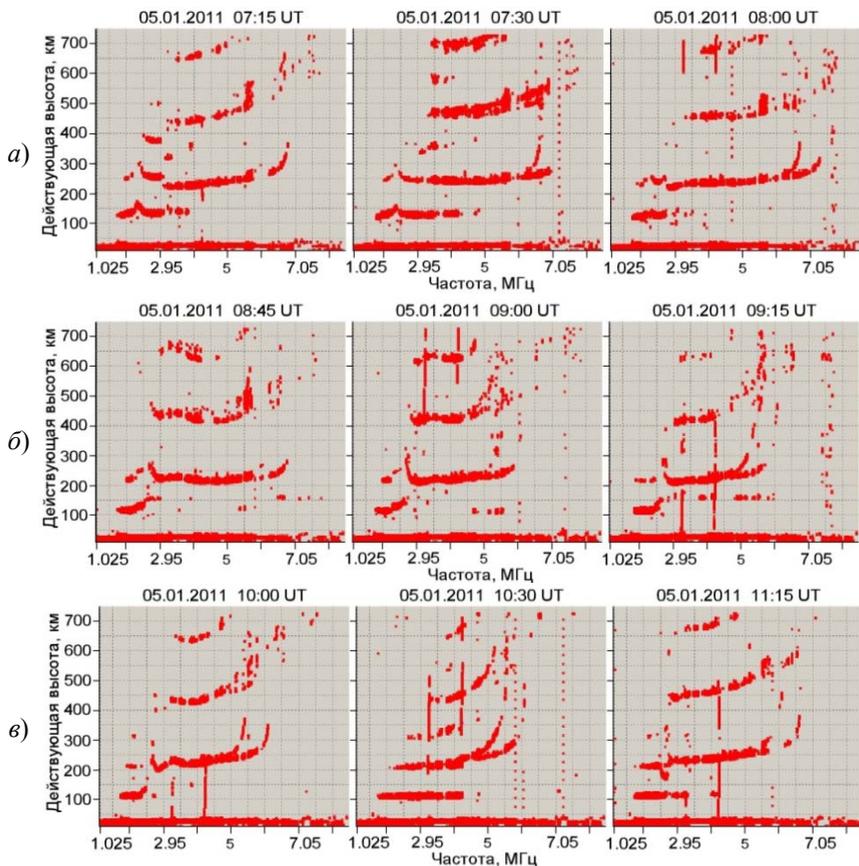


Рис. 2. Ионограммы полученные в контрольный день 5 января 2011 г. в интервалах времени 07:15 – 08:00 (а), 9:30 – 12:30 (б) 10:00 – 11:15 (в).

Слой E_s , как и 4 января 2011 г., был прерывистый, его критическая частота достигала 7.9 МГц. Высота слоя изменялась от 90 до 150 км. На некоторых ионограммах наблюдался двукратный и трехкратный следы для слоя E_s , для которых действующие высоты были от 195 до 220 км и от 300 до 320 км соответственно.

В отличие от дня СЗ, отражения от слоя *E* наблюдались более четко. Значение его критической частоты не превышало 2.7 МГц.

Видно, что в течение всего периода измерений ионограммы незначительно отличались как между собой, так и от ионограмм, полученных 4 января до начала и после окончания СЗ. Их поведение является типичным для невозмущенной ионосферы в утреннее и околополуденное время.

Выводы. В течение затмения критические частоты слоев *F2* и *E* вблизи главной фазы уменьшились на 1.9 МГц и 0.4 МГц, или на 31 % и 16 % соответственно, а увеличение действующей высоты отражения в максимуме слоя *F2* составило 70 км.

Таким образом, качественный анализ высотно-частотных характеристик показал, что СЗ вызвало существенные изменения параметров ионограмм, а значит и средней ионосферы. Приведенные результаты исследования хорошо согласуются с результатами наших более ранних наблюдений [2, 3, 5 – 8].

Список литературы: 1. Емельянов Л.Я., Живолуп Т.Г. Институт ионосферы НАН и МОН Украины. Краткий исторический обзор // Дистанционное радиозондирование ионосферы. Сборник тезисов. – 2011. – С. 10. 2. Акимов Л.А., Боговский В.К., Григоренко Е.И., Таран В.И., Черногор Л.Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты солнечного затмения 31 мая 2003 года в Харькове // Геомагнетизм и аэрономия. – 2005. – Т. 45, № 4. – С. 526 – 551. 3. Акимов Л.А., Григоренко Е.И., Таран В.И., Тырнов О.Ф., Черногор Л.Ф. Комплексные радиофизические и оптические исследования динамических процессов в атмосфере и геокосмосе, вызванных солнечным затмением 11 августа 1999 года // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 2002. – № 2. – С. 25 – 63. 4. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. – М.: Наука, 1988. – 527 с. 5. Бурмака В.П., Григоренко Е.И., Емельянов Л.Я., Лысенко В.Н., Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф. Радарные наблюдения эффектов в геокосмосе, вызванных частным солнечным затмением 29 марта 2006 г. // Успехи современной радиоэлектроники. – 2007. – № 3. – С. 38 – 53. 6. Бурмака В.П., Лысенко В.Н., Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты частного солнечного затмения 3 октября 2005 г. в Харькове. 1. Результаты наблюдений // Космічна наука і технологія. – 2007. – Т. 13, № 6. – С. 74 – 86. 7. Григоренко Е.И., Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф. Эффекты в ионосфере и атмосфере, вызванные солнечным затмением 29 марта 2006 г. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2008. – Т. 48, № 3. – С. 350 – 364. 8. Емельянов Л.Я., Складаров И.Б., Черногор Л.Ф. Отклик ионосферы на солнечное затмение 1 августа 2008 г.: результаты вертикального зондирования // Космічна наука і технологія. – 2009. – Т. 15, № 4. – С. 12 – 21.

Поступила в редколлегию 29.06.2011

Я.Н. ЧЕПУРНЫЙ, зав. сектором, Институт ионосферы, Харьков
И.Б. СКЛЯРОВ, главный инженер, Институт ионосферы, Харьков

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ДЛЯ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ КОРОТКОВОЛНОВОГО НАГРЕВНОГО СТЕНДА

Розглянуто варіанти випромінювачів для короткохвильової антенної решітки зенітного випромінювання. Проведено їх комп'ютерне моделювання, проаналізовано отримані технічні характеристики. Запропоновано оптимальний варіант для використання в антенній решітці нагрівного стенду.

Рассмотрены варианты излучателей для коротковолновой антенной решетки зенитного излучения. Проведено их компьютерное моделирование, проанализированы полученные технические характеристики. Предложен оптимальный вариант для использования в антенной решетке нагревного стенда.

The variants of radiating elements for the HF-antenna array of zenithal radiation are considered. Their computer simulation is realized. The got spec characteristics are analyzed. The optimum variant of radiating elements for application in the HF-antenna array of heating stand is offered.

Введение. В исследованиях ионосферы методом некогерентного рассеяния коротковолновый нагревной стенд используется в качестве инструмента, позволяющего осуществлять искусственное возмущение ионосферной плазмы. В состав нагревного стенда входит широкополосная антенная решетка, предназначенная для излучения в направлении зенита электромагнитных волн линейной либо круговой поляризации большой мощности.

Антенна нагревного стенда Института ионосферы [1, 2] представляет собой синфазную решетку, состоящую из горизонтальных проволочных вибраторов (16 вибраторов в ряду, 16 рядов) и распределительных фидеров. Каждый вибратор запитывается одновременно из двух смежных вершин квадрата с требуемым фазовым сдвигом. Это позволяет при двухканальной схеме питания излучать волны как линейной, так и круговой поляризации правого либо левого направления вращения. Излучатели сгруппированы в группы по 2×2 вибратора. Антенное полотно подвешено на высоте 10 м над поверхностью земли. Под антенной в грунт уложен рефлектор, представляющий собой сетку со стороной ячейки 1,4 м.

Разработка проекта антенны была выполнена в 1981 году. В то время методы компьютерного моделирования антенн еще не получили широкого распространения и разработка велась с использованием инженерных расчетов и изготовления масштабного макета излучателя. Используемый излучатель представляет собой достаточно сложную конструкцию (рис.1а). Он состоит из 56 проводов общей длиной более 660 м, имеет 52 места контакта (пайки) и весит более 160 кг. Последняя цифра имеет немаловажное

значение, поскольку от нее зависит усилие натяжения антенного полотна, величина провисания его проводов и, в конечном счете, высота подвеса антенны над поверхностью земли, оказывающая значительное влияние на характеристики антенны. Современные методы компьютерного моделирования позволяют определить, насколько оптимальной является существующая конструкция излучателя, выяснить возможности ее упрощения при сохранении основных технических характеристик.

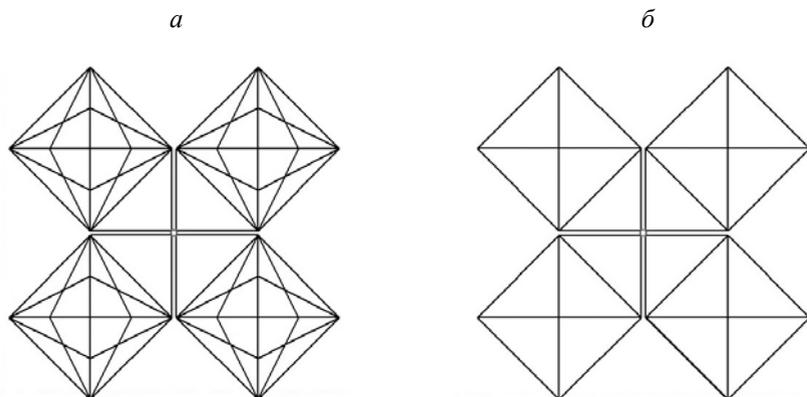


Рис. 1. Излучатели антенной решетки: *а* – существующий, *б* – описанный в [3] (модель 1)

Анализ литературы. Коротковолновые антенные решетки зенитного излучения не нашли широкого распространения в технике связи, где используется излучение в горизонтальном направлении, либо под углом к горизонту. Зарубежные нагревные стенды, как правило, построены по другому принципу, с использованием активных антенных решеток. Работа [3] является одной из немногих, в которой приведены примеры антенн зенитного излучения и их характеристики. В частности, описана более простая конструкция излучателя (рис. 1б) по сравнению с существующим (см. рис. 1а). Согласно описанию, излучатель выполнен из провода диаметром 6 мм. Длина диагонали квадрата составляет $0,395\lambda_0$. Питание подводится к вершинам квадратов с помощью двух систем симметричных фидеров с волновым сопротивлением 600 Ом, которые обеспечивают возбуждение в антенне электромагнитного поля с двумя взаимно-ортогональными поляризациями. При возбуждении фидерных линий со сдвигом фаз, равным 90° , имеет место круговая поляризация. Для изменения направления вращения круговой поляризации достаточно изменить полярность одной из фидерных линий. Приведенные зависимости коэффициента бегущей волны (КБВ) описываемого излучателя в диапазоне

длин волн $(0,85 - 1,15)\lambda_0$ при высоте подвеса $0,154\lambda_0$ и $0,22\lambda_0$ показывают, что более высокие значения КБВ достигаются при высоте подвеса $0,22\lambda_0$. Представляет интерес компьютерное моделирование этой конструкции излучателя с целью определения его основных характеристик в более широком, по сравнению с описанным в [3] диапазоне частот. Кроме того, целесообразно рассмотреть и провести аналогичное компьютерное моделирование других возможных конструкций излучателей, в частности, приведенных на рис. 2.

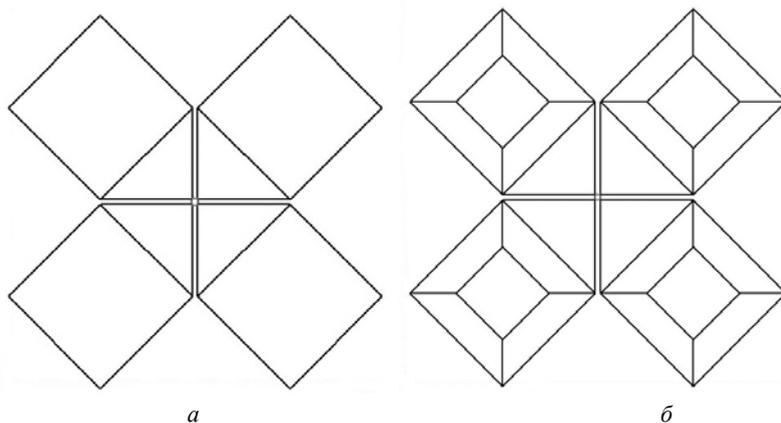


Рис. 2. Излучатели антенной решетки: *а* – модель 2, *б* – модель 3

Габаритные геометрические размеры всех моделей равны и определяются существующим расположением несущих мачт на антенном поле. При этом длина диагонали квадрата излучателя составляет 16 м.

Цель статьи – сравнение характеристик существующего излучателя и предлагаемых моделей, выяснение возможностей упрощения структуры излучателя при сохранении основных технических параметров.

Компьютерное моделирование излучателей проведено с помощью программы MANA-GAL Basic v.3.0.0.15. Расчет производится методом моментов [4]. Материал всех моделей – медь, диаметр провода 6 мм, высота подвеса над уровнем земли – 10 м и 12 м. Поскольку существующая антенна имеет рефлектор, все вычисления в моделях проведены в предположении идеальной земли. Для каждой задаваемой частоты определены: комплексное входное сопротивление, коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) по отношению к заданному волновому сопротивлению фидера, коэффициент усиления антенны, диаграммы направленности (ДН) антенны в азимутальной, угломестной плоскости и трехмерная. Основные результаты моделирования приведены ниже.

На рис. 3 приведены полученные частотные зависимости КСВН модели существующего излучателя и рассматриваемых моделей 1, 2, 3.

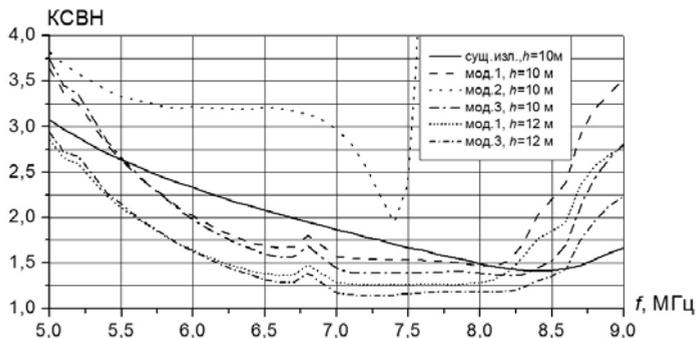


Рис. 3. Частотные зависимости КСВН моделей излучателей

Видно, что существующий излучатель имеет хорошее согласование в средней и верхней части рабочего диапазона частот, однако на нижних частотах его КСВН значительно возрастает и на частоте 5 МГц КСВН > 3.

Излучатель модели 2 (см. рис. 2а) имеет наихудшее согласование и наименьшую полосу рабочих частот. На частотах $f > 7,6$ МГц его КСВН недопустимо высок.

Весьма сходные характеристики КСВН имеют излучатели моделей 1 и 3 (см. рис. 1б, 2б). При высоте подвеса $h = 10$ м по качеству согласования они превосходят существующий излучатель в полосе частот от 5,5 МГц до 8,1 – 8,4 МГц, а при $h = 12$ м – в полосе от 5,0 МГц до 8,2 МГц (модель 1) и до 8,6 МГц (модель 3).

Таким образом, наилучшее качество согласования в рабочем диапазоне частот имеет излучатель модели 3, несколько худшее – модели 1. С точки зрения согласования предпочтительной является высота подвеса $h = 12$ м, однако и при $h = 10$ м характеристики КСВН этих излучателей остаются приемлемыми практически во всем рабочем диапазоне частот.

На рис. 4 приведены полученные частотные зависимости коэффициента усиления G рассматриваемых излучателей.

Представленные зависимости показывают, что при высоте подвеса 10 м излучатели моделей 1 и 3 в полосе частот 5,0 – 8,2 МГц имеют более высокий коэффициент усиления по сравнению с существующим излучателем. Все кривые имеют провал усиления порядка 1,5 – 1,7 дБ с минимумом на частоте 9 МГц для существующего излучателя; 8,4 МГц – для излучателя модели 1; 8,6 – для модели 3. Для излучателя модели 2 коэффициент усиления падает на 2,7 дБ на частоте 7,6 МГц, на более высоких частотах вычисление G не проводилось из-за неприемлемо высокого

КСВН. Увеличение высоты подвеса с 10 до 12 м ведет к уменьшению усиления на величину от 0,25 дБ на частоте 5 МГц до 1,5 дБ на 9 МГц.

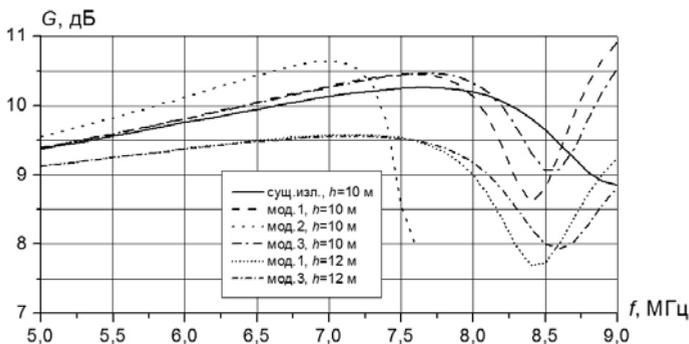


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициента усиления G моделей излучателей

Таким образом, наивысшим коэффициентом усиления в рабочем диапазоне частот обладают излучатели моделей 1 и 3. Более высокие значения коэффициента усиления имеют место при высоте подвеса 10 м.

Диаграммы направленности всех рассматриваемых излучателей являются однолепестковыми, ориентированные максимумом излучения в зенит. На рис. 5 в качестве иллюстрации приведены трехмерные диаграммы направленности излучателя модели 1 при высоте подвеса 12 м на частотах 5, 7 и 9 МГц. Ширина ДН по уровню половинной мощности меняется от 65° на частоте 5 МГц до 58° на частоте 9 МГц. С увеличением частоты происходит сужение ДН в направлении осей X и Y , совпадающих с диагоналями квадратов излучателей, и расширение в направлениях, совпадающих со сторонами квадратов.

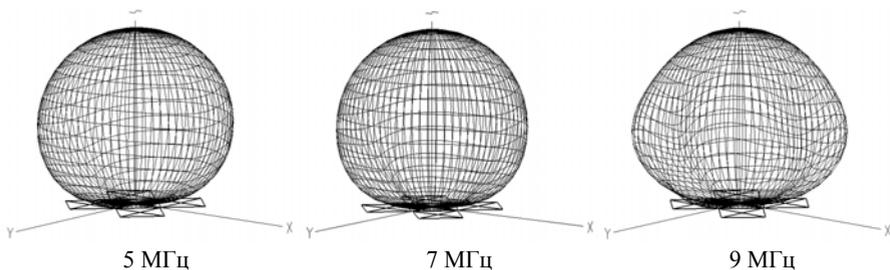


Рис. 5. Трехмерные ДН излучателя модели 1 на частотах 5, 7 и 9 МГц

Оценка материалоемкости рассматриваемых излучателей показала, что она составляет 57 % для модели 1 и 61 % для модели 3 по отношению к существующему варианту.

Выводы. Рассмотренные варианты излучателей моделей 1 и 3 по своим техническим характеристикам могут быть использованы в составе антенной решетки нагревного стенда. Модель 3 является оптимальной по техническим характеристикам, но имеет более сложную конструкцию по сравнению с моделью 1. Для обеспечения максимального коэффициента усиления излучателей следует использовать высоту их подвеса над поверхностью земли $h = 10$ м. Использование предлагаемых излучателей моделей 1 или 3 позволит существенно упростить конструкцию антенной решетки, снизить ее материалоемкость, трудоемкость изготовления и технического обслуживания.

Список литературы: 1. *Богдан А.П., Боговский В.К., Дивавин В.В.* Коротковолновый нагревной стенд // Вестник Харьковского политехнического института. Исследование ионосферы методом некогерентного рассеяния. – 1986. – № 234, вып. 4. – С. 16 – 17. 2. *Рогожкин Е.В., Боговский В.К., Смирнов А.Н., Герштейн Л.Я.* Предварительные результаты исследования воздействия КВ-нагрева на ионосферу // Вестник Харьковского политехнического института. Исследование ионосферы методом некогерентного рассеяния. – 1987. – № 248, вып. 5. – С. 47 – 49. 3. Коротковолновые антенны / *Айзенберг Г.З., Белоусов С.П., Журбенко Э.М.* и др.; под ред. *Айзенберга Г.З.* – 2-е, перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1985. – 536 с. 4. *Гончаренко И.В.* Антенны КВ и УКВ. Часть 1. Компьютерное моделирование. MMANA. – М.: ИП РадиоСофт, Журнал “Радио”, 2004. – 128 с.

Поступила в редколлегию 12.09.2011

Н.С. ЛЯШЕНКО, учитель физики, Харьковская общеобразовательная школа I–III степеней № 41 Харьковского горсовета Харьковской обл.

ОПТИЧЕСКАЯ БИСТАБИЛЬНОСТЬ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СПОНТАННЫХ РЕШЁТОК В ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ВОЛНОВОДНЫХ СЛОЯХ

Представлено результати досліджень прояв ефекту оптичної бістабільності при формуванні спонтанних ґраток у фоточувливих хвилевідних шарах. Отримано, що подвійна структура дифракційних рефлексів від спонтанних ґраток є наслідком ефекту оптичної бістабільності.

Представлены результаты исследований проявления эффекта оптической бистабильности при формировании спонтанных решеток в фоточувствительных волноводных слоях. Получено, что двойная структура дифракционных рефлексов от спонтанных решеток является следствием эффекта оптической бистабильности.

Investigation results of display of the optical bistability effect at formation of spontaneous lattices in photosensitive wave-guide layers are presented. It is received that the double structure of diffraction reflexes from spontaneous lattices is a consequence of the optical bistability effect.

Введение. Задача дифракции электромагнитной волны на периодической структуре актуальна, по всей видимости, с момента изобретения дифракционной решетки в 1786 г. астрономом Риттенгаузером, в виде натянутых на рамку параллельных тонких проволок. В настоящее время такая задача представляет интерес для интегральной оптики, когда, по крайней мере, одна из волн оказывается модой волновода.

В классической физической оптике распределение светового поля при рассеянии или дифракции, отражении или преломлении определяется тем, как распределено в пространстве вещество.

Существенно иная ситуация реализуется в нелинейной оптике, когда под влиянием излучения, обычно достаточно мощного лазерного, изменяются характеристики самого вещества, например его показатель преломления. Наиболее известными в этом смысле являются так называемые керровские среды. Именно такое поведение показателя преломления приводит к известным нелинейно-оптическим эффектам третьего порядка (самофокусировка, самодефокусировка). Изменение показателя преломления вещества внутри резонатора Фабри-Перо порождает еще один нелинейно-оптический эффект – оптическую бистабильность в уровне пропускания излучения при его прохождении через такой резонатор.

Обращение к задаче дифракции обусловлено исследованиями спонтанных решеток (СР), которые формируются в волноводных фоточувствительных пленках под действием лазерного излучения. Причиной возникновения таких решеток является нелинейно-оптический отклик вещества пленки на интерференционную картину, неизбежно возникающую

при суперпозиции поля лазерного пучка с полями рассеянных в пленке волноводных мод [1 – 8].

Целью данной работы является изложение результатов исследования оптической бистабильности в уровне дифракционной эффективности на решетке, помещенной внутри нелинейного волноводного слоя.

Результаты данной работы получены в ходе выполнения магистерского проекта на кафедре физической оптике физического факультета ХНУ имени В.Н. Каразина в 2008 г.

Описание экспериментальной методики. Для проведения исследования использовались волноводные пленки хлористого серебра (AgCl) с добавкой серебра (Ag). Пленки AgCl (толщиной ~ 100 нм) и Ag (толщиной ~ 10 нм) последовательно напылялись в вакуумной установке при давлении $\sim 10^{-5}$ мм рт. ст. на стеклянную подложку. Для более равномерного распределения серебра в матрице AgCl образец после напыления облучался “белым” светом от лампы накаливания.

О равномерном распределении гранул Ag внутри хлористого серебра свидетельствует полоса поглощения в спектре оптической плотности, свидетельствующая о плазменном резонансе для колебаний электронов внутри мельчайших гранул серебра, окруженных диэлектриком AgCl. Этот резонанс имеет максимум при $\lambda \sim 500$ нм. Кроме того, на коротковолновом крыле полосы наблюдается более слабый резонанс при $\lambda = 380$ нм, который можно связать с плазменным резонансом в гранулах Ag, находящихся на поверхности пленки AgCl [1].

Толщина пленки измерялась методом линий равного хроматического порядка. Для образца эта толщина оказалась равной 122 нм.

Запись спонтанных решеток производилась по схеме, приведенной на рис. 1.

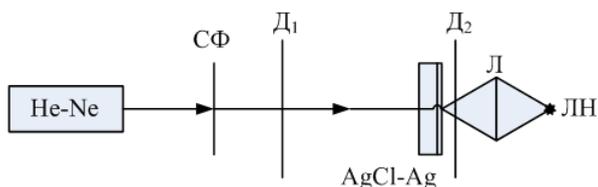


Рис. 1. Схема записи СР в фоточувствительных волноводных пленках AgCl-Ag

Фоточувствительная волноводная пленка AgCl-Ag одновременно облучалась некогерентным “белым” светом от лампы накаливания (ЛН), способствующим однородному распределению гранул серебра в пленке, т.е. стирающим, создаваемым лазерным излучением структуру. С помощью светофильтров (СФ) регулировалась интенсивность записывающего

излучения, интенсивность “белого” света контролировалась по силе тока через ЛН. Процесс записи СР в такой схеме становится обратимым (как и классические нелинейно-оптические эффекты): если лазерный пучок выключается, СР постепенно разрушаются под действием света от ЛН.

Сначала на образце записывались СР, используя неослабленный лазерный пучок ($P = 6 - 7$ мВт) при различных фиксированных интенсивностях света от ЛН. Для всех пятен в этой серии экспозиция от лазерного излучения подбиралась приблизительно одной и той же.

На образце записывались СР в зависимости от интенсивности лазерного пучка (использовались светофильтры, ослабляющие пучок примерно в 1,4; 1,5; 1,6; 2; 3 раза) при экспозиции $\sim 2 \cdot 10^4$ Дж/см² и интенсивности света от ЛН $\sim 2,65$ Вт/см².

Мощности используемых в эксперименте излучений определялись измерителем мощности ИМО-2Н, при этом интенсивность света от ЛН определялась по размеру изображения нити накала на образце ($\sim 4 \times 2,5$ мм²).

Образец после записи решеток в виде серий пятен (при различных интенсивностях ЛН) обрабатывались в фиксаже для удаления AgCl и устранения светочувствительности. Средние значения периодов СР по центру каждого пятна измерялись по схеме автоколлимационной дифракции (см. рис. 2).

Луч He-Ne лазера фокусировался линзой Л в центре пятна с записываемой решеткой. Дифракционный рефлекс от решетки наблюдается на экране Э навстречу пучку. По углу поворота образца ϕ , измеряемому на столике гониометра Г, определяется период, как

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \phi}.$$

Для наблюдения дифракции использовался He-Ne – лазер ($\lambda = 632,8$ нм).

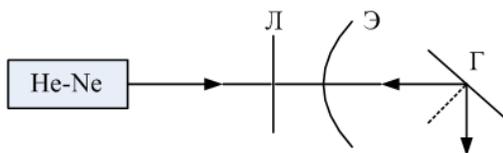


Рис. 2. Схема измерения периода при автоколлимационной дифракции. На рисунке буквами обозначены: Л – фокусирующая линза; Э – экран; Г – гониометр с образцом

Обсуждение результатов эксперимента. Ранее была решена задача рассеяния–дифракции плоской монохроматической волны на структуре из накладывающихся друг на друга решеток внутри волноводного слоя с возбуждением из-за этой дифракции–рассеяния волноводных мод. Было

показано, что поле $\Psi^s(\vec{r}, z)$ рассеянных волноводных мод определяется следующим выражением:

$$\Psi^s(\vec{r}, z) = -i \frac{8\pi\beta_0\alpha k_0^2}{(\partial\rho/\partial\beta)_{\beta=\beta_0}} V(t) Z_\uparrow(z) \sum_{\vec{\beta}_s} \frac{N\vec{K}}{\beta_s^2 - \beta_0^2 + 2i\gamma\beta_0} e^{-i\vec{\beta}_s\vec{r}}, \quad (1)$$

где β_0 – постоянная распространения волноводной моды, $k_0 = \omega/c$ – величина волнового вектора в вакууме, $V(t)$ – функция толщины пленки, которую можно определить через амплитуду падающей и отраженной от слоя волн, $Z_\uparrow(z)$ – функция поперечного распределения амплитуды волноводной моды в волноводе, $(\partial\rho/\partial\beta)_{\beta=\beta_0}$ – функция толщины волноводной пленки и поперечных волновых чисел, α – поляризуемость рассеивающего центра, $N(\vec{\beta}_s - \vec{k}_h)$ – амплитуда концентрации рассеивающих центров в дифракционной решетке с волновым вектором $\vec{K} = \vec{\beta}_s - \vec{k}_h$, $\vec{\beta}$ – волновой вектор рассеянной моды, \vec{k}_h – проекция волнового вектора $\vec{k}_i = (\vec{k}_h, k_z)$ падающей плоской волны на слой [1 – 8].

Выражение (1) показывает, что поле рассеянных волноводных мод внутри пленки является суммой “2-мерных плоских волн”, волновые вектора $\vec{\beta}_s$ каждой из которых определяются проекцией \vec{k}_h , \vec{K}_h в распределении концентрации рассеивающих центров $\vec{\beta}_s = \vec{k}_h + \vec{K}_h$.

Однако не все из указанных плоских волн равноправны из-за наличия множителя $N(\vec{K}_h) / (\beta_s^2 - \beta_0^2 + 2i\gamma\beta_0)$.

В теории вынужденных колебаний такой вид зависимости амплитуды колебаний от частоты вынужденной силы описывает явление резонанса. В нашем случае имеем “пространственно частотный” резонанс и β_s , β_0 , γ имеют смысл волновых чисел.

Существует аналогия задачи о возбуждении моды поля с вынужденной частотой β_s с задачей о вынужденных колебаниях гармонического осциллятора. Учитывая эту аналогию, можно записать уравнение связи амплитуды a поля в пленке с вынужденной волной поляризации s :

$$\frac{da}{dx} = (-i\beta_a + \gamma)a + \kappa. \quad (2)$$

Здесь γ характеризует затухание моды, κ – коэффициент связи с вынуждающей “внешней” волной; $\beta_a = \beta_0(1 - \kappa|a|^2)$.

Будем искать “стандартные” решения в виде: $s = Se^{-i\beta_s x}$, $a = Ae^{-i\beta_a x}$. Тогда

$$-i\beta_s Ae^{-i\beta_s x} = (-i\beta_a + \gamma)Ae^{-i\beta_a x} + \kappa Se^{-i\beta_s x}$$

или

$$(-i[\beta_s - \beta_a - \gamma])A = \kappa S, \quad (3)$$

$$(i[\beta_s - \beta_a - \gamma])A^* = \kappa S^*. \quad (4)$$

Перемножая (3) и (4), получим

$$(\beta_s - \beta_a)^2 + \gamma^2 = \kappa^2 S^2. \quad (5)$$

Введем новые переменные:

$y = |A|^2 \geq 0$ – интенсивность поля волноводной моды;

$0 \leq x = \kappa^2 |S|^2$ – интенсивность внешней волны с точностью до постоянного множителя. Тогда можем переписать уравнение (5) в следующем виде:

$$x(y) = y \left[\kappa^2 \beta_0^2 y^2 - 2\kappa \beta_0 (\beta_s - \beta_0) y + (\beta_s - \beta_0)^2 + \gamma^2 \right]. \quad (6)$$

При малых ($y \rightarrow 0$) интенсивностях внешней волны в пленке из-за дифракции на решетке возбуждаются моды малой амплитуды:

$$|A|^2 = \frac{\kappa^2}{(\beta_s - \beta_0)^2 + \gamma^2} |S|^2.$$

Зависимость $x(y)$, даваемое уравнением (6), легко исследуется на наличие экстремумов, что дает уравнение

$$y^2 - \frac{4}{3\kappa} \left(1 - \frac{\beta_s}{\beta_0} \right) y + \frac{1}{3\kappa^2} \left(\frac{\gamma^2}{\beta_0^2} + \left(\gamma^2 - \frac{\beta_s}{\beta_0} \right)^2 \right) = 0$$

и его решения:

$$y_{1,2} = \frac{2}{3\kappa} \left(1 - \frac{\beta_s}{\beta_0} \right) \pm \sqrt{\frac{1}{9\kappa^2} \left(1 - \frac{\beta_s}{\beta_0} \right)^2 - \frac{\gamma^2}{3\kappa^2 \beta_0^2}} = 0.$$

Интенсивности волноводной моды (наибольшая на нижней ветви соответствует знаку “–”; наименьшая на верхней ветви соответствует знаку “+”):

$$|A_{1,2}| = \frac{\beta_0 - \beta_s}{3\kappa \beta_0} \left(2 \pm \sqrt{1 - \frac{3\gamma^2}{(\beta_0 - \beta_s)^2}} \right). \quad (7)$$

Ситуация изменится при дальнейшем росте интенсивности $|S|^2$ внешней волны. При значениях больше некоторого $|S_1|^2$ возможен более высокий по интенсивности уровень возбуждения волноводной моды, наряду с низким “начальным” уровнем. Именно с наличием этих двух возможностей для возбуждения волноводной моды объясняется бистабильность. Различие в пространственных частотах возбуждаемых волноводных мод можно оценить по формуле:

$$\Delta\beta \sim \frac{2}{3} \sqrt{(\beta_0 - \beta_s)^2 - 3\gamma^2}.$$

Из-за керровской нелинейности возникает также скачок $\Delta\beta$ резонансного значения постоянной распространения волноводной моды.

В приближении слабого поглощения $\gamma \rightarrow 0$ разным уровням возбуждения мод соответствуют разные постоянные распространения. Используя (7) и выражение для резонансной частоты

$$\beta_{0_{1,2}} = \beta_0 \left(1 - \kappa |A_{1,2}|^2 \right)$$

получаем значения резонансных частот

$$\beta_{0_1} = \beta_s, \quad \beta_{0_2} = \frac{2\beta_0 + \beta_s}{3}. \quad (8)$$

Это соотношение можно проверить в эксперименте, измеряя периоды зарождающихся решеток $d_0 = (2\pi)/\beta_0$, периоды наиболее развитых решеток $d_s = (2\pi)/\beta_s$ соответствуют верхней ветви бистабильности, и периоды более слабых решеток d_{0_2} соответствуют нижней ветви бистабильности.

После записи спонтанных решеток с достаточно большими экспозициями (порядка 10^4 Дж/см²), и их закрепление в схеме автоколлимационной дифракции наблюдались и изучались дифракционные рефлексы от СР.

Выполнена запись серии пятен при мощности лазера $P = 6$ мВт, но с использованием различных интенсивностей света от ЛН, которая регулировалась за счет величины тока через лампу. Использовались токи: 4, 5 и 6 А. Также записывалось пятно без использования подсветки.

На фотографиях (рис. 3) приведен вид дифракционных рефлексов от решеток в центре пятен и при смещении пробного пучка на периферию.

Видно, что на всех пятнах присутствуют решетки, дифракционные рефлексы от которых имеют характерную двойную структуру. Наличие этой двойной структуры рассматриваем как проявление эффекта бистабильности при формировании СР.

По вышеописанной процедуре на участках с решетками, записанными при подсветках 4, 5 и 6 А, измерялись периоды зарождающихся решеток d_0 , и периоды d_s и d_{0_2} решеток, дающие двойные дифракционные рефлексы.

Данные эксперимента сведены в таблице. По значениям d_s и d_{0_2} можно рассчитать, используя вторую из формул (8), теоретическое значение d_{0_2} , которое также приведено в таблице. Видим хорошее соответствие расчетных и экспериментальных значений d_{0_2} в пределах погрешности менее 1 %.

Последнее обстоятельство свидетельствует в пользу нашей трактовки двойной структуры дифракционных рефлексов, как проявление оптической бистабильности при возбуждении волноводных мод с помощью лазера на решетках внутри волноводного слоя с нелинейностью.

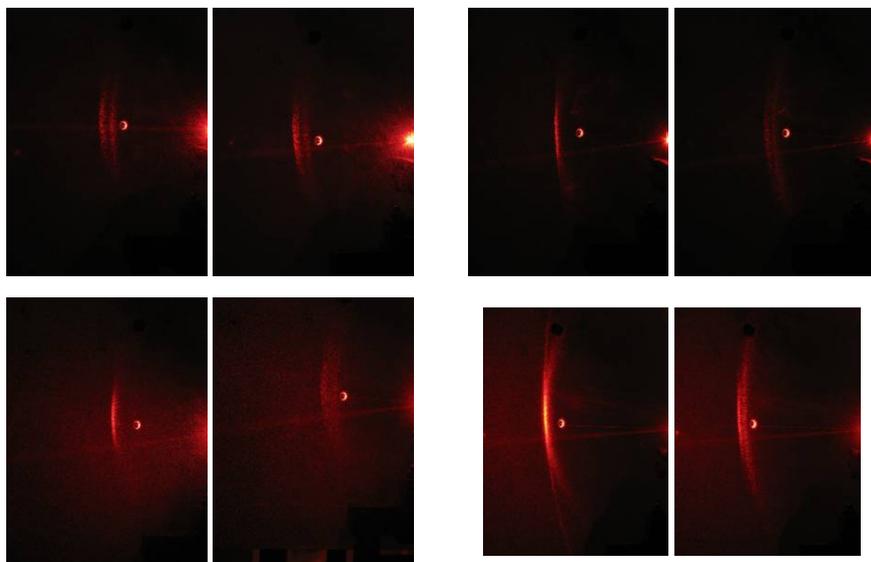


Рис. 3. Фотографии дифракционных рефлексов от решеток в центре пятен и при смещении пробного пучка на периферию

Таблица
Периоды зарождающихся решеток d_0 и периоды решеток d_s и d_{0_s} , дающие двойные дифракционные рефлексы

| I, A | эксперимент | | | теория |
|---------------|------------------|------------------|----------------------|----------------------|
| | $d_0, \text{нм}$ | $d_s, \text{нм}$ | $d_{0_s}, \text{нм}$ | $d_{0_s}, \text{нм}$ |
| 4 | 353 | 371 | 363 | 359 |
| 5 | 358 | 372 | 362 | 363 |
| 6 | 359 | 373 | 362 | 363 |

Выводы. В ходе работы получены следующие результаты.

1. Получены дифракционные рефлексы от спонтанных решеток в центре пятен и при смещении пучка на периферию.
2. Экспериментальным путем обнаружено, что дифракционные рефлексы от спонтанных решеток имеют характерную двойную структуру, наличие которой является следствием эффекта бистабильности при формировании спонтанных решеток.
3. Измерены периоды зарождающихся решеток d_0 и периоды d_s и d_{0_s} решеток, дающие двойные дифракционные рефлексы.

4. Выполнен теоретический расчет периодов d_{0_1} . Получено хорошее соответствие расчетных и экспериментальных значений d_{0_1} в пределах погрешности менее 1 %

Автор благодарит сотрудников кафедры физической оптики физического факультета ХНУ имени В.Н. Каразина д-ра физ.-мат. наук, проф. Агеева Л.А., д-ра физ.-мат. наук, проф. Милославского В.К., ст. преподавателя Лымаря В.И. за руководство и помощь в ходе выполнения магистерского проекта, а также д-ра физ.-мат. наук, проф. Черногора Л.Ф. за ценные замечания и помощь в подготовке настоящей статьи.

Список литературы: 1. Лымарь В.И., Милославский В.К., Агеев Л.А. Временная эволюция спонтанных решеток в светочувствительных пленках AgCl-Ag // Оптика и спектроскопия. – 1997. – Т. 83, № 6. – С. 995 – 1000. 2. Лымарь В.И., Милославский В.К., Агеев Л.А. Эволюция периода спонтанных решеток в волноводных светочувствительных пленках // Оптика и спектроскопия. – 1992. – Т. 72, № 3. – С. 751 – 756. 3. Kivshar Y.S., Argaval G.P. Optical solution. From Fibers to photonic Crystal // Academic Press, Elsevier Sci. – 2003. – 510 p. 4. Агеев Л.А., Милославский В.К. Светоиндуцированные спонтанные решетки в волноводных пленках // Физическая инженерия поверхностей. – 2003. – Т. 1, № 1. – С. 59 – 81. 5. Агеев Л.А., Милославский В.К. Фотоиндуцированные периодические структуры в светочувствительных слоях // Квантовая электроника (Киев). – 1990. – Вып. 38. – С. 28 – 56. 6. Агеев Л.А., Милославский В.К., Нуреддин Ассад. Спектральные свойства фотоиндуцированных периодических структур в светочувствительных пленках AgCl-Ag // Оптика и спектроскопия. – 1988. – Т. 65, № 1. – С. 147 – 154. 7. Агеев Л.А., Милославский В.К., Эльаишаб Х.И., Блоха В.Б. Учебные эксперименты и демонстрации по оптике. – Харьков: Институт монокристаллов, 2000. – 262 с. 8. Милославский В.К. Нелинейная оптика: Учебное пособие. – Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2008. – 312 с. 9. Агеев Л.А., Маковецкий Е.Д., Милославский В.К. Спонтанные S-решетки и особенности их зарождения и развития в светочувствительных пленках AgCl-Ag // Оптика и спектроскопия. – 2006. – Т. 100, № 2. – С. 328 – 336.

Поступила в редколлегию 30.06.2011

А.В. БОГОМАЗ, н.с., Институт ионосферы, Харьков

Д.В. КОТОВ, н.с., Институт ионосферы, Харьков

ПРОВЕРКА АЛГОРИТМА КОРРЕКЦИИ ПРОФИЛЯ МОЩНОСТИ НЕКОГЕРЕНТНО РАССЕЯННОГО СИГНАЛА

Описано алгоритм корекції, що запропоновано для покращення висотного розрізнення при визначенні профілю потужності некогерентно розсіяного сигналу за допомогою простого довгого зондуючого імпульсу, та підтверджено його ефективність.

Описан алгоритм коррекции, предлагаемого для улучшения высотного разрешения при определении профиля мощности некогерентно рассеянного сигнала с помощью простого длинного зондирующего импульса, и подтверждена его эффективность.

The algorithm of correction, proposed to improve high-altitude resolution in determining the power profile of incoherent scatter signal using a simple long probe pulse is described. The effectiveness of this algorithm is confirmed.

Введение. При определении высотных распределений параметров ионосферы с помощью простых длинных сигналов высотное разрешение, пропорциональное длительности импульса, в большинстве случаев является неудовлетворительным (так как величина высоты однородной атмосферы H_p обычно меньше интервала высот, занимаемого импульсом $cT_n/2$). Вследствие этого в общем случае могут возникать искажения оценок измеряемых параметров ионосферной плазмы. Так, при использовании длинного зондирующего импульса ($T_n = 663$ мкс) величина высоты максимума распределения мощности некогерентно рассеянного (НР) сигнала переоценивается до нескольких десятков километров, а значение мощности недооценивается до нескольких десятков процентов [1]. Очевидно, что такая погрешность носит систематический характер и приводит к погрешностям определения параметров плазмы, прежде всего концентрации электронов [2].

В подобной ситуации для повышения разрешающей способности либо применяются сложные сигналы (что не всегда возможно и оправдано) [3], либо же сложные алгоритмы коррекции результатов, полученных с использованием простых зондирующих сигналов. Наиболее эффективным и корректным из таких алгоритмов является “full-profile” анализ [4].

Цель статьи – предварительное тестирование алгоритма, основанного на “full-profile” подходе, и использующего в процессе коррекции распределений мощности двумерную функцию неопределённости (ДФН), рассчитанную для одного из действующих режимов работы радара НР Института ионосферы [5].

Суть алгоритма коррекции. Предлагаемая коррекция заключается в подборе такого теоретического распределения мощности, которое, будучи пропущенным через математическую модель измерительного канала, учитывающую специфику процесса НР и все существенные аппаратные характеристики (форму импульсной характеристики радиоприёмного устройства, форму огибающей зондирующего сигнала и др.), даст результат, наилучшим образом согласующийся (например, по критерию наименьшего среднеквадратического отклонения) с экспериментальными результатами [6].

Проверка эффективности алгоритма. Для проверки эффективности алгоритма коррекции профиля мощности было проведено моделирование, основные этапы которого заключались в следующем.

1. Выбор исходного (“реального”) профиля мощности НР сигнала.

Был выбран усреднённый на интервале 15 мин профиль мощности, полученный во время измерений 15 декабря 2009 г. На рис. 1 этот профиль показан сплошной линией.

2. Получение “экспериментального” профиля мощности НР сигнала.

“Экспериментальный” профиль $P'(H)$ был получен путём пропускания исходного профиля мощности $P(H)$ через математическую модель измерительного канала. На рис. 1 он показан прерывистой линией. В условиях реальных измерений имеются лишь такие, “экспериментальные”, профили мощности.

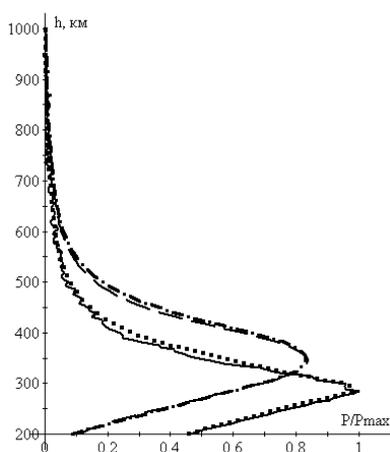


Рис. 1. Высотное распределение мощности НР сигнала. Сплошной линией показан “реальный” профиль, прерывистой линией – “экспериментальный”, точками – восстановленный профиль, штрих-пунктиром – восстановленный профиль, пропущенный через математическую модель измерительного тракта

Пропускание исходного профиля мощности через математическую модель измерительного канала заключалось в свёртке этого профиля с ДФН радара НР $A(h, \tau)$, показанной на рис. 2, по следующей формуле:

$$P'(H) = \frac{\int_{h=0}^{h_0} P(H-h)A(h, \tau=0)dh}{\int_{h=0}^{h_0} A(h, \tau=0)dh},$$

где h_0 – высота, выше которой ДФН $A(h_0, \tau = 0)$ имеет только нулевые значения.

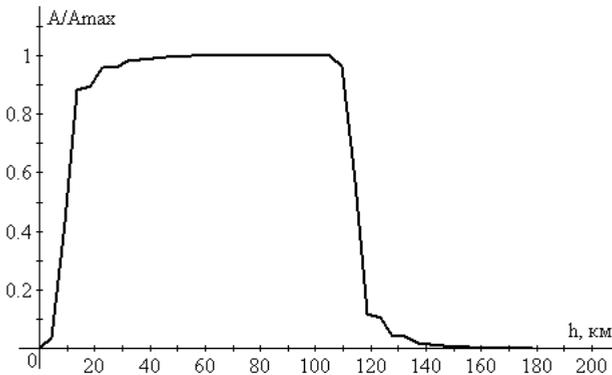


Рис. 2. ДФН для мощности ($\tau = 0$)

3. Поиск теоретического профиля, который будучи пропущенным через ту же математическую модель измерительного канала наилучшим образом согласуется с “экспериментальным” профилем.

В результате ранее проведенного моделирования [1] было установлено, что максимум “экспериментального” профиля мощности $P'(H)$ по сравнению с “реальным” $P(H)$ всегда завышен примерно на одно и то же значение. Учёт этого обстоятельства позволил сократить количество задаваемых вариантов теоретического профиля.

Исходный теоретический профиль получается из “экспериментального” путём его корректировки по высоте. Далее выбираются узлы, в которых будут варьироваться значения мощности. В качестве главного узла выбирается максимум профиля, остальные узлы берутся ниже и выше максимума. Значения мощности на всех высотных интервалах вне ограниченного узлами участка жёстко фиксируются.

Так как увеличивать узлов нецелесообразно вследствие роста времени перебора, значения мощности между узлами теоретического профиля рассчитываются с помощью интерполяции В-сплайнами.

Выводы. Моделирование показало, что удовлетворительные результаты описанный метод даёт даже в случае выбора трёх узлов (главный узел – в максимуме скорректированного профиля, и по узлу выше и ниже главного на 22 км). Мощности в узлах варьировались в пределах от 80 до 160 % от их первоначального значения с шагом 10 %.

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности используемого алгоритма. Например, из рис. 1 следует, что коррекция позволила уточнить максимальное значение мощности до 20%; как результат устраняется двадцатипроцентное смещение оценок концентрации электронов для всего профиля.

Таким образом, применение предложенного алгоритма целесообразно для ощутимого повышения точности определения параметров ионосферы методом НР.

Список литературы: 1. *Лысенко В.Н.* Измерение параметров ионосферы средствами корреляционной обработки некогерентно рассеянного сигнала // Радиофизика и электроника. – 2002. – Т. 7, № 1. – С. 82 – 88. 2. *Эванс Дж.* Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн // ТИИЭР. – 1969. – Т. 57, № 4. – С. 139 – 175. 3. *Рогожкин Е.В., Пуляев В.А.* Измерение параметров ионосферы с использованием фазовой модуляции несущей // Вестник Харьковского политехнического института. – 1986. – № 234, вып. 4. – С. 30 – 34. 4. *Holt J.M., Rhoda D.A.* Optimal analysis of incoherent scatter radar data // Radio Sci. – 1992. – P. 435 – 447. 5. *Сюсюк М.Н., Котов Д.В., Богомаз А.В.* Моделирование двумерной функции неопределенности радара некогерентного рассеяния // (см. статью в этом сборнике) 6. *Богомаз А.В., Котов Д.В., Ярков Е.И.* Восстановление профиля мощности сигнала некогерентного рассеяния // Конференция молодых учёных “Дистанционное радиозондирование ионосферы (ИОН–2011)” (Харьков, Украина, 12 – 15 апреля 2011 г.). – Сборник тезисов. – 2011. – С. 34.

Поступила в редколлегию 19.09.2011

С.В. ГРИНЧЕНКО, н.с., Институт ионосферы, Харьков

ПОСТРОЕНИЕ ВЕКТОРНОГО ПОЛЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ НЕЙТРАЛЬНЫХ ВЕТРОВ

Рух заряджених частинок іоносферної плазми вздовж ліній магнітного поля Землі відбувається, зокрема, під дією горизонтальних вітрів частинок нейтральної атмосфери. Для аналізу варіацій нейтральних вітрів запропоновано алгоритм побудови планетарного розподілу векторів швидкостей, реалізований у середовищі Visual Fortran. Аналіз векторного поля вітрів показує сезонні відмінності поведінки нейтральних вітрів, що мають вплив на формування висотного профілю електронної концентрації.

Движение заряженных частиц ионосферной плазмы вдоль линий магнитного поля Земли происходит, в частности, под действием горизонтальных ветров частиц нейтральной атмосферы. Для анализа вариаций нейтральных ветров предложен алгоритм построения планетарного распределения векторов скоростей, реализованный в среде Visual Fortran. Анализ векторного поля ветров показывает сезонные различия поведения нейтральных ветров, оказывающие влияние на формирование высотного профиля электронной концентрации.

The motion of ionospheric plasma charge particles along the Earth's magnetic field occurs, in particular, under the influence of horizontal neutral particle winds. To analyze the variations of neutral winds, an algorithm for the construction of the planetary distribution of velocity vectors is offered. It's realized in Visual Fortran environment. The wind vector field analysis shows seasonal distinctions of the neutral wind behaviour, influencing formation of electron density high profile.

Постановка задачі. Одно из направлений исследования ионосферы – это изучение явлений переноса плазмы. При изучении этих явлений различают движение нейтральной среды и движение ионизированной компоненты ионосферной плазмы. Движение плазмы определяется, во-первых, диффузией ионов в нейтральной среде. Во-вторых, горизонтальное движение нейтральных ветров вынуждает заряженные частицы плазмы двигаться вдоль магнитных линий. В-третьих, на заряженные частицы плазмы оказывают влияние электрические поля, генерируемые в так называемой динамо-области. В настоящее время для вычисления скоростей горизонтального движения нейтральных ветров в основном используются различные эмпирические модели. Наибольшее распространение получила модель HWM93. Исходный фортрановский код программы, описывающей эту модель, находится в открытом доступе на официальном сайте NASA.

В данной работе решается две задачи. Первая – разработка алгоритма построения векторного поля нейтральных ветров в географических координатах широты и долготы северного полушария Земли путём пересчёта меридиональной (долготной) и зональной (широтной) составляющих скорости в проекции прямоугольной системы координат экрана компьютера. И вторая – анализ вариаций параметров нейтрального ветра на основе данных, полученных с помощью программы построения поля ветров.

Построение векторного поля нейтральных ветров средствами Фортрана удобно тем, что позволяет в рамках одного фортрановского проекта проводить вычисления и выводить результаты в виде таблиц и графических рисунков. Использование языка Фортран обусловлено 50-летней историей написания программ расчёта параметров ближнего космоса: магнитного поля Земли, характеристик солнечного излучения, температуры и концентраций нейтральных компонент, температур ионов и электронов и других величин.

Horizontal Neutral Wind Model 93 (HWM 93) – эмпирическая модель горизонтального нейтрального ветра. Она основана на данных ветра, полученных с помощью спутниковых измерений. Первая версия модели (HWM87), выпущенная в 1987 году [1], описывала ветры выше 220 км. С включением данных ветра, полученных при помощи радаров некогерентного рассеяния и оптических интерферометров, модель HWM90 [2] была расширена вниз до 100 км. С использованием метеорных данных новая версия модели HWM93 [3] была расширена до поверхности Земли. Модель учитывает вариации солнечной активности и магнитного поля Земли.

Модель HWM93 позволяет рассчитывать меридиональный ветер (положительное значение обозначает северное направление) и зональный ветер (положительное значение которого соответствует восточному направлению). Входными параметрами модели являются номер дня в году, высота, географические широта и долгота, истинное время, усреднённый индекс $F_{10.7}$ солнечной активности, индекс $F_{10.7}$ в предыдущий день, магнитный индекс A_p .

Построение векторного поля горизонтальных нейтральных ветров.

Координаты точки расчёта значений компонент вектора скорости нейтрального ветра по модели HWM93 – это географические широта φ (для северного полушария $0 \leq \varphi < \pi/2$) и долгота λ ($0 \leq \lambda < 2\pi$). Начало прямоугольных координат x, y экрана находится в верхнем левом углу. Пусть северный полюс имеет экранные прямоугольные координаты x_0, y_0 . Считая координату φ измеряемой в линейных единицах длины (см. рис. 1), получаем соотношения между координатами φ, λ и x, y :

$$\begin{cases} x = x_0 - r \cos \lambda = x_0 - \left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) \cos \lambda \\ y = y_0 + r \sin \lambda = x_0 + \left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) \sin \lambda \end{cases}, \text{ где } r = \pi/2 - \varphi.$$

Для проверки написанных формул вычислим x, y при $\lambda = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$:

$$\lambda = 0 \Rightarrow \begin{cases} x = x_0 - r = x_0 - \left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right); \\ y = y_0 \end{cases}$$

$$\lambda = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \begin{cases} x = x_0 \\ y = y_0 + r = x_0 + \left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right); \end{cases}$$

$$\lambda = \pi \Rightarrow \begin{cases} x = x_0 + r = x_0 + \left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right); \\ y = y_0 \end{cases}$$

$$\lambda = \frac{3\pi}{2} \Rightarrow \begin{cases} x = x_0 \\ y = y_0 - r = x_0 - \left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right). \end{cases}$$

Меридиональный ветер – это проекция вектора нейтрального ветра на меридиональные линии, т.е. на направление положительного отсчёта широты φ : $v_{\text{mer}} = v_{\varphi}$. Если $v_{\varphi} > 0$, нейтральный ветер направлен к северному полюсу, при $v_{\varphi} < 0$ нейтральный ветер имеет южное направление. Зональный ветер представляет собой проекцию вектора нейтрального ветра на широтные линии, т.е. на направление положительного отсчёта долготы λ : $v_{\text{zon}} = v_{\lambda}$. Если $v_{\lambda} > 0$, нейтральный ветер направлен с запада на восток, при $v_{\lambda} < 0$ он имеет западное направление.

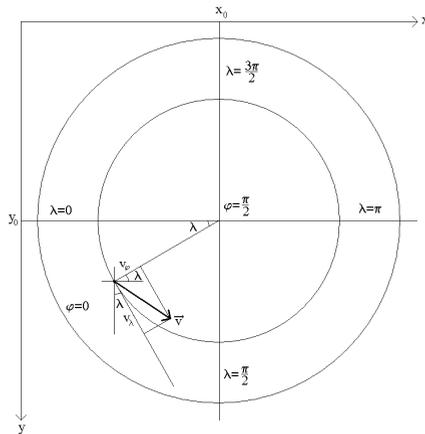


Рис. 1. Построение вектора нейтральной скорости в прямоугольных координатах экрана по его меридиональной и зональной компонентам

Так как $(v_\varphi)_x = v_\varphi \cos \lambda$, $(v_\varphi)_y = -v_\varphi \sin \lambda$,

$$(v_\lambda)_y = v_\lambda \cos \lambda, (v_\lambda)_x = v_\lambda \sin \lambda,$$

то $v_x = (v_\varphi)_x + (v_\lambda)_x = v_\varphi \cos \lambda + v_\lambda \sin \lambda$,

$$v_y = (v_\varphi)_y + (v_\lambda)_y = -v_\varphi \sin \lambda + v_\lambda \cos \lambda.$$

В частности, при $\lambda = 0$ компоненты векторов $(v_\varphi)_x = v_\varphi$, $(v_\varphi)_y = 0$,
 $(v_\lambda)_y = v_\lambda$, $(v_\lambda)_x = 0$.

Рисование стрелок вектора нейтральной скорости в среде Visual Fortran. Написанные формулы позволяют находить начало и конец вектора скорости. Теперь разработаем вопрос построения стрелок вектора \vec{AB} . Точки $A(x, y)$, $B(x_1, y_1)$ являются началом и концом вектора (см. рис. 2). Координаты x_2, y_2 точки C найдём, исходя из того, что $\frac{CB}{AB} = \frac{1}{n}$, где n – любое заданное число. Так как $\frac{x_1 - x_2}{x_1 - x} = \frac{1}{n}$, то $x_2 = x_1 - \frac{x_1 - x}{n}$. Аналогично, $y_2 = y_1 - \frac{y_1 - y}{n}$.

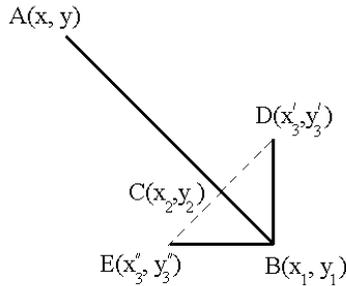


Рис. 2. Координаты концов вектора и стрелок

Выразим координаты точек $D(x'_3, y'_3)$ и $E(x''_3, y''_3)$ – концов стрелок. Так как вектора $\vec{CB} = (x_1 - x_2)\vec{i} + (y_1 - y_2)\vec{j}$ и $\vec{CD} = (x_3 - x_2)\vec{i} + (y_3 - y_2)\vec{j}$ взаимно перпендикулярны, то $\vec{CB} \cdot \vec{CD} = (x_1 - x_2)(x_3 - x_2) + (y_1 - y_2)(y_3 - y_2) = 0$. Из равенства $CB = CD$ следует, что $(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 = (x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2$. Таким образом, для нахождения x_3, y_3 имеем систему уравнений

$$\begin{cases} (x_1 - x_2)(x_3 - x_2) + (y_1 - y_2)(y_3 - y_2) = 0 \\ (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 = (x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2 \end{cases}$$

Решая систему уравнений относительно x_3 и y_3 , получаем

$$x_3 = x_2 \mp (y_1 - y_2), \quad y_3 = y_2 \pm (x_1 - x_2).$$

Полученные формулы позволяют вычислить координаты (x_3', y_3') и (x_3'', y_3'') концов вектора скорости.

Сравнение карты распределения нейтральных ветров северного полушария для зимних и летних условий. На рис. 3 показано распределение векторов горизонтального нейтрального ветра в день зимнего солнцестояния 22 декабря (356-ый день в году) и день летнего солнцестояния 22 июня (173-ий день в году) на высоте 400 км для спокойных условий магнитного поля ($A_p = 2$) и минимума солнечной активности ($F_{10.7} = 100$).

Общим для зимних и летних условий является то, что около полудня ветер направлен к полюсу, а около полуночи – к экватору; скорость ветра больше на ночной стороне, чем на дневной. Следовательно, ветер дует от тёплой части атмосферы (полуденный сектор) к холодной (ночной сектор) через полярные области и зонально вокруг Земли на низких широтах. На планетарное распределение нейтральных ветров оказывают влияние “приливные” волны солнечного и лунного происхождения, кориолисова сила и другие эффекты.

В работе [4] отмечается существование вертикального нейтрального ветра. При этом, если в области D вертикальные движения очень медленные (от 1 см/с до 1 м/с), а на высотах около 300 км скорость вертикального ветра равна примерно 2 – 3 м/с, причём днём он направлен вверх, а ночью – вниз. Вертикальные скорости связаны с существенным на высотах ионосферы нагреванием и охлаждением.

Для исследования вопроса влияния горизонтальных нейтральных ветров на состояние ионосферы на широте расположения измерительного комплекса некогерентного рассеяния Института ионосферы существенным является то обстоятельство, что в околополуденное время на высотах выше 300 км меридиональный ветер в зимнее и летнее время имеет противоположные направления. В зимнее время меридиональная составляющая нейтрального ветра направлена к полюсу, а летом – к экватору.

Вертикальная составляющая скорости движения ионов O^+ , доминирующих в F2-области, $v_z = v_{\text{диф}} + v_{\text{эл}} + v_{\text{маг}}$. Вертикальная составляющая скорости диффузии $v_{\text{диф}}$ определяется концентрацией ионов O^+ , температурами ионов и электронов, ион-нейтральными соударениями. Вертикальная составляющая скорости движения ионов, обусловленная дрейфом заряженных частиц в геомагнитном поле, $v_{\text{маг}} = v_{\text{мер}} \sin I / \cos I$, где I – наклонение магнитного поля (в месте расположения Харьковского радара некогерентного рассеяния угол $I \approx -66^\circ$). Зимой меридиональная составляющая $v_{\text{мер}} > 0$, скорость дрейфа отрицательна. Летом на высотах

больше 300 км $v_{\text{мер}} < 0$, скорость дрейфа направлена вверх. Это обстоятельство является основополагающим в объяснении сезонных вариаций электронной концентрации и общей скорости движения плазмы [5, 6, 7].

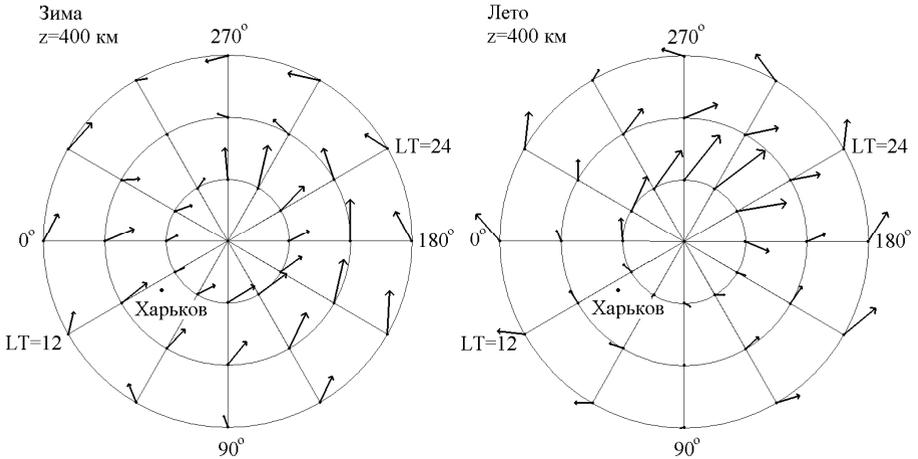


Рис. 3. Планетарное распределение горизонтальных нейтральных ветров в дни зимнего и летнего солнцестояний

Вариации суточного хода горизонтальных ветров в области F среднеширотной ионосферы. Сравним суточный ход ветров в дни зимнего (рис. 4) и летнего (рис. 5) солнцестояний. Величины ветров в период низкой солнечной активности изменяются в пределах от -100 до 100 м/с. Зимой зональный ветер меняет направление с восточного на западное примерно в 5 LT, около 12 LT зональный ветер меняет направление на обратное. Летом зональный ветер принимает восточное направление примерно в 13 LT, но в 20 LT зональный ветер меняет направление. Таким образом, на высотах области F летом зональный ветер имеет восточное направление в течение 7 часов (и 17 часов – западное), а в зимнее время зональный ветер имеет восточное направление в течение 17 часов (соответственно, западное – 7 часов). Меридиональный ветер имеет положительное направление (т.е. от экватора к полюсу) зимой с 6 до 20 LT. В день летнего солнцестояния меридиональный ветер имеет отрицательные значения (т.е. направлен от северного полюса к экватору) и только на высоте 200 км примерно с 10 до 14 LT имеет положительное значение.

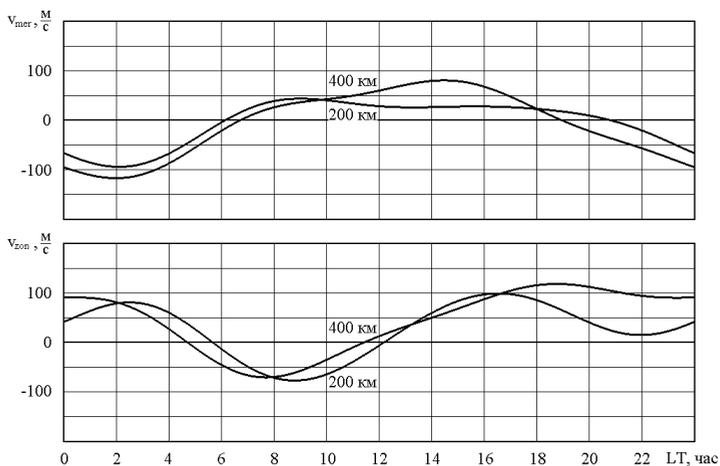


Рис. 4. Суточные вариации меридиональных и зональных ветров в день зимнего солнцестояния

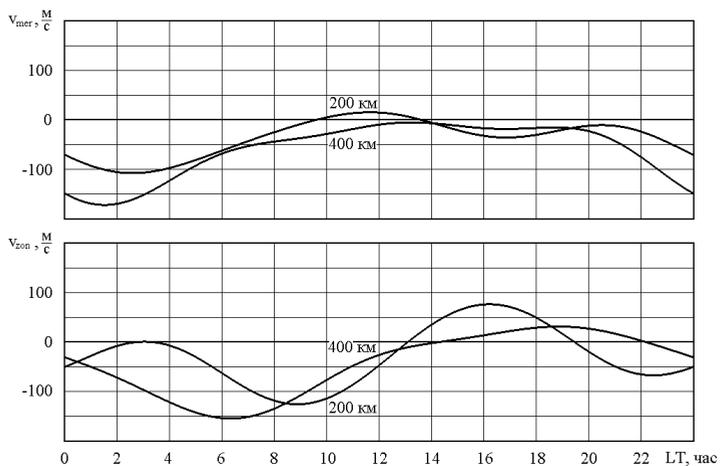


Рис. 5. Суточные вариации меридиональных и зональных ветров в день летнего солнцестояния

Выводы. Анализ планетарного распределения горизонтальных нейтральных ветров показывает сезонные отличия меридионального ветра

нейтральной среды. Зимой меридиональный ветер дует к северному полюсу, вследствие чего скорость дрейфа ионосферной плазмы направлена вниз. Летом на высотах больше 300 км меридиональный ветер дует к экватору, скорость дрейфа направлена вверх.

Список литературы: 1. *Hedin A.E., Spencer N.W., Killeen T.L.* Empirical Global Model of Upper Thermosphere Winds Based on Atmosphere and Dynamics Explorer Satellite Data // *J. Geophys. Res.* – 1988. – V. 93. – P. 9959 – 9978. 2. *Hedin A.E. et al.* Revised Global Model of Thermosphere Winds Using Satellite and Ground-Based Observations // *J. Geophys. Res.* – 1991. – V. 96. – P. 7657 – 7688. 3. *Hedin A.E. et al.* Empirical Wind Model for the Upper, Middle and Lower Atmosphere // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1996. – V. 58. – P. 1421 – 1447. 4. *Казимировский Э.С., Кокуров В.Д.* Движения в ионосфере. – Новосибирск: Наука, 1979. – 344 с. 5. *Rishbeth H.* How the thermospheric circulation affects the ionospheric F2-Layer // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* – 1998. – V. 60. – P. 1385 – 1402. 6. *Гринченко С.В.* Связь скорости переноса плазмы и электронной концентрации области F2 околополюденной ионосферы // *Геомагнетизм и аэронавигация.* – 1992. – Т. 32. – С. 136 – 138. 7. *Гринченко С.В., Емельянов Л.Я., Лысенко В.Н.* Сезонные вариации скорости переноса плазмы околополюденной ионосферы по данным некогерентного рассеяния // *Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье. Сборник научных трудов ХГПУ. Часть третья.* – 1999. – Вып. 7. – С. 337 – 339.

Поступила в редколлегию 12.10.2011

С.С. КОЗЛОВ, аспирант, НТУ “ХПИ”, Харьков

ДАнные И СУБД ДЛя БАЗы ДАНных ХАРьКОВСКОГО РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

Розглянуті дані та вироблена їх класифікація, організація бази даних, зроблено вибір системи управління базою даних.

Рассмотрены данные и произведена их классификация, организация базы данных, произведён выбор системы управления базой данных.

Information is considered and their classification, organization of database, is produced, the choice of the database management system is produced.

Введение. Увеличивающийся объём ионосферных данных, получаемых в Институте ионосферы с помощью радара некогерентного рассеяния и автоматической ионосферной станции “Базис”, привёл к необходимости создания базы данных (БД). Создание БД позволит улучшить информационное обеспечение, повысить быстродействие процесса обработки ионосферных данных измерительного комплекса, появляется возможность с любого рабочего места организации получить доступ к информационному ресурсу, за счёт подключения локальной сети к Internet или создания внутрикорпоративной сети на базе Intranet.

Предложена классификация данных, которые целесообразно хранить в БД Института ионосферы. Рассмотрена структура данных и возможность их оптимального размещения в БД. Предложена система управления БД (СУБД) для БД харьковского радара некогерентного рассеяния и автоматической ионосферной станции “Базис”.

Анализ литературы. Проведённый анализ показал, что данные Института ионосферы, которые предполагается хранить в базе, можно разделить на три группы.

– исходные данные, которые формируются системой первичной обработки радара НР [1] и блоком цифрового преобразования автоматической ионосферной станции “Базис”:

– служебные данные, которые необходимы для корректной обработки исходных данных.

– выходные данные, которые представляют собой высотные и временные распределения значений таких геофизических параметров.

Существующие подходы к созданию модели данных. Одним из этапов проектирования БД является даталогическое проектирование, представляющее собой создание логической структуры данных [2].

Одними из первых таких моделей стали иерархические, сетевые и модели на основе инвертированных списков. Однако сложности их практического использования, увеличение объёма и структурной

сложности хранимых данных привели к широкому распространению реляционных СУБД [4].

Реляционная модель состоит из трёх частей, описывающих разные аспекты реляционного подхода: структурной части, манипуляционной части и целостной части. Преимуществом реляционных БД является наличие мощного и в тоже время простого языка SQL – Structured Query Language, позволяющего выполнять многие необходимые пользователям операции.

Одним из недостатков реляционной СУБД является отсутствие в ней сложных типов данных (таких, как рисунки, графики, диаграммы и т. п.) и абстрактных типов, определяемых пользователем.

Попытка встроить семантику в сам механизм управления БД подтолкнула к созданию объектно-ориентированной модели, в основу которой положены принципы, характерные для объектно-ориентированного программирования: инкапсуляция, полиморфизм и наследование.

Преимуществом объектно-реляционных СУБД является сохранение преемственности с системами предыдущего поколения, а также возможность применения уже зарекомендовавших себя методов хранения информации в реляционных СУБД, возможность использования новых объектно-ориентированных механизмов, повышающих эффективность хранения и обработки данных.

Постановка задачи. В ходе анализа возможности оптимизации системы хранения и обработки радиофизических данных был выявлен существенный недостаток, суть которого заключается в несовершенстве хранения, а именно записи больших объёмов информации (до 10 Гб/сут) после первичной обработки на CD-диски. Современная система хранения и обработки требует преобразований своей структуры. Предложено провести анализ данных, получаемых в Институте ионосферы, и рассмотреть возможность создания электронной БД, которая позволит существенно снизить время на обработку информации.

Анализ входных и выходных данных. В целом, структура базы данных радара должна учитывать особенности использования метода НР. Она предназначена для хранения радиотехнической информации, получаемой в процессе геофизических экспериментов, хранения измеренных высотно-временных зависимостей АКФ и спектров сигнала НР, вычисленных высотно-временных вариаций параметров ионосферы и результатов их анализа. Анализ входной информации показал, что помимо файлов, получаемых с корреляторов, и файлов ионограмм, в БД необходимо хранить и служебную информацию, содержащую метки к данным файлов корреляторов, причины проведения экспериментов, техническое состояние аппаратуры. Таким образом, данные целесообразно разделить на группы [3].

Исходные данные, которые получаются на выходе системы первичной обработки. В настоящее время производится корреляционная обработка на трёх персональных компьютерах. Форматы выходных файлов каждой из систем сходны. Файлы состоят из заголовка (рис. 1), который содержит дату и время, число зондирующих импульсов, а значит и развёрток дальности, из которого можно рассчитать время накопления, и накопленных автокорреляционных функций (АКФ) некогерентного рассеянного сигнала, высотных профилей мощности сигнала НР, значений “нуля” АЦП вдоль развёртки дальности.

| | | | | | |
|----------------------|------|------|--------------|--------------------------|---|
| Заголовок | word | | день | | |
| | word | | месяц | | |
| | word | | год | | |
| | word | | часы | | |
| | word | | минуты | | |
| | word | | секунды | | |
| | word | | номер сеанса | | |
| | word | | nr0 | | |
| | word | | nr1 | | |
| Данные | 1 | 1 | word | АКФ (4 канала) | |
| | | ... | | | |
| | | 19 | word | | |
| | | ... | | | |
| | | 680 | word | | |
| | | 19 | word | | |
| | 2 | -- | | | |
| | 3 | -- | | | |
| | 4 | -- | | | |
| | 1 | 1 | word | «Ноль» АЦП (2 канала) | |
| | | ... | | | |
| | | 680 | word | | |
| | | 2 | -- | | |
| | | 1 | 1 | word | Мощность по короткому импульсу (2 канала) |
| | | | 680 | word | |
| | 2 | -- | | | |
| | 1 | -- | | | |
| 2 | -- | | | | |
| Служебная информация | 1 | word | Метки | | |
| | ... | | | | |
| | 680 | word | | | |

Рис. 1. Структура файла четырёхканального коррелятора

Исходные файлы формируются в течение одной минуты, записываются в двоичном коде и имеют приблизительные размеры 18, 21 и 218 Кб. К исходным данным также относятся ионограммы, получаемые с помощью автоматической ионосферной станции “Базис”. Ионограммы формируются в течение 15 мин, представляют не типизированные файлы и имеют размер около 12 Мб.

Из результатов ориентировочного расчёта следует, что существующий объём исходной информации, накопленной за период с 1990 по 2010 гг., составляет приблизительно 70 Гб, а объём поступающей первичной информации в год приблизительно около 8 Гб.

Под служебными данными будем понимать такие данные, которые необходимы для корректной обработки первичной информации. Три вида служебных данных, которые следует хранить в БД Института ионосферы:

1) Метки отбракованных данных. Каждый сеанс содержит информацию со 170 либо с 680 высотных участков. Удаление данных (создание меток) проводится либо вручную, либо в автоматизированном режиме. В любом случае, необходимо иметь различные варианты массивов меток. При создании меток вручную часто руководствуются субъективными критериями, и результаты отбраковки разными операторами будут различны. Результаты автоматизированного режима также будут различаться из-за разных алгоритмов и параметров фильтрации. Поэтому необходимо кроме меток хранить информацию о том, кто проводил фильтрацию, каким программным обеспечением и с какими параметрами.

2) Журналы радиопередающего и радиоприёмного устройств, а также журнал работы АИС “Базис”. В этих журналах содержится информация о режимах работы, помеховой обстановке, внештатных ситуациях, результатах экспресс-обработки.

3) Графики измерений с указанием причины их проведения (плановые измерения или измерения, связанные с затмением Солнца или стартами ракет), связанные данные (время, в которое происходило затмение, максимальное покрытие диска, время старта и характеристики ракетносителя, расстояние до места старта), а также известные значения геофизических параметров (например, уровень солнечной активности, состояние магнитного поля) во время измерений. Такая информация необходима для сопоставления выходных данных различных дней, сезонов и лет.

Под выходными данными понимаются данные, которые используются в дальнейшем для геофизических расчётов. Минимальный набор геофизических параметров:

- температура ионов $T_i(h, t)$;
- температура электронов $T_e(h, t)$;
- концентрация электронов $N(h, t)$;
- относительное содержание ионов кислорода $[O^+]/[M]$;

- относительное содержание ионов водорода $[H^+]/[N]$;
- относительное содержание ионов гелия $[He^+]/[N]$;
- относительное содержание молекулярных ионов $[M^+]/[N]$;
- вертикальная составляющая скорости переноса плазмы $V_z(h, t)$.

База данных. При проведении расчётов параметров ионосферной плазмы обычно накапливаются большие объёмы информации. Эта информация хранится в виде разрозненных файлов, которые содержат сведения обо всех экспериментальных результатах [5]. Основная задача базы данных заключается в унификации представления разнотипной информации, требуемой для различных алгоритмов и устранении ее дублирования. Она должна, во-первых, производить систематическое накопление и хранение практически неограниченных объёмов как экспериментальных, так и других данных.

Во-вторых, база данных должна дать возможность проводить регулярные и оперативные уточнения характеристик изучаемых процессов. В частности, получать однородные выборки по интересующим пользователя параметрам с целью проверки выдвигаемых статистических гипотез.

На диаграмме развёртывания (рис. 2) показана упрощённая структура обмена потоками информации.

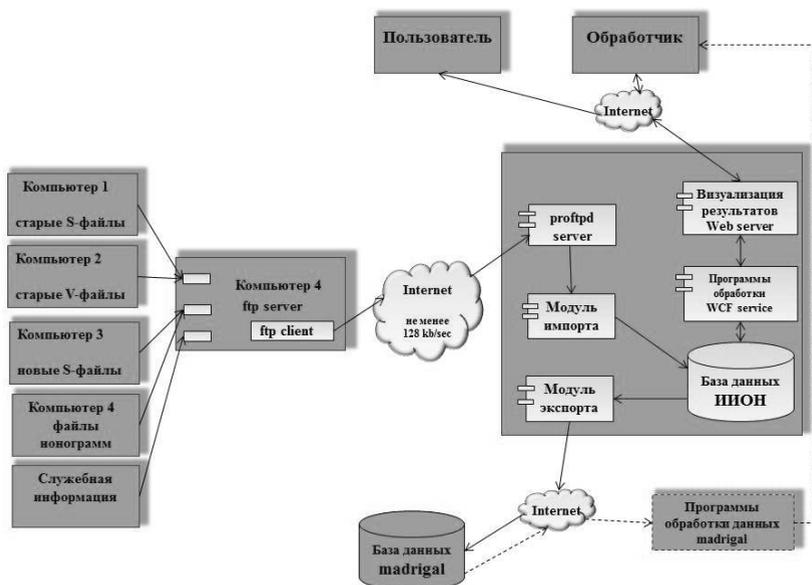


Рис. 2. Диаграмма развёртывания

Очевидно, что из-за территориальной разобщённости измерительного и исследовательского комплексов, необходима оперативная передача исходной информации. Это возможно реализовать с помощью сети Internet со скоростью не менее 128 Кб/с. Предложено формирование пакетов исходных данных с последующей их передачей через ftp-server. При передаче исходных данных в Харьков предусмотрено шифрование пакетов и проверка целостности. Далее исходная информация импортируется в базу данных. Генерализация файлов на основе заголовка, т.е. обобщение информации по времени, значительно упростит поиск по различным параметрам и ускорит доступ к ним. Это также реализуется за счёт преобразования различных частей файла, содержащих информацию об одном параметре, в одномерные массивы. Предполагается модуль экспорта, который автоматически формирует пакеты установленного формата для Международной базы данных радаров НР, а также модули визуализации исходных и выходных данных.

Выбор системы управления базой данных. Все СУБД могут быть поделены на настольные и промышленные. Настольные СУБД, такие как Access, FoxPro предназначены для создания либо автономных информационных систем (ИС), либо ИС файл-серверного типа. Промышленные СУБД, такие как Oracle, MS SQL Server, Postgress и др. предназначены для построения клиент-серверных информационных систем. СУБД, как правило, предоставляет разработчику язык программирования, который включает в себя специализированный язык управления базами данных. Для наиболее распространённых баз данных реляционного типа таким языком является язык SQL.

Использование СУБД при построении информационных систем призвано реализовать физическую и логическую независимость прикладного программирования от данных. Физическая независимость от данных заключается в том, что работа программного обеспечения ИС не будет зависеть от изменений, которые могут происходить на внутреннем, физическом уровне. Эти изменения могут заключаться, например, в том, что будет изменена файловая система или же в том, что изменится структура тех файлов, которые составляют базу данных [6].

Логическая независимость прикладного программирования от данных при использовании СУБД в трёхуровневой структуре доступа к данным заключается, прежде всего, в том, что добавление новых элементов (например, добавление нового столбца в таблицу) в структуру данных никак не влияет на функционирование программного обеспечения. Учитывая основные требования, предъявляемые к СУБД для данного объекта:

- поддержка больших объёмов данных (база/таблица/запись);
- поддержка индексирования данных;
- простота лицензирования, бесплатность, открытость исходных кодов, поддержка сообществом;

- поддержка механизма партиционирования (разбиения таблицы на подтаблицы на основе даты);
- поддержка необходимых типов данных (например, массивов, бинарных файлов для ионограмм);
- наличие инструментов для работы с БД (администрирования, конфигурирования, резервного копирования);
- компрессия данных.

Была выбрана PostgreSQL – свободная объектно-реляционная система управления базами данных.

Выводы. Таким образом, в результате проведённых исследований получены следующие результаты.

- 1) Проанализированы структуры файлов исходной информации.
- 2) Проведена оценка объёма исходной информации.
- 3) Рассмотрена возможность импорта исходной радиофизической и геофизической информации в БД и типизация исходных файлов в БД.
- 4) Представлена возможность нормализации данных.
- 5) Сформулированы основные требования к СУБД и произведён её выбор.
- 6) С использованием преимуществ СУБД было реализовано партиционирование и индексирование данных.

Список литературы: 1. Пуляев В.А., Дзюбанов Д.А., Домнин И.Ф. Определение параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн: монография – Х.: Учебник НТУ “ХПИ”, 2011. – 240 с. 2. Гарсия-Молина Г., Ульма Дж., Уидом Дж. Системы баз данных. Полный курс. – М.: Вильямс, 2008. – 1088 с. 3. Лысенко В.Н., Кононенко А.Ф., Черняк Ю.В. Корреляционная обработка сигнала некогерентного рассеяния // Вестник Национального технического университета “Харьковский политехнический институт”. Тематический выпуск “Радиофизика и ионосфера”. – 2004. – № 23. – С. 49 – 62. 4. Чекалов А.П. Базы данных: от проектирования до разработки приложений. – СПб.: Питер, 2006. – 384 с. 5. Рыбанов А.А. Инструментальные средства автоматизированного проектирования баз данных. – Волгоград: ВолГТУ, 2007. – 96 с. 6. Семенов В.А., Морозов С.В., Порох С.А. Стратегии объектно-реляционного отображения: систематизация и анализ на основе паттернов // Труды Института Системного Программирования РАН. – 2004. – Т. 8, часть 2. – С. 53 – 92.

Поступила в редакцию 12.10.2011

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| <i>Емельянов Л.Я., Живолуп Т.Г.</i> Институт ионосферы НАН и МОН Украины. Краткий исторический обзор | 3 |
| <i>Гринченко С.В.</i> Построение профиля электронной концентрации областей E, F1, F2 по характерным точкам максимумов слоев и долин | 11 |
| <i>Живолуп Т.Г., Черногор Л.Ф.</i> Сравнительный анализ возмущений в ионосфере, вызванных стартами ракет “Протон” и “Союз” | 18 |
| <i>Емельянов Л.Я., Кононенко А.А.</i> Автоматическая ионосферная станция “Базис” как инструмент для мониторинга ионосферы | 27 |
| <i>Емельянов Л.Я., Черногор Л.Ф.</i> Вариации скорости движения ионосферной плазмы во время частного солнечного затмения 4 января 2011 г. | 31 |
| <i>Пуляев В.А., Чаган А.Е.</i> Вопросы реализации системы передачи ионосферной информации в базу данных | 36 |
| <i>Панасенко С.В.</i> Фильтрация временных вариаций мощности некогерентно рассеянного сигнала при наличии нерегулярных помех и сбоев аппаратуры | 40 |
| <i>Ляшенко М.В.</i> Эффекты частного затмения Солнца 4 января 2011 г. в вариациях параметров тепловых процессов в ионосфере | 45 |
| <i>Лялюк А.И., Рогожкин Е.В.</i> Особенности аналого-цифрового преобразования при измерении параметров ионосферы методом НР | 52 |
| <i>Харитоновна С.В., Черногор Л.Ф.</i> Эффекты слабой геокосмической бури 20 – 21 января 2010 г. | 58 |
| <i>Пуляев В.А., Пидручная Н.А.</i> Разработка системы контроля и резервирования блоков питания специализированной аппаратуры | 65 |
| <i>Коптяева А.С., Пуляев В.А.</i> Выбор разрядности аналого-цифрового преобразования сигнала некогерентного рассеяния | 69 |
| <i>Слинько Д.А., Пуляев В.А.</i> Учет искажений, связанных с эффектом импульсного сглаживания сигнала некогерентного рассеяния | 73 |
| <i>Котов Д.В.</i> Оценивание погрешностей определения параметров ионосферной плазмы, связанных с неучетом конечности величины дебаевского радиуса экранирования | 77 |
| <i>Сюсюк М.Н., Котов Д.В., Богомаз А.В.</i> Моделирование двумерной функции неопределенности радара некогерентного рассеяния | 81 |

| | |
|--|-----|
| Колчев А.А., Щирый А.О. Модель для вычисления амплитудно-частотных характеристик КВ радиолиний в геометрооптическом приближении по данным наклонного зондирования ионосферы | 85 |
| Колчев А.А., Недопёкин А.Е. Экспериментальное подтверждение априорной непараметрической неопределённости для сигнала ЛЧМ-ионозонда в спектральной области | 91 |
| Рымарь С.И., Гончаренко Ю.В., Горобец В.Н., Кивва Ф.В., Коворотный А.Л. Особенности сушки сорбентов в электромагнитном поле высокой частоты Вопросы идентичности преобразования информации в многоканальном блоке АЦП радара НР | 100 |
| Черногор Л.Ф., Барабаш В.В. Эффекты солнечного затмения 4 января 2011 г., наблюдаемые при помощи ионозонда | 107 |
| Чепурный Я.Н., Склярков И.Б. Моделирование излучателей для антенной решетки коротковолнового нагревного стенда | 112 |
| Ляшенко Н.С. Оптическая бистабильность при формировании спонтанных решеток в фоточувствительных волноводных слоях | 118 |
| Богомаз А.В., Котов Д.В. Проверка алгоритма коррекции профиля мощности некогерентно рассеянного сигнала | 126 |
| Гринченко С.В. Построение векторного поля горизонтальных нейтральных ветров | 130 |
| Козлов С.С. Данные и СУБД для базы данных харьковского радара некогерентного рассеяния | 138 |

ДЛЯ ЗАМЕТОК

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК

Національного технічного університету
“Харківський політехнічний інститут”

Збірник наукових праць
Тематичний випуск
Радіофізика та іоносфера
№ 44

Науковий редактор: д.т.н., проф. Пуляєв В.О.
Технічний редактор: к.ф.-м.н. Ляшенко М.В.
Відповідальний за випуск: к.т.н. Обухова І.Б.

Об. вид. № 156-11

Підписано до друку 08.11.2011 р. Формат 60x90 1/16.
Папір офсетний. Друк – ризографія. Гарнітура Times New Roman.
Умовн. друк. арк. 9,25. Наклад 300 прим. Зам. № 030161.

НТУ “ХПІ”, 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Надруковано у СПДФО Ізраїлев Є.М.
Свідоцтво № 24800170000040432 від 21.03.2001 р.
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 16