



<http://www.volgatech.net/>

ВЕСТНИК 3(19) 2013

ПОВОЛЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Научно-технический журнал

Издаётся с ноября 2007 года

Выходит три раза в год

СЕРИЯ «Радиотехнические и инфокоммуникационные системы»

Журнал включен в **ПЕРЕЧЕНЬ** ведущих рецензируемых научных журналов и изданий,
в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций
на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук

Учредитель и издатель:

ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет»

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-51886 от 23 ноября 2012 г.)

Полное или частичное воспроизведение материалов, содержащихся в настоящем издании, допускается только с письменного разрешения редакции.

Адрес редакции:

424006 Йошкар-Ола, ул. Панфилова, 17

Тел. (8362) 68-60-12, 68-78-46

Факс (8362) 41-08-72

e-mail: vestnik@volgatech.net

Редактор *Т. А. Рыбалка*

Дизайн обложки *Л. Г. Маланкина*

Компьютерная верстка

А. А. Кислицын

Перевод на английский язык

О. В. Миронова

Подписано в печать 26.12.13.

Формат 60×84 1/8. Усл. п. л. 11,85.

Тираж 500 экз. Заказ №

Дата выхода в свет 30.12.13.

Цена свободная

Поволжский государственный
технологический университет
424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3

Отпечатано с готового оригинал-макета
в ООО «Стринг»
424002, Йошкар-Ола,
ул. Кремлевская, 31

Главный редактор **Е. М. Романов**

Главная редакционная коллегия:

Е. М. Романов, д-р с.-х. наук, профессор

(главный редактор)

Д. В. Иванов, д-р физ.-мат. наук, профессор

(первый зам. гл. редактора)

А. Д. Арзамасцев, д-р экон. наук, профессор

(зам. гл. редактора)

С. А. Денисов, д-р с.-х. наук, профессор

(зам. гл. редактора)

Н. В. Рябова, д-р физ.-мат. наук, профессор

(зам. гл. редактора)

Редакционная коллегия серии:

Н. В. Рябова, д-р физ.-мат. наук, профессор

(зам. гл. редактора – главный редактор серии)

Alexander A. Balandin, D. Sci., Professor

(Riverside, California, USA)

А. С. Дмитриев, д-р физ.-мат. наук, профессор (Москва)

В. А. Иванов, д-р физ.-мат. наук, профессор

Д. В. Иванов, д-р физ.-мат. наук, профессор

А. С. Крюковский, д-р физ.-мат. наук, профессор (Москва)

А. Н. Леухин, д-р физ.-мат. наук, профессор

Д. С. Лукин, д-р физ.-мат. наук, профессор (Москва)

И. Я. Орлов, д-р техн. наук, профессор (Нижний Новгород)

В. А. Песошин, д-р техн. наук, профессор (Казань)

А. А. Роженцов, д-р техн. наук, профессор

И. Г. Сидоркина, д-р техн. наук, профессор

Н. М. Скулкин, д-р техн. наук, профессор

Я. А. Фурман, д-р техн. наук, профессор

Л. Ф. Черногор, д-р физ.-мат. наук, профессор (Украина)

Yury V. Shestopalov, D. Sci., Professor

(Karlstad University, Sweden)

А. В. Зуев, канд. техн. наук, доцент

(отв. секретарь серии)

VESTNIK 3(19) 2013

OF VOLGA STATE UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY

Scientific and technical journal

Issued since November, 2007

Published three times a year

SERIES «Radio Engineering and Infocommunication Systems»

The journal is included in the list of leading reviewed scientific magazines and editions, where the basic scientific results of doctoral and Ph. D. theses should be published

Founder and Publisher:

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «Volga State University of Technology»

The journal is registered by the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications (registration certificate ПИ № ФС77-51886 from November 23, 2012)

Full and partial reproduction of materials published in the issue is allowed only upon receiving the written approval of the Editorial Office

Editorial office address:

424006, Yoshkar-Ola, Panfilov street, 17

Tel. (8362) 68-60-12, 68-78-46

Fax (8362) 41-08-72

E-mail: vestnik@volgatech.net

Editor *T. A. Rybalka*

Cover design *L. G. Malankina*

Computer-aided makeup

A. A. Kislitsyn

Translation into English

O. V. Mironova

Passed for printing 26.12.13.

Format 60×84 ¹/₈. No. of press sheets. 11,85

Circulation 500 copies. Order No

Publication Date 30.12.13.

Free price

Volga State University of Technology
424000, Yoshkar-Ola, Lenin Square, 3

Printed from the original layout

in LLC «String»

424002, Yoshkar-Ola,

Kremlevskaya street, 31

Editor-in-chief E. M. Romanov

Editorial Board:

E. M. Romanov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor
(*Editor-in-Chief*)

D. V. Ivanov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Professor (*First Deputy Editor-in-Chief*)

A. D. Arzamastsev, Doctor of Economic Sciences, Professor
(*Deputy Editor-in-Chief*)

S. A. Denisov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor
(*Deputy Editor-in-Chief*)

N. V. Ryabova, Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Professor (*Deputy Editor-in-Chief*)

Editorial Board of the series:

N. V. Ryabova, Doctor of Physics and Mathematics, Professor
(*Deputy Editor-in-chief – Editor-in-chief of the series*)

Alexander A. Balandin, D. Sci., Professor (Riverside, California, USA)

A. S. Dmitriev, Doctor of Physics and Mathematics, Professor (Moscow)

V. A. Ivanov, Doctor of Physics and Mathematics, Professor

D. V. Ivanov, Doctor of Physics and Mathematics, Professor

A. S. Kryukovsky, Doctor of Physics and Mathematics, Professor
(Moscow)

A. N. Leukhin, Doctor of Physics and Mathematics, Professor

D. S. Lukin, Doctor of Physics and Mathematics, Professor (Moscow)

I. Ya. Orlov, Doctor of Engineering Sciences, Professor
(Nizhny Novgorod)

V. A. Pesoshin, Doctor of Engineering Sciences, Professor (Kazan)

A. A. Rozhentsov, Doctor of Engineering Sciences, Professor

I. G. Sidorkina, Doctor of Engineering Sciences, Professor

N. M. Skulkin, Doctor of Engineering Sciences, Professor

Ya. A. Furman, Doctor of Engineering Sciences, Professor

L. F. Chernogor, Doctor of Physics and Mathematics, Professor
(Ukraine)

Yury V. Shestopalov, D. Sci., Professor (Karlstad University, Sweden)

A. V. Zuev, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor
(*Executive Secretary of the series*)

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ И РАДИОТЕХНИКА

Л. Ф. Черногор, С. В. Кацко. Возмущение параметров ионосферного канала распространения радиоволн в течение геокосмических бурь

Ю. В. Ясюкевич, А. А. Мыльникова, В. В. Демьянов, В. А. Иванов, Н. В. Рябова, А. В. Зувев, М. И. Рябова, А. А. Кислицын. Суточная динамика вертикального полного электронного содержания над городами Иркутск и Йошкар-Ола по данным GPS/ГЛОНАСС и модели IRI-2012

О. Г. Морозов, М. Р. Нургазизов, А. А. Талипов, А. А. Василец, П. Е. Денисенко. Измерение мгновенной частоты СВЧ-радиосигналов в оптическом диапазоне на основе преобразования «частота-амплитуда» в волоконной решётке Брэгга с фазовым π -сдвигом

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Н. П. Вашкевич, С. А. Зинкин, Н. С. Карамышева. Облачная платформа для реализации агентно-ориентированных метакомпьютерных систем

А. В. Горохов, А. В. Маслобоев, А. Г. Олейник. Технология формирования спецификаций среды имитационного моделирования задач управления

ЭЛЕКТРОНИКА

О. Ш. Даутов, Ибрахим Салем. Исследование диаграммы направленности и частоты согласования прямоугольной щелевой антенны, покрытой слоем диэлектрика и возбуждаемой симметричной полосковой линией в объёмном резонаторе

Д. В. Иванов, В. А. Иванов, Н. В. Рябова, А. А. Елсуков, М. И. Рябова, А. А. Чернов. SDR-ионизонд с непрерывным ЛЧМ-сигналом на платформе USRP

НОВИНКИ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ. ОБЗОРЫ. КОНФЕРЕНЦИИ. ВАЖНЫЕ ДАТЫ

Д. В. Иванов, Ю. С. Андрианов, П. А. Нехорошков. III Фестиваль науки в Республике Марий Эл, итоги года

Указатель материалов, опубликованных в журнале в 2013 году

Информация для авторов

CONTENTS

TELECOMMUNICATION AND RADIO ENGINEERING

L. F. Chernogor, S. V. Katsko. The disturbance of parameters of ionospheric radio waves propagation channel during of geospace storms

5

Yu. V. Yasukevich, A. A. Mylnikova, V. V. Demyanov, V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, A. V. Zuev, M. I. Ryabova, A. A. Kislitsin. Diurnal variation of vertical total electron content over the cities irkutsk and yoshkar-ola according to the data of GPS/GLONASS and IRI-2012 model

18

O. G. Morozov, M. R. Nurgazizov, A. A. Talipov, A. A. Vasilets, P. E. Denisenko. Instantaneous frequency measurement of microwave radio signals in the optical range based on the «frequency-amplitude» transformation in a fibre bragg grating with a phase π -shift

30

COMPUTER ENGINEERING AND INFORMATION TECHNOLOGY

N. P. Vashkevich, S. A. Zinkin, N. S. Karamysheva. The cloud platform for the implementation of agent-oriented metacomputer systems

42

A. V. Gorokhov, A. V. Masloboev, A. G. Oleynik. Technology for the formation of specifications of control problem simulation environment

55

ELECTRONICS

O. Sh. Dautov, Ibrahim Salem. Research on the directional pattern and frequency matching of the rectangular slot antenna, covered by a dielectric lauer and excited by the balanced strip line in a cavity resonator

71

D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, A. A. Elsukov, M. I. Ryabova, A. A. Chernov. SDR-ionosonde with continuous LFM-signal on the platform USRP

80

THE NOVELTIES IN THE FIELD OF ENGI- NEERING AND TECHNOLOGIES. REVIEWS. CONFERENCES. IMPORTANT DATES

D. V. Ivanov, Yu. S. Andrianov, P. A. Nekhoroshkov. III Festival of science in the Republic of Mari El, the results of the year

94

List of materials published in the journal in 2013

99

Information for the authors

102

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ И РАДИОТЕХНИКА

УДК 551.5, 551.510, 523.98, 523.745, 550.388

Л. Ф. Черногор, С. В. Кацко

ВОЗМУЩЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРНОГО КАНАЛА РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН В ТЕЧЕНИЕ ГЕОКОСМИЧЕСКИХ БУРЬ

Приведены результаты экспериментальных исследований возмущений параметров ионосферы, вызванных воздействием геокосмических бурь. Рассчитаны возмущения параметров ионосферного канала распространения радиоволн. Продемонстрировано, что геокосмические бури приводят к ряду регулярных и нерегулярных эффектов при распространении радиоволн в диапазоне частот от ~ 1 кГц до ~ 1 ГГц.

Ключевые слова: канал распространения; геокосмическая буря; поглощение радиоволн; фазовые вариации; мерцание радиосигналов.

Введение. Мощные нестационарные процессы на Солнце, сопровождаемые значительным усилением солнечного ветра и выбросами корональной массы, приводят к интенсивным геокосмическим бурям. Геокосмическая буря (ГБ) представляет собой синергетически взаимодействующую совокупность магнитной, атмосферной, ионосферной и электрической бурь [1–6]. При этом значительно возмущаются параметры ионосферы, атмосферы и атмосферно-ионосферно-магнитосферного электрического поля, а также относительно незначительно изменяется уровень геомагнитного поля. Возмущения околоземной среды могут существенно сказываться на параметрах ионосферного канала распространения. До настоящего времени величина этих возмущений и степень их влияния на распространения

радиоволн различных диапазонов остаются мало изученными. Имеется лишь небольшое количество работ, посвящённых влиянию геокосмических бурь на ионосферный канал и характеристики радиоволн [7–11].

Целью работы является изложение результатов экспериментальных исследований вариаций параметров среднеширотной ионосферы в течение геокосмических бурь и результатов расчёта влияния этих вариаций на ионосферный канал распространения радиоволн различных диапазонов (от ОНЧ до УВЧ).

Средства и методы. *Радар некогерентного рассеяния.* Наблюдения проводились на харьковском радаре некогерентного рассеяния, расположенного в Ионосферной обсерватории Института ионосферы ($49^{\circ}36' \text{ N}$, $36^{\circ}18' \text{ E}$). Радар ра-

ботает в режиме излучения двухчастотного составного сигнала с двумя импульсами длительностью 660 и 130 мкс на частотах f_1 и $f_1 \pm 100$ кГц, где $f_1 \approx 158$ МГц. Такой режим обеспечивает высотное разрешение примерно 100 и 20 км в диапазонах высот 200 – 1000 и 100 – 400 км соответственно. Импульсная мощность двухканального радиопередающего устройства радара достигает 3,6 МВт, поляризация – круговая. Коэффициент усиления $G \approx 2700$. Температура системы составляет 470 – 980 К.

Ионозонд «Базис». С помощью ионозонда «Базис» Института ионосферы калибруется получаемый методом некогерентного рассеяния профиль концентрации электронов $N(z)$ и проводится оперативный анализ состояния космической погоды. Погрешность измерения частоты составляет около 0,05 – 0,1 МГц, мощность радиопередающего устройства $P = 10$ кВт, диапазон частот $f = 0,3 – 20$ МГц, время получения одной ионограммы равно 1 – 15 мин.

Несерийный цифровой ионозонд. Разработан специалистами из Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина. Размещен в Радиофизической обсерватории Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина (49°38' N, 36°20' E). Используется для общего контроля состояния ионосферы.

Радар частичных отражений. Радар также расположен в Радиофизической обсерватории. Он позволяет изучать процессы в D-области ионосферы методом частичных отражений. Радар используется для нахождения профиля $N(z)$, вектора горизонтальной скорости и параметров неоднородностей нижней ионосферы методом разнесённого приёма с малой базой (~ 100 м), а также параметров волновых возмущений N . Основные характеристики радара следующие: частота $f = 2 – 6$ МГц, длительность импульса $\tau = 20$ мкс; частота повторения импульсов $F_p = 1 – 100$ Гц, ширина полосы пропускания радиоприёмного устройства $\Delta f = 60$ кГц, $P = 100$ кВт, $G \approx 100$, разреше-

ние по высоте $\Delta z \approx 3$ км, диапазон исследуемых высот $z = 60 – 132$ км.

Доплеровский радар. Радар также расположен в Радиофизической обсерватории. Основные его параметры следующие: диапазон частот $f = 1 – 24$ МГц, $P = 1$ кВт, $\tau \approx 500$ мкс, $F_p = 100$ Гц, $\Delta f = 10$ Гц. Антенная система представляет собой вертикальный ромб с $G \approx 1 – 10$. Используется стробирование по высоте с дискретностью $\Delta z = 75$ км в диапазоне действующих высот $z' = 75 – 450$ км. Сигнал биений колебаний опорного генератора и отражённого сигнала в цифровом виде (частота опроса – 10 Гц) записывается на жёсткий диск.

Радиотехнический комплекс многочастотного наклонного зондирования ионосферы. Комплекс, работающий в диапазоне частот 3 кГц – 30 МГц, расположен в Магнитометрической обсерватории Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина (49°40' N, 36°50' E). В качестве радиопередающих устройств используются станции точного времени, навигационные и радиовещательные станции.

Система GPS-приёмников. Приёмники размещены как в Радиофизической обсерватории, так и в главном корпусе университета (г. Харьков).

При помощи перечисленных средств в течение многих лет осуществлялся мониторинг процессов в ионосфере и вариаций характеристик радиоволн в широком диапазоне частот (от 3 кГц до ~ 1 ГГц), сопровождавших геокосмические бури.

Энергетика и характеристики геокосмических бурь. Энергетические характеристики геокосмических бурь приведены в табл. 1 [1, 2, 4–6]. В процессе бури больше всего изменяется энергетика ионосферы и электрического поля.

Авторами [4, 12, 13] проведена классификация геокосмических бурь по интенсивности её составляющих (табл. 2). Из табл. 2 видно, что интенсивная магнитная буря не всегда сопровождается интенсивными ионосферными бурями, атмосферными бурями и электрическими бурями.

Таблица 1

Энергетика геокосмической бури в средних широтах

Область геокосмоса	Энергия, Дж	Мощность, Вт	Продолжительность, с	Относительные изменения энергии	Примечание
Магнитосфера	10^{16}	10^{12}	10^4	10^{-2}	Энергия магнитного поля
	$10^8 - 10^{10}$	$10^4 - 10^6$	$10^4 - 10^5$	$10^2 - 10^4$	Энергия электрического поля (ЭП)
Ионосфера	10^{12}	10^8	10^4	около ± 1	Тепловая энергия
	$10^5 - 10^7$	$10 - 10^3$	$10^4 - 10^5$	$10^2 - 10^4$	Энергия ЭП
Термосфера	$10^{15} - 10^{17}$	$10^{11} - 10^{13}$	$10^4 - 10^5$	$10^{-3} - 10^{-1}$	Тепловая энергия
Приземная атмосфера	$10^{11} - 10^{12}$	$10^6 - 10^8$	$10^4 - 10^5$	1 – 10	Энергия ЭП

Таблица 2

Характеристики составляющих геокосмической бури (МБ – магнитная буря, ИБ – ионосферная буря, АБ – атмосферная (термосферная) буря, ЭБ – электрическая буря, ГИП – главный ионосферный провал, ПАВ – перемещающиеся атмосферные возмущения)

Интенсивность бури	Примеры	Эффекты ионосферной бури	Причины	Механизм
Интенсивная МБ Интенсивная ИБ Интенсивная АБ Интенсивная ЭБ	Бури 25.09.98, 29–30.05.03, 7–10.11.04	Уменьшение $NmF2$ в 4–7 раз. Ночной нагрев плазмы до 2400–3200 К. Подъём слоя $F2$ на 100–300 км. Уменьшение относительной концентрации ионов водорода $N(H^+)/N_e$ до 10 раз с последующим восстановлением. Проникновение в средние широты магнитосферных электрических полей	Смещение аврорального овала, ГИП, провала лёгких ионов и горячей зоны в средние широты, опустошение магнитной силовой трубки. Магнитосферные суббури	Взаимодействие солнечного ветра с геомагнитным полем, деформация магнитосферы. Высыпание энергичных частиц из магнитосферы
Умеренная МБ Интенсивная ИБ Интенсивная АБ Интенсивная ЭБ	Буря 20–21.03.03	Уменьшение $NmF2$ до 5 раз, сопровождаемое увеличением T_e в дневное время до 2700–3300 К на высотах 300–500 км, подъёмом максимума слоя $F2$ более чем на 100 км в ночные часы. Проникновение в средние широты магнитосферных электрических полей и прохождения ПАВ	Смена фазы бури за счёт дестабилизирующего воздействия импульса электрического поля с «переключением» направления компоненты E_y с запада на восток и ПАВ, генерируемых магнитосферными суббурями	Магнитосферные суббури, сопровождаемые генерацией ПАВ и нестационарными возмущениями магнитосферных электрических полей
Интенсивная МБ Умеренная ИБ Умеренная АБ Слабая ЭБ	Буря 17.04.02	Увеличение $NmF2$ на 15 %, подъём слоя $F2$ на 50 км, температура плазмы не изменилась	Перестройка глобальной термосферной циркуляции и нейтрального состава за счёт нагрева высокоширотной атмосферы	Трансформация отрицательной ИБ в высоких широтах в положительную фазу в дневном секторе средних широт

Классификация геокосмических бурь. Классификацию геокосмических бурь (ГБ) целесообразно производить по величине энергии, передаваемой солнечным ветром магнитосфере в единицу времени. Мерой этой энергии служит функция Акасофу ε_A .

Введём в рассмотрение индекс ГБ [13]

$$G_{st} = 10 \lg \frac{\varepsilon_A}{\varepsilon_{Amin}},$$

где $\varepsilon_{Amin} = 20$ ГВт – пороговое значение функции Акасофу (при котором возмущение в геокосмосе может считаться ГБ). Тип ГБ будем обозначать GSSI1, GSSI2 и т. д. (GSSI – Geospace Storm Index). Характеристики ГБ приведены в табл. 3.

Из таблицы видно, что слабой буре соответствует $G_{st} = 0$, а крайне сильной – 18 дБ.

Возмущение параметров ионосферного канала распространения радиоволн. Результаты наблюдений. Исследование среднеширотной ионосферы в периоды геокосмических бурь в течение 23-го цикла солнечной активности показало, что параметры плазмы при этом значительно возмущаются: концентрация электронов N и полное электронное содержание в течение отрицательных ионосферных бурь уменьшались до 10 и 2 раз соответственно; высота z_m слоя F2 ионосферы увеличивалась на 150 – 300 км, температура электронов и ионов в ночное время увеличивалась до 2 – 3 раз, относительная концентрация ионов водорода

уменьшалась до 3 – 4 раз [6–10]. В течение положительных ионосферных бурь в области F наблюдалось увеличение N на 20–30 %, увеличение z_m достигало 50–70 км [12–20].

В среднеширотной D-области ионосферы N увеличивалась на 1–2 порядка [13, 20].

Геокосмические бури обычно сопровождались усилением волновой активности в атмосфере и ионосфере. Относительная амплитуда волновых возмущений N с периодами 5 – 180 мин. увеличивалась от 1–5 % до 10 – 30 %. Существенно увеличивалась относительная интенсивность неоднородной структуры $\sigma^2 = (\Delta N/N)^2$: значения σ достигали 0,3 – 0,5.

Возмущения параметров ионосферы приводили к значительному изменению параметров ионосферного канала распространения радиоволн: в 10 – 30 раз увеличивался интегральный коэффициент поглощения радиоволн в нижней ионосфере НЧ-, СЧ-, ВЧ- и ОВЧ-диапазонов (длина радиоволн $\lambda \sim 1$ м – 10 км), существенно увеличивалась многолучевость ВЧ-радиоволн ($\lambda = 10$ – 100 м) и глубина мерцаний уровня радиосигналов в широком диапазоне радиоволн ($\lambda \sim 0,1$ – 10 м). Высота отражения радиоволн ОНЧ-диапазона ($\lambda = 10$ – 100 км) уменьшалась на 5–10 км, что приводило к изменению фазы радиоволны на 0,04–0,07 и 0,22– 0,44 град/км для $\lambda = 10$ – 100 км соответственно. Уменьшение N в течение отрицательных

Таблица 3

Классификация ГБ и их основные параметры

Тип ГБ	Названия ГБ	ε_{Amax} , ГВт	G_{st} , дБ	Продолжительность, часы	Количество ГБ в цикле СА
GSSI5	Крайне сильная (Extreme)	1200	18	20 – 25	2 – 4
GSSI4	Очень сильная (Severe)	600	15	15 – 20	50 – 150
GSSI3	Сильная (Strong)	300	12	9 – 15	150 – 300
GSSI2	Умеренная (Moderate)	100	7	6 – 9	400 – 800
GSSI1	Слабая (Minor)	20	0	3 – 6	1000 – 2000

ионосферных бурь в 10 раз приводило к уменьшению максимально применимых частот (МПЧ) примерно в три раза. Частотная ёмкость канала распространения F , равная по определению $f_{\max}/f_{\min}$, за счёт уменьшения МПЧ уменьшалась также примерно в три раза. Рост поглощения радиоволн в нижней ионосфере приводил к увеличению $f_{\min}$ в 1,5 – 2 раза, в результате чего частотная ёмкость канала распространения радиоволн дополнительно уменьшалась в 1,5 – 2 раза. Общее уменьшение F достигало 4,5 – 6 раз. Возможности радиосвязи и радиолокации в ВЧ-диапазоне существенно снижались, многие радиолинии на трассах Земля – ионосфера – Земля фактически разрушались. Из-за значительного роста σ^2 и усиления мерцаний уровня радиосигналов ОВЧ- и УВЧ-диапазонов ухудшались и даже нарушались радиосвязь и функционирование радионавигационных систем на трассах Земля – космос и космос – Земля. Относительная плотность сбоев фазовых измерений систем GPS и ГЛОНАСС увеличивалась в 10 – 100 раз. Резко возрастали (до 100 – 300 м) ошибки позиционирования. Продолжительность сбоев достигала 20 – 40 мин.

Радиофизические эффекты геокосмических бурь. Результаты расчётов. Результаты экспериментальных исследований показали, что параметры ионосферы могут существенно возмущаться. Следует различать положительные и отрицательные ионосферные бури [13].

Общие сведения. Во время положительных ионосферных бурь электронная концентрация на высотах F-области ионосферы увеличивается до 2 – 3 раз. Отрицательная ионосферная буря сопровождается уменьшением этой концентрации на тех же высотах на порядок. Также значительно (примерно до 1,5 – 2 раз) увеличивается температура ионов и электронов.

Важно, что в течение сильных ГБ среднеширотная ионосфера приобретает свойства высокоширотной ионосферы. В

частности, усиливается неоднородная структура ионосферной плазмы.

Указанные изменения существенно влияют на работу навигационных (GPS (США), ГЛОНАСС (Россия) и др.), радиолокационных и телекоммуникационных систем.

Рассмотрим радиофизические эффекты ионосферных бурь подробнее.

Влияние ГБ на поглощение радиоволн различных диапазонов. Вдали от области отражения радиоволн показатель поглощения радиоволн при их квазипродольном по отношению к геомагнитному полю распространении даётся соотношением (см., например, [21]):

$$\kappa = \frac{\omega_p^2 \nu}{2\omega(\omega \pm \omega_L)^2 + \nu^2}, \quad (1)$$

где $\omega_p = 2\pi f_p$, f_p – плазменная частота электронов, ν – частота соударений электронов с тяжёлыми частицами, $\omega = 2\pi f$, f – частота радиоволны, $\omega_L = 2\pi f_L$, f_L – продольная составляющая гирочастоты электронов, знаки $\pm$ относятся к обыкновенной и необыкновенной волнам.

Поглощение радиоволн определяется интегральным коэффициентом поглощения

$$K = \frac{\omega}{c} \int_s \kappa(s) ds,$$

где c – скорость света в вакууме, s – траектория радиоволн. При этом амплитуда радиоволн

$$A = A_0 e^{-K},$$

где A_0 – амплитуда радиоволн в отсутствие поглощения.

Поглощение радиоволн – эффект интегральный. Примерно половину вклада в K даёт нижняя ионосфера (D- и E-области), а вторую половину – F-область ионосферы [21, 22].

В F-области ионосферы (при $z \geq 250$ км) значение ν в основном определяется частотой соударений электронов с ионами ν_{ei} [22]. Используя зависимость ν_{ei} от N и T_e , приведённую в [22], можно записать, что

$$v_{ei} \approx v_{ei0} \frac{N}{N_0} \left(\frac{T_{e0}}{T_e} \right)^{3/2},$$

где индекс «0» здесь и далее относится к невозмущённым условиям.

Результаты расчёта v_{ei}/v_{ei0} в зависимости от N/N_0 и T_e/T_{e0} для высот F-области ионосферы приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчёта v_{ei}/v_{ei0} , соответствующие положительным ионосферным бурям

$N/N_0 \backslash T_e/T_{e0}$	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1
1,0	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1
1,1	0,95	1,13	1,3	1,47	1,65	1,82
1,3	0,74	0,88	1,01	1,15	1,28	1,42
1,5	0,6	0,71	0,82	0,93	1,03	1,14
1,7	0,5	0,59	0,68	0,77	0,86	0,94
1,9	0,42	0,5	0,57	0,65	0,73	0,8

Из табл. 4 видно, что значение v_{ei} существенно изменяется в течение положительных ионосферных бурь, когда $N/N_0 > 1$. Так, при $N/N_0 = \text{const}$ отношение v_{ei}/v_{ei0} убывает, а при $T_e/T_{e0} = \text{const}$ – увеличивается.

Аналогичные результаты расчёта v_{ei}/v_{ei0} для отрицательных ионосферных бурь приведены в табл. 5.

Из табл. 5 видно, что по мере уменьшения N/N_0 и роста T_e/T_{e0} отношение v_{ei}/v_{ei0} убывает. При наиболее сильных МБ это отношение уменьшается примерно в 25 раз.

Таблица 5

Результаты расчёта v_{ei}/v_{ei0} , соответствующие отрицательным ионосферным бурям

$N/N_0 \backslash T_e/T_{e0}$	0,9	0,7	0,5	0,3	0,1
1,0	0,9	0,7	0,5	0,3	0,1
1,1	0,78	0,61	0,43	0,26	0,09
1,3	0,61	0,47	0,33	0,2	0,07
1,5	0,49	0,38	0,27	0,16	0,05
1,7	0,41	0,32	0,23	0,14	0,05
1,9	0,34	0,27	0,19	0,11	0,04

В F-области ионосферы имеют место неравенства $\omega \gg \omega_L, \nu$. Тогда из (1) следует, что

$$\kappa \approx \frac{\omega_p^2 \nu}{2\omega^3}.$$

Поскольку

$$\omega_p^2 = \frac{e^2 N}{\epsilon_0 m},$$

где e – заряд электрона, m – масса электрона, ϵ_0 – электрическая постоянная,

$$\kappa = \kappa_0 \frac{N}{N_0} \frac{v_{ei}}{v_{ei0}} = \kappa_0 \left(\frac{N}{N_0} \right)^2 \left(\frac{T_{e0}}{T_e} \right)^{3/2}.$$

Результаты расчёта отношения κ/κ_0 для положительных и отрицательных ионосферных бурь приведены в табл. 6 и табл. 7 соответственно.

Таблица 6

Результаты расчёта κ/κ_0 , соответствующие положительным ионосферным бурям

$N/N_0 \backslash T_e/T_{e0}$	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1
1,0	1,21	1,69	2,25	2,89	3,61	4,41
1,1	1,05	1,46	1,95	2,51	3,13	3,82
1,3	0,82	1,14	1,52	1,95	2,44	2,98
1,5	0,66	0,92	1,22	1,57	1,97	2,40
1,7	0,55	0,76	1,02	1,30	1,63	1,99
1,9	0,46	0,65	0,86	1,10	1,38	1,68

Таблица 7

Результаты расчёта κ/κ_0 , соответствующие отрицательным ионосферным бурям

$N/N_0 \backslash T_e/T_{e0}$	0,9	0,7	0,5	0,3	0,1
1,0	0,81	0,49	0,25	0,09	0,01
1,1	0,7	0,42	0,22	0,08	0,009
1,3	0,55	0,33	0,17	0,06	0,007
1,5	0,44	0,27	0,14	0,05	0,005
1,7	0,37	0,22	0,11	0,04	0,005
1,9	0,31	0,19	0,09	0,03	0,004

Из табл. 6 видно, что по мере увеличения N/N_0 отношение κ/κ_0 возрастает. При увеличении T_e/T_{e0} отношение κ/κ_0 уменьшается. При наиболее сильных ГБ это отношение увеличивается примерно в 1,4 – 1,7 раза.

Из табл. 7 следует, что по мере уменьшения N/N_0 и роста T_e/T_{e0} отношение κ/κ_0 убывает. При наиболее сильных ГБ это отношение уменьшается примерно в 250 раз.

Считая, что в пределах F-области ионосферы отношения N/N_0 и T_e/T_{e0} слабо зависят от высоты, получим, что

$$\frac{K}{K_0} \approx \frac{\kappa}{\kappa_0}.$$

Это означает, что во время положительных бурь K может увеличиться в 1,4 – 1,7 раза, а во время отрицательных бурь – уменьшиться в 250 раз.

Изменение частотной ёмкости ионосферного канала связи ВЧ-диапазона. Назовём частотной ёмкостью ионосферного канала связи безразмерный параметр

$$F = \frac{f_{\max}}{f_{\min}},$$

где $f_{\max}$ и $f_{\min}$ – максимальное и минимальное значения рабочей частоты радиосигнала, определяющие дальнюю радиосвязь на трассах Земля – ионосфера – Земля в ВЧ-диапазоне радиоволн.

Значение $f_{\max}$, называемое максимально применимой частотой (МПЧ), при наклонном падении на сферическую ионосферу даётся известным приближённым соотношением (см., например, [21])

$$f_{\max} \approx \sqrt{\frac{R_e}{2h_r}} \cdot f_{cr},$$

где R_e – радиус Земли, h_r – высота отражения радиоволны. При $R_e \approx 6370$ км, $h_r \approx 300 - 400$ км множитель $\sqrt{R_e/2h_r} \approx 3,3 - 2,8$ для дневного и ночного времени соответственно. Далее примем, что в среднем этот множитель равен 3. Тогда

$$f_{\max} \approx 3f_{cr},$$

где f_{cr} – критическая частота области F ионосферы. Обычно в средних широтах

значение $f_{cr} \approx 3 - 10$ МГц для ночного и дневного времени соответственно.

Величина $f_{\min}$ определяется значением K вдоль радиотрассы и составляет в невозмущённых условиях $f_{\min 0} \approx 1 - 3$ МГц для ночного и дневного времени соответственно.

В условиях высокой солнечной активности максимальное значение $F_0 \approx 10$. При низкой солнечной активности $f_{\max} \approx 10 - 20$ МГц и $f_{\min 0} \approx 1 - 2$ МГц, а $F_0 \approx 10$.

В возмущённых условиях

$$F = F_0 \frac{f_{\max}}{f_{\max 0}} \frac{f_{\min 0}}{f_{\min}}.$$

Учтём, что $f_{\min}$ определяется в основном поглощением радиоволн в нижней ионосфере и увеличивается в результате роста N на высотах D- и E-областей ионосферы, например, под действием потоков высокоэнергичных высыпавшихся частиц или рентгеновского излучения. При увеличении N в D-области ионосферы на 1 – 2 порядка, как показывают наши оценки, $f_{\min}$ может увеличиваться до 3 – 10 МГц.

Значение $f_{\max}/f_{\max 0} = f_{cr}/f_{cr 0} = (N/N_0)^{1/2}$ определяется возмущением N в F-области ионосферы.

При слабом возмущении N в F-области ионосферы

$$F \approx F_0 \frac{f_{\min 0}}{f_{\min}} \approx 0,3 F_0 \approx 3,$$

т. е. уменьшается примерно в три раза.

При сильном возмущении N в области ионосферы параметр F изменяется также значительно (см. табл. 8, 9). При расчётах учтено, что

$$\frac{F_0}{F} = \left(\frac{N_0}{N} \right)^{1/2} \frac{f_{\min}}{f_{\min 0}}.$$

В табл. 8 видно, что отрицательные ионосферные бури приводят к уменьшению частотной ёмкости, а положительные – к её увеличению. При $F \leq 1$ связь

Таблица 8

Значение частотной ёмкости F при различных уровнях возмущённости ($F_0 = 10$)

N/N_0 $f_{\min 0} / f_{\min}$	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1
1,0	3,16	5,48	7,07	8,37	9,49	10,0	10,49	11,40	12,25	13,04	13,78	14,49
0,9	2,84	4,93	6,36	7,53	8,54	9,00	9,44	10,26	11,03	11,74	12,40	13,84
0,7	2,21	3,84	4,95	5,86	6,64	7,00	7,34	7,98	8,58	9,13	9,65	10,14
0,5	1,58	2,74	3,54	4,19	4,75	5,00	5,25	5,70	6,13	6,52	6,89	7,25
0,3	0,95	1,64	2,12	2,51	2,85	3,00	1,10	3,42	3,68	3,91	4,13	4,25
0,1	0,32	0,55	0,71	0,84	0,95	1,00	1,05	1,14	1,23	1,30	1,38	1,45

Таблица 9

Значения F_0 / F при различных уровнях возмущённости ионосферы (прочерки означают невозможность связи на трассах Земля – ионосфера – Земля)

N/N_0 $f_{\min 0} / f_{\min}$	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1
1,0	3,16	1,82	1,41	1,12	1,05	1,00	0,95	0,88	0,82	0,77	0,73	0,69
0,9	3,51	2,03	1,57	1,33	1,17	1,11	1,06	0,97	0,91	0,85	0,81	0,77
0,7	4,52	2,60	2,02	1,71	1,51	1,43	1,36	1,25	1,17	1,09	1,04	0,99
0,5	6,25	3,65	2,82	2,39	2,11	2,00	1,90	1,75	1,63	1,53	1,45	1,32
0,3	–	6,10	4,72	3,98	3,51	3,33	9,09	2,92	2,71	2,56	2,42	2,30
0,1	–	–	–	–	–	–	9,52	8,77	8,13	7,69	7,25	6,90

при помощи радиоволн ВЧ-диапазона на трассах Земля – ионосфера – Земля становится невозможной. При положительной ионосферной буре параметр F увеличивается по сравнению с F_0 .

Из табл. 9 видно, что при $F_0 / F \approx 1$ частотная ёмкость канала связи изменяется незначительно. Большие (3 – 10) значения отношения F_0 / F свидетельствуют о том, что частотная ёмкость канала значительно уменьшилась. При $F_0 / F \geq 10$ связь становится невозможной.

Фазовые вариации в ионосферном канале распространения радиоволн УНЧ-, ОНЧ- и НЧ-диапазонов. Для радиоволн с длиной волны 3 – 300 км ($f = 100 - 1$ кГц) набег фазы $\Delta\varphi$ при изменении высоты от-

ражения h_r на величину Δh даётся соотношением [21]:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi R}{\lambda} \left(\frac{h_r}{2R_e} + \frac{\lambda^2}{16h_r^2} \right) \frac{\Delta h}{h_r},$$

где R – длина радиотрассы.

В условиях спокойной ионосферы высота отражения радиоволн указанных диапазонов приходится на нижнюю ионосферу (высоты 60 – 100 км) (табл. 10). Во время ГБ в результате роста N значения h_r уменьшаются до 10 км. Результаты расчёта $\Delta\varphi$ на единицу длины радиотрассы для $\Delta h = 10$ км приведены в табл. 10. Видно, что фазовые вариации значительны как в дневное, так и в ночное время суток. Это серьёзно ограничивает возможности радионавигации в ОНЧ-диапазоне радиоволн.

Таблица 10

Результаты расчёта $\Delta\phi/R$ в зависимости от длины радиоволны для дневного и ночного (в скобках) времени суток

λ_r , км	300	100	30	10	3
h_r , км	65 (85)	67 (87)	70 (90)	72 (92)	74 (94)
$\frac{\Delta\phi}{R}$, рад/км	$4,3 \cdot 10^{-3}$ ($1,9 \cdot 10^{-3}$)	$1,5 \cdot 10^{-3}$ ($6,9 \cdot 10^{-4}$)	$5,9 \cdot 10^{-4}$ ($3,5 \cdot 10^{-4}$)	$6,4 \cdot 10^{-4}$ ($5,5 \cdot 10^{-4}$)	$1,6 \cdot 10^{-4}$ ($1,6 \cdot 10^{-4}$)

Влияние усиления ионосферной турбулентности. Оценим далее влияние эффектов рассеяния радиоволн на неоднородностях электронной концентрации. Радиоволны будем считать достаточно высокочастотными, так что выполняется неравенство $\omega \gg \omega_p, \omega_L, \nu$. Такая ситуация реализуется на трансионосферных трассах для радиоволн с частотой больше 10 и 30 МГц в ночное и дневное время соответственно.

Как показано в работах [8, 13], во время ГБ среднеширотная ионосфера приобретает черты высокоширотной ионосферы. В частности, это проявляется в усилении ионосферной турбулентности. В невозмущённых условиях в средних широтах относительная дисперсия флуктуаций N , равная $\sigma_N^2 = (\Delta N / N)^2$, обычно составляет $10^{-4} - 10^{-3}$. При ГБ этот параметр увеличивается на 1 – 2 порядка. При этом существенно возрастает роль замираний радиосигналов, уменьшается их средняя амплитуда $\bar{A}$ и отношение сигнал/шум $\bar{q}$.

Известно, что в результате статистической дифракции радиоволн на случай-

ных неоднородностях N имеет место равенство [23]

$$\bar{A} = A_0 e^{-\sigma_\phi^2},$$

где A_0 – амплитуда радиоволн в отсутствие флуктуаций, σ_ϕ^2 – дисперсия флуктуаций фазы радиоволн. Последняя, как известно, даётся соотношением:

$$\sigma_\phi^2 = \left(\frac{\omega}{c} \sigma_n \right)^2, \quad (2)$$

где дисперсия флуктуаций показателя преломления ионосферы, равная

$$\sigma_n^2 \approx \left(\frac{1}{2} \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \sigma_N \right)^2. \quad (3)$$

Соотношение (3) справедливо при условии, что $\omega \gg \omega_p, \omega_L, \nu$.

Из (2) и (3) следует, что ионосферные возмущения приводят к изменению σ_ϕ^2 , которое удобно характеризовать безразмерным параметром

$$\Sigma = \frac{\sigma_\phi^2}{\sigma_{\phi 0}^2} = \frac{\sigma_n^2}{\sigma_{n 0}^2} = \left(\frac{N}{N_0} \right)^2 \left(\frac{\sigma_N}{\sigma_{N 0}} \right)^2.$$

Результаты расчёта параметра Σ приведены в табл. 11.

Таблица 11

Зависимость Σ от степени возмущённости ионосферы и её турбулентной структуры

N/N_0	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1
$\sigma_N^2 / \sigma_{N 0}^2$												
1	0,01	0,09	0,25	0,49	0,81	1	1,21	1,69	2,15	2,89	3,61	4,41
3	0,03	0,27	0,75	1,47	2,43	3	1,63	5,07	6,45	8,67	10,8	13,2
10	0,1	0,9	2,5	4,9	8,1	10	12,1	16,9	21,5	28,9	36,1	44,1
30	0,3	2,7	7,5	14,7	24,3	30	16,3	50,7	64,5	86,7	108	132
100	1	9	25	49	81	100	121	169	215	289	361	441

Из табл. 11 видно, что во время сильных отрицательных ионосферных бурь, когда $N/N_0 = 0,1$, значения $\sigma_\phi^2 / \sigma_{\phi 0}^2 < 1$. При этом роль замираний уменьшается. При $\sigma_\phi^2 / \sigma_{\phi 0}^2 > 1$ их роль существенно возрастает и нормальное функционирование радиосредств и радиосистем может стать невозможным.

В результате замирания сигнала среднее отношение сигнал/шум изменяется следующим образом:

$$\frac{\bar{q}}{q_0} = \left(\frac{\bar{A}}{A_0} \right)^2 = e^{-(\sigma_\phi^2 - \sigma_{\phi 0}^2)} = e^{-\sigma_{\phi 0}^2(\Sigma - 1)}.$$

Роль замираний малосущественна при $\sigma_\phi \approx \sigma_{\phi 0}$ или $\alpha = \sigma_{\phi 0}^2(\Sigma - 1) \ll 1$. При $\alpha \sim 1$ она становится существенной, а при $\alpha \gg 1$ – определяющей.

Выводы

1. Сильные геокосмические бури приводят к значительному возмущению параметров околоземной среды в целом и среднеширотной ионосферы в частности.

2. Вариации параметров ионосферы в течение геокосмических бурь вызывают существенную перестройку канала распространения радиоволн. При этом значительно изменяются основные характеристики радиоволн: фаза, мгновенная частота, амплитуда и др.

3. В средних широтах в течение отрицательных ионосферных бурь частотная ёмкость канала распространения радиоволн на трассах Земля – ионосфера – Земля уменьшается в 5–6 раз. При этом разрушаются многие радиолнии ВЧ-диапазона.

Для обеспечения дальней радиосвязи в ВЧ-диапазоне во время отрицательных ионосферных бурь рекомендуется уменьшать рабочую частоту телекоммуникационных средств до трёх раз. Если частоту оставлять неизменной, связь на трассах Земля – ионосфера – Земля вообще нарушится.

4. Во время положительных ионосферных бурь поглощение радиоволн с длиной радиоволны, равной 0,1 – 100 м, увеличивается на 10 – 100 %, поэтому телекоммуникационные системы декаметрового

диапазона должны переходить на более высокие частоты, которые на несколько десятков процентов могут быть выше рабочей частоты в спокойных условиях. При этом также расширяется частотная ёмкость телекоммуникационного канала.

5. В результате значительного роста электронной концентрации в нижней ионосфере интегральный коэффициент поглощения увеличивается в 10–30 раз, приводя к существенному снижению отношения сигнал/шум на радиолниях ОНЧ-, НЧ-, СЧ- и ВЧ-диапазонов. При этом в НЧ- и ОНЧ-диапазонах имеют место также значительные фазовые искажения.

6. Рост интенсивности неоднородной структуры сопровождается ростом многолучевости в ВЧ-диапазоне радиоволн, а также усилением мерцаний уровня радиосигналов в ОВЧ- и УВЧ-диапазонах. Последнее, в ряде случаев, приводит к нарушению функционирования радиолний на трассах Земля – космос и космос – Земля.

Усиление ионосферной турбулентности во время геомагнитных бурь приведёт к замираниям радиосигнала в широком диапазоне частот (вплоть до сантиметрового диапазона радиоволн). Для сохранения прежней (имеющей место в спокойных условиях) помехоустойчивости рекомендуется применение разнесённых по частоте радиотехнических средств различного назначения.

7. Для учёта влияния геокосмических бурь на функционирование радиотехнических систем необходима разработка и усовершенствование моделей возмущённой ионосферы и возмущённого ионосферного канала связи.

8. Для адаптации радиотехнических систем различного назначения к изменениям условий в процессе геокосмических бурь рекомендуется непрерывный мониторинг состояния геокосмоса (ионосферы), например, на основе уже имеющихся навигационных искусственных спутников Земли. В качестве реперных измерений целесообразно использовать непрерывные измерения на мировой сети ионозондов, а также, в качестве эталонных – эпизодические измерения на сети радаров некогерентного рассеяния.

Список литературы

1. Черногор, Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы / Л. Ф. Черногор // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, № 1. – С. 59–106.
2. Черногор, Л. Ф. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 1 / Л. Ф. Черногор // Нелинейный мир. – 2006. – Т. 4, № 12. – С. 655–697.
3. Черногор, Л. Ф. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 2 / Л. Ф. Черногор // Нелинейный мир. – 2007. – Т. 5, № 4. – С. 198–231.
4. Zalyubovsky, I. The Earth – Atmosphere – Geospace System: Main Properties, Processes and Phenomena / I. Zalyubovsky, L. Chernogor, V. Rozumenko // Space Research in Ukraine. 2006 – 2008. The Report Prepared by the Space Research Institute of NASU-NSAU. – Kyiv, 2008. P. 19–29.
5. Chernogor, L. F. Earth – Atmosphere – Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System / L. F. Chernogor, V. T. Rozumenko // Radio Physics and Radio Astronomy. – 2008. – Vol. 13, No 2. – P. 120–137.
6. Черногор, Л. Ф. О нелинейности в природе и науке. Монография / Л. Ф. Черногор. – Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2008. – 528 с.
7. Karasawa, Y. Ionospheric scintillation measurements at 1.5 GHz in mid-latitude region / Y. Karasawa, K. Yasukawa, M. Yamada // Radio Science. – 1985. – Vol. 20, No. 3. – P. 643–651.
8. Afraimovich, E. L. Geomagnetic storms and the occurrence of phase slips in the reception of GPS signals / E. L. Afraimovich, O. S. Lesyuta, I. I. Ushakov et. al. // Ann. Geophys. – 2001. – Vol. 45, No. 1. – P. 55–71.
9. Афраймович, Э. Л. Среднеширотные амплитудные мерцания сигналов GPS и сбои функционирования GPS на границе аврорального овала / Э. Л. Афраймович, Э. И. Астафьева, О. И. Бернгардт и др. // Изв. вузов. Радиофизика. – 2004. – Т. 47, № 7. – С. 509–526.
10. Chen, Z. Evaluation of Solar Radio Burst's Effect on GPS Receiver Signal Tracking within IGS Network / Z. Chen, Y. Gao, Z. Z. Liu // Radio Science. – 2005. – Vol. 40. – RS3012, doi: 10.1029/2004RS003066.
11. Interface Control Document [Electronic re-

References

1. Chernogor L. F. Fizika Zemli, atmosfery i geokosmosa v svete sistemnoy paradigmy [Physics of the Earth, Atmosphere and Geospace in the Light of Systemic Paradigm]. Radiofizika i radioastronomiya [Radiophysics and Radio Astronomy]. 2003. Vol. 8, No 1. P. 59-106.
2. Chernogor L. F. Zemlya-atmosfera-ionosfera-magnitosfera kak otkrytaya dinamicheskaya nelineinaya fizicheskaya sistema. 1 [The Earth-Atmosphere – Ionosphere - Magnetosphere as an Open Dynamic Nonlinear Physical System. 1]. Nelineynyy mir [Nonlinear World]. – 2006. – Vol. 4, No 12. – P. 655-697.
3. Chernogor L. F. Zemlya-atmosfera-ionosfera-magnitosfera kak otkrytaya dinamicheskaya nelineinaya fizicheskaya sistema. 2 [The Earth-Atmosphere – Ionosphere - Magnetosphere as an Open Dynamic Nonlinear Physical System. 2]. Nelineynyy mir [Nonlinear World]. 2007. Vol. 5, No 4. P. 198-231.
4. Zalyubovsky I., Chernogor L., Rozumenko V. The Earth – Atmosphere – Geospace System: Main Properties, Processes and Phenomena. Space Research in Ukraine. 2006 – 2008. The Report Prepared by the Space Research Institute of NASU-NSAU. Kyiv, 2008. P. 19–29.
5. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. Earth – Atmosphere – Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System. Radio Physics and Radio Astronomy. 2008. Vol. 13, No 2. P. 120–137.
6. Chernogor L. F. O nelineinosti v prirode i nauke. Monografiya [About Nonlinearity in the Nature and Science. Monograph]. Kharkov: KNU named after V. N. Karazin, 2008. 528 p.
7. Karasawa Y., Yasukawa K., Yamada M. Ionospheric scintillation measurements at 1.5 GHz in mid-latitude region. Radio Science. 1985. Vol. 20, No. 3. P. 643–651.
8. Afraimovich E. L., Lesyuta O. S., Ushakov I. I. et. al. Geomagnetic storms and the occurrence of phase slips in the reception of GPS signals. Ann. Geophys. 2001. Vol. 45, No. 1. P. 55–71.
9. Afraimovich E. L., Astafyeva E. I., Berngardt O. I. et. al. Sredneshirotnye amplitudnye mertsa-niya signalov GPS i sboi funktsionirovaniya GPS na granitse avroral'nogo ovala [Average Latitudinal Amplitude Scintillation of GPS signals and GPS Functioning Failures on the Auroral Oval Border]. Izv. vuzov. Radiofizika [News of Higher Educational Institutions: Radiophysics]. 2004. Vol. 47, No 7. P. 509-526.
10. Chen, Z. Gao Y., Liu Z. Z. Evaluation of Solar Radio Burst's Effect on GPS Receiver Signal Tracking within IGS Network. Radio Science. 2005. Vol. 40. RS3012, doi: 10.1029/2004RS003066.
11. Interface Control Document [Electronic re-

source] (ICD-GPS-200C) / The Navigation Center of Excellence. US, 2002. Mode of access: <http://www.navcen.uscg.mil/pubs/gps/icd-200/> (07.10.2009).

12. Chernogor, L. F. Dynamic processes in the ionosphere during magnetic storms from the Kharkov incoherent scatter radar observations / L. F. Chernogor, Ye. I. Grigorenko, V. N. Lysenko et. al. // Int. J. Geomagn. Aeron. – 2007. – Vol. 7. – GI3001 doi: 10.1029/2005GI000125.

13. Черногор, Л. Ф. Физика геокосмических бурь / Л. Ф. Черногор, И. Ф. Домнин. – Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2014. – 408 с.

14. Григоренко, Е. И. Аномальная ионосферная буря 21 марта 2003 года: результаты наблюдений на харьковском радаре некогерентного рассеяния / Е. И. Григоренко, В. И. Таран, Л. Ф. Черногор и др. // Успехи современной радиоэлектроники. – 2005. – № 4. – С. 4–20.

15. Chernogor, L. F. Specific Features of the Ionospheric Storm of March 20–23, 2003 / L. F. Chernogor, E. I. Grigorenko, V. N. Lysenko et. al. // Geomagnetism and Aeronomy. – 2005. – Vol. 45, No. 6. – P. 45–757.

16. Chernogor, L. F. Dynamic Processes in the Ionosphere during the Strongest Magnetic Storm of May 30–31, 2003 / L. F. Chernogor, E. I. Grigorenko, V. N. Lysenko et. al. // Geomagnetism and Aeronomy. – 2005. – Vol. 45, No. 6. – P. 758–777.

17. Chernogor, L. F. Ionospheric Disturbances during the Severe Magnetic Storm of November 7–10, 2004 / L. F. Chernogor, E. I. Grigorenko, V. N. Lysenko et. al. // Geomagnetism and Aeronomy. – 2007. – Vol. 47, No. 6. – P. 720–738.

18. Григоренко, Е. И. Анализ и классификация ионосферных бурь в средних широтах Европы. 1 / Е. И. Григоренко, В. Н. Лысенко, В. И. Таран и др. // Космічна наука і технологія. – 2007. – Т. 13, № 5. – С. 58–76.

19. Григоренко, Е. И. Анализ и классификация ионосферных бурь в средних широтах Европы. 2 / Е. И. Григоренко, В. Н. Лысенко, В. И. Таран и др. // Космічна наука і технологія. – 2007. – Т. 13, № 5. – С. 77–96.

20. Panasenko, S. V. Event of the November 7–10, 2004 Magnetic Storm in the Lower Ionosphere / S. V. Panasenko, L. F. Chernogor // Geomagnetism and Aeronomy. – 2007. – Vol. 47, No. 5. – P. 608–658.

21. Davies, K. Ionospheric Radio / K. Davies. – Peter Peregrinus, London, 1990. – 587 p.

22. Shunk, R. W. Ionospheres: Physics, Plasma Physics And Chemistry / R. W. Shunk, A. F. Nagy // Atmospheric and Space Science Series. – Cambridge University Press, 2000. – 555 p.

source] (ICD-GPS-200C) / The Navigation Center of Excellence. US, 2002. Mode of access: <http://www.navcen.uscg.mil/pubs/gps/icd-200/> (07.10.2009).

12. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Lysenko V. N. et. al. Dynamic processes in the ionosphere during magnetic storms from the Kharkov incoherent scatter radar observations. Int. J. Geomagn. Aeron. 2007. Vol. 7. GI3001 doi: 10.1029/2005GI000125.

13. Chernogor L. F., Domnin I. F. Fizika geokosmicheskikh bur' [Physics of Geospace Storms]. Kharkov: KNU named after V. N. Karazin, 2014. 408 p.

14. Grigorenko E. I., Taran V. I., Chernogor L. F. et. al. Anomal'naya ionosfernaya burya 21marta 2003 goda: rezul'taty nablyudeniya na khar'kovskom radare nekogerentnogo rasseyaniya [Anomalous Ionospheric Storm on March 21, 2003: Results of Observations on Kharkov Incoherent Scattering Radar]. Modern Radio Electronics Progress. 2005. No 4. P. 4-20.

15. Chernogor L. F., Grigorenko E. I., Lysenko V. N., et. al. Specific Features of the Ionospheric Storm of March 20–23, 2003. Geomagnetism and Aeronomy. 2005. Vol. 45, No. 6. P. 45–757.

16. Chernogor L. F., Grigorenko E. I., Lysenko V. N. et. al. Dynamic Processes in the Ionosphere during the Strongest Magnetic Storm of May 30–31, 2003. Geomagnetism and Aeronomy. 2005. Vol. 45, No. 6. P. 758–777.

17. Chernogor L. F., Grigorenko E. I., Lysenko V. N. et. al. Ionospheric Disturbances during the Severe Magnetic Storm of November 7–10, 2004. Geomagnetism and Aeronomy. 2007. Vol. 47, No. 6. P. 720–738.

18. Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Taran V. I. et. al. Analiz i klassifikatsiya ionosfernykh bur' v srednikh shirotakh Evropy. 1 [Analysis and Classification of Ionospheric Storms in Middle Latitudes of Europe. 1]. Space Science and Technology. 2007. Vol. 13, No 5. P. 58-76.

19. Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Taran V. I. et. al. Analiz i klassifikatsiya ionosfernykh bur' v srednikh shirotakh Evropy. 2 [Analysis and Classification of Ionospheric Storms in Middle Latitudes of Europe. 2]. Space Science and Technology. 2007. Vol. 13, No 5. P. 77-96.

20. Panasenko S. V., Chernogor L. F. Event of the November 7–10, 2004 Magnetic Storm in the Lower Ionosphere. Geomagnetism and Aeronomy. 2007. Vol. 47, No. 5. P. 608–658.

21. Davies, K. Ionospheric Radio. Peter Peregrinus, London, 1990. 587 p.

22. Shunk R. W., Nagy A. F. Ionospheres: Physics, Plasma Physics And Chemistry. Atmospheric and Space Science Series. Cambridge University Press, 2000. 555 p.

23. Рытов, С. М. Введение в статистическую радиофизику. Часть 2. Случайные поля / С. М. Рытов, Ю. А. Кравцов, В. И. Татарский. – М.: Наука, 1978. – 464 с.

23. Rytov S. M., Kravtsov Yu. A., Tatarsky V. I. Vvedenie v statisticheskuyu radiofiziku. Chast' 2. Sluchaynye polya. [Introduction to Statistical Radiophysics. Part 2. Random Fields]. Moscow: Nauka, 1978. – 464 p.

Статья поступила в редакцию 20.10.13.

ЧЕРНОГОР Леонид Феоктистович – доктор физико-математических наук, профессор, Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина (Украина, Харьков). Область научных интересов – радиофизика, телекоммуникации, радиолокация, радионавигация. Автор 820 публикаций.

E-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

КАЦКО Софья Валериевна – аспирант, младший научный сотрудник отдела геофизики, Институт ионосферы (Украина, Харьков). Область научных интересов – радиофизика, геофизика. Автор 21 публикации.

E-mail: sophiaharytonova@gmail.com

CHERNOGOR Leonid Feoktistovich – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Kharkov National University named after V. N. Karazin (Kharkov, Ukraine). The sphere of scientific interests is Radiophysics, Telecommunications, Radiolocation and Radio Navigation. The author of 820 publications.

E-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

KATSKO Sophia Valerievna – a postgraduate student, Junior Research Fellow of Geophysics Department, Ionosphere Institute (Kharkov, Ukraine). The sphere of scientific interests is Radiophysics, Geophysics. The author of 21 publications.

E-mail: sophiaharytonova@gmail.com.

L. F. Chernogor, S. V. Katsko

THE DISTURBANCE OF PARAMETERS OF IONOSPHERIC RADIO WAVES PROPAGATION CHANNEL DURING OF GEOSPACE STORMS

Key words: *propagation channel; geospace storm; radio waves absorption; phase variations; radio signals scintillations.*

ABSTRACT

It is demonstrated that strong geomagnetic storms reduce to intense parameters disturbance of near-the Earth medium in whole and middle latitude ionosphere in particular. Ionospheric parameters variations cause considerable reconstruction of radio waves propagation channel during geospace storms. At that main radio waves characteristics change such as a phase, an instant frequency, an amplitude and etc. It is shown that the frequency capacity of radio waves propagation channel on traces Earth – ionosphere – Earth decrease in 5–6 times during negative ionospheric storms at the middle latitudes. At the same time most HF range radio lines are destroying. It is recommended to decrease the operating frequency of telecommunication facilities to 3 times for providing with distant radio communication in HF range during negative ionospheric storms. If the frequency is not modified, the communication on traces Earth – ionosphere – Earth will be troubled at all.

Radio waves absorption with radio wave length equal 0.1 – 100 m increase on 10 – 100 % during positive ionospheric storms. Therefore telecommunication systems of HF range must change on most high frequencies, which may be higher than the operating frequency on some tens percent during quite conditions. At the same time the frequency capacity of telecommunication channel is also widening. As a result of the significant electron concentration increase in the lower ionosphere, the integral coefficient of absorption increases in 10 – 30 times and reduces to considerable decrease of the signal/noise ratio on radio lines VLF, LF, MF and HF ranges. At that there are significant phase distortions in LF and VLF ranges.

The increase of the irregularity structure intensity of electron density is accompanied by the multipathing increase in HF radio waves range and also the scintillation intensification in VLF and UHF radio signals ranges. In a number of cases the last reduces to the disturbance of radio lines operation on traces Earth – space and space – Earth. The intensification of ionospheric turbulence during geospace storms will have produce to radio signal fading in the wide frequency range (to the centimeter range of radio waves). It is recommended to apply radio-technical facilities of different function, which are entered on frequency, for the preservation of previous interference immunity (which has place during quite conditions).

УДК 550.388.2

**Ю. В. Ясюкевич, А. А. Мыльникова, В. В. Демьянов, В. А. Иванов,
Н. В. Рябова, А. В. Зуев, М. И. Рябова, А. А. Кислицын**

СУТОЧНАЯ ДИНАМИКА ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ НАД ГОРОДАМИ ИРКУТСК И ЙОШКАР-ОЛА ПО ДАННЫМ GPS/ГЛОНАСС И МОДЕЛИ IRI-2012

Представлен разработанный алгоритм определения абсолютного полного электронного содержания по данным отдельных приёмников GPS/ГЛОНАСС, отличающийся учётом дифференциальных кодовых задержек в аппаратуре спутников и приёмников. Анализ региональных особенностей экспериментального суточного хода полного электронного содержания в ионосфере и хода, полученного с использованием международной справочной модели IRI-2012, показал, что существующие отличия, связанные с аномалиями, необходимо принимать во внимание в практике действующих радиотехнических систем.

Ключевые слова: полное электронное содержание; GPS; ГЛОНАСС; дифференциальные кодовые задержки; аномалии распространения.

Введение. Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) ГЛОНАСС и GPS (Global Positioning System) были разработаны для определения точных координат приёмника, регистрирующего сигналы от навигационных искусственных спутников Земли (НИСЗ) при известных координатах НИСЗ. В настоящее время ГНСС используются также для дистанционного радиозондирования ионосферы [1–5], когда по двухчастотным кодовым и фазовым измерениям псевдодальности определяется полное электронное содержание в ионосфере (ПЭС) [1,2,6,7].

В ряде научных центров были разработаны методики расчёта глобальных карт GIM вертикального ПЭС на основе данных сети станций навигационных приёмников GPS/ГЛОНАСС [8–10]. Эти карты находят широкое применение для изучения климатологии ПЭС [11, 12]. На основе GIM были разработаны алгоритмы определения глобального электронного

содержания – полного числа электронов в ионосфере Земли [13]. Глобальные ионосферные карты позволяют исследовать региональное электронное содержание [14]. Однако данная технология имеет свои ограничения, связанные как с малым временным разрешением, так и с невысокой достоверностью данных в ряде регионов мира из-за отсутствия в них экспериментальных данных.

Целью работы является создание методики и алгоритма определения абсолютного вертикального полного электронного содержания на основе данных отдельных навигационных приёмников GPS/ГЛОНАСС и оценка по ним суточного хода ПЭС; апробация их для регионов г. Иркутска и г. Йошкар-Олы.

Адекватность результатов и выводов планируется проверить путём сопоставления их с данными GIM лаборатории CODG и данными моделирования с привлечением международной справочной

модели ионосферы IRI-2012 (<http://iri.gsfc.nasa.gov/>) [15–19].

Методика определения абсолютного значения полного электронного содержания. Методика определения полного электронного содержания вдоль луча спутник–приёмник с использованием фазовых и групповых измерений на двух частотах достаточно хорошо описана в литературе (см. например [1,2]). Пренебрегая влиянием магнитного поля на показатель преломления ионосферы, ПЭС определяется по формулам (1) и (2).

$$I = \frac{1}{40,308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + K + \sigma L], \quad (1)$$

где $L_1 \lambda_1$, $L_2 \lambda_2$ – приращения фазового пути радиосигнала, вызванные изменением фазы в ионосфере; $L_{1,2} = \Delta \varphi_{1,2} / 2\pi$ – фазовые измерения навигационного приёмника, выполненные на частоте соответственно f_1 и f_2 ; K – неоднозначность фазовых измерений; σL – ошибка измерения фазы.

$$I = \frac{1}{40,308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(P_2 - P_1) + DCB + \sigma P], \quad (2)$$

где P_1 , P_2 – псевдозадержка на первой и второй частоте; σP – случайная ошибка измерения дальности по P коду; DCB – Differential code biases – ошибка, связанная с дифференциальными кодовыми задержками (частотно-зависимыми эффектами при распространении радиосигнала в аппаратуре спутников и приёмников).

Хорошо известно, что ПЭС, полученное по групповым измерениям (2), достаточно сильно зашумлено. Особенно значительно это проявляется на низких углах, где шумы измерений могут достигать более 100 % [20]. При этом с точностью до ошибки, связанной с DCB, групповые измерения ПЭС являются абсолютными.

Фазовые измерения характеризуются значительно меньшим шумом, однако, вследствие неоднозначности измерения фазы, они позволяют получать только ва-

риации ПЭС вдоль луча спутник–приёмник.

Для вычисления абсолютного вертикального ПЭС нами был разработан алгоритм, основанный на одновременном использовании фазовых и групповых измерений ПЭС и простой модели измерений ПЭС, учитывающей дифференциальные кодовые задержки.

Алгоритм имеет следующую структуру:

1) разделение рядов данных на непрерывные интервалы по времени;

2) детектирование и устранение выбросов и срывов сопровождения сигнала. Данный алгоритм основан на последовательной оценке шума измерений и сопоставлении изменения величины ПЭС с текущей оценкой шума σ [21]. При скачке одного из измерений ПЭС более чем на 4σ регистрируется срыв измерений. Если следующие три измерения ПЭС находятся в интервале 4σ относительно друг друга, то фиксируется срыв сопровождения сигнала. Устранение основано на линейной аппроксимации достоверно измеренных величин;

3) вычисление неоднозначности фазовых измерений и ПЭС осуществляется на основе усреднения разности фазовых и групповых измерений. Неоднозначность фазовых измерений для каждого непрерывного интервала определяется как:

$$K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_2 - P_1 - (L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2))_i, \quad (3)$$

где P_1 , P_2 – кодовые измерения псевдодальности, L_1 , L_2 – фазовые измерения на двух частотах, λ_1 , λ_2 – длина волны, N – число измерений.

При накоплении независимых измерений интенсивность шума определения этой неоднозначности падает в $\sqrt{N}$ раз;

4) задание модели измерений и вычисление параметров этой модели на основе экспериментальных данных по методу наименьших квадратов.

Используемая нами модель измерений имеет вид (4). Параметрами модели могут

являться вертикальное ПЭС, широтные и долготные градиенты, временная производная ПЭС.

$$I_M = S_j^i (I_V + G_{Lon} \cdot \Delta Lon_j^i + G_{q_Lon} \cdot (\Delta Lon_j^i)^2 + G_{Lat} \cdot \Delta Lat_j^i + G_{q_Lat} \cdot (\Delta Lat_j^i)^2 + G_t \cdot \Delta t_j^i + G_{q_t} \cdot (\Delta t_j^i)^2) + I_{BIAS_j}, \quad (4)$$

где i отмечает номер измерения, j – номер спутника GPS или ГЛОНАСС; I_V – абсолютное значение вертикального ПЭС; G_{Lon} , G_{Lat} , G_{q_Lon} , G_{q_Lat} – линейные и квадратичные члены пространственных градиентов ПЭС по широте (Lon) и долготе (Lat); ΔLon , ΔLat – расстояние по широте и долготе между подионосферной точкой и станцией; G_t , G_{q_t} – временная первая и вторая производная ПЭС; Δt – разница по времени между текущим временем и серединой анализируемого интервала.

В модели задаётся функциональная зависимость градиентов и производных ПЭС, а также зависимость ПЭС от угла места посредством фактора наклона S_j^i :

$$S_j^i = \left[\cos \left\{ \arcsin \left(\frac{R_E}{R_E + h_{\max}} \cdot \cos \theta_i^j \right) \right\} \right]^{-1}, \quad (5)$$

где R_E – радиус Земли, $h_{\max}=450$ км – средневзвешенная высота ионосферы, θ_i – угол места.

Далее по методу наименьших квадратов определяются параметры модели. Для этого осуществляется минимизация функционала:

$$U = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{N_j} W_i^j \cdot (I_{Mi}^j - I_{изм}^j)^2, \quad (6)$$

где $W_i^j = \frac{1}{S_i^j} \left[1 + \left(\frac{2 \cdot \Delta t_i^j}{UT_{end} - UT_{beg}} \right)^2 \right]^{-1}$ – весовой множитель.

После дифференцирования по параметрам модели получаем набор уравнений. Далее формируется матрица коэффициентов для полученной системы

уравнений $Ax=B$, которая решается численным методом.

Оценка параметров модели осуществлялась по данным двухчасовых интервалов. Начало каждого интервала сдвинуто относительно предыдущего на полчаса.

Динамика ПЭС над городами Иркутск и Йошкар-Ола в 2012 г. Для анализа нами были использованы данные одновременных наблюдений в г. Иркутске и в г. Йошкар-Оле за 22 дня 2012 г., для которых имелись непрерывные суточные измерения GPS/ГЛОНАСС в г. Иркутске и г. Йошкар-Оле. Анализируемые дни, а также максимальное значение Kp за сутки представлены в таблице (с. 21). Геомагнитную обстановку в рассматриваемый период за исключением 17 июня, когда наблюдалось небольшое возмущение магнитосферы, можно оценить как спокойную. Здесь же представлено максимальное и минимальное значение ПЭС, полученное на основе изложенной в настоящей статье методики, а также среднеквадратичное отклонение (СКО) ПЭС, полученного на основе разных методик: по данным сети станций, полученным лабораторией CODG, и по данным отдельного приёмника GPS/ГЛОНАСС.

На рисунках 1–4 представлены данные вертикального полного электронного содержания над г. Иркутском и г. Йошкар-Олой в зимний (рис. 1), весенний (рис. 2), летний (рис. 3), осенний (рис. 4) периоды. Красной кривой – результаты, полученные на основе описанного выше алгоритма с использованием экспериментальных данных GPS/ГЛОНАСС для Иркутской станции IRKJ и IR50, а также Йошкар-Олинской станции YOSH. Синей кривой приведены данные вертикального ПЭС лаборатории CODG, полученные на сети станций GPS/ГЛОНАСС. Чёрной кривой приведены модельные данные, полученные на основе международной справочной модели ионосферы IRI-2012 (<http://iri.gsfc.nasa.gov/>).

**Геомагнитная возмущённость, а также максимальные и минимальные значения
ПЭС за сутки**

дата	день года	КР _{макс}	г. Иркутск			г. Йошкар-Ола		
			ПЭС _{мин} , TECU	ПЭС _{макс} , TECU	СКО	ПЭС _{мин} , TECU	ПЭС _{макс} , TECU	СКО
21 января	21	2,3	2,4	19,3	0,8	0,7	19,0	1,6
22 января	22	4,7	3,7	16,7	1,5	1,3	22,7	3,7
29 января	29	2,7	1,7	18,8	1,1	1,9	17,9	0,6
31 января	31	1,3	3,1	29,0	2,6	3,5	18,9	1,0
21 марта	81	2,3	6,3	21,1	2,1	3,3	18,6	1,6
31 марта	91	2,3	7,4	26,8	2,3	4,6	24,8	2,8
7 апреля	98	3,3	5,1	24,1	2,4	2,6	24,0	2,1
8 апреля	99	2,3	5,1	25,6	2,1	0,6	23,9	1,8
30 мая	151	2,3	12,3	22,4	4,4	14,6	23,6	4,6
2 июня	154	3,7	15,0	23,6	5,6	9,5	23,6	4,7
17 июня	169	6	5,3	20,5	2,8	7,3	17,9	2,8
24 июня	176	1,7	9,6	16,4	3,8	7,4	16,5	3,2
25 июня	177	3,3	8,2	18,6	2,8	6,1	22,8	2,8
26 июня	178	2,7	8,4	15,4	3,0	6,2	14,0	3,4
31 октября	305	2,3	4,2	22,6	1,6	4,1	23,0	1,8
2 ноября	307	2,3	3,0	25,0	1,3	3,3	20,0	1,4
27 ноября	332	1,3	1,4	15,7	1,4	0,5	13,9	1,4
29 ноября	334	1,3	2,1	15,3	1,0	3,6	12,9	1,7
13 декабря	348	1,7	3,2	14,2	1,5	1,4	13,6	1,5
22 декабря	357	0,3	1,7	11,0	0,7	3,4	11,3	1,3
23 декабря	358	1	0,9	11,2	1,1	3,4	10,9	1,0
27 декабря	362	0,7	3,1	11,9	1,3	2,7	10,9	1,0

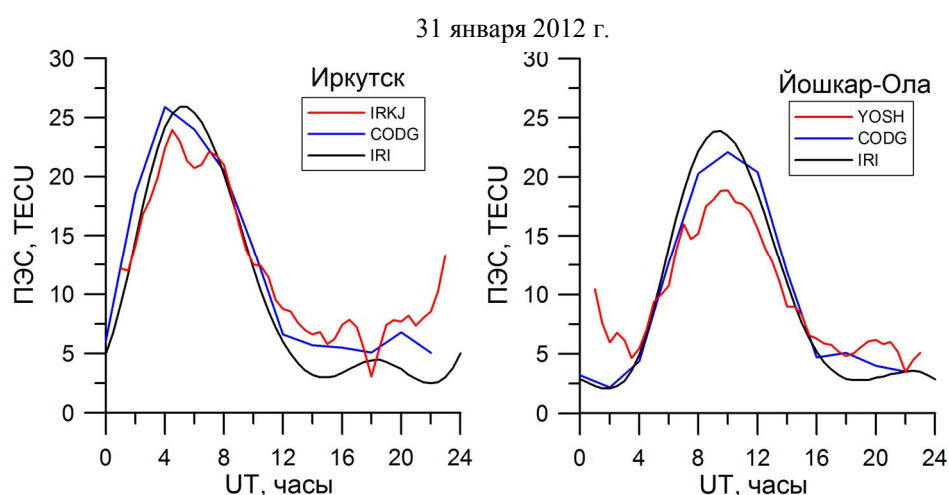


Рис. 1. Суточный ход абсолютного ПЭС над г. Иркутском и г. Йошкар-Олой 31 января 2012 г.
Красная кривая – результаты, полученные с использованием указанного выше алгоритма, синяя кривая – данные CODG, чёрная кривая – данные модели IRI-2012

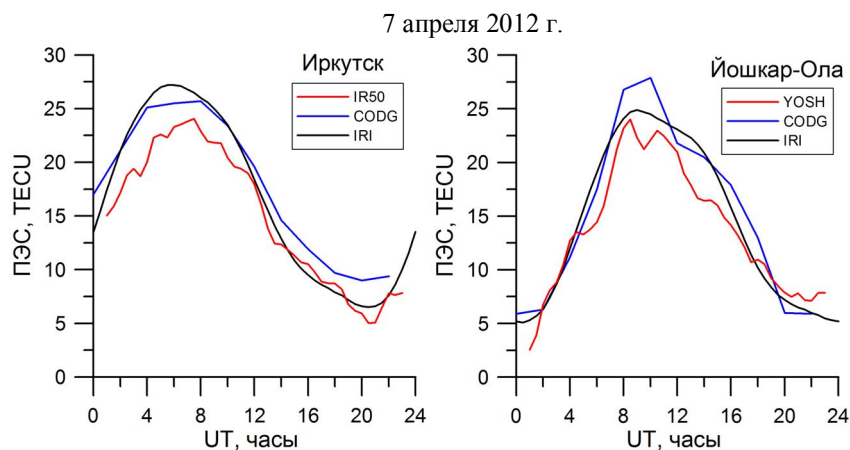


Рис. 2. Суточный ход абсолютного ПЭС над г. Иркутском и г. Йошкар-Олой 7 апреля 2012 г.
Красная кривая – результаты, полученные с использованием указанного выше алгоритма, синяя кривая – данные CODG, чёрная кривая – данные модели IRI-2012

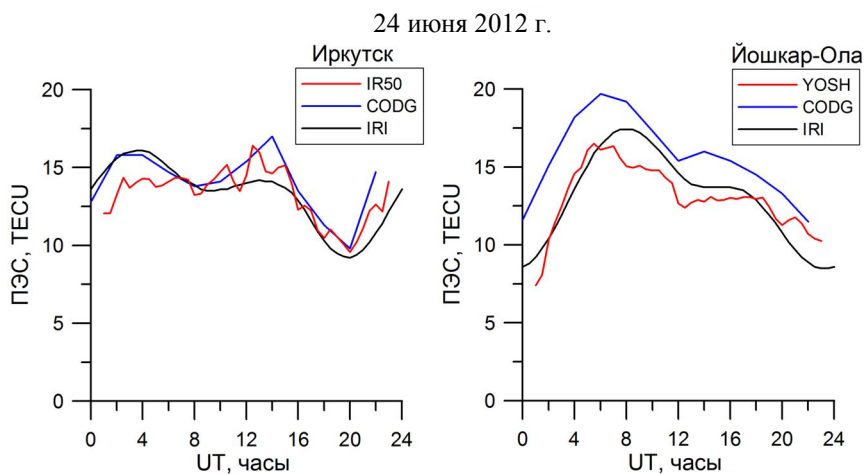


Рис. 3. Суточный ход абсолютного ПЭС над г. Иркутском и г. Йошкар-Олой 24 июня 2012 г.
Красная кривая – результаты, полученные с использованием указанного выше алгоритма, синяя кривая – данные CODG, чёрная кривая – данные модели IRI-2012

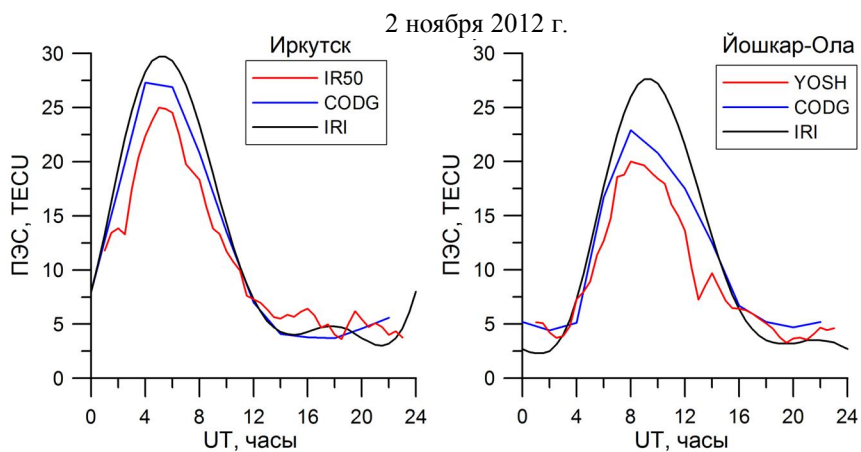


Рис. 4. Суточный ход абсолютного ПЭС над г. Иркутском и г. Йошкар-Олой 2 ноября 2012 г.
Красная кривая – результаты, полученные с использованием указанного выше алгоритма, синяя кривая – данные CODG, чёрная кривая – данные модели IRI-2012

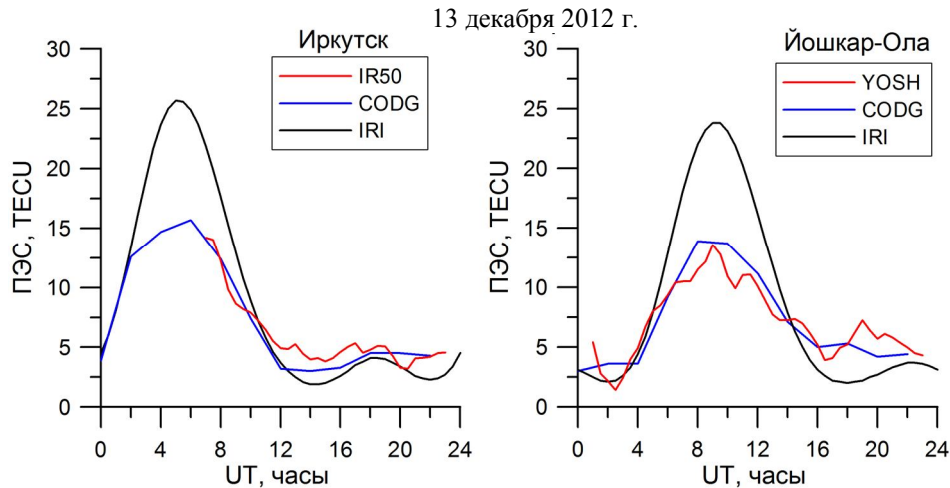


Рис. 5. Суточный ход абсолютного ПЭС над г. Иркутском и г. Йошкар-Олой 13 декабря 2012 г. Красная кривая – результаты, полученные с использованием указанного выше алгоритма, синяя кривая – данные CODG, чёрная кривая – данные модели IRI-2012

Можно видеть, что в целом, полученные нами результаты суточного хода ПЭС являются достаточно адекватными. Наблюдается полуденный максимум во временном интервале 13–15 часов локального времени с явно выраженным переходом к ночной ионосфере в вечернее время. В летние месяцы перепад дневных и ночных значений становится менее выраженным.

Вертикальное ПЭС над г. Иркутском несколько превышает ПЭС (см. таблицу) над г. Йошкар-Олой. Это соответствует тому, что г. Йошкар-Ола находится на более высокой широте ($56,7^\circ$), чем г. Иркутск ($52,2^\circ$).

Для всех сезонов можно отметить достаточно близкое подобие общей формы хода ПЭС по экспериментальным и модельным данным. Можно отметить, что в дневное время полученные нами значения оказываются несколько ниже модельных значений и данных CODG. В вечернее и ночное время согласие несколько лучше.

Исключение составляют данные за конец ноября – декабрь 2012 г., когда модельные данные в несколько раз превос-

ходят экспериментальные данные, полученные по изложенной в настоящей статье методике, и данные CODG (см. рис. 5).

Кроме того, стоит отметить слабое проявление в экспериментальных данных CODG ночного увеличения ПЭС, заложенного в модель (см. рис. 1, 4). Полученные нами данные демонстрируют подобное увеличение, но оно выражено не достаточно сильно по сравнению с моделью.

Заключение. Разработанная методика позволяет определять вертикальное ПЭС по данным отдельных приёмников GPS/ГЛОНАСС. Полученная динамика ПЭС качественно согласуется с динамикой ПЭС по данным лаборатории CODG, а также модельной динамикой ПЭС. При этом имеет место превышение данных CODG над данными, полученными на основе описанной в настоящей статье методики. Наиболее сильное различие отмечается для дневного времени. Имеет место достаточно хорошее соответствие экспериментальных данных, а также модельных данных IRI-2012.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность В. И. Куркину, Д. В. Иванову, А. В. Медведеву за интерес к работе и ценные замечания.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ: гранты № 13-05-90762 мол_рф_нр; 12-02-31734_мол_а; 13-07-00371-а; 13-02-00524-а; 13-07-97041.

Список литературы

1. Афраймович, Э.Л. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Э.Л. Афраймович, Н.П. Перевалова. – Иркутск: Изд-во ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. – 480 с.
2. Hofmann-Wellenhof, B. Global Positioning System: Theory and Practice / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, J. Collins. – New York: Springer-Verlag Wien, 1992. – 327 p.
3. Иванов, В.А. Зондирование ионосферы и декаметровых каналов связи сложными радиосигналами / В.А. Иванов, Д.В. Иванов, Н.В. Рябова // Вестник Марийского государственного технического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2010. – № 1 (8). – С. 3-37.
4. Иванов, Д.В. Искажения в ионосфере декаметровых сигналов с псевдослучайной рабочей частотой / Д.В. Иванов // Радиотехника и электроника. – 2006. – Т. 51, № 7. – С. 807-815.
5. Иванов, В.А. Теоретические основы метода прямого цифрового синтеза радиосигналов для цифровых систем связи / В.А. Иванов, Д.В. Иванов, А.А. Чернов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2012. – № 1 (15). – С. 3-34.
6. Иванов, В.А. Влияние геомагнитных возмущений на полное электронное содержание ионосферы / В.А. Иванов, А.Ю. Желонкин, Н.В. Рябова, А.В. Зуев // Вестник Марийского государственного технического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2011. – № 1 (11). – С. 24-30.
7. Иванов, В. А. Экспериментальное определение полного электронного содержания в ионосфере над Йошкар-Олой с использованием технологий ГЛОНАСС/GPS / В. А. Иванов, Н.В. Рябова, М. И. Рябова, А.А. Кислицын // Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике: материалы IV Всероссийской научной конференции (III Всероссийские Арmandовские чтения). – Муром: Изд. - полиграфический центр МИ ВлГУ, 2013. – С. 101-105.

References

1. Afraymovich E. L., Perevalova N. P. GPS-monitoring verkhney atmosfery Zemli [GPS-Monitoring of the Upper Earth's Atmosphere]. Irkutsk: Izd-vo GU NTS RVKH VSNTS SO RAMN, 2006. – 480 p.
2. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System: Theory and Practice. New York: Springer-Verlag Wien, 1992. 327 p.
3. Ivanov V. A., Ivanov D. V., Ryabova N. V. Zondirovanie ionosfery i dekametrovykh kanalov svyazi slozhnymi radiosignalami [The Sounding of the Ionosphere and Decameter Communication Channels by Complex Radio Signals]. Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy [Vestnik of Mari State Technical University. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems]. 2010. No 1 (8). P. 3-37.
4. Ivanov D. V. Iskazheniya v ionosphere dekametrovykh signalov s psevdosluchainoy rabochey chistotoy [Distortions of Decameter Signals with Pseudorandom Operating Frequency in the Ionosphere]. Radiotekhnika i elektronika [Radio Engineering and Electronics]. 2006. Vol. 51, No 7. P. 807-815.
5. Ivanov V. A., Ivanov D. V., Chernov A. A. Teoreticheskie osnovy metoda pryamogo tsifrovogo sinteza radiosignalov dlya tsifrovyykh sistem svyazi [The Theory of the Method of Direct Digital Synthesis of Radio Signals for Digital Communication Systems]. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser. Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems]. 2012. No 1 (15). – P. 3-34.
6. Ivanov V. A., Zhelonkin A. Yu., Ryabova N. V., Zuev A. V. Vliyanie geomagnitnykh vozmushcheniy na polnoe elektronnoe soderzhanie ionosfery [The Influence of Geomagnetic Disturbance on Total Electronic Content of the Ionosphere]. Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy [Vestnik of Mari State Technical University. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems]. 2011. No 1 (11). P. 24-30.
7. Ivanov V. A., Ryabova N. V., Ryabova M. I., Kislitsin A. A. Eksperimental'noe opredelenie polnogo elektronno soderzhaniya v ionosfere nad Yoshkar-Oloy s ispol'zovaniem tekhnologiy GLONASS/GPS [Experimental Determination of Total Electron Content in the Ionosphere over Yoshkar-Ola Using GLONASS/GPS Technologies]. Sverkhshirokoplosnye signaly v radiolokatsii, svyzi, i akustike: materialy IV Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii (III Vserossiyskie Armandovskie chteniya) [Ultra Broadband

8. *Schaer, S.* Mapping and predicting the ionosphere / S. Schaer, G. Beutler, M. Rothacher // Proceedings of the IGS AC Workshop (February 9-11). – Darmstadt, Germany. – 1998. – P. 307–320.
9. *Hernández-Pajares, M.* New approaches in global ionospheric determination using ground GPS data / M. Hernández-Pajares, J.M. Juan, J. Sanz // J. Atmos. Solar Terr. Phys. – 1999. – Vol. 61. – P. 1237–1247.
10. *Mannucci, A.J.* A global mapping technique for GPS derived ionosphere TEC measurements / A.J. Mannucci, B.D. Wilson, D.N. Yuan, C.M. Ho, U.J. Lindqwister, T.F. Runge // Radio Sci. – 1998. – Vol. 33 (3). – P. 565–582.
11. *Libo, Liu.* Climatology of the mean total electron content derived from GPS global ionospheric maps / Libo Liu, Weixing Wan, Baiqi Ning, Man-Lian Zhang // Journal of geophysical research. – 2009. – Vol. 114, A06308, doi:10.1029/2009JA014244.
12. *Иванов, В.А.* Исследование влияния на помехоустойчивость радионавигационных сигналов ГЛОНАСС/GPS метеоусловий и космической погоды / В.А. Иванов, Н.В. Рябова, А.А. Кислицын, А.В. Зуев, С.В. Крылов // Вестник Марийского государственного технического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2011. – № 3 (13). – С. 25–35.
13. *Astafyeva, E.I.* Dynamics of global electron content in 1998–2005 derived from global GPS data and IRI modeling / E.I. Astafyeva, E.L. Afraimovich, A.V. Oinats, Yu.V. Yasukevich, I.V. Zhivetiev // Advances in Space Research. – 2008. – Vol. 42, No 4. – P. 763–769. doi:10.1016/j.asr.2007.11.007.
14. *Ясюкевич, Ю.В.* Региональное электронное содержание в Байкальской рифтовой зоне / Ю.В. Ясюкевич, И.В. Живетьев, А.В. Лухнев // Материалы Российской научной конференции «Зондирование земных покровов радарми с синтезированной апертурой» (06–10 сентября 2010 г., г. Улан-Удэ). – М.: Издание JRE – ИПЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2010. – С. 195–204. http://jre.cplire.ru/jre/library/Ulan-Ude-2010/pdffiles/s2_1.pdf
15. *Иванов, В.А.* Зондирование ионосферных каналов высокочастотной связи с поверхности Земли / В.А. Иванов, Д.В. Иванов, Н.В. Рябова, Signals in Radiolocation, Communication and Acoustics: Proceedings of IV All-Russian Scientific Conference (III Armand Readings)]. – Murom: Publishing house – printing center MI VISU, 2013. P. 101–105.
8. *Schaer S., Beutler G., Rothacher M.* Mapping and predicting the ionosphere. Proceedings of the IGS AC Workshop (February 9–11). Darmstadt, Germany. 1998. P. 307–320.
9. *Hernández-Pajares M., Juan J.M., Sanz J.* New approaches in global ionospheric determination using ground GPS data. J. Atmos. Solar Terr. Phys. 1999. Vol. 61. P. 1237–1247.
10. *Mannucci A.J., Wilson B.D., Yuan D.N., Ho C.M., Lindqwister U.J., Runge T.F.* A global mapping technique for GPS derived ionosphere TEC measurements. Radio Sci. 1998. Vol. 33 (3). P. 565–582.
11. *Libo Liu, Weixing Wan, Baiqi Ning, Man-Lian Zhang.* Climatology of the mean total electron content derived from GPS global ionospheric maps // Journal of geophysical research. 2009. Vol. 114. A06308, doi:10.1029/2009JA014244.
12. *Ivanov V. A., Ryabova N. V., Kislitsin A. A., Zuev A. V., Krylov S. V.* Issledovanie vliyaniya na pomekhoustoichivost' radionavigatsionnykh signalov GLONASS/GPS meteousloviy i kosmicheskoi pogody [The Research on the Influence of Meteorological Conditions and Cosmic Weather on the Interference Immunity of Radio Navigation Signals GLONASS/GPS]. Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy [Vestnik of Mari State Technical University. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems]. 2011. No 3(13). P. 25–35.
13. *Astafyeva E.I., Afraimovich E.L., Oinats A.V., Yasukevich Yu.V., Zhivetiev I.V.* Dynamics of global electron content in 1998–2005 derived from global GPS data and IRI modeling. Advances in Space Research. 2008. Vol. 42, No 4. P. 763–769. doi:10.1016/j.asr.2007.11.007.
14. *Yasukevich Yu. V., Zhivetiev I. V., Lukhnev A. V.* Regional'noe elektronnoe sodержanie v Baikal'skoy riftovoy zone [Regional Electron Content in Baikal Rift Zone]. Materialy Rossiyskoy nauchnoy konferentsii «Zondirovanie zemnykh pokrovov radarami s sintezirovannoy aperturoy» [Proceedings of Russian Scientific Conference «Sounding of Land Covers by Radars with Synthetic Aperture» (September 6–10, 2010, Ulan-Ude)]. Moscow: Edition of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, 2010. – P. 195–204. http://jre.cplire.ru/jre/library/Ulan-Ude-2010/pdffiles/s2_1.pdf
15. *Ivanov V. A., Ivanov D. V., Ryabova N. V., Mal'tsev A. V., Ryabova M. I., Tsarev I. E.* Zondirovanie ionosfernykh kanalov vysokochastotnoy

А.В. Мальцев, М.И. Рябова, И.Е. Царев // Вестник Марийского государственного технического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2008. – № 1 (2). – С. 3-20.

16. *Иванов, В.А.* Искажение сложных декаметровых радиосигналов в дисперсных ионосферных радиоканалах при квазизенитном распространении / В.А. Иванов, Д.В. Иванов, М.И. Рябова, Н.А. Сорокин // Вестник Марийского государственного технического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2010. – № 1 (8). – С. 43-53.

17. *Иванов, В.А.* Исследование регулярной и стохастической дисперсии в ионосферных широкополосных высокочастотных радиоканалах / В.А. Иванов, Д.В. Иванов, Н.Н. Михеева, М.И. Рябова // Нелинейный мир. – 2012. – Т. 10, № 10. – С. 678-686.

18. *Иванов, В.А.* Диагностика функции рассеяния декаметровых узкополосных стохастических радиоканалов / В.А. Иванов, Н.В. Рябова, И.Е. Царев // Радиотехника и электроника. – 2009. – Т. 55, № 3. – С. 285-292.

19. *Иванов, В.А.* Численные и полунатурные исследования функции рассеяния узкополосных декаметровых радиоканалов / В.А. Иванов, Д.В. Иванов, Н.В. Рябова, И.Е. Царев // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2009. – Т. 14, № 8. – С. 46-54.

20. *Куницын, В.Е.* Радиотомография ионосферы / В.Е. Куницын, Е.Д. Терещенко, Е.С. Андреева. – М.: Физматлит, 2007. – 255 с.

21. *Blewitt, G.* An automatic editing algorithm for GPS data / G. Blewitt // Geophysical Research Letters. – 1990. – No.17. – P. 483-492.

svyazi s poverkhnosti Zemli [The Sounding of the Ionospheric Channels of High-frequency Communication from the Surface of the Earth]. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser. Radio Engineering and Infocommunication Systems. 2008. No 1 (2). P. 3-20.

16. *Ivanov V. A., Ivanov D. V., Ryabova M. I., Sorokin N. A.* Iskazhenie slozhnykh dekametrovykh radiosignalov v dispersnykh ionosfernnykh radiokanalakh pri kvazizenitnom rasprostranenii [The Distortion of Complex Decameter Radio Signals in Dispersive Ionospheric Radio Channels During their Quasi-zenithal Propagation]. Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy [Vestnik of Mari State Technical University. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems]. 2010. No 1 (8). P. 43-53.

17. *Ivanov V. A., Ivanov D. V., Mikheeva N. N., Ryabova M. I.* Issledovanie regul'yarnoy i stokhasticheskoy dispersii v ionosfernnykh shirokopolosnykh vysokochastotnykh radiokanalakh [Research on Regular and Stochastic Dispersion in Ionospheric Broadband High-frequency Radio Channels]. Nelineyny mir [Nonlinear world]. 2012. Vol. 10, No 10. P. 678-686.

18. *Ivanov V. A., Ryabova N. V., Tsarev I. E.* Diagnostika funktsii rasseyaniya dekametrovykh uzkopolosnykh stokhasticheskikh radiokanalov [Diagnostics of Scattering Function of Decameter Narrowband Stochastic Radio Channels]. Radiotekhnika i elektronika [Radio Engineering and Electronics]. 2009. Vol. 55, No 3. P. 285-292.

19. *Ivanov V. A., Ivanov D. V., Ryabova N. V., Tsarev I. E.* Chislennye i polunaturalnye issledovaniya funktsii rasseyaniya uzkopolosnykh dekametrovykh radiosignalov [Numerical and Seminalural Investigations of Narrowband Decameter Radio Signal Scattering Function]. Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy [Electromagnetic Waves and Electronic Systems]. 2009. Vol. 14. No 8. P. 46-54.

20. *Kunitsin V. E., Tereshchenko E. D., Andreeva E. S.* Radiotomografiya ionosfery [Radio Tomography of the Ionosphere]. Moscow: Fizmatlit, 2007. 255 p.

21. *Blewitt, G.* An automatic editing algorithm for GPS data. Geophysical Research Letters. 1990. No. 17. P. 483-492.

Статья поступила в редакцию 22.10.13.

ЯСЮКЕВИЧ Юрий Владимирович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЗФ СО РАН) (Российская Федерация, Иркутск). Область научных интересов – исследование ионосферы с использованием глобальных навигационных спутниковых систем, влияние гелио-геофизических факторов на стабильность работы навигационных систем. Автор 60 публикаций.

E-mail: yasukevich@iszf.irk.ru

МЫЛЬНИКОВА Анна Александровна – аспирант, Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЗФ СО РАН) (Российская Федерация, Иркутск). Область научных интересов – использование GPS/ГЛОНАСС для определения параметров ионосферной плазмы. Автор четырёх публикаций.

E-mail: manna@iszf.irk.ru

ДЕМЬЯНОВ Владислав Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры автоматики и телемеханики, Иркутский государственный университет путей сообщения; главный специалист отдела физики околоземного космического пространства, Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (Российская Федерация, Иркутск). Область научных интересов – анализ влияния факторов космической погоды на устойчивость работы навигационных систем. Автор более 100 публикаций.

E-mail: sword1971@yandex.ru

ИВАНОВ Владимир Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – ионосфера, распространение радиоволн, моделирование, широкополосные сигналы. Автор более 250 публикаций.

E-mail: IvanovVA@volgatech.net

РЯБОВА Наталья Владимировна – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники и связи, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – информационно-телекоммуникационные системы, ионосфера, распространение радиоволн, прогнозирование, моделирование, адаптивные системы. Автор более 130 публикаций.

E-mail: RyabovaNV@volgatech.net

ЗУЕВ Алексей Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники и связи, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – радионавигационные и телекоммуникационные системы. Автор 49 публикаций.

E-mail: ZuevAV@volgatech.net

РЯБОВА Мария Игоревна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – моделирование технических систем, распространение радиоволн. Автор более 35 публикаций.

E-mail: RyabovaMI@volgatech.net

КИСЛИЦЫН Алексей Александрович – аспирант кафедры радиотехники и связи, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – исследование ионосферы Земли, радионавигационные системы связи. Автор 12 публикаций.

E-mail: KislitsinAA@volgatech.net

YASUKEVICH Yuri Vladimirovich – Candidate of Physics and Mathematics, Research Fellow, Institute of Solar-Terrestrial Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISTP SB RAS) (Irkutsk, Russian Federation). The sphere of scientific interests is the research on the ionosphere using global navigation satellite systems, the influence of heliogeophysical factors on the stability of navigation system work. The author of 60 publications.

E-mail: yasukevich@iszf.irk.ru

MYLNIKOVA Anna Aleksandrovna – a postgraduate student, Institute of Solar-Terrestrial Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISTP SB RAS) (Irkutsk, Russian Federation). The sphere of scientific interests is the use of GPS/GLONASS for the determination of ionospheric plasma parameters. The author of 4 publications.

E-mail: manna@iszf.irk.ru

DEMYANOV Vladislav Vladimirovich – Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Chair of Automatics and Telemechanics of Irkutsk State Transport University; leading specialist of the Department of Physics of Circumterrestrial Space of the Institute of Solar-Terrestrial Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russian Federation). The sphere of scientific interests is the analysis of the influence of cosmic weather factors on navigation system work stability. The author of more than 100 publications.

E-mail: sword1971@yandex.ru

IVANOV Vladimir Alekseevich – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, the Head of the Chair of Higher Mathematics at Volga State University of Technology (Yoshkar-Ola, Russian Federation). The sphere of scientific interests is the ionosphere, the propagation of radio waves, modeling and broadband signals. The author of more than 250 publications.

E-mail: IvanovVA@volgatech.net

RYABOVA Natalia Vladimirovna – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, the Head of the Chair of Radio Engineering and Communication at Volga State University of Technology (Yoshkar-Ola, Russian Federation). The sphere of scientific interests is information and telecommunication systems, the ionosphere, the propagation of radio waves, forecasting, modeling, adaptive systems. The author of more than 130 publications.

E-mail: RyabovaNV@volgatech.net

ZUEV Aleksey Valeryevich – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Chair of Radio Engineering and Communication at Volga State University of Technology (Yoshkar-Ola, Russian Federation). The sphere of scientific interests is radio navigation and telecommunication systems. The author of 49 publications.

E-mail: ZuevAV@volgatech.net

RYABOVA Maria Igorevna – Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor of the Chair of Higher Mathematics at Volga State University of Technology (Yoshkar-Ola, Russian Federation). The sphere of scientific interests is the modeling of technical systems, the propagation of radio waves. The author of more than 35 publications.

E-mail: RyabovaMI@volgatech.net

KISLITSIN Aleksey Aleksandrovich – a postgraduate student of the Chair of Radio Engineering and Communication at Volga State University of Technology (Yoshkar-Ola, Russian Federation). The sphere of scientific interests is the research on the Earth's ionosphere, radio navigation communication systems. The author of 12 publications.

E-mail: KislitsinAA@volgatech.net

*Yu. V. Yasukevich, A. A. Mylnikova, V. V. Demyanov, V. A. Ivanov,
N. V. Ryabova, A. V. Zuev, M. I. Ryabova, A. A. Kislitsin*

**DIURNAL VARIATION OF VERTICAL TOTAL ELECTRON CONTENT OVER
THE CITIES IRKUTSK AND YOSHKAR-OLA ACCORDING TO THE DATA
OF GPS/GLONASS AND IRI-2012 MODEL**

Key words: *total electron content; GPS; GLONASS; differential code delays; propagation anomalies.*

ABSTRACT

Global navigation satellite systems (GNSS) GLONASS and GPS (Global Positioning System) were developed for the determination of exact coordinates of a receiver, registering signals from navigation artificial Earth satellites (NAES) at known coordinates of NAES. At present GNSS is also used for remote radio sounding of the ionosphere, when the total electron content (TEC) in the ionosphere is determined by two-frequency code and phase measurements of pseudo range.

The purpose of the work is the creation of the method and the algorithm of the determination of absolute vertical total electron content based on the data of certain navigation receivers GPS/GLONASS and the estimation of TEC diurnal variation using them, their approbation for the regions of Irkutsk and Yoshkar-Ola.

For the calculation of absolute vertical TEC the algorithm based on the simultaneous use of phase and group TEC measurements and the simple model of TEC measurements, considering differential code delays was developed.

The algorithm has the following structure:

- 1) division of sequences of data into continuous time intervals;*
- 2) detection and elimination of surges and stalls of signal tracking;*
- 3) calculation of ambiguity of phase measurements and TEC is carried out on the basis of difference averaging of phase and group measurements;*
- 4) assignment of measurement model and the calculation of parameters of this model on the basis of experimental data using least-squares method.*

For the analysis the data of simultaneous observations in Irkutsk and Yoshkar-Ola for 22 days of 2012 were used, for which there were continuous daily measurements GPS/GLONASS in Irkutsk and Yoshkar-Ola.

The data of vertical total electron content over Irkutsk and Yoshkar-Ola for winter, spring, summer, autumn periods are presented. On the whole the received results of diurnal variation of TEC are sufficient. The midday maximum in the time interval 13-15 p.m. of the local time with clearly defined transition to the night ionosphere in the evening is observed. In summer months the rate of change of day and night values becomes less defined. The vertical TEC over Irkutsk slightly exceeds the TEC over Yoshkar-Ola. For all seasons one can note sufficiently near similarity of the general form of TEC variation according to experimental and artificial data.

The developed method allows determining the vertical TEC using the data of certain receivers GPS/GLONASS. The received TEC variation qualitatively conforms to the TEC variation of CODG laboratory as well as to TEC modeling variation. Moreover GODG data exceed the data, received on the basis of the method, described in this article. The biggest difference is observed for the day time. There is quite good correspondence of experimental data and model data of IRI-2012.

УДК 621.396.2

**О. Г. Морозов, М. Р. Нургазизов,
А. А. Талипов, А. А. Василец, П. Е. Денисенко**

ИЗМЕРЕНИЕ МГНОВЕННОЙ ЧАСТОТЫ СВЧ-РАДИОСИГНАЛОВ В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ НА ОСНОВЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ «ЧАСТОТА-АМПЛИТУДА» В ВОЛОКОННОЙ РЕШЁТКЕ БРЭГГА С ФАЗОВЫМ π -СДВИГОМ

Представлен радиофотонный метод измерения мгновенной частоты СВЧ-сигналов, основанный на формировании в модуляторе Маха-Цендера двухчастотного лазерного излучения с разностной частотой, равной измеряемой, и его преобразовании «частота-амплитуда» в волоконной решётке Брэгга с фазовым π -сдвигом. Разработано устройство для измерения частоты в двух диапазонах: 0,3 – 3 ГГц в полосе пропускания решётки и 3 – 30 ГГц в полосе её отражения. Использование специфики преобразования двухчастотного лазерного излучения в волоконной решётке Брэгга с фазовым π -сдвигом позволило получить измерительные характеристики, не зависящие от амплитудных флуктуаций оптической несущей, и организовать дополнительный контур мониторинга спектральных характеристик используемых элементов с целью уменьшения погрешности измерений, вызванных их температурной нестабильностью.

Ключевые слова: радиофотоника; СВЧ-сигнал; измерение мгновенной частоты; формирование двухчастотного лазерного излучения; разностная частота; волоконная решётка Брэгга с фазовым π -сдвигом; преобразование вида «частота-амплитуда»; контур мониторинга спектральных характеристик.

Введение. Определение характеристик радиочастотных сигналов СВЧ-диапазона играет важную роль в области современных радиолокационных и телекоммуникационных технологий (радары, системы опознавания, когнитивное радио, широкополосные системы связи и т.д.). Одним из наиболее значимых параметров для измерения является мгновенная частота. Современные радиотехнические методы измерений мгновенной частоты характеризуются низкой помехоустойчивостью, принципиальной возможностью работы лишь в узкой полосе частот с многоканальным спектральным расширением, громоздкостью устройств их

технической реализации. Фотонные методы измерения мгновенной частоты, основанные на процедурах её измерительного преобразования в оптическом диапазоне и включающие, как правило, процессы модуляции, дисперсионного различения с преобразованием «частота-амплитуда» и фотодетектирования, являются наиболее перспективными, так как имеют существенные преимущества перед радиотехническими – широкая полоса измеряемых частот, низкие потери и невосприимчивость к электромагнитным помехам, малый вес, объём, возможность работы в широком диапазоне климатических условий.

На современном этапе развития фотонных методов можно выделить ряд основных, классифицируемых по реализуемым для построения систем измерений целевым функциям: частотно-зависимой мощности [1–3], микроволновой фотонной [4] и узкополосной оптической фильтрации [5], многоканального спектрального мультиплексирования [6] и оптического смещения [7], цифрового кодирования [8] и преобразования Гильберта [9]. В большинстве из перечисленных методов в качестве устройства, осуществляющего модуляцию оптической несущей сигналом радиочастоты, используется модулятор Маха-Цендера (ММЦ) [1,5, 6,9]. Одним из основных устройств дисперсионного разложения мгновенной частоты являются волоконные решётки Брэгга (ВРБ) [2,3]. Применение известных фотонных методов измерения мгновенной частоты не всегда позволяет добиться решения поставленных перед исследователем задач.

Основными **задачами** исследования являются:

1) устранение погрешности измерений, вызванной нестабильностью частоты и амплитуды источника оптического излучения [4];

2) устранение погрешности измерений мгновенной частоты, вызванной температурной зависимостью спектральных характеристик ММЦ и ВРБ. Так, в работах [2,3] отмечается погрешность измерений $\pm 0,25$ ГГц, определяемая темпера-

турными флуктуациями как несущей лазерного излучения, так и рабочей точки ММЦ;

3) разработка конкретной методики по измерению амплитуды радиочастотного сигнала, в котором может быть заложена информация, например, о характеристиках канала связи или дальности до объекта локационного наблюдения.

Таким образом, **целью** исследования является разработка нового метода измерения, позволяющего решить данные вопросы. Нами в [10] был предложен и кратко рассмотрен радиофотонный метод измерения мгновенной частоты СВЧ-сигнала, основанный на формировании в модуляторе Маха-Цендера двухчастотного лазерного излучения с разностной частотой, равной измеряемой, и его преобразовании типа «частота-амплитуда» в ВРБ. Формирование двухчастотного лазерного излучения осуществлялось в ММЦ на основе метода Ильина-Морозова [11,12] и его реализации [13,14], детально представленных в [15,16]. Отмечены как ряд преимуществ разработанного метода [10], так и его недостатки, одним из вариантов устранения которых является использование ВРБ с фазовым π -сдвигом, описанные нами ранее в [17].

Теоретическое обоснование метода измерения мгновенной частоты и амплитуды СВЧ-сигналов. Структурная схема системы измерения мгновенной частоты СВЧ-сигнала показана на рис. 1.

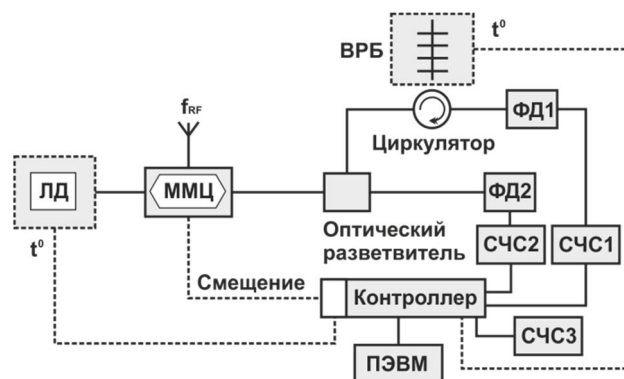


Рис. 1. Экспериментальная установка: ЛД – лазерный диод (DFB-лазер); ММЦ – модулятор Маха-Цендера; ФД – фотодетектор; СЧС – схема частотной селекции; ВРБ – волоконная решётка Брэгга; ПЭВМ – персональная электронная вычислительная машина

Система состоит из DFB-лазера ЛД, ММЦ, оптического разветвителя 1×2 и двух каналов: опорного и измерительного преобразования «частота-амплитуда». Опорный канал состоит из фотодетектора ФД2 и схемы частотной селекции СЧС2. Канал измерительного преобразования – из ВРБ, соединённой с оптическим разветвителем и фотодетектором ФД1 через циркулятор, и схемы частотной селекции СЧС1. Сигналы с выходов СЧС1 и СЧС2 поступают на контроллер определения параметров неизвестного СВЧ-сигнала.

Оптическая несущая ЛД поступает на ММЦ, где модулируется СВЧ-сигналом, а затем разделяется на два канала в оптическом разветвителе 1×2. По каналу измерительного преобразования излучение через вход циркулятора поступает на ВРБ, отражается от неё и с выхода циркулятора подаётся на первый фотодетектор ФД1. Второй канал с фотодетектором ФД2 используется как опорный. Схемы частотной селекции представляют собой два полосовых фильтра: первый – поддиапазона 0,3-3 ГГц, второй – 3-30 ГГц. Представленное деление условно по значению частот, зависит от требуемых параметров измерения и определяется параметрами ВРБ с фазовым π -сдвигом, что будет объяснено ниже. Находя в контроллере определения параметров неизвестного СВЧ-сигнала отношение амплитуд сигналов на выходе ФД1 и ФД2, прошедших через равномерные полосовые фильтры СЧС1 и СЧС2, получаем функцию отношения мощностей, которая однозначно зависит от частоты СВЧ-сигнала и не зависит от мощности излучения лазера и СВЧ-сигнала. Амплитуда неизвестного СВЧ-сигнала определяется по выходному сигналу ФД2, прошедшему СЧС2.

В отличие от известных методов для модуляции СВЧ-сигналом с неизвестной частотой ω_{RF} оптической несущей с частотой ω_0 выберем «нулевую» рабочую точку ММЦ, при работе в которой реали-

зуется амплитудно-фазовое преобразование оптического одночастотного излучения по методу Ильина-Морозова [10–12,13,15], а выходное излучение представляет собой двухчастотное на частотах $\omega_0 - \omega_{RF}$ и $\omega_0 + \omega_{RF}$ с подавленной несущей ω_0 и равными амплитудами A_{-1} и A_{+1} , определяемыми функциями Бесселя первого рода.

Ток на выходе фотодетектора ФД2 в опорном канале пропорционален

$$i(t) \propto A_{-1}^2 + A_{+1}^2 + A_{-1}A_{+1} \cos(2\omega_{RF}t), \quad (1)$$

а детектируемая мощность составляющей с частотой $2\omega_{RF}$ в первом и втором поддиапазонах:

$$P_{оп} \propto A_{-1}^2 A_{+1}^2 = A_1^4, \quad (2)$$

где $A_{-1} = A_{+1} = A_1$.

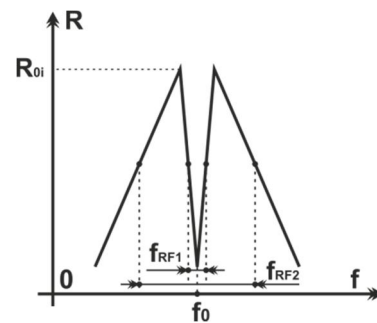


Рис. 2. ВРБ с треугольным равнобедренным спектром с внесенным фазовым π -сдвигом

Для дисперсионного различения «частота-амплитуда» в отличие от известных решений выберем ВРБ с треугольным равнобедренным спектром [2] с внесённым в неё фазовым π -сдвигом [17], которая характеризуется различным коэффициентом отражения для различных разностных частот (рис. 2), определяемых линейными зависимостями:

для первого поддиапазона

$$R_1(f_{RF}) = R_{01} + k_1 f_{RF_1}, \quad (3)$$

и для второго поддиапазона

$$R_2(f_{RF}) = R_{02} - k_2 f_{RF_2}, \quad (4)$$

где $f_{RF} = \omega_{RF}/2\pi$ (ГГц), R_{01}, R_{02} и $k_{1,2}$ – коэффициент отражения, соответствующий

частоте подавленной оптической несущей ω_0 (дБ), и угол наклона спектральной характеристики ВРБ (дБ/ГГц) соответственно для первого и второго поддиапазонов.

Диапазон измеряемых мгновенных частот в устройствах, аналогичных предложенному нами, составляет около 2/3 от ширины полосы пропускания ВРБ на полувысоте. Измерение более высоких частот ограничено дисперсионными эффектами. Для СВЧ-сигналов в диапазонах, используемых в телекоммуникационных и радиолокационных технологиях, нижняя измеряемая частота составляет 0,3 ГГц, верхняя – 30 ГГц. Данная информация позволила определить требования к ВРБ, используемой для измерения мгновенной частоты. Ширина полосы пропускания ВРБ на полувысоте с учётом преобразования удвоенной измеряемой частоты $2\omega_{RF}$ (1) должна составлять 45 ГГц (0,36 нм), что характерно для практически реализуемых решёток (0,1–0,5 нм).

Заметим, что около центральной частоты классических ВРБ существует неиспользуемая зона ± 3 ГГц (0,025 нм), которая определяется малой крутизной и нелинейностью преобразования «частота-амплитуда». Учитывая это, было предложено изменить конфигурацию измерительной ВРБ на решётку с фазовым псдвигом и использовать характерный для таких решёток провал в спектральной характеристике для организации первого поддиапазона канала измерительного преобразования 0,3–3 ГГц. При этом верхняя граница диапазона может быть выбрана разработчиком в соответствии с требованиями решаемых задач. Второй поддиапазон соответственно определяется частотами 3–30 ГГц. Верхняя граница будет соответствовать ширине полосы пропускания ВРБ в 60 ГГц на уровне, сравнимом с 0,1–0,2 от её высоты. Следует учесть, что в общем случае $k_1 > k_2$.

Таким образом, при настройке центральной частоты ВРБ на частоту оптиче-

ской несущей составляющие двухчастотного излучения, прошедшие через ВРБ, в зависимости от частоты будут иметь амплитуду:

для первого поддиапазона

$$A_{-1}^{ИЗМ} = A_{+1}^{ИЗМ} = A_1 [1 - 10^{k_1 f_{RF1}/20}], \quad (5)$$

для второго поддиапазона

$$A_{-1}^{ИЗМ} = A_{+1}^{ИЗМ} = A_1 [1 - 10^{(R_{02} - k_2 f_{RF2})/20}], \quad (6)$$

а детектируемая мощность на выходе ФД1 в измерительном канале на составляющей с частотой $2\omega_{RF}$:

для первого поддиапазона

$$P_{ИЗМ} \propto A_1^4 [1 - 10^{k_1 f_{RF1}/20}]^2, \quad (7)$$

для второго поддиапазона

$$P_{ИЗМ} \propto A_1^4 [1 - 10^{(R_{02} - k_2 f_{RF2})/20}]^2. \quad (8)$$

Определив частотно-зависимую функцию отношения мощностей как $\rho = P_{ИЗМ}/P_{ОП}$, получим:

для первого поддиапазона

$$\rho = [1 - 10^{k_1 f_{RF1}/20}]^2, \quad (9)$$

для второго поддиапазона

$$\rho = [1 - 10^{(R_{02} - k_2 f_{RF2})/20}]^2. \quad (10)$$

На рис. 3 показаны однозначные зависимости между ρ и f_{RF} в обоих поддиапазонах, которые не зависят от мощности излучения лазера. Таким образом, зная только отношение мощностей ρ , мы

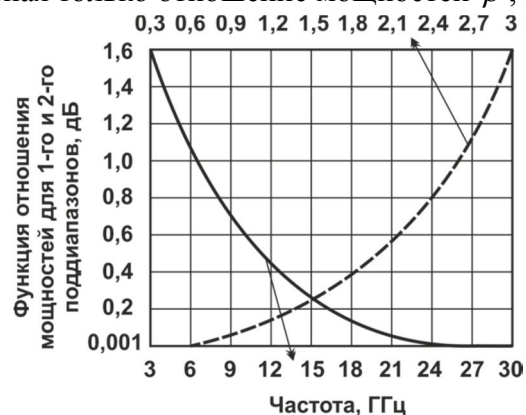


Рис. 3. Зависимость функции отношения мощностей ρ от $f_{RF1,2}$

можем определить мгновенную частоту неизвестного СВЧ-сигнала f_{RF} .

Амплитуда неизвестного СВЧ-сигнала определяется по выходному сигналу ФД2 при калиброванной мощности DFB-лазера и известных характеристиках модуляционного преобразования в ММЦ.

Анализ погрешностей измерений. Экспериментальный стенд в соответствии с рис. 1 был собран и испытан в лаборатории НОЦ «Волоконно-оптические технологии» КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева на базе DFB-лазера LDI-DFB 1550-20/50-T 2-SM3-FA-CWP и ММЦ JDS Uniphase OC-192 Modulator и волоконных решёток, изготовленных в лаборатории НИИ ПРЭФЖС КНИТУ-КАИ им. А. Н. Туполева. Полученные характеристики подтвердили теоретические предположения и позволили провести комплексный анализ причин, определяющих основные погрешности измерений.

К ним относятся: уходы центральной частоты излучения лазера, рабочей точки ММЦ и центральной частоты ВРБ, различие характеристик оптоэлектронного преобразования фотодетекторов ФД1 и ФД2 и АЧХ фильтров СЧС1 и СЧС2. Первые три носят характер температурных флуктуаций, последние две могут быть сведены к минимуму при калибровке устройства или устранены применением коммутационных решений с использованием одного фотодетектора и одной системы частотной селекции.

Существенным влиянием на точность измерения, согласно (3)–(4), обладают спектральные характеристики лазерного излучения и ВРБ. Типовое значение ухода центральной частоты излучения DFB-лазера, вызванное температурой, составляет 12,5 ГГц/°К (0,1 нм/°К), для решёток Брэгга температурный сдвиг центральной частоты, как правило, имеет значение 1,25 ГГц/°К (0,01 нм/°К). Применение известных методов стабилизации температуры лазера, как более чувствительного в паре «лазер-ВРБ», позволяет значительно,

но недостаточно снизить эти значения до 0,25 ГГц/°К. Термостабилизация ВРБ, как отмечается и в ряде работ других авторов [2], требует применения дополнительных, достаточно сложных, решений.

Для решения данной проблемы предложено использовать преимущества описанного в данной статье взаимодействия оптического излучения с контуром ВРБ на основе двух частотных составляющих и контроля его параметров по амплитудным и фазовым характеристикам огибающей их биений. При точной настройке частоты оптической несущей на центральную частоту ВРБ амплитуды частотных составляющих будут равны $A_{-1}^{ИЗМ} = A_{+1}^{ИЗМ}$, а коэффициент модуляции частоты их биений равен 1. При уходе настройки – амплитуды частотных составляющих будут не равны $A_{-1}^{ИЗМ} \neq A_{+1}^{ИЗМ}$, а коэффициент модуляции будет меньше 1. В контроллере по значению коэффициента модуляции можно определить величину расстройки, по величине разности фаз огибающих на выходе ФД2 и ФД1 или её знаку – направление расстройки и скомпенсировать их [17].

Температурный уход рабочей точки ММЦ составляет 0,02 В/°К. В отличие от вышерассмотренных элементов стенда его наличие приводит к появлению в обоих каналах паразитного излучения на частоте подавленной несущей ω_0 и уменьшению амплитуды составляющих двухчастотного излучения. В случае измерения мгновенной частоты неизвестного СВЧ-сигнала это вызовет уменьшение отношения сигнал-шум измерений, что существенно, поскольку амплитуда детектируемого сигнала, как правило, невелика и лежит в пределах чувствительности стенда. В случае измерений мгновенной амплитуды по опорному каналу это вызовет пропорциональное изменение оценки требуемой характеристики канала связи или дальности до объекта локации. Величина такого изменения может составить единицы процентов, что недопустимо.

Для решения данной проблемы предложено также использовать преимущества предложенного в данной статье взаимодействия оптического излучения с контуром ВРБ на основе двух частотных составляющих и контроля его параметров по частотным характеристикам огибающей их биений. При точном равенстве рабочей точки «нулю» модуляционной характеристики ММЦ в спектре выходного сигнала ФД2 будет присутствовать только огибающая на частоте $2\omega_{RF}$. При уходе рабочей точки в спектре появится составляющая на частоте ω_{RF} как результат биений между неподавленной до конца оптической несущей ω_0 и составляющими двухчастотного излучения $\omega_0 - \omega_{RF}$ и $\omega_0 + \omega_{RF}$. По отношению амплитуд огибающих на частотах $2\omega_{RF}$ и ω_{RF} в контроллере можно определить величину ухода рабочей точки и скомпенсировать его [14].

Для этого в структуру системы был введён третий канал – канал мониторинга на частоте модуляции ММЦ, равной ширине полосы пропускания и отражения ВРБ на полувысоте (1,5 ГГц для первого и 15 ГГц для второго поддиапазонов). Используемые процедуры мониторинга соответствуют описанным нами выше в этом разделе. В таком случае требуется более простой и дешёвый фотодетектор, что даёт дополнительные преимущества перед системами, которые используют для мониторинга характерные особенности поведения спектральных характеристик элементов устройств на рабочих частотах от 0,3 до 30 ГГц.

Канал мониторинга системы измерения мгновенной частоты. Анализ, представленный нами в [18], показывает, что из электрического выходного сигнала можно получить образ оптической передаточной функции на частоте биений двух компонент зондирующего сигнала, характер которого будет определяться изменением их амплитуд и фаз. При этом в момент достижения средней частоты зондирующего сигнала резонансной частоты

датчика (ВРБ) амплитуды и модули фаз обеих компонент становятся равны, коэффициент модуляции огибающей выходного сигнала максимален и равен 1, а сама огибающая сигнала по фазе совпадает с огибающей зондирующего сигнала на входе. При использовании метода двухчастотного зондирования максимальная чувствительность измерений достигается при настройке его средней частоты на резонансную частоту датчика (ВРБ), при этом значение расстройки между двумя составляющими должно быть близко к ширине его полосы пропускания на полувысоте. Этим определяется выбор частот 1,5 и 15 ГГц.

Погрешность проводимых измерений будет зависеть от точности поддержания равенства амплитуд и модулей фаз составляющих зондирующего сигнала, а также от отношения сигнал/шум измерений. При этом наличие фазовых измерений в диапазоне 30 ГГц представляет собой достаточно сложную задачу, поэтому реализация дополнительного контура мониторинга спектральных характеристик осуществляется только по амплитуде, в соответствии с разработанным нами четырехчастотным методом [19, 20]. На рис. 4 изображена зависимость амплитуд огибающих биений сигналов первой $U_{\Omega 1}$ и второй $U_{\Omega 2}$ пары, прошедших через ВРБ (левая вертикальная ось), и их разности $U_{\Omega 1} - U_{\Omega 2}$ (правая вертикальная ось) от обобщённой расстройки полосы пропускания ВРБ (горизонтальная ось) для случая подачи на него сигналов одинаковой амплитуды со средней частотой, соответствующей центральной частоте полосы пропускания. При этом разностные частоты пар $\Omega 1$ и $\Omega 2$ не одинаковы и лежат в диапазоне до 300 МГц. Это позволяет использовать узкополосный фотоприёмник.

В сгенерированных парах сигналов, проходящих через ВРБ, происходит изменение амплитуд отдельных составляющих в зависимости от направления и величины частотного смещения полосы пропускания

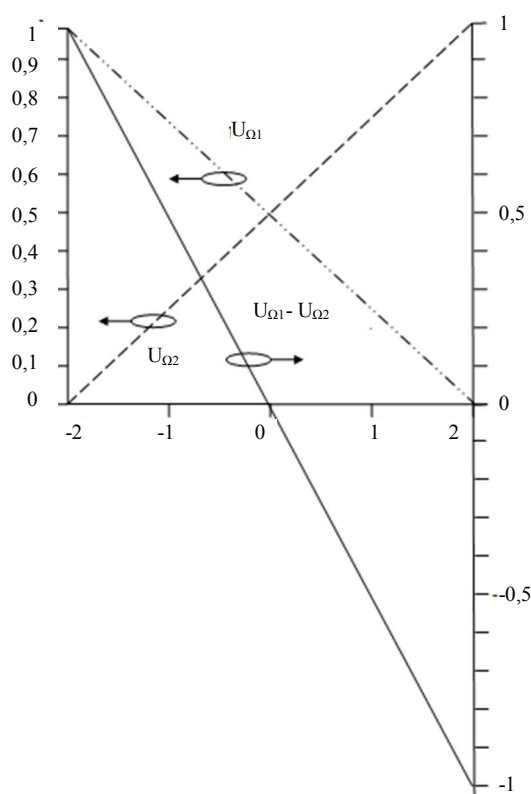


Рис. 4. Зависимость разности между амплитудами огибающих биений сигналов первой и второй пар $U_{\Omega 1}-U_{\Omega 2}$ от обобщенной расстройки полосы пропускания

ния. При частотном смещении полосы пропускания ВРБ в зависимости от изменений температуры положение компонент сгенерированной пары сигналов относительно полосы пропускания будет меняться, будут меняться амплитуды огибающих биений пар и будут меняться разности между амплитудами огибающих биений первой и второй пар, прошедших через ВРБ в соответствии с представленной зависимостью $U_{\Omega 1}-U_{\Omega 2}$.

Блок СЧСЗ (рис. 1) будет представлен набором избирательных усилителей для сигналов пар Ω_{11} и Ω_{21} , Ω_{12} и Ω_{22} соответственно первого и второго поддиапазонов. Диапазон выбора частот первой и второй пары первого поддиапазона лежит в пределах 15 МГц, а второго – в пределах 150 МГц, что обусловлено необходимой погрешностью измерений.

При этом измерения проводятся на частотах огибающих, лежащих в области минимальных шумов фотоприёмников.

Выводы. Предложен новый радиофотонный метод нахождения мгновенной частоты СВЧ-сигналов, основанный на формировании двухчастотного излучения с разностной частотой, равной измеряемой, и его преобразовании «частота-амплитуда» в ВРБ с фазовым π -сдвигом. Ключевые особенности метода заключаются в использовании специфики преобразования двухчастотного излучения в ВРБ с фазовым π -сдвигом, что позволило получить измерительные характеристики, не зависящие от флуктуаций оптической несущей, в двух поддиапазонах – в полосе пропускания (0,3 – 3 ГГц) и отражения (3 – 30 ГГц) решётки соответственно.

Для снижения погрешности измерений, вызванных температурными флуктуациями спектральных характеристик элементов системы, применялся дополнительный канал мониторинга, построенный на узкополосном четырёхчастотном методе измерения без применения фазового анализа. Преимущество такого подхода определяется возможностью проведения измерений в диапазоне до 300 МГц узкополосным малощумящим фотоприёмником. При этом уровень отношения сигнал/шум может быть снижен до двух порядков.

Для подтверждения реализации метода было проведено имитационное моделирование. В качестве системы моделирования была выбрана профессиональная среда проектирования OptiSystem, отвечающая всем современным требованиям для проектирования, проверки и моделирования волоконно-оптических и радиофотонных систем. Для практической реализации был собран макет, представленный на рис. 5. В состав макета входил лазер LDI-DFB 1550-20/50-T 2-SM3-FA-CWP, источник Superlum SLD Pilot-4, осциллограф Agilent InfiniiVision 7000, генератор сигналов произвольной формы AFG3000, мультиметр, ММЦ JDS Uniphase OC-192 Modulator, стабилизированный источник питания ИПС-1, анализатор спектра FTV 5240-S, оптический разветвитель, циркулятор, ВРБ, фотодиод LSIPD-A75.

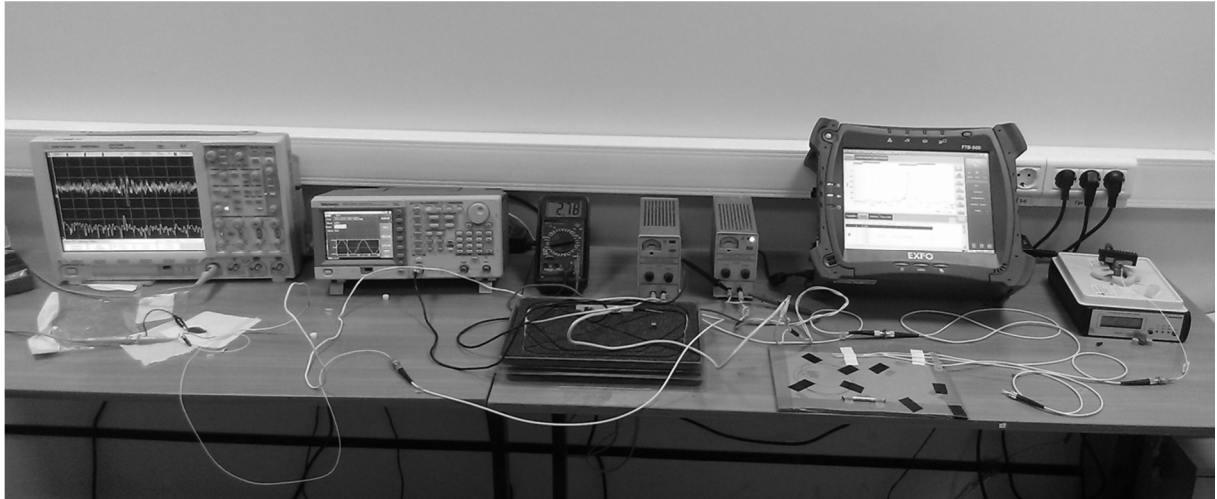


Рис. 5. Установка для измерения мгновенной частоты СВЧ-сигнала

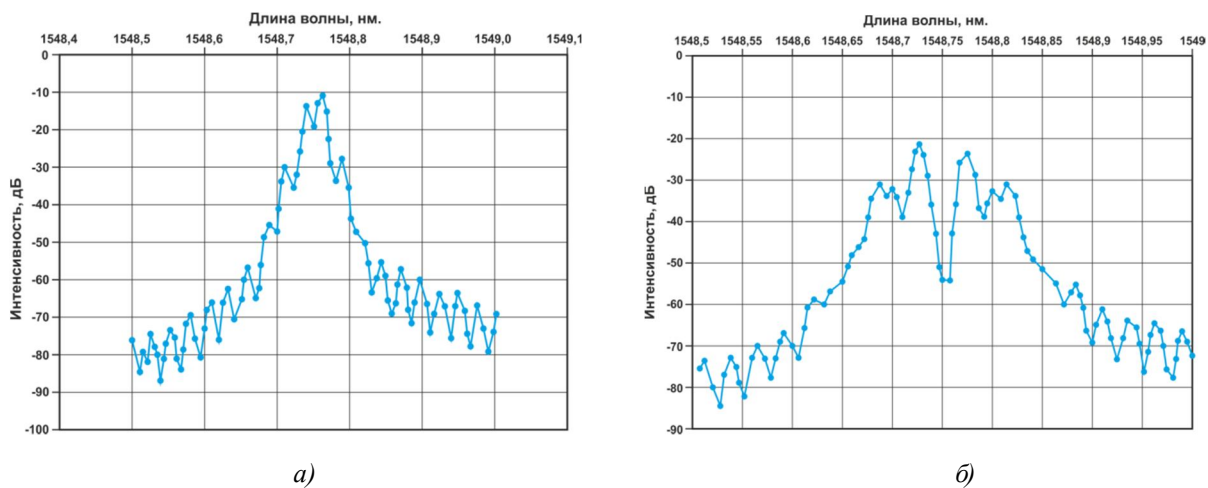


Рис. 6. Спектры двухчастотного лазерного излучения для частот 2 ГГц (а) и 8 ГГц (б)

На рис. 6 показаны спектры двухчастотного лазерного излучения, осуществляемого в модуляторе Маха-Цендера на основе метода Ильина-Морозова для частот 2 ГГц (рис. 6,а) и 8 ГГц (рис. 6,б) на выходе ВРБ с фазовым π -сдвигом. Отмечено, что коэффициент преобразования

«частота-амплитуда» для частоты 2 ГГц первого поддиапазона составил 2,35. По пропусканию, для частоты 8 ГГц второго поддиапазона – 0,28 по отражению. Полученные данные хорошо согласуются с коэффициентами k_1 и k_2 , взятыми нами для теоретического обоснования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках соглашения №14.В37.21.1522 и в рамках государственного задания на оказание услуг (выполнение работ) по организации научных исследований, выполняемых ФГБОУ ВПО «КНИТУ-КАИ» на кафедре телевидения и мультимедийных систем и в Научно-исследовательском институте прикладной электродинамики, фотоники и живых систем (программа «Симметрия»).

Список литературы

1. *Attygalle, M.* Improved Photonic Technique for Broadband Radio-Frequency Measurement / M. Attygalle, B. Hunter // IEEE photonics technology letters. – 2009. – Vol. 21, № 4. – P. 206-208.
2. *Zhang, X.* Microwave Frequency Measurement Using Fiber Bragg Grating as V-shape Filter / X. Zhang, J. Ni, P. Cheng, Z. Li // ICDMA. – 2010. – Vol. 1. – P. 921-924.
3. *Ze, Li.* Photonic instantaneous measurement of microwave frequency using fiber Bragg grating / Li Ze., Bo Yang, Hao Chi, X. Zhang, S. Zheng, Xiaofeng Jin // Optics Communications. – 2010. – Vol. 283. – P. 396-399.
4. *Pan, S.* Instantaneous Microwave Frequency Measurement Using a Photonic Microwave Filter Pair / S. Pan, J. Yao // IEEE photonics technology letters. – 2010. – Vol. 22, No 19. – P. 1437-1439.
5. *Dai, J.* A simple photonic-assisted microwave frequency measurement system based on MZI with tunable measurement range and high resolution / J. Dai, K. Xu, X. Sun, J. Niu, Q. Lv, J. Wu, X. Hong, W. Li, J. Lin // IEEE photonics technology letters. – 2010. – Vol. 22, № 15. – P. 1162-1164.
6. *Zou, X.* Photonic approach for multiple-frequency-component measurement using spectrally sliced incoherent source / X. Zou, W. Pan, B. Luo, L. Yan // Optics letters. – 2010. – Vol. 35, No 3. – P. 438-440.
7. *Drummond, M. V.* Photonic instantaneous microwave frequency measurement system based on signal remodulation / M. V. Drummond, C. A. F. Marques, P. P. Monteiro, R. N. Nogueira // IEEE photonics technology letters. – 2010. – Vol. 22, No 16. – P. 1226-1228.
8. *Zou, X.* Photonic approach to microwave frequency measurement with digital circular-code results / X. Zou, W. Pan, B. Luo, L. Yan, Y. Jiang // Optics express. – 2011. – Vol. 19, № 21. – P. 20580-20585.
9. *Emami, H.* Amplitude independent RF instantaneous frequency measurement system using photonic Hilbert transform / H. Emami, N. Sarkhosh, L. A. Bui, A. Mitchell // Optics express. – 2008. – Vol. 16, No 18. – P. 13707.
10. *Морозов, О.Г.* Измерение мгновенной частоты с помощью двухчастотного зондирования / О.Г. Морозов, А.А. Талипов, А.Г. Федоров, М.Р. Нургазизов, Т.С. Садеев // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 4. – С. 146-149.
11. Пат. А 1338647 SU 4 G02F 1/03. Способ преобразования одночастотного когерентного излучения в двухчастотное / Ильин Г.И., Морозов О.Г.; заявитель КАИ им. А. Н. Туполева. – №3578456/31-25; заявл. 13.04.83; опубл. 20.04.2004.

References

1. *Attygalle M., Hunter B.* Improved Photonic Technique for Broadband Radio-Frequency Measurement. IEEE photonics technology letters. 2009. Vol. 21, No 4. P. 206-208.
2. *Zhang X., Ni J., Cheng P., Li Z.* Microwave Frequency Measurement Using Fiber Bragg Grating as V-shape Filter. ICDMA. 2010. Vol. 1. P. 921-924.
3. *Ze Li., Bo Yang, Hao Chi, Zhang X., Zheng S., Xiaofeng Jin.* Photonic instantaneous measurement of microwave frequency using fiber Bragg grating. Optics Communications. 2010. Vol. 283. P. 396-399.
4. *Pan S., Yao J.* Instantaneous Microwave Frequency Measurement Using a Photonic Microwave Filter Pair. IEEE photonics technology letters. 2010. Vol. 22, No. 19. P. 1437-1439.
5. *Dai J., Xu K., Sun X., Niu J., Lv Q., Wu J., Hong X., Li W., Lin J.* A simple photonic-assisted microwave frequency measurement system based on MZI with tunable measurement range and high resolution. IEEE photonics technology letters. 2010. Vol. 22, No. 15. P. 1162-1164.
6. *Zou X., Pan W., Luo B., Yan L.* Photonic approach for multiple-frequency-component measurement using spectrally sliced incoherent source. Optics letters. 2010. Vol. 35, No. 3. P. 438-440.
7. *Drummond M. V., Marques C. A. F., Monteiro P. P., Nogueira R. N.* Photonic instantaneous microwave frequency measurement system based on signal remodulation. IEEE photonics technology letters. 2010. Vol. 22, No. 16. P. 1226-1228.
8. *Zou X., Pan W., Luo B., Yan L., Jiang Y.* Photonic approach to microwave frequency measurement with digital circular-code results. Optics express. 2011. Vol. 19, No. 21. P. 20580-20585.
9. *Emami, H. Sarkhosh N., Bui L. A., Mitchell A.* Amplitude independent RF instantaneous frequency measurement system using photonic Hilbert transform. Optics express. 2008. Vol. 16, No. 18. P. 13707.
10. *Morozov O. G., Talipov A. A., Fedorov A. G., Nurgazizov M. R., Sadeev T. S.* Izmerenie mgnovennoy chastoty s pomoshchyu dvukhchastotnogo zondirovaniya [Measurement of Instantaneous Frequency Using Two-frequency Sounding]. Nauchno-tehnicheskiiy vestnik Povolzh'ya [Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region]. 2012. No 4. P. 146-149.
11. *Ilyin G. I., Morozov O. G.* Sposob preobrazovaniya odnochastotnogo kogerentnogo izlucheniya v dvukhchastotnoe [The Method of the Transformation of One-frequency Coherent Radiation into Two-frequency One]. Patent RF, no 3578456/31-25, 2004.

12. Морозов, О.Г. Особенности построения электрооптических амплитудно-фазовых формирователей двухчастотного лазерного излучения для дифференциальных ЛЧМ-лидаров / О.Г. Морозов, Г.И. Ильин, Ю.Е. Польский // Оптика атмосферы и океана. – 1998. – Том 11, № 5. – С. 513.
13. Пат. 92180 Российская Федерация МПК7 G01/K 11/32. Устройство для измерения параметров физических полей / Морозов О.Г., Морозов Г.А., Куревин В.В. и др.; заявитель и патентообладатель ПГУТИ; опубл. 10.03.2010, Бюл. № 7. – 2 с.
14. Морозов, О.Г. Волоконно-оптические технологии в распределенных системах экологического мониторинга / О.Г. Морозов, В.Г. Куприянов, О.А. Степушенко, В.В. Куревин, И.Р. Садыков // Известия Самарского научного центра РАН, Достижения физики, электроники и нанотехнологий. – 2011. – Том 13, № 4(4). – С. 1087-1091.
15. Пат. 102256 Российская Федерация МПК7 G01K 11/32. Устройство для измерения параметров физических полей / Морозов О.Г., Морозов Г.А., Куревин В.В. и др.; заявитель и патентообладатель ПГУТИ; опубл. 20.02.2011, Бюл. № 5. – 2 с.
16. Куревин, В.В. Структурная минимизация волоконно-оптических сенсорных сетей экологического мониторинга / В.В. Куревин, О.Г. Морозов, В.П. Просвирин, А.М. Салихов, А.С. Смирнов // Инфокоммуникационные технологии. – 2009. – Т. 7, № 3. – С. 46-52
17. Морозов, О.Г. Модуляционные методы измерений в оптических биосенсорах рефрактометрического типа на основе волоконных решёток Брэгга с фазовым сдвигом / О.Г. Морозов, О.А. Степушенко, И.Р. Садыков // Вестник Марийского государственного технического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2010. – № 3. – С. 3-13.
18. Морозов, О.Г. Определение характеристик спектра усиления Мандельштама-Бриллюэна с помощью двухчастотного зондирующего излучения / О.Г. Морозов, Г.А. Морозов, А.А. Талипов, В.Г. Куприянов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2012. – Том 15. № 3. – С. 95-100.
12. Morozov O. G., Ilyin G. I., Polskiy Yu. E. Osobennosti postroeniya elektroopticheskikh amplitudno-fazovykh formirovateley dvukhchastotnogo lazernogo izlucheniya dlya differentsial'nykh LCHM-lidarov [The Singularities of the Construction of Electrooptic Amplitude-phase Formers of Two-frequency Laser Radiation for Differential LFM-lidars]. Optika atmosfery i okeana [Atmosphere and Ocean Optics]. 1998, Vol. 11, No 5. P. 513.
13. Morozov O. G., Morozov G. A., Kurevin V. V. and others Ustroistvo dlya izmereniya parametrov fizicheskikh poley [The Device for the Measurement of Physical Field Parameters]. Patent RF 92180 МПК7 G01/K 11/32, 2010.
14. Morozov O. G., Kupriyanov V. G., Stepushchenko O. A., Kurevin V. V., Sadykov I. R. Volokonno-opticheskie tekhnologii v raspredelennykh sistemakh ekologicheskogo monitoringa [Fibre-optical Technologies in Distributed Systems of Ecological Monitoring]. Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN, dostizheniya fiziki, elektroniki i nanotekhnologiy [The Proceedings of Samara Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, the Achievements in Physics, Electronics and Nanotechnologies]. 2011. Vol. 13, No 4(4). P. 1087-1091.
15. Morozov O. G., Morozov G. A., Kurevin V. V. and others.. Ustroistvo dlya izmereniya parametrov fizicheskikh poley [The Device for the Measurement of Physical Field Parameters]. Patent RF 102256 МПК7 G01K 11/32, 2011.
16. Kurevin V. V., Morozov O. G., Prosvirin V. P., Salikhov A. M., Smirnov A. S. Strukturnaya minimizatsiya volokonno-opticheskikh sensorykh setey ekologicheskogo monitoringa [Structural Minimization of Fibre-optical Sensor Networks of Ecological Monitoring]. Infokommunikatsionnye tekhnologii [Infocommunication Technologies]. 2009. Vol. 7, No 3. P. 46-52.
17. Morozov O. G., Stepushchenko O. A., Sadykov I. R. Modulyatsionnye metody izmereniy v opticheskikh biosensorakh refraktometricheskogo tipa na osnove volokonnykh reshetok Bregga s fazovym sdvigom [Modulation Methods of Measurements in Optical Biosensors of a Refractometric Type Based on Fiber Bragg Gratings with a Phase Shift. Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy [Vestnik of Mari State Technical University. Ser. Radio Engineering and Infocommunication Systems]. 2010. No 3. P. 3-13.
18. Morozov O. G., Morozov G. A., Talipov A. A., Kupriyanov V. G. Opredelenie kharakteristik spektra usileniya Mandelshtama- Brilluena s pomoshchyu dvukhchastotnogo zondiruyushchego izlucheniya [Determination of Mandelshtam-Brilluen Amplification Spectrum Characteristics Using Two-frequency Probe Radiation]. Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy]. 2012. Vol. 15. No 3. P. 95-100.

19. Пат. 122174 Российская Федерация МПК G01/K. Устройство для измерения параметров физических полей / Денисенко П.Е., Морозов О.Г. и др.; заявитель и патентообладатель КНИТУ-КАИ; опубл. 20.11.2012. Бюл. № 32.

20. Алюшина, С.Г. Волоконные решетки Брегга с фазированной структурой в распределенных информационно-измерительных системах / С.Г. Алюшина, П.Е. Денисенко, О.Г. Морозов [и др.] // Нелинейный мир. – 2011. – Т. 9, № 8. – С. 522—528.

19. *Denisenko P. E., Morozov O. G. and others* *Ustroistvo dlya izmereniya parametrov fizicheskikh poley* [The Device for the Measurement of Physical Field Parameters]. Patent RF 122174 RF МПК G01/K, 2012.

20. *Alyushina S. G., Denisenko P. E., Morozov O. G. and others*. *Volokonnye reshetki Bregga s fazirovannoy strukturoy v raspredelennykh informatsionno-izmeritel'nykh sistemakh* [Fibre Bragg Gratings with Phase Structure in Distributed Information-Measuring Systems]. *Nelineyny mir* [Nonlinear world]. 2011. Vol. 9, No 8. P. 522-528.

Статья поступила в редакцию 26.09.13.

МОРОЗОВ Олег Геннадьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой телевидения и мультимедийных систем, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ) (Российская Федерация, Казань). Область научных интересов – информационно-измерительные и телекоммуникационные системы оптического и микроволнового диапазонов. Автор свыше 120 публикаций.

E-mail: microoil@mail.ru

НУРГАЗИЗОВ Марат Ринатович – аспирант, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ) (Российская Федерация, Казань). Область научных интересов – волоконно-оптические информационно-измерительные и телекоммуникационные системы. Автор свыше 10 публикаций.

E-mail: marat_nur@bk.ru

ТАЛИПОВ Анвар Айратович – аспирант, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ) (Российская Федерация, Казань). Область научных интересов – волоконно-оптические информационно-измерительные и телекоммуникационные системы. Автор свыше 15 публикаций.

E-mail: talipov.anvar@gmail.com

ВАСИЛЕЦ Александр Александрович – магистрант, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ) (Российская Федерация, Казань). Область научных интересов – волоконно-оптические информационно-измерительные и телекоммуникационные системы. Автор пяти публикаций.

E-mail: a.vasilets@mail.ru

ДЕНИСЕНКО Павел Евгеньевич – аспирант, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ) (Российская Федерация, Казань). Область научных интересов – волоконно-оптические информационно-измерительные и телекоммуникационные системы. Автор свыше 10 публикаций.

E-mail: denisenko.kazan@gmail.com

MOROZOV Oleg Gennadyevich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, the Head of the Chair of Television and Multimedia Systems at Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev (Kazan, Russian Federation). The sphere of scientific interests is information-measuring and telecommunication systems of optical and microwave ranges. The author of more than 120 publications.

E-mail: microoil@mail.ru

NURGAZIZOV Marat Rinatovich – a post graduate student at Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev (Kazan, Russian Federation). The sphere of scientific interests is fibre-optical, information-measuring and telecommunication systems. The author of more than 10 publications.

E-mail: marat_nur@bk.ru

TALIPOV Anvar Airatovich – a post graduate student at Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev (Kazan, Russian Federation). The sphere of scientific interests is fibre-optical information-measuring and telecommunication systems. The author of more than 15 publications.

E-mail: talipov.anvar@gmail.com

VASILETS Aleksandr Aleksandrovich – an undergraduate at Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev (Kazan, Russian Federation). The sphere of scientific interests is fibre-optical, information-measuring and telecommunication systems. The author of 5 publications.

E-mail: a.vasilets@mail.ru

DENISENKO Pavel Evgenyevich – a postgraduate student at Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev (Kazan, Russian Federation). The sphere of scientific interests is fibre-optical, information-measuring and telecommunication systems. The author of more than 10 publications.

E-mail: denisenko.kazan@gmail.com

***O. G. Morozov, M. R. Nurgazizov, A. A. Talipov,
A. A. Vasilets, P. E. Denisenko***

**INSTANTANEOUS FREQUENCY MEASUREMENT OF MICROWAVE RADIO
SIGNALS IN THE OPTICAL RANGE BASED ON THE «FREQUENCY-AMPLITUDE»
TRANSFORMATION IN A FIBRE BRAGG GRATING WITH A PHASE π -SHIFT**

Key words: *radiophotonics; microwave signal; instantaneous frequency measurement, two-frequency laser radiation forming; difference frequency; fibre Bragg grating with a phase π -shift; «frequency-amplitude» transformation; spectral characteristic monitoring contour.*

ABSTRACT

The application of well-known photon methods of instantaneous frequency measurement doesn't always allow solving the raised problems. There is often a measurement error in considered methods that is caused by frequency and amplitude instability of the optical emission source. Another problem is instantaneous frequency measurement error, caused by the temperature dependence of spectral characteristics of MZM and FBG. So in the works of researches in this field the measurement error $\pm 0, 25$ GHz is observed, that is determined by temperature fluctuations of both laser radiation carrier and the operating point of MZM. It should also be noted that in many analyzed methods there is no specific technique of the amplitude measurement of a radio-frequency signal that can contain the information about communication channel characteristics or the distance to the object of location observation. As a result there is a necessity for the development of new measurement methods that allow solving the problems and the improvement of traditional ones.

The suggested new radiophoton method of the finding of microwave signal instantaneous frequency is based on the formation of two-frequency radiation with difference frequency, equal to the measured one and its «frequency-amplitude» transformation into FBG with a phase π -shift. The key feature of the method is the use of the specificity of two-frequency radiation transformation into FBG with a phase π -shift that allowed getting the measurement characteristics, that don't depend on optical carrier fluctuations, in two subranges - in a grating pass band (0,3 – 3 GHz) and reflection (3 – 30 GHz) respectively.

For decreasing measurement errors, caused by temperature fluctuations of the spectral characteristics of system elements, the secondary monitoring channel, based on narrowband four-frequency measurement method without the phase analysis was applied. The advantage of such an approach is determined by the possibility of making measurements by narrowband noiseless photodetector in the range to 300 MHz. Meanwhile the signal-to-noise ratio level can be reduced to two orders. It is observed that the «frequency-amplitude» transformation coefficient for the frequency 2 GHz of the first subrange was 2, 35; for the frequency 8 GHz of the second subrange - 0.28 considering pass and reflection. The received data conform to coefficients c_1 and c_2 , taken for theoretical justification.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

УДК 681.32

Н. П. Вашкевич, С. А. Зинкин, Н. С. Карамышева

ОБЛАЧНАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АГЕНТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ МЕТАКОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ

Предложена виртуальная архитектура агентно-ориентированного метакомпьютера, которую может реализовать единственный агент, выполняя поручение клиента. При этом он может создавать свои клоны и распределять их по физическим узлам вычислительной сети, используя при этом знания о структурных и функциональных связях между объектами – разнообразными ресурсами метакомпьютерной системы. Далее, используя программно реализуемые декларативные и процедурные знания, исходный агент совместно с другими агентами может обрабатывать поступающие данные. Рассмотрены проблемы выбора, разработки и интеграции технологий программной реализации сетевых агентно-ориентированных метакомпьютерных систем, а также абстрактный и структурный синтез распределённых систем логического управления.

Ключевые слова: вычислительные сети; агенты; метакомпьютеры; облачные вычисления; структурные и функциональные связи; ресурсы.

Введение. В последнее время большое внимание уделяется проблемам использования вычислительных сетей как больших вычислительных систем, предназначенных для решения задач, не требующих интенсивного взаимодействия между параллельно исполняемыми частями. Связанная с подобной проблемой технология метакомпьютинга определяется в работах [1, 2] как «использование мощных вычислительных ресурсов, доступных прозрачно посредством телекоммуникационной среды». С другой стороны, существует мнение, что концепция метакомпьютерной технологии не предъявляет особых требований к вычислительным мощностям процессорных ресурсов, в качестве которых

могут выступать рабочие станции и персональные компьютеры, подключённые к сети. Поэтому более общим следует считать определение метакомпьютера как виртуального компьютера, динамически организуемого из географически распределённых ресурсов, соединённых сетями передачи данных [3]. В состав метакомпьютерной системы, таким образом, могут входить как простые персональные компьютеры, так и мощные кластерные и массивно-параллельные системы. В настоящей работе рассмотрены проблемы выбора, разработки и интеграции технологий программной реализации сетевых агентно-ориентированных метакомпьютерных систем.

Выбор платформы для реализации метакомпьютерных систем. Реализуемое метакомпьютером распределённое приложение должно эволюционировать от известной сетевой архитектуры типа «клиент-сервер» к менее апробированной архитектуре «клиент-агент-сервер» и далее к сложным сетевым архитектурам «клиент-агент – мультиагентная система» и «клиент-агент – агентно-ориентированный метакомпьютер». Рассматриваемый с позиций облачных вычислений метакомпьютер может представлять один из облачных сервисов (рис. 1). Развитие клиент-серверной сетевой архитектуры агентно-ориентированных метакомпьютеров иллюстрирует рис. 2. Там, где это не противоречит контексту, мы будем рассматривать агентно-ориентированную систему (АОС) как мультиагентную (МАС). Однако понятие агентно-ориентированной системы шире понятия МАС. Например, в работе [4] АОС характеризуется как система, ключевым понятием в которой является абстракция агента.

В данной работе предлагается виртуальная архитектура агентно-ориентированного метакомпьютера, которую может реализовать единственный агент, выполняющий поручение клиента, или пользователя, создавая свои клоны и распределяя их по

физическим узлам вычислительной сети, используя при этом знания о структурных и функциональных связях между объектами – разнообразными ресурсами метакомпьютерной системы, а затем, используя заданные в программах декларативные и процедурные знания, совместно с другими агентами обрабатывать поступающие данные.

В работе [4] под мультиагентной системой подразумевается система, в которой функционируют несколько агентов, способных взаимодействовать, сотрудничать, договариваться или соперничать. Проблемы декомпозиции, модульности и синхронизации, рассматриваемые в параллельном и распределённом программировании, характерны и для мультиагентных систем. Асинхронное в общем случае взаимодействие агентов удобно формализовать сетями абстрактных машин, узлы которых описываются логико-алгебраическими выражениями.

Целью настоящего исследования является разработка методики абстрактного и структурного проектирования асинхронных систем логического управления для распределённых агентно-ориентированных систем, реализуемых в облачной среде. К таким системам отнесём также и агентно-ориентированные *grid*-системы.

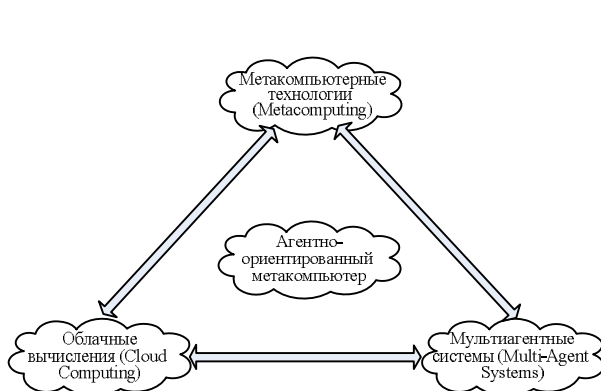


Рис. 1. Интеграция технологий при проектировании агентно-ориентированного метакомпьютера как облачного сервиса



Рис. 2. Развитие сетевых агентно-ориентированных архитектур: от простой клиент-серверной архитектуры до агентно-ориентированной метакомпьютерной архитектуры облачного сервиса

Под облачными вычислениями подразумевается такая технология обработки данных, при которой компьютерные ресурсы предоставляются пользователям как Интернет-сервисы, или так называемые облачные сервисы. В процессе облачной обработки данных информация хранится на серверах в Интернете и может временно кэшироваться на клиентской стороне [5]. Программное обеспечение, при помощи которого обеспечивается согласованная работа серверов, предоставляющих облачные услуги, относится к классу *middleware*. Это программное обеспечение осуществляет выделение вычислительных ресурсов для решения задачи, балансировку нагрузки и мониторинг состояния сетевого оборудования, в первую очередь серверов. Распространён такой вид виртуализации сетевых ресурсов, как виртуализация серверов с размещением виртуальных серверов на реальных компьютерах [6].

Реализация агентно-ориентированного метакomпьютера как облачного сервиса. Использование свойств гибкости и прозрачности облачных сервисов позволяет создавать на их основе виртуальные среды для распределённой обработки данных. Функциональные возможности облачных сервисов могут быть расширены за счёт использования мобильного программного обеспечения, в частности, за счёт использования технологий мобильных агентов. Обобщённая модель платформы агентов представлена на рис. 3. Данная модель разработана организацией FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents) для программных агентов и описана в работах [7, 8].

Согласно описанию, агенты в мульти-агентной системе функционируют под управлением платформы агентов. Платформой представлены основные службы, которые желательно иметь в любой мультиагентной системе – это службы, обеспечивающие создание и уничтожение



Рис. 3. Обобщённая модель платформы агента

агентов, поиск и распознавание агентов, а также коммуникации между агентами. Локальная служба каталогов позволяет агенту получить сведения о том, какие ещё агенты имеются на данной платформе. К службе каталогов могут иметь доступ другие агенты, в том числе агенты, находящиеся на других платформах. Агенты связываются друг с другом, пересылая сообщения и разделяя при работе общее информационное пространство.

Распределённые службы каталогов, каналы связи, организованные при помощи серверов, и другие средства платформы агентов позволяют строить сложные структуры, предназначенные для обработки данных. На рис. 4 представлена упрощённая концептуальная схема формирования виртуальной архитектуры метакomпьютера как облачного сервиса. Реальная инфраструктура агентно-ориентированного метакomпьютера формируется путём загрузки на выбранные физические узлы агентов и данных. Агенты разделены на различные категории и обеспечивают функционирование заданных сервисов (приложения как сервиса, управления как сервиса, хранения как сервиса, базы знаний как сервиса и др.). Рис. 5 иллюстрирует предлагаемую нами концепцию формирования виртуальной архитектуры метакomпьютера как гибридного облачного сервиса «Земля-облако», в которой

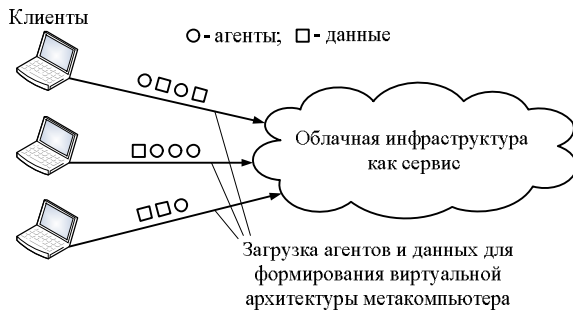


Рис. 4. Реализация метакomпьютера как облачного сервиса: загрузка облачной инфраструктуры

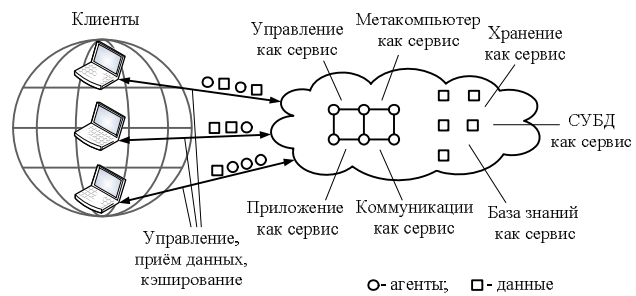


Рис. 5. Реализация метакomпьютера как гибридного облачного сервиса «Земля-облако»

вычислительные ресурсы пользовательских компьютеров рассматриваются как дополнительные сервисы.

Определены также агенты-супервизоры, агенты-диспетчеры вычислений, агенты-хранители данных, интерфейсные агенты, связанные агенты, агенты-координаторы. Выбор основных типов агентов должен быть основан на анализе агентно-ориентированных технологий. Загрузка агентов и данных, определяющих виртуальную архитектуру метакomпьютера, осуществляется с клиентских компьютеров, которые могут предоставлять свои вычислительные ресурсы («землю») другим пользователям посредством облачного сервиса коммуникаций.

Организация логического управления глобальными вычислительными

процессами в системах метакomпьютерного типа. В работах [9, 10] предложено для логического управления дискретными процессами использовать формализм асинхронных предикатных сетей (АПС). Проиллюстрировано применение асинхронных предикатных сетей для формализации основных процессов занятия и освобождения ресурсов в агентно-ориентированных метакomпьютерных системах. Далее в данной среде становится возможной организация метакomпьютерных вычислений. Следующими важными задачами являются организация управления коллективным обменом, коллективными вычислениями и синхронизация процессов. Примеры двух вариантов коллективных пересылок данных между агентами по принципу «каждый с каждым» представлены на рис. 6.

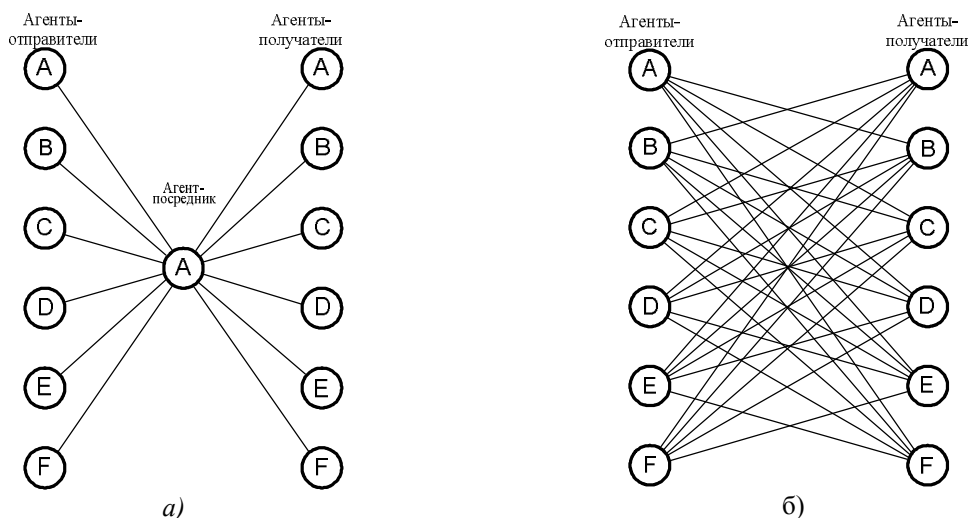


Рис. 6. Коллективные пересылки данных между агентами по принципу «каждый с каждым» через агента-посредника (а) и непосредственно между агентами (б)

Предложим четыре предикатные сети MCS_1 , MCS_2 , MCS_3 , MCS_4 , реализующие при соответствующей программной интерпретации управление коллективным обменом данными и управляющими сообщениями в метакомпьютерных системах. Дополнительные механизмы реализации метакомпьютера вытекают из его формального определения, приведённого в работе [11]. Приводимые формальные спецификации относятся к классу непосредственно интерпретируемых в том смысле, что при создании распределённых программ должны учитываться только эти спецификации.

Асинхронной предикатной сетью MCS_1 задается процесс логического управления в метакомпьютерной системе при передаче данных от агента A каждому из остальных агентов B , C , D , E с подтверждением приёма и передачей результатов от агентов B , C , D , E агенту A . Данная сеть MCS_1 соответствует схеме обменов, представленной на рис. 6, а. Введены предикаты P_x , $x \in \{a, b, c, d, e\}$, характеризующие состояния процессов для мобильных агентов A , B , C , D , E соответственно. Например, если истинно высказывание $P_x(x_i)$, то это означает, что агент x находится в состоянии x_i . Каждый агент x может находиться в одном из трёх состояний: x_1 (начальная фаза), x_2 (рабочая фаза) и x_3 (заключительная фаза). Для процесса, создаваемого агентом A , добавлено состояние a' , соответствующее ширококонтинентальной передаче сообщений каждому из остальных агентов. Этим передачам соответствуют модификации предиката P_s . Агенты B , C , D , E затем отвечают отправкой ответных сообщений агенту A , отмечая эти события модификациями предиката P_r . Затем процессы агентов переходят в рабочие состояния, завершающиеся переходами каждого из них в заключительные состояния и модификациями предиката P_q , что сопровождается фактами отправки агентами B , C , D , E сообщений об

окончании работы или квитанций агенту A . Выполнение одноимённых процессов A , B , C , D , E сопровождается согласованными модификациями предикатов P_x , $x \in \{a, b, c, d, e\}$. Инициатором начальной ширококонтинентальной рассылки сообщений является агент A . Выражения для процедур в правых частях продукций записаны в упрощённой форме. Например, выражение $P_a(a_3) \Rightarrow \neg P_a(a_3) \& P_a(a_1)$ в полной форме имело бы следующий вид:

$P_a(a_3) \Rightarrow (P_a(a_3) \leftarrow false) \& \rightarrow (P_a(a_1) \leftarrow true)$, где « $\& \rightarrow$ » – символ последовательной композиции операторов.

Следующей асинхронной предикатной сетью MCS_2 описывается процесс обмена данными между агентами по принципу «каждый с каждым» (через агент A) с возвратом результатов агенту A . Данный метод управления обменом данными можно использовать также для синхронизации процессов в метакомпьютерных системах. Введены дополнительные состояния b_0 , c_0 , d_0 , e_0 для агентов B , C , D , E и не используется состояние a' для агента A . Здесь агенты B , C , D , E синхронизируют свои действия, направляя сообщения агенту A , что сопровождается соответствующими модификациями предиката P_r . Ответные посылки сообщений от агента A сопровождаются модификациями предиката P_s . Завершив согласованные действия, агенты B , C , D , E сигнализируют об этом агенту A , модифицируя предикат P_q . Начальное состояние сети задают следующие начальные факты (истинные атомарные константные формулы): $P_a(a_1)$, $P_b(b_0)$, $P_c(c_0)$, $P_d(d_0)$ и $P_e(e_0)$.

Следующей асинхронной предикатной сетью MCS_3 задается процесс логического управления передачей данных от агента A по конвейеру последовательно остальным агентам B , C , D , E с возвратом результатов последовательно также по конвейеру от агентов E , D , C , B агенту A . Введены

предикаты P_x , $x \in \{a, b, c, d, e\}$, характеризующие состояния одноимённых процессов для мобильных агентов A, B, C, D, E соответственно. Истинность высказывания $P_x(x_i)$ означает, что агент x находится в состоянии x_i . Каждый процесс, реализуемый агентом x , может находиться в одном из трёх состояний: x_1 (начальная фаза), x_2 (рабочая фаза) и x_3 (заключительная фаза). Посредством предиката P_s организуется конвейерная связь между процессами в направлении от агента A последовательно к остальным агентам B, C, D и E . Обратная конвейерная связь организована посредством предиката P_r . Такая организация удобна для реализации конвейерного обмена данными при выполнении глобальных вычислительных операций в метакомпьютерах. Начальное состояние сети задают следующие начальные факты (истинные атомарные константные формулы): $P_a(a_1)$, $P_b(b_1)$, $P_c(c_1)$, $P_d(d_1)$ и $P_e(e_1)$.

Асинхронной предикатной сетью MCS_4 задаётся процесс логического управления обменом данными от каждого агента каждому, причём здесь при обмене не выделяется главный агент. Данная сеть соответствует схеме обменов, представленной на рис. 6, б. Каждый агент здесь может находиться в одном из четырёх состояний: x_0 (фаза широковещательной рассылки сообщений от каждого из агентов всем остальным агентам), x_1 (фаза приёма сообщений каждым из агентов от остальных агентов), x_2 (рабочая фаза) и x_3 (заключительная фаза). Введены предикаты P_x , $x \in \{a, b, c, d, e\}$, характеризующие состояния одноимённых процессов для мобильных агентов A, B, C, D, E соответственно.

Начальное состояние сети задают следующие начальные факты (истинные атомарные константные формулы): $P_a(a_0)$, $P_b(b_0)$, $P_c(c_0)$, $P_d(d_0)$ и $P_e(e_0)$. Как и остальные асинхронные предикатные сети, данная сеть функционирует,

модифицируя предикаты. Каждая модификация сопровождается изменением состояния метакомпьютерной системы и может сопровождаться передачей сообщений между агентами.

Определение асинхронной предикатно-функциональной сети. Асинхронная предикатно-функциональная сеть (АПФС, или $APFN$) – это набор

$$APFN = (A, A', A'', M, P, F, I_{P \cup F}, Prod, f_{MA}, B, C, X, Y, p_x, p_y, f_x, f_y),$$

где $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ – множество агентов, $A' = A'_1 \cup A'_2 \cup \dots \cup A'_n$ – множество некоторых символов (меток), отмечающих отдельные стадии выполнения процессов на различных узлах распределённой вычислительной системы или сети и интерпретируемых как предметные константы, $A'_1, A'_2, \dots, A'_n$ – непересекающиеся подмножества множества A' , определённые соответственно для каждого из агентов $a_1, a_2, \dots, a_n$; A'' – множество дополнительных меток для обозначения объектов (очереди, счётчиков и др.), представляемых в модели унарными функциями; M – множество абстрактных узлов (модулей) сети $APFN$, реализующих продукционные правила из множества $Prod$; P – множество модифицируемых предикатов, в том числе унарных предикатов вида $p_i: A'_i \rightarrow \{true, false\}$, $p_i \in P$, вводимых для обозначения состояний процессов, реализуемых агентами; F – множество модифицируемых функций, в том числе унарных функций вида $f: A'' \rightarrow z$ (z – множество неотрицательных целых чисел; множество $P \cup F$ образует модифицируемое пространство, или базу знаний, согласования взаимодействующих процессов и ресурсов), $I_{P \cup F}$ – начальная интерпретация предикатно-функциональной сигнатуры, задающая начальное состояние базы знаний, включающей предикаты и функции из множества $P \cup F$; $Prod$ – множество продукционных правил

обновления (модификации) предикатов и функций из множества $P \cup F$ (продукционные правила из множества $Prod$ удобно представлять также в виде α -дизъюнкций вида $[a](r_1 \vee r_2)$ или $[a](r \vee E)$, то есть в нотации систем алгоритмических алгебр Глушкова); $B = \{p_{ge}, p_{le}, p_{gt}, p_{lt}, p_{eq}, p_{ne}\}$ – множество бинарных (стационарных) предикатов сравнения, $B \cap P = \emptyset$; $C = \{f_{plus}, f_{minus}\}$ – множество, содержащее две бинарные (стационарные) арифметические функции сложения и вычитания, определённые для неотрицательных целых чисел, $C \cap F = \emptyset$; $f_M: M \rightarrow A$ – унарная функция, ставящая в соответствие каждому модулю реализующий его агент; X, Y – множества входных и выходных символов (меток), отмечающих соответственно виды входных и выходных воздействий при взаимодействиях с операционной средой (например, при занятии и освобождении ресурсов) и интерпретируемых как предметные константы, $p_X: X \rightarrow \{true, false\}$ – входной унарный предикат, $p_X \in P$, $p_Y: Y \rightarrow \{true, false\}$ – выходной унарный предикат, $p_Y \in P$; $f_X: X \rightarrow z$, $f_Y: Y \rightarrow z$ – входная и выходная унарные функции, $f_X \in F$, $f_Y \in F$, z – множество неотрицательных целых чисел.

Под воздействием модулей из множества M , реализующих продукционные правила из множества $Prod$, интерпретация $I_{P \cup F}$ сигнатуры $P \cup F$

модифицируется (вначале задаётся исходная интерпретация, или состояние базы знаний), определяя тем самым динамику предметной области.

Сети АПФС, для которых определены только унарные модифицируемые предикаты и функции, назовём унарными. Частным случаем сетей АПФС являются сети АПС, в которых не используются функции.

Пример реализации агентно-ориентированной системы логического управления. Рассмотрим пример разработки распределённого агентно-ориентированного приложения для системы логического управления некоторой абстрактной *grid*-системы. Пусть для распределённого процесса управления задано множество символов $x_1, x_2, \dots, x_7$, составляющих область определения для унарного предиката $p(x)$ и отмечающих события, происходящие при реализации распределённого процесса; число данных символов равно числу реализуемых процессом событий. Предикат $p(x)$ выполняет роль характеристической функции для множества событий данного процесса. Задано также множество символов $w_1, w_2, \dots, w_7$ (область определения унарного предиката $q(w)$) для отметки одновременно реализуемых модулей из множества M . Предикат $q(w)$ является характеристической функцией для множества одновременно выполняемых модулей, описываемых следующими выражениями:

$$\begin{aligned} m_1 &= [p(x_1)](\{p(x_1) \leftarrow false, p(x_2) \leftarrow true, p(x_6) \leftarrow true, \\ &\quad q(w_1) \leftarrow false\} \vee E); \\ m_2 &= [p(x_2)](\{p(x_2) \leftarrow false, p(x_3) \leftarrow true, q(w_2) \leftarrow false\} \vee E); \\ m_3 &= [p(x_3)](\{p(x_3) \leftarrow false, p(x_4) \leftarrow true, q(w_3) \leftarrow false\} \vee E); \\ m_4 &= [p(x_4)](\{p(x_4) \leftarrow false, p(x_5) \leftarrow true, q(w_4) \leftarrow false\} \vee E); \\ m_5 &= [p(x_6)](\{p(x_6) \leftarrow false, p(x_7) \leftarrow true, q(w_5) \leftarrow false\} \vee E); \\ m_6 &= [p(x_5) \& p(x_7)](\{p(x_1) \leftarrow true, p(x_5) \leftarrow false, p(x_7) \leftarrow false, \\ &\quad q(w_6) \leftarrow false\} \vee E); \\ m_7 &= [p(x_5) \& p(x_7)](\{p(x_2) \leftarrow true, p(x_5) \leftarrow false, \\ &\quad p(x_6) \leftarrow true, p(x_7) \leftarrow false, q(w_7) \leftarrow false\} \vee E). \end{aligned}$$

Здесь согласно [10] в квадратные скобки заключены α -условия, при истинности которых выполняются действия в фигурных скобках, а при ложных значениях условий никакие действия не выполняются.

Истинность или ложность атомарных константных формул (другими словами, фактов) $p(x_1), p(x_2), \dots, p(x_7)$ учитывается при организации потока управления в распределённой программе, реализованной одним стационарным агентом A_0 и рабочими агентами $A_1, A_2, \dots, A_7$.

При выполнении некоторого модуля m_i реализующим его мобильным агентом A_i проверяется α_i -условие и при его истинности выполняются элементарные правила модификации предикатов $p(x)$ и $q(w)$, а также операции обработки данных, выполнение которых определяется результатом модификации предиката $p(x)$. Модификация предиката $p(x)$ переводит процесс модуля m_i в новое состояние, а модификация $q(w_1) \leftarrow false$ предиката $q(w)$ свидетельствует о завершении выполнения модуля m_i агентом A_i . Этот агент передаёт результат модификации предикатов $p(x)$ и $q(w)$ по сети стационарному агенту, который тем самым узнаёт о завершении выполнения модуля m_i агентом A_i .

Стационарный агент инициирует выполнение некоторого модуля сети АПС параллельно с уже выполняемыми модулями при условии, что новый модуль совместим с ними, то есть выполняет совместимые правила модификации предикатов и обработки данных. Таким образом, в распределённом агентно-ориентированном сетевом приложении реализуется параллельное выполнение операций.

В дополнение уточним, что при реализации распределённого сетевого приложения используются и модифицируются следующие векторы. Вектор значений предиката $q(w)$ используется стационарным агентом A_0 для опреде-

ления состава параллельно исполняемых модулей из множества модулей M . Эта информация нужна агенту A_0 при назначении на исполнение нового мобильного агента, интерпретирующего данный модуль. Так, например, значения высказываний $q(w_1)=false, q(w_2)=false, q(w_3)=true, q(w_4)=false, q(w_5)=true, q(w_6)=false, q(w_7)=false$ означают, что в сети выполняются модули m_3 и m_5 мобильными агентами A_3 и A_5 соответственно. Ни один новый модуль не может при этом выполняться параллельно с ними и, следовательно, не может иницироваться стационарным агентом A_0 .

В общем случае на параллельное выполнение могут быть назначены модули, не проверяющие и не модифицирующие значения предиката $p(x)$, определённые на непересекающихся подмножествах предметных констант из множества меток $\{x_1, x_2, \dots, x_7\}$. Поэтому для каждого модуля m_i АПС формируется соответствующий ему так называемый «вектор несовместимости» c_i . Множество векторов несовместимостей для рассматриваемого примера, полученных на основании анализа выражений для модулей $m_1, m_2, \dots, m_7$, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} c_1 &= (1, 1, 0, 0, 1, 1, 1); \\ c_2 &= (1, 1, 1, 0, 0, 0, 1); \\ c_3 &= (0, 1, 1, 1, 0, 0, 0); \\ c_4 &= (0, 0, 1, 1, 0, 1, 1); \\ c_5 &= (1, 0, 0, 0, 1, 1, 1); \\ c_6 &= (1, 0, 0, 1, 1, 1, 1); \\ c_7 &= (1, 1, 0, 1, 1, 1, 1). \end{aligned}$$

Кроме того, агент A_0 не выберет на выполнение модуль при ложности его α -условия, даже если он совместим с текущими выполняемыми модулями.

Все векторы $c_i, i = 1, 2, \dots, 7$ используются только стационарным агентом A_0 . Например, если для модуля m_3 имеем вектор $c_3 = \langle 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0 \rangle$, то это означает, что данный модуль попарно совместим с модулями m_1, m_5, m_6, m_7 . Под совместимостью здесь понимается

отсутствие взаимной каузальной (причинно-следственной) зависимости у пар модулей, модифицирующих унарный предикат $p(x)$ при различных значениях предметной переменной.

Вектор $Q = (q(w_1), q(w_2), \dots, q(w_7)) >$ значений предиката $q(w)$, или фактов, используется стационарным агентом A_0 . Истинные значения предиката $q(w)$ указывают на одновременно выполняемые в текущий момент времени модули. Соответствующие модулям истинные значения предиката $q(w)$ передаются по сети мобильным агентам и инициируют их выполнение. Затем соответствующие ложные значения предиката $q(w)$, отмечающие завершение выполнения каждого из модулей, передаются стационарному агенту A_0 , который обновляет собственный вектор Q . Таким образом, стационарный агент A_0 хранит и обновляет информацию о текущем числе и составе одновременно исполняемых мобильными агентами модулей, инициируя их выполнение.

Рассмотрим теперь работу мобильных агентов, размещённых на удалённых узлах. При выполнении агентами модулей происходит обновление базы знаний, содержащей факты, описываемые атомарными константными формулами $p(x_1), p(x_2), \dots, p(x_7)$, составляющими вектор P , и формулами, составляющими вектор Q . Вектор P используется для реализации функции логического управления, а вектор Q – для координации работы агентов. Множества модифицируемых значений предикатов представим следующими векторами соответственно для каждого модуля:

$$\begin{aligned} k_1 &= (p(x_1), p(x_2), -, -, -, p(x_6), -; q(w_1)); \\ k_2 &= (-, p(x_2), p(x_3), -, -, -, q(w_2)); \\ k_3 &= (-, -, p(x_3), p(x_4), -, -, q(w_3)); \\ k_4 &= (-, -, -, p(x_4), p(x_5), -, -, q(w_4)); \\ k_5 &= (-, -, -, -, p(x_6), p(x_7); q(w_5)); \\ k_6 &= (p(x_1), -, -, -, p(x_5), -, p(x_7); q(w_6)); \\ k_7 &= (-, p(x_2), -, -, p(x_5), p(x_6), p(x_7); q(w_7)). \end{aligned}$$

В векторах $k_1, k_2, \dots, k_7$ указаны значения предиката $p(x)$, которые должны проверяться или модифицироваться соответствующими модулями $m_1, m_2, \dots, m_7$; прочерки означают, что соответствующие значения предиката не проверяются и не модифицируются. На основе данных векторов формируются сообщения, которыми обмениваются стационарный агент A_0 с мобильными агентами.

В качестве примера рассмотрим обмен сообщениями между агентом A_0 и агентом A_1 . Агент A_0 при работе использует векторы Q и P , хранящиеся в его локальном пространстве (окружении) и составляющие центральную базу знаний. В начальном состоянии базы знаний $p(x_1)=true, p(x_2)=false, p(x_3)=false, p(x_4)=false, p(x_5)=false, p(x_6)=false, p(x_7)=false; q(w_1)=false, q(w_2)=false, q(w_3)=false, q(w_4)=false, q(w_5)=false, q(w_6)=false, q(w_7)=false$, где ложные значения вектора Q означают, что ни один мобильный агент не включён в работу. Агент A_0 проверяет возможность выполнения модуля m_1 агентом A_1 . На основании значений вектора Q он устанавливает, что ни один мобильный агент еще не выполняется, то есть на выполнение может быть назначен любой агент, для которого истинно α -условие в выражении для соответствующего ему модуля. Проверяя α -условия для каждого модуля, агент A_0 устанавливает, что истинно единственное α -условие $\alpha=p(x_1)$ для модуля m_1 , поэтому он планирует выполнение модуля m_1 удалённым агентом A_1 . Для этого он изменяет значение высказывания $q(w_1)$ на истинное, выполняя элементарное правило обновления $q(w_1) \leftarrow true$ предиката $q(x)$. Затем, учитывая вид вектора $k_1=(p(x_1), p(x_2), -, -, -, p(x_6), -; q(w_1))$ и текущие значения предикатов $p(x)$ и $q(w)$, он формирует управляющее сообщение $<1, 0, -, -, -, 0, -, 1>$ и отправляет его удалённому агенту A_1 . Получив это сообщение, удалённый мобильный агент A_1 реализует модуль m_1 ,

выполняя модификацию локальной базы знаний. В соответствии с данными модификациями агент A_1 выполняет поиск и обработку данных на удалённом узле вычислительной сети. После выполнения модуля m_1 локальные значения предикатов $p(x)$ и $q(w)$ изменятся на $p(x_1)=false$, $p(x_2)=true$, $p(x_6)=true$, $q(w_1)=false$ (остальные значения предикатов модулем m_1 не модифицируются). Агент A_1 формирует ответное сообщение $\langle 0, 1, -, -, -, 1, -, 0 \rangle$ и отправляет его по сети стационарному агенту A_0 . Получив ответное сообщение, стационарный агент A_0 обновляет центральную базу знаний.

В процессе формирования управляющих сообщений центральный агент использует векторы масок, в которых для каждого модуля единицами отмечены те значения предикатов, которые он может проверять и модифицировать:

$$\begin{aligned} e_1 &= (1, 1, 0, 0, 0, 1, 0); \\ e_2 &= (0, 1, 1, 0, 0, 0, 0); \\ e_3 &= (0, 0, 1, 1, 0, 0, 0); \\ e_4 &= (0, 0, 0, 1, 1, 0, 0); \\ e_5 &= (0, 0, 0, 0, 0, 1, 1); \\ e_6 &= (1, 0, 0, 0, 1, 0, 1); \\ e_7 &= (0, 1, 0, 0, 1, 1, 1). \end{aligned}$$

Соответствующие копии каждого из этих векторов хранятся у каждого из мобильных агентов и используются ими при формировании ответных сообщений.

Реализуя принцип асинхронного управления, стационарный агент A_0 непрерывно проверяет готовность модулей $m_1, m_2, \dots, m_7$ к выполнению, используя обновляемую базу знаний (содержащую множество фактов, представленных значениями предикатов $p(x)$ и $q(w)$), и запускает их путём инициирования работы удалённых мобильных агентов.

Путём обмена сообщениями в распределённой интеллектуальной системе логического управления удалённые мобильные агенты получают информацию о состоянии центральной базы знаний, на

основании этой информации и с помощью программно реализованных абстрактных модулей АПС вносят изменения в свои локальные базы знаний и затем отправляют результаты центральному стационарному агенту. Последний вносит изменения в центральную базу знаний. Выполняя описанные действия, агенты обмениваются не только управляющими сообщениями, но исходными данными и результатами.

Заключение

1. Предложены модели логического управления глобальными вычислительными процессами в вычислительных сетях с агентно-ориентированными облачными метакомпьютерными сервисами, основанные на пересылках данных, что позволяет упростить реализацию массового параллелизма в крупномасштабных прикладных распределённых системах.

2. Предложен метод синтеза системной архитектуры агентно-ориентированных метакомпьютерных систем, отличающийся согласованностью с предложенными вычислительными моделями на уровне систем продукционных правил и позволяющий проектировать новую логическую структуру системы, упростить реализацию структурных и функциональных связей между основными компонентами посредством использования базы знаний.

3. Предложены модели асинхронного логического управления процессами и ресурсами в агентно-ориентированных метакомпьютерных системах, предназначенных для распределённой обработки данных, отличающиеся от известных моделей возможностью непосредственной программной интерпретации, что ведёт к сокращению сроков проектирования и повышает эффективность реализации согласованных взаимодействий и синхронизации в коллективе агентов, разделяющих общую распределённую базу знаний о функционировании метакомпьютерной системы и её логической архитектуре.

Список литературы

1. Структура и проблемы развития программного обеспечения среды распределенных вычислений Grid / В. Н. Коваленко, Е. И. Коваленко, Д.А. Корягин, Э. З. Любимский, А. В. Орлов, Е.В. Хухлаев // Препринт Института прикладной математики имени М.В.Келдыша Российской академии наук. – М., 2002. – 23 с.

2. Catlett, C. Metacomputing / C. Catlett, L. Smarr // Communications of the ACM. – 1992. – No 35 (6). – P. 44–52.

3. Коваленко, В. Н. Вычислительная инфраструктура будущего / В. Н. Коваленко, Д. А. Корягин // Открытые системы. – 1999. – № 11–12. – С. 45–52.

4. Wooldridge, M. An Introduction to Multiagent Systems / M. J. Wooldridge // John Wiley&Sons. – 2009. – 484 p.

5. Hewitt, C. ORGs for scalable, robust, privacy-friendly client cloud computing / C. Hewitt // IEEE Internet Computing. – 2008. – Vol. 12. – No. 5. – P. 96–99.

6. Dave, P. Introduction to Cloud Computing. Published: 10 April, 2009 / P. Dave // [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://dotnetslackers.com/articles/sql/introduction-to-cloud-computing.aspx>, свободный (дата обращения: 10.06.2013).

7. Таненбаум, Э. Распределенные системы. Принципы и парадигмы / Э. Таненбаум, М. ван Стен. – СПб.: Питер, 2003. – 877 с.

8. FIPA Specifications [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.fipa.org/specifications/index.html>, свободный (дата обращения: 10.06.2013).

9. Зинкина, Н. С. Методы и модели логического управления дискретными процессами в распределенных вычислительных системах на основе концепции согласования / Н. С. Зинкина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1. – С. 35–47.

10. Механов, В. Б. Формализация управления вычислительными процессами в распределенных системах хранения и обработки данных и знаний / В. Б. Механов, С. А. Зинкин, Н. С. Карамышева // Информационные технологии. – 2013. – № 1. – С. 51–58.

References

1. Kovalenko V.N., Kovalenko E.I., Koryagin D.A., Lyubimskiy E.Z., Orlov A.V., Khukhlaev E.V. Structura i problemy razvitiya programmnogo obespecheniya sredy raspredelennykh vychisleniy Grid [The Structure and the Problems of the Development of the Software Environment of Distributed Computing Grid]. Preprint Instituta prikladnoy matematiki imeni M. V. Keldysha Rossiyskoy akademii nauk. [Preprint of M. V. Keldysh Institute of Applied Mathematics of the Russian Academy of Sciences]. Moscow, 2002. 23 p.

2. Catlett C., Smarr L. Metacomputing. Communications of the ACM, 1992. No 35 (6). P. 44–52.

3. Kovalenko V. N., Koryagin D. A. Vychislitel'naya ifrastructura budushchego. [The Computing Infrastructure of the Future]. Otkrytye sistemy [Open Systems]. 1999. No 11–12. P. 45–52.

4. Wooldridge M. J. An Introduction to Multiagent Systems. John Wiley&Sons, 2009. P. 484.

5. Hewitt C. ORGs for Scalable, Robust, Privacy-friendly Client Cloud Computing. IEEE Internet Computing. 2008. Vol. 12. No 5. P. 96–99.

6. Dave P. Introduction to Cloud Computing. URL: <http://dotnetslackers.com/articles/sql/introduction-to-cloud-computing.aspx> (reference date: 22.06.2013).

7. Tanenbaum E. M. van Steen. Raspredelennyye sistemy. Printsipy i paradigmy [Distributed Systems. Principles and Paradigms]. SPb.: Piter, 2003. 877 p.

8. FIPA Specifications. URL: <http://www.fipa.org/specifications/index.html> (reference date: 22.06.2013).

9. Zinkina N. S. Metody i modeli logicheskogo upravleniya diskretnymi protsessami v raspredelennykh vychislitel'nykh sistemakh na osnove kontseptsii soglasovaniya. [Methods and Models of Logical Control of Discrete Processes in Distributed Computing Systems Based on the Concept of Coordination]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki. [The Proceedings of Higher Education Institutions. Volga Region. Technical Sciences]. 2011. No 1. P. 35–47.

10. Mekhanov V. B., Zinkin S. A., Karamysheva N.S. Formalizatsiya upravleniya vychislitel'nyimi protsessami v raspredelennykh sistemakh khraneniya i obrabotki dannykh i znaniy. [The Formalization of the Control Processes in Distributed Computing Systems for Storage and Processing of Data and Knowledge]. Informatsionnye tekhnologii [Information Technologies]. 2013. No 1. P. 51–58.

11. Зинкина, Н. С. Обобщенная логико-алгебраическая модель и организация мультиагентных метакомпьютерных систем / Н. С. Зинкина // Перспективы науки. – 2011. – № 4. – С. 98–108.

11. Zinkina N. S. Obobshchennaya logiko-algebraicheskaya model' i organizatsiya multiagentnykh metakomp'yuternykh system. [The Generalized Logical-algebraic Model and the Organization of Multi-agent Metacomputing Systems]. Perspektivy nauki. [Perspectives of Science]. No 4. P. 98-108.

Статья поступила в редакцию 23.06.13

ВАШКЕВИЧ Николай Петрович – доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной техники, Пензенский государственный университет (Российская Федерация, Пенза). Область научных интересов – специализированные вычислительные системы, системы логического управления. Автор более 400 публикаций.

E-mail: vt@alice.pnzgu.ru

ЗИНКИН Сергей Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной техники, Пензенский государственный университет (Российская Федерация, Пенза). Область научных интересов – системы хранения и обработки данных. Автор более 250 публикаций.

E-mail: zsa49@yandex.ru

КАРАМЫШЕВА Надежда Сергеевна – кандидат технических наук, инженер-программист кафедры вычислительной техники, Пензенский государственный университет (Российская Федерация, Пенза). Область научных интересов – распределенная обработка данных, облачные и метакомпьютерные технологии. Автор 25 публикаций.

E-mail: kagliari@yandex.ru

VASHKEVICH Nikolay Petrovich – Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Chair of Computer Engineering at Penza State University (Penza, Russian Federation). The sphere of scientific interests is specialized computer systems, logic control systems. The author of more than 400 publications.

E-mail: vt@alice.pnzgu.ru

ZINKIN Sergey Aleksandrovich – Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Chair of Computer Engineering at Penza State University (Penza, Russian Federation). The sphere of scientific interests is data storage and processing systems. The author of more than 250 publications.

E-mail: zsa49@yandex.ru

KARAMYSHEVA Nadezhda Sergeevna – Candidate of Engineering Sciences, Software Engineer of the Chair of Computer Engineering at Penza State University (Penza, Russian Federation). The sphere of scientific interests is the distributed data processing, cloud and metacomputer technologies. The author of 25 publications.

E-mail: kagliari@yandex.ru

N. P. Vashkevich, S. A. Zinkin, N. S. Karamysheva

THE CLOUD PLATFORM FOR THE IMPLEMENTATION OF AGENT-ORIENTED METACOMPUTER SYSTEMS

Key words: *computer networks; agents; metacomputers; cloud computing; structural and functional relations; resources.*

ABSTRACT

We consider the problems of selection, development and the integration of the technologies of software implementation of network agent-oriented metacomputer systems. The purpose of this research is to develop the techniques of abstract and structural design of asynchronous logic control systems for distributed agent-oriented systems implemented in the cloud. As examples of such systems we also consider agent-oriented grid-systems.

We have proposed a concept of forming virtual metacomputer architecture as a hybrid cloud service «Earth-cloud» in which computational resources of user-defined computers are considered as additional services.

The study illustrates the application of asynchronous predicate networks to formalize the basic processes of resource occupation and deallocation in agent-oriented metacomputer systems. Further in this environment the organization of metacomputer computing becomes possible. The next important tasks are the organization of collective exchange control, collective computing and process synchronization.

We give the definition of an asynchronous predicate-functional network as the formalism for the description of the logical control of computing processes in agent-oriented metacomputer systems. The example of the development of distributed agent-oriented application for the control logic system of some abstract grid-system.

We offer models of asynchronous logical control of processes and resources in agent-oriented metacomputer systems intended for the distributed processing of data that differ from the known models in the possibility of direct software interpretation, that results in reducing a design period and improving the efficiency of the implementation of coordinated interactions and the synchronization in a group of agents, sharing the general distributed knowledge base of the functioning of the metacomputer system and its logical architecture.

УДК 004.89, 004.942, 338.24

А. В. Горохов, А. В. Маслобоев, А. Г. Олейник

ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СПЕЦИФИКАЦИЙ СРЕДЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ

Предложен когнитивный подход к построению проблемно ориентированных самоорганизующихся мультиагентных информационных систем с использованием методов системной динамики и концептуального моделирования. Такие системы ориентированы на интеллектуальную поддержку принятия решений в области управления гетерогенными социально-экономическими структурами регионального уровня. Использование системно-динамических моделей обеспечивает вариабельность горизонтов прогнозирования в рамках единой среды моделирования.

Ключевые слова: *системная динамика; когнитивный агент; мультиагентная система; информационная поддержка; управление; имитационное моделирование; региональное развитие.*

Введение. В региональной системе взаимодействуют объекты различной природы и функционального назначения. Они формируют различные подсистемы региона на основе территориальных, технологических, ресурсных и информационных связей [1]. При этом каждый объект имеет собственные «интересы» и функции в рамках конкретных подсистем и региональной макросистемы в целом. Это дает основание отнести региональные социально-экономические системы (РСЭС) к классу систем, обладающих высокой комбинаторной и динамической сложностью. Особенности региональных систем, в первую очередь – обуславливающие их динамическую сложность, существенно осложняют создание однородных моделей для поддержки принятия решений в области управления такими системами. Различный уровень знаний о компонентах региональных систем и взаимодействиях между ними обуславливает необходимость использовать различные методы анализа данных и моделирования [1].

В связи с этим средства информационно-аналитической поддержки принятия

решений в сфере регионального управления должны обеспечивать возможность оперативной настройки среды моделирования на особенности той или иной задачи управления, а также высокой вариабельностью реализации вычислительных экспериментов. В то же время интерфейс, обеспечивающий взаимодействие пользователя с системой поддержки принятия решений должен быть когнитивным, способствующим целостному и наглядному восприятию информации, как при постановке задач, так и предъявлении ответов системы.

Цель исследований, результаты которых представлены в настоящей работе, заключалась в развитии методов когнитивного моделирования и технологий их практической реализации, обеспечивающих создание систем, удовлетворяющих указанным выше требованиям.

Методологическая база исследования. В настоящее время одним из перспективных направлений развития технологий построения интеллектуальных средств поддержки принятия решений в области управления сложными системами

являются когнитивные информационные технологии [2]. Методология когнитивного моделирования [3] ориентирована на анализ и поддержку принятия решений в сложных ситуациях для систем, характеризующихся многоаспектностью происходящих в них процессов и их взаимосвязанностью, динамичностью и высокой степенью неопределённости, отсутствием достаточной количественной информации о динамике протекающих в них процессов, что вынуждает переходить к качественному анализу таких систем. При этом модели формируются на основе формализации субъективных представлений (знаний) экспертов о системе и/или ситуации в виде концептуальных моделей [4], являющихся базой для создания полимодельных комплексов, входящих в состав средств поддержки принятия решений по управлению сложными динамическими системами и процессами. Это обусловливает целесообразность применения когнитивного подхода и реализующих его технологий для создания средств поддержки и автоматизации процессов управления РСЭС.

Достаточно полное представление о региональной социально-экономической системе может быть сформировано только на основе коллективных знаний экспертов различных предметных областей (экономика, экология, социология, административное управление и т.д.). Активно используемым и динамично развивающимся средством структурирования, формализации и унификации представления знаний с целью их многократного и гибкого использования в информационных системах являются онтологии [5]. Однако объективные различия в определении специалистами различных предметных областей состава и, что более важно, структуры представляемых в модели региональной системы сущностей вызывают проблемы с формированием онтологических соглашений. Избежать проблем, связанных с представлением сложной разнородной си-

стемы в рамках объектно ориентированной модели, используемой в онтологиях, позволяет технология концептуального моделирования [6, 7]. С использованием данной технологии в Институте информатики и математического моделирования Кольского научного центра РАН (ИИММ КНЦ РАН) разработана интегрированная концептуальная модель, объединяющая в себе концептуальные модели предметной области и исполнительной среды информационно-аналитической поддержки решения задач в рамках рассматриваемой предметной области [8], которая в полной мере может выполнять функции онтологии в плане представления знаний об исследуемой системе [9]. Разработанные методы и средства концептуального моделирования обеспечивают возможность в автоматизированном режиме синтезировать на основе концептуальных описаний спецификации исполнительной среды систем поддержки принятия решений. Интегрированная концептуальная модель, в частности, положена в основу инструментальной системы комплексного моделирования задач регионального управления [10].

При моделировании социально-экономических процессов и систем выбор типов моделей и средств их практической реализации зависит от особенностей решаемых задач. В качестве одного из наиболее эффективных подходов к моделированию региональных систем можно указать метод системной динамики [11]. Данный метод применяется для исследования динамически сложных процессов с множественными и, как правило, неоднородными обратными связями, что затрудняет применение аналитических методов для их моделирования. Постоянный рост вычислительной мощности компьютеров, а также развитие программных средств реализации диалога между конечным пользователем и инструментальной средой моделирования способствуют тому, что имитационное моделирование все шире используется в области исследова-

ния и управления социально-экономическими системами и процессами. Важным достоинством инструментальных средств системно-динамического моделирования является возможность оперативной модификации не только параметров модели, но и её структуры непосредственно в ходе реализации вычислительного эксперимента. Отмеченные аспекты и имеющийся мировой опыт [12–14] позволяют констатировать большой потенциал метода системной динамики в поддержке решения задач управления РСЭС, характеризующихся сложностью, новизной ситуаций, большой длительностью развития и слабой формализованностью. В ИИММ КНЦ РАН разработана методология и созданы специализированные инструментальные средства для автоматизированного синтеза структуры системно-динамических моделей на основе концептуальной модели решаемой задачи [15].

В ходе дальнейших исследований по развитию технологий информационно-аналитической поддержки управления РСЭС установлено, что качественно новое решение в данной области позволяет получить включение в используемый инструментальный базис технологий мультиагентного моделирования. Интеграция методов концептуального, системно-динамического и мультиагентного моделирования обеспечивает основу для разработки когнитивных информационных

технологий построения интеллектуальных систем поддержки принятия решений в сфере управления развитием РСЭС в слабоструктурированных ситуациях. Средства реализации каждого из указанных методов обеспечивают выполнение определённых функций, а их интеграция приводит к синергетическому эффекту (рис. 1) и получению результатов, обладающих высоким уровнем когнитивности.

Использование методов системной динамики в мультиагентных моделях. Анализ современного состояния исследований отечественных и зарубежных научных школ в области разработки проблемно ориентированных мультиагентных систем (МАС) показывает, что, несмотря на большой потенциал развития современных МАС и базирующихся на них технологических решений для различных предметных областей, вопросы приложения технологии МАС для задач информационного обеспечения управления развитием РСЭС недостаточно изучены.

Использование мультиагентного подхода в сочетании с технологией оперативного динамического формирования исполнительной среды «под задачу» на основе интегрированной концептуальной модели позволяет создать адекватную информационно-аналитическую среду поддержки управления развитием и функционированием РСЭС, учитывая распределённость, динамичность и структурную



Рис. 1. Отличительные особенности когнитивного подхода к решению задач информационной поддержки управления региональной безопасностью

сложность образующих их подсистем. При таком подходе моделирование (виртуализация) функций управления отдельными компонентами РСЭС осуществляется за счёт делегирования их интеллектуальным проактивным агентам, а на основе проблемно ориентированных коалиционных взаимодействий агентов обеспечивается динамическая самоорганизация моделей управления региональными подсистемами. Формирование коалиций агентов – это один из эффективных подходов синтеза и динамического конфигурирования виртуальных организационных структур (моделей функционирования систем управления) под возникающие задачи управления регионом в слабоструктурированных ситуациях с учётом динамически меняющихся условий. Элемент или подсистема РСЭС будет представлена в исполнительной среде собственной моделью (агентом или коалицией агентов). Требования, которым должна удовлетворять эта модель, явно соотносятся с характеристическими требованиями к агентам [16] – модель должна быть относительно самостоятельной, но «уметь» взаимодействовать с «окружающим миром». Самостоятельность необходима для того, чтобы обеспечить возможность гибкого использования моделей объектов региональной системы в различных комбинациях при решении различных задач. Наличие множественных взаимодействий между компонентами является одним из основных свойств региональной системы.

Важным свойством исполнительной среды, реализованной на основе агентов, является её автономность. После настройки и запуска сеанса моделирования как отдельные модели, так и весь их комплекс должны быть способны функционировать без прямого вмешательства человека.

Как уже отмечалось выше, многие объекты региональной системы имеют собственные цели и функции. Следовательно, модели, представляющие эти объекты, должны обладать целенаправлен-

ным поведением, стремиться привести или хотя бы приблизить моделируемые характеристики объекта к целевым значениям. При этом они должны воспринимать воздействия окружающей среды и реагировать на них как путём изменения своего внутреннего поведения, так и ответным воздействием на окружающую среду с целью её изменения в собственных интересах. Таким образом, модели таких объектов должны обладать реактивностью и проактивностью.

Создание «среды обитания» для программных агентов, представляющих собой модели компонентов региональной системы, является важным моментом при построении проблемно ориентированных мультиагентных систем поддержки принятия решений. Агенты – модели, представляя проактивные сущности, существуют в виртуальной (компьютерной) среде. Вместе с этим, когда речь идёт о моделировании региональной системы, практически для каждого моделируемого объекта может быть определено конкретное местоположение в реальном мире. Причем, функции и цели объекта, а также пути достижения этих целей существенно зависят от положения этого объекта в региональной системе. Эта особенность региональных систем предопределяет необходимость привлечения для их моделирования геоинформационных систем (ГИС). В работах [1, 8, 17] рассматриваются функции и технология использования ГИС в рамках концептуального моделирования региональных систем. В первую очередь ГИС обеспечивают наглядность модели, позволяя пользователям чётко сопоставить элементы концептуального описания с объектами реального мира. Кроме этого, использование ГИС позволяет фиксировать пространственные взаимосвязи объектов.

Среда, в которой действуют проактивные агенты, является не только пространственно распределённой, но и обладает собственной внутренней динамикой.

Причем, эта динамика, как правило, является различной для разных компонентов среды, поэтому для построения модели среды (сцены) в мультиагентной системе моделирования регионального развития предлагается интегрировать метод системной динамики и ГИС-технологии. В работе [17] представлены разработанные правила поддержания соответствия между элементами имитационной (реализуемой системно-динамическими моделями) и визуализирующей (геоинформационной) подсистемами. На основе этих правил созданы алгоритмы, которые обеспечивают контроль и коррекцию интерфейсных связей внутри интегрированной системы в процессе динамического взаимодействия. Реализованы и системно-динамические модели, позволяющие решать задачу автоматизированного синтеза единой геоинформационной динамической системы. Алгоритмы предусматривают различные способы представления исходных моделей и учитывают требования к интегрированной модели социально-экономической системы.

Агенты, представляющие проактивные сущности реального мира (население, или его отдельные группы, хозяйствующие субъекты региона и т.п.), в общем, должны обладать интеллектуальностью (когнитивностью). Это значит, что они должны «обладать» знаниями о себе и окружающем мире и быть способными определять и корректировать своё поведение в соответствии с этими знаниями [16]. Основным инструментом, используемым интеллектуальными (когнитивными) агентами при принятии решения, являются методы искусственного интеллекта. Алгоритм принятия решения обычно не существует в явном виде, а формируется из правил, закономерностей и т.д. в процессе решения задачи. Неинтеллектуальные агенты работают по процедурной схеме, а алгоритм поведения и выбора альтернатив обычно зафиксирован в программном коде или записан на некотором интерпретируемом языке сценариев (скрипт-языке).

В данной работе под когнитивным агентом понимается интеллектуальная система, моделирующая поведение и взаимодействие субъектов проблемно ориентированной деятельности в виртуальной среде. Отличительными особенностями когнитивных агентов являются реализация полного цикла «восприятие - познание - исполнение» с использованием пространства знаний, а также высокая автономность и способность семантического агрегирования, анализа и обработки информации для получения новых знаний о предметной области, для которой они предназначены.

Синтезируемое на основе агентных технологий мультиагентное виртуальное пространство региона представляет собой модель реального мира, обеспечивающую эффект присутствия пользователя. Модель предоставляет прямой доступ к объектам виртуального пространства для имитации поведения реальных объектов в исследуемой системе при различных управляющих воздействиях. Особенностью мультиагентных виртуальных пространств является ориентация на использование онтологических моделей представления знаний. Онтологии являются динамично развивающейся и перспективной формой представления знаний в гетерогенных распределённых информационных системах [16]. Онтология задает интеллектуальность когнитивного агента – чем точнее составлена онтология, чем более корректно обозначены связи, тем адекватнее агент представляет предметную область, для которой он существует.

Так как для когнитивных агентов характерно не только наличие целенаправленного поведения, но и возможность использования достаточно сложных знаний о среде функционирования, партнёрах и о себе, то к их свойствам добавляются следующие:

- убеждения – переменная часть базовых знаний, которые могут меняться во времени, хотя агент может об этом не

знать и продолжать их использовать для своих целей;

- желания – состояния и/или ситуации, достижение которых для агента важно;
- обязательства – задачи, которые берёт на себя агент по просьбе и/или поручению других агентов;
- намерения – то, что агент должен делать в силу своих обязательств и/или желаний.

Когнитивные агенты, обладая развитым внутренним представлением сцены и возможностями реализации рассуждений, должны быть способными запоминать и анализировать различные ситуации, предвидеть возможные реакции на свои действия, делать из этого выводы, полезные для дальнейших действий, и в результате – прогнозировать результативность своего поведения и изменения сцены. Для этого агенты должны быть снабжены имитационным аппаратом [19]. Анализ используемых в современной практике проектирования МАС архитектурных решений интеллектуальных агентов показал, что ни одно из них не обладает достаточной функциональностью для реализации указанных способностей. Некоторые попытки теоретического осмысления подобного подхода представлены в работе [20], но не

имеют конкретной практической реализации. На рис. 2 схематически показана структура интеллектуального (когнитивного) агента.

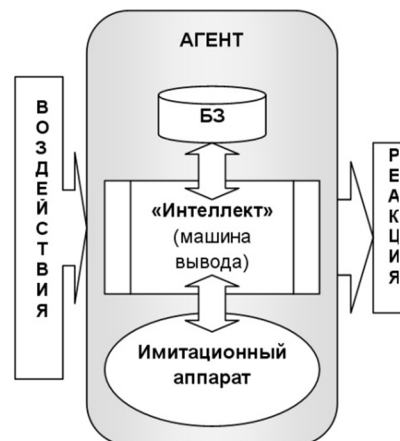


Рис. 2. Структура интеллектуального (когнитивного) агента

Более детально архитектуру когнитивного агента иллюстрирует рис. 3. Наличие имитационного аппарата в составе архитектуры когнитивных агентов обеспечивает агентам способность формирования модели внешнего мира, моделей собственного поведения и поведения других агентов, и на основе результатов моделирования строить стратегию своего поведения в ходе межагентных коммуникаций в виртуальной среде.

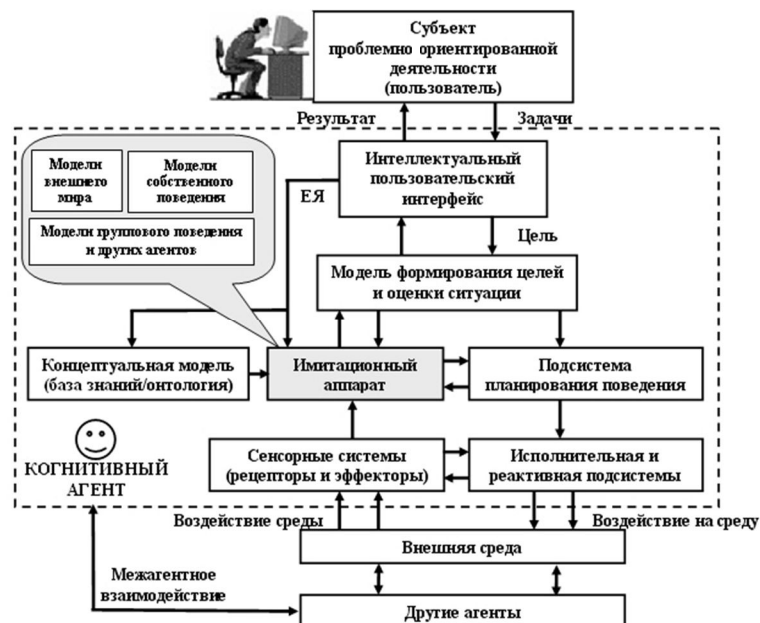


Рис. 3. Гибридная архитектура когнитивного агента с имитационным аппаратом

В состав когнитивного агента входят: подсистема взаимодействия; база знаний и имитационный аппарат. База знаний агента реализована в виде онтологии предметной области, для которой предназначен агент. Подсистема взаимодействия реализована с помощью языков KIF (Knowledge Interchange Format) и ACL (Agent Communication Language). Имитационный аппарат представляет собой полную или упрощённую модель среды, в которой функционирует агент, рекуррентно вызываемую в процессе моделирования, и обеспечивает локальный прогноз результатов его потенциальной активности. В качестве средства реализации имитационного аппарата предложено использовать системно-динамические (СД) модели.

Схема работы агента без учёта имитационных возможностей принципиально не отличается от функционирования классических агентных моделей: на каждом шаге моделирования каждый агент выбирает один из множества альтернативных вариантов собственных действий, исходя из сформулированного для него критерия эффективности [21]. После реализации всеми агентами модели выбранных альтернатив происходит переход к следующему модельному шагу.

Отличие предлагаемой модели функциональной организации когнитивного агента от классической схемы заключается в механизме оценки альтернатив дальнейшего поведения. В классическом случае выбор определяется параметрами анализируемой альтернативы и текущими и/или предшествующими значениями параметров среды функционирования агента. Агенты с имитационным аппаратом при выборе варианта собственных действий на некотором шаге учитывают не только текущее и предшествующие состояния среды, но и предполагаемые будущие значения её параметров, а также влияние на эти значения деятельности других агентов. Это обеспечивается путём «прогонки» анализируемого варианта дей-

ствий агента на структурно идентичной вспомогательной имитационной модели.

Подходы к реализации имитационного аппарата агентов на основе СД-моделей. Рассмотрим варианты реализации имитационного аппарата когнитивных агентов на основе системно-динамических моделей.

Первый подход предполагает, что для прогнозирования развития сцены осуществляется копирование модели сцены в имитационный аппарат агента. Проактивный агент в данном случае формирует собственный внутренний виртуальный мир, приняв за основу текущее состояние и структуру внешнего виртуального мира (комплексной модели, включающей модель среды и модели действующих в ней проактивных сущностей). Выработка стратегии поведения рассматриваемого агента осуществляется путём «внутренней» симуляции различных сценариев собственного развития и развития сцены в результате выбора агентом на каждом шаге тех или иных действий для достижения собственных целей. В данном случае агент берёт на себя функции моделирования всего окружающего мира. Такое решение существенно повышает автономность агента, но порождает ряд проблем. Во-первых, полное дублирование модели окружающего мира, или даже его упрощённой копии, потребует выделения для агента дополнительных ресурсов. Во-вторых, нет однозначного решения для учета работы других проактивных агентов, функционирующих параллельно в той же среде.

Второй подход, основанный на порождении «параллельных» виртуальных миров агентами, предполагает создание упрощённых моделей других агентов. Такое решение приемлемо, если в рамках решаемой задачи допускается рассмотрение других агентов как исполнителей заданий агента-владельца виртуального мира. Система получается относительно простой с динамической точки зрения, так как в качестве общих приоритетов высту-

пают цели агента-владельца. При этом система обладает достаточно высокой «прогностической» ценностью для агента-владельца виртуального мира – позволяет прогнозировать его эффективное развитие на много шагов вперед. К сожалению, подобные допущения ограничивают спектр задач, для которых модель может считаться адекватной, ситуациями, в которых субъекты жертвуют (по тем или иным причинам) своими интересами в интересах других субъектов.

При моделировании реальных сценариев развития региональных систем проактивные агенты должны работать как коллектив (или как конкуренты), взаимодействуя на сцене. Сохранить функциональность и целеустремленное поведение всех проактивных сущностей в процессе имитационного анализа вариантов развития позволяет подход, предполагающий порождение «параллельных» виртуальных миров агентами (рис. 4).

Для анализа возможностей и вариантов своего поведения в рамках комплексной виртуальной среды некоторый агент A_i инициирует запуск «параллельного» мира. При этом параллельный мир формируется как копия основного виртуального мира на момент порождения T_i , дублируя его структуру и состояние $S(T_i)$. Параметр τ_i определяет, на какое время порождается этот мир. Данный параметр зависит от прогностических задач агента

A_i и может быть назван «глубиной прогнозирования». После инициализации параллельного мира агент A_i «проживает» в нём несколько раз отрезок времени τ_i , варьируя варианты своего поведения с целью поиска следующего наиболее выгодного для него поведенческого шага в основном виртуальном мире. Найдя этот шаг, он его реализует, изменяя состояние основного виртуального мира.

Остальные проактивные сущности действуют аналогичным образом, порождая собственные виртуальные миры, анализируя в них варианты собственного развития и окружающей среды. В каждом порождённом виртуальном мире сохраняется полная функциональность и целенаправленное поведение каждого проактивного агента.

Наиболее сложной проблемой является организация взаимодействия агентов и согласования планов действий – оценки выигрыша и потерь в случае конфликта, компромисса, вступления в коалицию. В рамках этой проблемы необходимо решить задачу синхронизации основного виртуального мира и порождённых миров каждого проактивного агента, участвующего в коллективном или конкурентном процессе. При использовании в качестве имитирующей среды системно-динамических моделей задача сводится к согласованию шагов имитации (единиц дискретного времени системно-динамических моделей) как для среды, так и для проактивных сущностей.

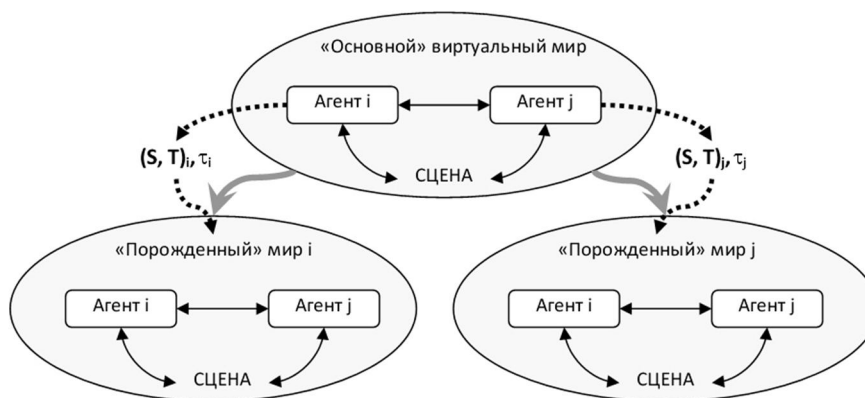


Рис. 4. Схема организации работы мультиагентной среды с «порождением» виртуальных миров проактивными сущностями

При инициализации порождённого мира основной мир либо полностью должен оставаться в фиксированном состоянии, либо, при определённых условиях, изменяться в нём может только среда по своим внутренним закономерностям при фиксированных воздействиях проактивных сущностей.

Выполнение очередных шагов проактивными агентами в основном виртуальном мире, в ходе которых может измениться внутреннее состояние агентов и осуществляется элементарный акт взаимодействия с окружающей средой и другими проактивными сущностями, происходит по определённому синхронизационному плану.

Синхронизационный план, по сути, представляет собой временную схему, определяющую моменты срабатывания каждого агента. Естественным требованием является кратность внутренних шагов имитации проактивных сущностей и среды.

При моделировании задач, требующих взаимодействия агентов, необходимо формировать логически связанные структуры, отражающие динамику исследуемой подсистемы. Данные структуры должны обеспечивать такие системные свойства, как:

- в возникающих структурах агенты организуются в целое, свойства которого не являются простой суммой свойств составляющих;
- логически связанные (интегрированные) относительно простые правила поведения и взаимодействия отдельных агентов могут генерировать новое явление;
- устойчивые возникающие структуры могут стать компонентами более сложных возникающих структур и приводят к иерархии возникающих структур и их масштабируемости.

Формирование структур, обладающих указанными свойствами, возможно на основе концептуального описания с помощью соответствующих средств работы с концептуальной моделью. В первую очередь, это средства выделения фрагмента

концептуальной модели, «покрывающего» определённую задачу, в интересах решения которой организуется сеанс моделирования [22]. На основе выделенного фрагмента производится анализ декларативной разрешимости задачи, определяющей принципиальную возможность получения искомого решения на основе заданного условия. После этого формируется спецификация информационно-вычислительной исполнительской среды, обеспечивающей возможность реализации сеанса моделирования с учётом наличия и распределённости исполнительных агентов.

Третий подход предполагает, что в ходе моделирования используются два вида агентных моделей, идентичных по структуре, но различающихся внутренней организацией агентов. Первый вид, назовём его *базовой агентной моделью*, характеризуется тем, что при принятии решения о действиях, реализуемых на очередном шаге моделирования, агент оперирует лишь текущими и предшествующими параметрами состояния среды функционирования и никак не учитывает влияние на значение критерия выбора последующей активности агентов-конкурентов или агентов-союзников. Второй вид моделей – *модели с внутренней имитацией*, при той же структуре среды функционирования использует агентов с архитектурой, представленной на рис. 3. При определении значения критерия выбора альтернативного действия на некотором шаге агент запускает базовую агентную модель, предварительно проинициализировав её текущими параметрами состояния среды, и моделирует с заданным горизонтом последствия собственных потенциальных действий. Возможна также и организация большей глубины рекурсивного использования моделей. В этом случае агент основной модели использует для определения критерия выбора вспомогательную модель с внутренней имитацией, агенты которой, в свою очередь, также могут использовать вспомогательные модели

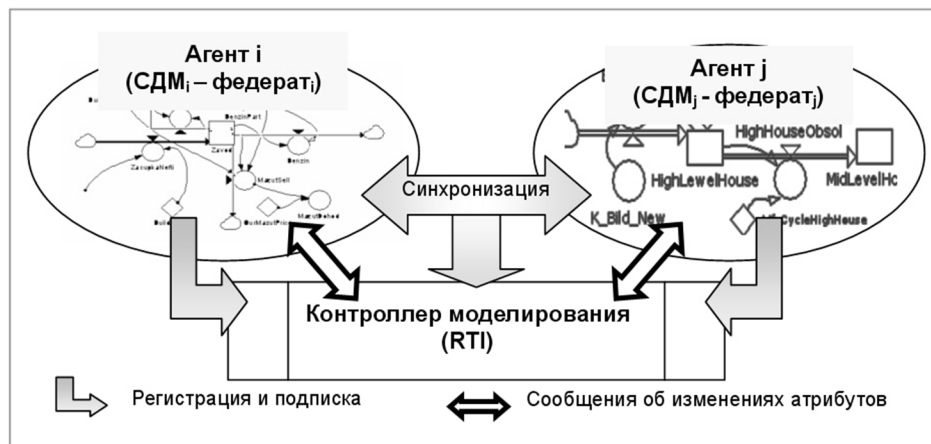


Рис. 5. Схема взаимодействия распределённого комплекса системно-динамических моделей в рамках архитектуры HLA

с внутренней имитацией, и так далее – до нижнего уровня, на котором для прогнозирования результатов собственной активности агентами используются базовые модели. Вместе с тем, следует также отметить, что важным вопросом, требующим дополнительной детальной проработки в рамках реализации данного подхода, является влияние на качество моделирования глубины рекурсивного вызова моделей.

Одним из путей формирования мультиагентной среды с использованием СД-моделей является организация распределённой работы комплекса СД-моделей в рамках архитектуры HLA (High Level Architecture) [8]. При этом каждая отдельная СД-модель, представляющая конкретный объект или подсистему, является самостоятельным моделирующим агентом. В терминологии HLA такой агент называется Федератом. Состав федерации (совокупности взаимодействующих федератов) для решения сложной задачи определяется описывающим эту задачу фрагментом концептуальной модели предметной области. Важная проблема синхронизации моделирующих процессов осуществляется специализированным контроллером моделирования в выделенных точках. Перед началом моделирования агенты подключаются к контроллеру моделирования при помощи механизма сокетов. Для каждого агента на основе заданных в концептуаль-

ной модели атрибутов и отношений определяется: уникальное имя, списки импортируемых и экспортируемых атрибутов (данных); собственный шаг моделирования. В процессе моделирования контроллер осуществляет согласование шагов моделирования и передачу изменённых данных между агентами согласно подписке. Схема взаимодействия распределённого комплекса СД-моделей в рамках архитектуры HLA показана на рис. 5.

Протокол взаимодействия компонентов распределённой системы представляет собой набор команд интерфейса (API) среды системно-динамического моделирования и их параметров.

Общая схема технологии. Технология формирования спецификаций мультиагентной среды имитационного моделирования задач управления включает четыре основных этапа (рис. 6).

На первом этапе на основе анализа представленных в концептуальной модели предметной области субъектов и ассоциированных с ними задач проводится определение базового множества классов агентов, которые будут функционировать в синтезируемой системе. К одному классу будет относиться множество агентов, играющих однотипные роли. Например, при моделировании инновационных процессов определялись такие классы, как инвестор, исполнитель, генератор инноваци-

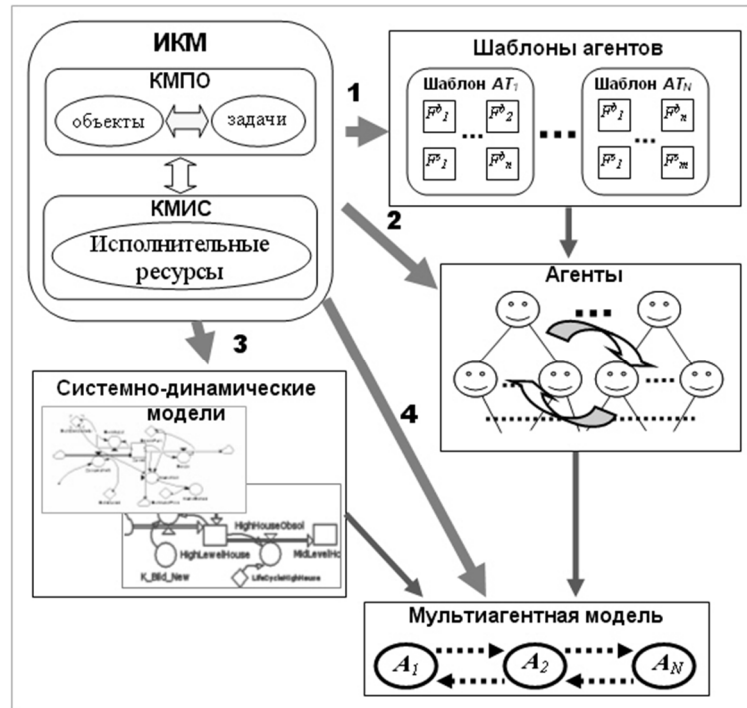


Рис. 6. Общая схема формирования спецификаций мультиагентной среды моделирования.

Обозначения: ИКМ – интегрированная концептуальная модель; КМПО – концептуальная модель предметной области; КМИС – концептуальная модель исполнительской среды; A – множество агентов (коалиций агентов) системы; F^b – множество общесистемных (базовых) функций агентов; F^s – множество специфических для предметной области функций агентов (с точки зрения настройки агента на решение задач из конкретной предметной области). 1-4 – основные этапы технологии

онной идеи. С каждым классом связывается набор общесистемных F^b и специфических F^s (определяемых однотипными задачами класса) функций агента. На втором этапе с использованием процедур анализа интегрированной концептуальной модели и выбора проблемно ориентированных фрагментов концептуального описания [1, 8] формируется множество экземпляров агентов каждого класса, а также их коалиции. Возможны ситуации, когда субъект, представленный в концептуальной модели предметной области, играет в системе несколько различных ролей. В этом случае для него будет формироваться несколько агентов различных классов. В конкретном сеансе имитационного моделирования может быть задействован как один ассоциированный с субъектом агент, так и несколько. При дальнейшей работе с интегрированной концептуальной моделью созданные агенты интерпретируются как алгоритмические исполнители нетерминаль-

ного уровня. База знаний агента формируется на основе соответствующих фрагментов концептуальной модели. Третий этап технологии заключается в создании компонентов, обеспечивающих реализацию имитационного моделирования – комплекса системно-динамических моделей, отвечающих как за имитацию динамики среды, так и за «поведение» агентов. Структура каждой имитационной модели синтезируется на основе совместного анализа интегрированной концептуальной модели и синтезированной на предыдущем этапе структуры агентов. Процедуры формального контроля обеспечивают проверку декларативной целостности мультимодельной среды имитации и «покрытия» ею представленных в концептуальной модели задач предметной области. Четвёртый этап заключается в интеграции синтезированных компонент в единую мультиагентную среду моделирования и окончательной настройке этой среды.

Заключение. Реализация предлагаемого в настоящей работе когнитивного подхода, основанного на интеграции методов концептуального, системно-динамического и мультиагентного моделирования, обеспечила базис для новых решений в области создания средств комплексной информационно-аналитической поддержки управления региональными социально-экономическими системами. Сферой приложения предложенных в ходе исследований моделей и технологий мультиагентной виртуализации процессов управления сложными слабоструктурированными системами может быть широкий спектр задач, связанных с управлением РСЭС, а также другими организационны-

ми и техническими системами различной степени сложности и масштаба. Полученные решения позволяют формировать и исследовать сценарии развития сложных территориально распределённых систем с имитацией динамических процессов и взаимодействий между субъектами хозяйственной деятельности. Результаты исследований могут найти широкое применение при реализации «Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года» в рамках решения задач управления региональным развитием, а также для создания единого информационного пространства арктических регионов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №12-07-00138 «Разработка когнитивных моделей и методов формирования интегрированной информационной среды поддержки управления безопасностью арктических регионов России»).

Список литературы

1. Емельянов, С. В. Информационные технологии регионального управления / С. В. Емельянов, Ю. С. Попков, А. Г. Олейник, В. А. Путилов. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 400 с.

2. Редько, В. Г. Направления исследований когнитивных автономных агентов / В. Г. Редько // XV Всеросс. научно-технич. конф. «Нейроинформатика-2013» (г. Москва, 21-25 янв. 2013 г., НИЯУ МИФИ). Режим доступа: http://neuroinfo.mephi.ru/sites/neuroinfo.mephi.ru/files/workshop_2013_redko.pdf (дата обращения 30.09.2013)

3. Кочкаров, А. А. Когнитивное моделирование региональных социально-экономических систем / А. А. Кочкаров, М. Б. Салпагаров // Управление большими системами. – 2007. – Вып. 16. – С. 137-145.

4. Путилов, В. А. Технологии распределенных систем информационной поддержки инновационного развития региона / В. А. Путилов, М.Г. Шишаев, А. Г. Олейник // Труды Института системного анализа РАН: Прикладные проблемы управления макросистемами. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2008. – Т. 39. – С. 40–63.

5. Ломов, П. А. Интеграция онтологий с использованием тезауруса для осуществления семан-

References

1. Emel'yanov S.V., Popkov Yu. S., Oleynik A. G., Putilov V. A. Informatsionnye tekhnologii regional'nogo upravleniya [Information Technologies for Regional Management]. Moscow: Editorial URSS, 2004. 400 p.

2. Red'ko V.G. Napravleniya issledovaniy kognitivnykh avtonomnykh agentov [Research Directions of Cognitive Autonomous Agents]. XV Vseros. nauchno-tekhnich. konf. «Neyroinformatika-2013» (g. Moskva, 21-25 yanv. 2013 g., NIYAU MIFI) [The 15th All-Russian Scientific and Technical Conference «Neuroinformatics-2013» (Moscow, 21-25 January 2013, MEPI)]. Access: http://neuroinfo.mephi.ru/sites/neuroinfo.mephi.ru/files/workshop_2013_redko.pdf (reference date: 30.09.2013).

3. Kochkarov A. A., Salpagarov M. B. Kognitivnoe modelirovanie regional'nykh sotsial'no-ekonomicheskikh sistem [Cognitive Modeling of Regional Socio-economic Systems]. Upravlenie bol'shimi sistemami [Grand System Control]. 2007. Issue 16. P. 137-145.

4. Putilov V. A., Shishaev M. G., Oleynik A. G. Tekhnologii raspredelennykh sistem informatsionnoy podderzhki innovatsionnogo razvitiya regiona [Distributed System Technologies of Information Support of Region Innovation Development]. Trudy Instituta sistemnogo analiza RAN: Prikladnye problemy upravleniya makrosistemami [The Proceedings of the Institute of the System Analysis of the Russian Academy of Sciences: Macrosystem Control Applied Problems]. – Moscow: Knizhnyy dom «LIBROKOM», 2008. Vol. 39. P. 40–63.

5. Lomov P. A., Shishaev M. G. Integratsiya ontologiy s ispol'zovaniem tezaurusa dlya

тического поиска / П. А. Ломов, М. Г. Шишаев // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2009. – № 3. – С. 49-59.

6. Олейник, А. Г. Технология представления знаний для информационной поддержки управления региональными системами. Ч.1. / А. Г. Олейник // Изв. вузов. Приборостроение. – 2005. – Т. 48, № 10. – С. 3-6.

7. Олейник, А. Г. Технология представления знаний для информационной поддержки управления региональными системами. Ч.2. / А. Г. Олейник // Изв. вузов. Приборостроение. – 2006. – Т. 49, № 1. – С. 3-6.

8. Олейник, А. Концептуальное моделирование региональных систем / А. Олейник. – Издательский Дом LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 204 с.

9. Горохов, А. В. Когнитивные функции концептуальных моделей социально-экономических систем / А. В. Горохов, А. Г. Олейник, В. А. Путилов // Вторая международная конференция по когнитивной науке (г. С-Петербург, 9-13 июня 2006 г.): Тезисы докладов в 2 т. – СПб.: Филологический факультет СПбГУ, 2006. – Т. 2. – С. 576-577.

10. Олейник, А. Г. Инструментальная система комплексного концептуального моделирования задач регионального управления / А. Г. Олейник // Информационные ресурсы России. – 2005. – № 2. – С. 33-36.

11. Форрестер, Дж. Мировая динамика / Дж. Форрестер. – М.: Наука, 1978. – 165 с.

12. Forrester, J.-W. System dynamics – a personal view of the first fifty years / J.-W. Forrester // System Dynamics Review. – 2007. – Vol. 23, Iss. 2-3. – P. 345-358.

13. Forrester, J.-W. System dynamics – the next fifty years / J.-W. Forrester // System Dynamics Review. – 2007. – Vol. 23, Iss. 2-3. – P. 359-370.

14. Путилов, В. А. Системная динамика регионального развития / В. А. Путилов, А. В. Горохов. – Мурманск: НИЦ «Пазори», 2002. – 306 с.

15. Путилов, В. А. Технология автоматизированной разработки динамических моделей для поддержки принятия решений / В. А. Путилов, А. В. Горохов, А. Г. Олейник // Информационные ресурсы России. – 2004. – № 1. – С. 30-33.

osushchestvleniya semanticheskogo poiska [Ontology Integration Based on Thesaurus Application for Semantic Search Implementation]. Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye si stemy [Information Technologies and Computational Systems]. 2009. No 3. P. 49-59.

6. Oleynik A.G. Tekhnologiya predstavleniya znaniy dlya informatsionnoy podderzhki upravleniya regional'nymi sistemami. Ch.1. [Knowledge Representation Technology for Regional System Management Information Support. Part 1]. Izv. vuzov. Priborostroenie. [The Proceedings of the Institutes of Higher Education. Instrument-making]. 2005. Vol. 48, No 10. P. 3-6.

7. Oleynik A.G. Tekhnologiya predstavleniya znaniy dlya informatsionnoy podderzhki upravleniya regional'nymi sistemami. Ch.2. [Knowledge Representation Technology for Regional System Management Information Support. Part 2]. Izv. vuzov. Priborostroenie. [The Proceedings of The Institutes of Higher Education. Instrument-making]. 2006. Vol. 49, No 1. P. 3-6.

8. Oleynik A. Kontseptual'noe modelirovanie regional'nykh sistem [Conceptual Modeling of Regional Systems]. Izdatel'skiy Dom LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 204 p.

9. Gorokhov A.V. Oleynik A.G., Putilov V.A. Kognitivnye funktsii kontseptual'nykh modeley sotsial'no-ekonomicheskikh sistem [The Cognitive Functions of Conceptual Models of Socio-economic Systems]. Vtoraya mezhdunarodnaya konferentsiya po kognitivnoy nauke (g. S-Peterburg, 9-13 iyunya 2006 g.): tezisy dokladov v 2 t. [The Proceedings of the Second International Conference on Cognitive Science (St. Petersburg, 9-13 June 2006): 2 parts]. St. Petersburg: Filologicheskii fakul'tet SPbGU, 2006. Vol. 2. P. 576-577.

10. Oleynik A. G. Instrumental'naya sistema kompleksnogo kontseptual'nogo modelirovaniya zadach regional'nogo upravleniya [The Development System for the Complex Conceptual Modeling of Regional Management Problems]. Informatsionnye resursy Rossii [Information Resources of Russia]. 2005. No 2. P. 33-36.

11. Forrester J. Mirovaya dinamika [World Dynamics]. Moscow: Nauka, 1978. 165 p.

12. Forrester J.-W. System dynamics – a personal view of the first fifty years. System Dynamics Review. 2007. Vol. 23, Iss. 2-3. P. 345-358.

13. Forrester, J.-W. System dynamics – the next fifty years. System Dynamics Review. 2007. Vol. 23, Iss. 2-3. P. 359-370.

14. Putilov V.A., Gorokhov A.V. Sistemnaya dinamika regional'nogo razvitiya [System Dynamics of Regional Development]. Murmansk: NITs «Pazori», 2002. 306 p.

15. Putilov V. A., Gorokhov A.V., Oleynik A.G. Tekhnologiya avtomatizirovannoy razrabotki dinamicheskikh modeley dlya podderzhki prinyatiya resheniy [The Technology of the Automated Development of Dynamic Models for Decision-Making

16. Расселл, С. Искусственный интеллект. Современный подход / С. Расселл, П. Норвиг. – М.: Вильямс, 2007. – 1408 с.

17. Федоров, А. М. Принципы построения имитационных систем на основе ГИС-технологий и методов системной динамики / А. М. Федоров // Труды Института системного анализа РАН: Прикладные проблемы управления макросистемами. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – Т. 8. – С. 174-178.

18. Маслобоев, А. В. Подходы к интеграции разнородных онтологий на основе формальных и неформальных методов оценки их семантической близости / А. В. Маслобоев, П. А. Ломов // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2010. – №4 (22). – С. 42-46.

19. Маслобоев, А. В. Гибридная архитектура интеллектуального агента с имитационным аппаратом / А. В. Маслобоев // Вестник МГТУ: Труды Мурманского государственного технического университета. – 2009. – Т. 12, № 1. – С. 113-125.

20. Калуцкая, А. П. Моделирование взаимодействия робота с внешней средой на основе пространственных логик и распространения ограничений / А. П. Калуцкая, В. Б. Тарасов // Программные продукты и системы. – 2010. – № 2. – С. 174-178.

21. Шишаев, М. Г. Рекуррентная агентная модель продвижения новой образовательной услуги / М. Г. Шишаев, А. С. Шемякин, А. В. Маслобоев // Системный анализ и информационные технологии: Труды II Международной конференции САИТ-2007 в 2 т. – М.: Изд-во ЛКИ, 2007. – Т. 1. – С. 285-287.

22. Маслобоев, А. В. Проблемно ориентированная агентная платформа для создания полимодельных комплексов поддержки управления безопасностью региона / А. В. Маслобоев, А. В. Горюхов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 2 (78). – С. 60-65.

Support]. Informatsionnye resursy Rossii [Information Resources of Russia]. 2004. No 1. P. 30-33.

16. Russell, S. Norvig P. Iskustvennyi intellekt. Sovremennyy podkhod [Artificial Intelligence. Modern Approach]. Moscow: Williams, 2007. 1408 p.

17. Fedorov A. M. Printsipy postroeniya imitatsionnykh sistem na osnove GIS-tekhnologiy i metodov sistemnoy dinamiki [Simulation System Construction Principles Based on GIS-Technologies and System Dynamic Methods]. Trudy Instituta sistemnogo analiza RAN: Prikladnye problemy upravleniya makrosistemami [The Proceedings of the Institute of the System Analysis of the Russian Academy of Sciences: Macrosystem Control Applied Problems]. Moscow: Editorial URSS, 2004. Vol. 8. P. 174-178.

18. Masloboev A.V., Lomov P.A. Podkhody k integratsii raznorodnykh ontologiy na osnove formal'nykh i neformal'nykh metodov otsenki ikh semanticheskoy blizosti [The Approaches to Heterogeneous Ontology Integration Based on Formal and Informal Assessment Methods of their Semantic Proximity]. Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozem'ya [The Proceedings of Chernozem'e Institutions of Higher Education]. 2010. No 4(22). P. 42-46.

19. Masloboev A.V. Gibrinaya arkhitektura intellektual'nogo agenta s imitatsionnym apparatom [Intellectual Agent Hybrid Architecture with Simulation Appliance]. Vestnik MG TU: Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of MSTU: Proceedings of Murmansk State Technical University]. 2009. Vol. 12, No 1. P. 113-125.

20. Kalutskaya A. P., Tarasov V. B. Modelirovanie vzaimodeystviya robota s vneshney sredoy na osnove prostranstvennykh logik i rasprostraneniya ogranicheniy [The Modeling of Robot and External Environment Interaction Based on Spatial Logic and Restriction Propagation]. Programmnye produkty i sistemy [Software Products and Systems]. 2010. No 2. P. 174-178.

21. Shishaev M. G., Shemyakin A. S., Masloboev A.V. Rekurrentnaya agentnaya model' prodvizheniya novoy obrazovatel'noy uslugi [The Recurrent Agent Model of Innovative Educational Service Advancement]. Sistemnyi analiz i informatsionnye tekhnologii: Trudy II Mezhdunarodnoy konferentsii SAIT-2007: v 2 t. [The Proceedings of the 2nd International Conference on System Analysis and Information Technologies SAIT-2013 2 Parts]. Moscow: Izd-vo LKI, 2007. Vol. 1. P. 285-287.

22. Masloboev A.V., Gorokhov A.V. Problemno-orientirovannaya agentnaya platforma dlya sozdaniya polimodel'nykh kompleksov podderzhki upravleniya bezopasnost'yu regiona [Problem-oriented Agent-based Platform for the Development of Polymodel Complexes Used for Regional Security Control Support]. Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki [Scientific-technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics]. 2012. No 2(78). P. 60-65.

Статья поступила в редакцию 17.09.13.

ГОРОХОВ Андрей Витальевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры прикладной математики и информационных технологий, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – проблемы моделирования и управления сложными системами, методы и информационные технологии синтеза динамических моделей региональных социально-экономических систем, управление качеством образования, кадровая безопасность. Автор более 100 публикаций, в том числе двух монографий.

E-mail: agv64@mail.ru

МАСЛОБОВ Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН, заведующий кафедрой математики Кольского филиала Петрозаводского государственного университета (Российская Федерация, Апатиты). Область научных интересов – методы проектирования распределенных информационных систем на базе P2P и GRID-технологий, когнитивные информационные технологии, мультиагентные системы поддержки принятия решений в задачах управления развитием региональных социально-экономических систем, глобальная безопасность. Автор более 120 публикаций.

E-mail: masloboev@iimm.kolasc.net

ОЛЕЙНИК Андрей Григорьевич – доктор технических наук, доцент, заместитель директора по научной работе, Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН, заведующий кафедрой информационных систем и технологий Кольского филиала Петрозаводского государственного университета (Российская Федерация, Апатиты). Область научных интересов – методы и средства компьютерного моделирования и информационной поддержки сложных природно-промышленных и социально-экономических систем, промышленных технологий. Автор более 150 публикаций, в том числе двух монографий.

E-mail: oleynik@iimm.kolasc.net

GOROKHOV Andrey Vitalievich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Chair of Applied Mathematics and Information Technologies at Volga State University of Technology (Yoshkar-Ola, Russian Federation). The sphere of scientific interests is the problems of the modeling and control of complex systems, methods and information technologies for dynamic models synthesis of regional socio-economic systems, education quality management and personnel security. The author of more than 100 publications including 2 monographs.

E-mail: agv64@mail.ru

MASLOBOEV Andrey Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Research Fellow at the Institute of Informatics and Mathematical Modeling of Technological Processes of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, the Head of the Chair of Applied Mathematics at the Kola Branch of Petrozavodsk State University (Apatity, Russian Federation). The sphere of scientific interests is engineering methods of distributed information systems based on P2P and GRID technologies, cognitive information technologies, multi-agent decision making support systems for management problem solving of regional socio-economic system development, global security. The author of more than 120 publications.

E-mail: masloboev@iimm.kolasc.net.ru

OLEYNIK Andrey Grigorievich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Director for Research Work at the Institute for Informatics and Mathematical Modeling of Technological Processes of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, the Head of the Chair of Information Systems and Technologies at the Kola Branch of Petrozavodsk State University (Apatity, Russian Federation). The sphere of scientific interests is computer simulation technique and information support of complex natural industrial and socio-economic systems, manufacturing technologies. The author of more than 150 publications including 2 monographs.

E-mail: oleynik@iimm.kolasc.net.ru

A. V. Gorokhov, A. V. Masloboev, A. G. Oleynik

TECHNOLOGY FOR THE FORMATION OF SPECIFICATIONS OF CONTROL PROBLEM SIMULATION ENVIRONMENT

Key words: system dynamics; cognitive agent; multi-agent system; information support; control; simulation; regional development.

ABSTRACT

The cognitive approach to the construction of problem-oriented self-organizing multi-agent information systems based on system dynamics and conceptual modeling methods was proposed. These systems are oriented to the intelligent support of decision making in the field of the control of heterogeneous socio-economic structures of the regional level. The application of system-dynamics models provides forecasting horizon variability within the framework of unified modeling environment.

The goal of the research which results are presented in our work consists in the development of cognitive modeling methods and its implementation technologies, providing the creation of information and analytical decision making support systems in the field of regional control. Such systems have to possess the cognitive interface that assists in entire and visual information perception both within the management problem statement and in system response presentation within the user and decision making support system interaction. Moreover they also have to provide the possibility of the operational tuning of modeling environment in accordance with control problem specificity and also high variability of computing experiment implementation.

During the research work on the development of technologies for information and analytical support of the control of regional socio-economic systems (RSES) it was determined that a qualitative new solution in the given field allows including the technologies of multi-agent modeling in used toll basis. The integration of conceptual, system-dynamic and multi-agent modeling methods provides the framework for the development of cognitive information technologies of intelligent decision making support systems construction in the field of RSES development control in semistructured situations. The implementation facilities of each specified method provide the execution of defined functions and their integration leads to the synergetic effect and the results possessing a high level of cognitivity.

The application of the multi-agent approach in combination with the technology operational dynamic formation of «task-oriented» executive environment based on an integrated conceptual model allows creating adequate information and analytical environment for the control support of RSES development and functioning taking into consideration the state of distribution, dynamic and structural complexity of the subsystems that form them. Within this approach the modeling (virtualization) of control functions by separate RSES components is realized due to their delegation to intelligent pro-active agents.

Intelligent agents possess full-fledged internal representation of the scene and the possibilities of reasoning implementation; they have to be capable of remembering and analyzing different situations, forecasting possible reactions to their own operations, drawing conclusions, necessary for further activity and, consequently, predicting the effectiveness of their own behavior and the scene dynamics. For carrying out such tasks the agent software framework has to include a simulation subsystem. The analysis of intelligent agent architectural solutions used in modern practice of multi-agent system engineering showed that none of them has enough functionality for implementing specified capabilities. In this work three methods of intelligent agent simulation implementation based on system-dynamic models were proposed.

Finally the technology of the formation of specifications of the multi-agent environment of the simulation modeling of complex system control problems based on the integration of methods of conceptual, system-dynamic and multi-agent modeling was developed. The application domain of proposed models and technologies of multi-agent virtualization of complex semistructured system control processes in this research work can be extended to the wide spectrum of problems connected with RSES control and other organizational and engineering systems, characterized by a different level of complexity and scale. The received research results allow forming and researching the scenario of complex geographically distributed systems with the simulation of dynamic processes and interactions between economical activity subjects.

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 537.962.226.8

О. Ш. Даутов, Ибрахим Салем

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ И ЧАСТОТЫ СОГЛАСОВАНИЯ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ЩЕЛЕВОЙ АНТЕННЫ, ПОКРЫТОЙ СЛОЕМ ДИЭЛЕКТРИКА И ВОЗБУЖДАЕМОЙ СИММЕТРИЧНОЙ ПОЛОСКОВОЙ ЛИНИЕЙ В ОБЪЁМНОМ РЕЗОНАТОРЕ

Работа посвящена изучению частоты согласования и диаграммы направленности прямоугольной щелевой антенны, возбуждаемой симметричной полосковой линией в объёмном резонаторе с воздушным заполнением и покрытой слоем диэлектрика. Отражение от границы покрытия снижает диапазонные свойства антенны и затрудняет её частотное согласование. Влияние диэлектрического покрытия проявляется и в искажениях диаграммы направленности антенны. Полученные экспериментальные данные с помощью вспомогательной рупорной антенны (П6-23М) хорошо согласуются с результатами моделирования с помощью программы HFSS.

Ключевые слова: *прямоугольная щелевая антенна; объёмный резонатор с воздушным заполнением; симметричная полосковая линия; диэлектрическое покрытие.*

Введение. Во многих приложениях антенн возникает необходимость обеспечения изотропной или секторной диаграммы направленности антенной системы, покрытой слоями диэлектрика для обеспечения защиты от климатических и экологических опасностей. Диэлектрические слои оказывают значительное влияние на такие характеристики антенны, как резонансная частота, входное сопротивление, диаграмма направленности, коэффициент усиления и т.д. При достаточно большой диэлектрической проницаемости укрытия диаграмма направленности раз-

рушается – появляются изрезанность и недопустимо глубокие провалы, устранение которых превращается в сложную проблему, требующую увеличения степени свободы для своего решения [1–4].

Обтекатели располагаются, как правило, на значительном расстоянии от раскрытия антенны в дальней и промежуточной зоне. Исследованию влияния обтекателей на характеристики излучения антенн посвящён ряд работ. Покрытие, в отличие от обтекателя, прилегает к раскрытию антенны вплотную или находится в её ближней зоне и в значительной степени

определяет процесс излучения электромагнитных волн. При этом, покрытие влияет на характеристики излучения антенн двояким образом: во-первых, возбуждаясь, оно поляризуется и становится вторичным источником радиоволн, которые, накладываясь на первичное поле излучения антенны, искажают её диаграмму направленности, во-вторых, отражаясь от границ раздела слоёв с различной диэлектрической проницаемостью, часть электромагнитной энергии попадает обратно в раскрыв антенны, изменяя её согласование и даже изменяя возбуждающее поле [5–7].

В качестве слабонаправленных малогабаритных антенн летательных аппаратов в диапазоне от метровых до сантиметровых волн широко используются щелевые антенны с отражающей полостью в виде резонатора, размещённого с противоположной стороны экрана по отношению к внешнему пространству. Исходя из требований, предъявляемых к диаграмме направленности и поляризационным характеристикам, применяются резонаторно-щелевые антенны с различными конфигурациями щелей (прямолинейные, кольцевые и др.) и формами резонаторов (прямоугольные, коаксиальные или круглые цилиндрические). Практика применения резонаторно-щелевых излучателей в качестве бортовых антенн летательных аппаратов требует дальнейшего развития методов расчёта характеристик для наиболее широко используемых типов таких излучателей с учётом наличия защитных обтекателей и возможности их миниатюризации путём заполнения полости резонатора магнитодиэлектриком, а также разработки методов расчёта характеристик новых типов резонаторно-щелевых излучателей, нашедших в последнее время практическое применение [8,9].

Для 3D-анализа и проектирования СВЧ-устройств (например: резонаторно-щелевые антенны, покрытые слоем диэлектрика) есть много программ модели-

рования (HFSS, FEKO, SCT Microwave Studio и другие коммерческие программы), в нашей работе мы будем использовать программу HFSS, потому что HFSS является отраслевым стандартом программного обеспечения для анализа высокочастотных структур и извлечения из их полевых характеристик S-параметров. Базовым алгоритмом в HFSS является векторный метод конечных элементов в 3D постановке, реализованный в частотной области для расчёта поведения электромагнитных полей в структурах произвольной геометрии с заданными свойствами материалов. При помощи HFSS инженеры могут извлечь матричные параметры СВЧ-структуры, рассчитать КСВ, получить параметры излучения и рассеяния (диаграммы направленности, коэффициенты направленного действия, реализуемое усиление антенн, и т.п.), отобразить в 3D распределение токов, векторов плотности потока мощности, распределений электромагнитных полей в ближней и дальней зонах и т.д.

Цель работы – исследование частоты согласования и диаграммы направленности прямоугольной щелевой антенны дециметрового диапазона волн, возбуждаемой симметричной полосковой линией в объёмном резонаторе с воздушным заполнением и покрытой слоем диэлектрика со стороны внешнего пространства.

Постановка задачи. Рассматривается прямоугольная щель в бесконечном металлическом экране, покрытая слоем диэлектрика прямоугольной формы со стороны внешнего пространства и возбуждаемая с противоположной стороны симметричной полосковой линией (СПЛ) в объёмном резонаторе с воздушным заполнением (рис.1). Исследуется влияние положения слоя диэлектрика относительно щели на частоту согласования и диаграмме направленности антенны.

Для получения высокой направленности излучения, часто требуемой на практике, можно использовать систему слабо-

направленных антенн, таких, как вибраторы, щель в стенке резонатора с однородным заполнением, открытые концы волноводов, и других, определённым образом расположенных в пространстве и возбуждаемых токами с требуемым соотношением амплитуд и фаз. В этом случае общая направленность, особенно при большом числе излучателей, определяется в основном габаритными размерами всей системы и в гораздо меньшей степени индивидуальными направленными свойствами отдельных излучателей.

Конструкция прямоугольной щелевой антенны, покрытой слоем диэлектрика со стороны внешнего пространства и возбуждаемой СПЛ в объёмном резонаторе с воздушным заполнением, представлена на рис.1.

Она состоит из металлического кругового экрана большого радиуса (радиус: 400 мм при наибольшей длине волны рассматриваемого диапазона – 150 мм) со щелью, с обратной стороны которого имеется металлическая полость, заполненная воздухом, в которой, в свою очередь, раз-

мещена полосковая линия. Параметры полосковой линии: b – расстояние между внешними электродами полосковой линии, w – ширина центрального проводника, t – толщина центрального проводника. Для значения характеристического сопротивления $Z_{om} = 50 \Omega$ при $b = 14$ мм, $t/b = 0,1$, $w/b = 1,25$ ширина полоскового проводника равна $w = 17,5$ мм. Размеры полости: $l_x = 114$ мм, $l_y = 160$ мм, $l_z = 14$ мм. Исследуемая щель длиной $l_x = 60$ мм, шириной $w_y = 3$ мм прорезана в центре экрана перпендикулярно к полосковой линии передачи (центр щели: X_s, Y_s). Длина полосковой линии от входа до открытой конца – 94 мм, ширина центрального проводника – 17,5 мм. Прямоугольный диэлектрический слой расположен в центре экрана (координаты центра слоя: X_d, Y_d, Z_d), $l_{dx} = l_{dy} = 300$ мм, $l_{dz} = 32$ мм, $\epsilon_r = 3,5$, тангенс угла диэлектрических потерь диэлектрика $\operatorname{tg} \delta = 0,0018$.

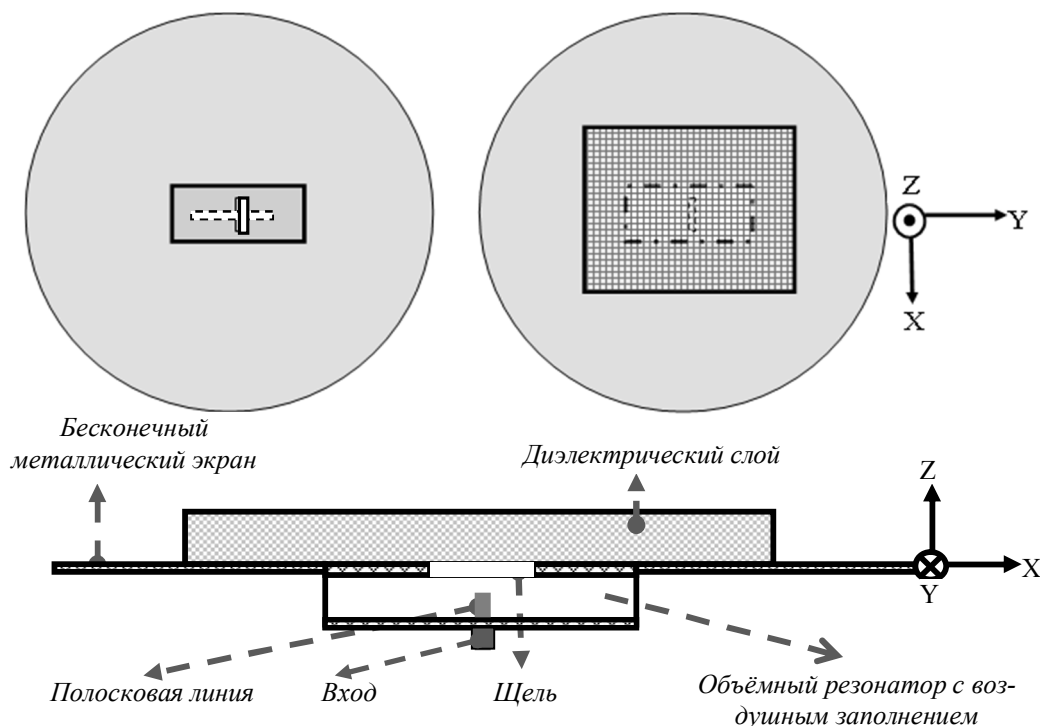


Рис. 1. Прямоугольная щелевая антенна, покрытая слоем диэлектрика и возбуждаемая СПЛ в объёмном резонаторе с воздушным заполнением

Обсуждение результатов моделирования с помощью программы HFSS и экспериментальных результатов.

Влияние изменения положения слоя диэлектрика на частоту согласования. Наличие отражения от границы раздела покрытия и внешней среды снижает диапазонные свойства рассматриваемой антенны и затрудняет расчёт её частоты согласования. Чтобы анализировать влияние изменения положения слоя диэлектрика на частоту согласования, обычно используется моделирование электрического поля с помощью программных пакетов, с помощью которых можно получить распределение электрического поля около антенны. Кроме того, из-за возмущающего действия объектов, расположенных вблизи антенны, может измениться харак-

тер её диаграммы направленности и, к сожалению, не существует простой формулы, чтобы вычислить изменение частоты согласования данной антенны в этих условиях.

На рис. 2–4 представлены результаты расчёта коэффициента отражения S_{11} (дБ) в диапазоне частот (2–3 ГГц) с помощью программы HFSS в следующих трёх случаях: 1) угол поворота диэлектрического слоя относительно щели на 45° , 2) смещения положения слоя диэлектрика вдоль оси X , 3) смещение положения слоя диэлектрика вдоль Y .

Из приведённых на рис. 2–4 результатов расчёта видно, что, чем больше расстояние между осью диэлектрического слоя и осью щели, тем меньше влияние на изменение частоты согласования.

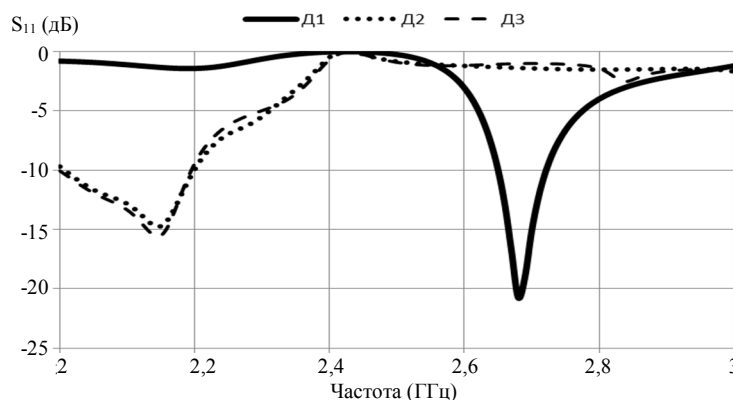


Рис. 2. Частота согласования: D1 – без диэлектрического укрытия, D2 – с диэлектрическим покрытием, D3 – с диэлектрическим покрытием при угле поворота диэлектрического слоя относительно щели на 45°

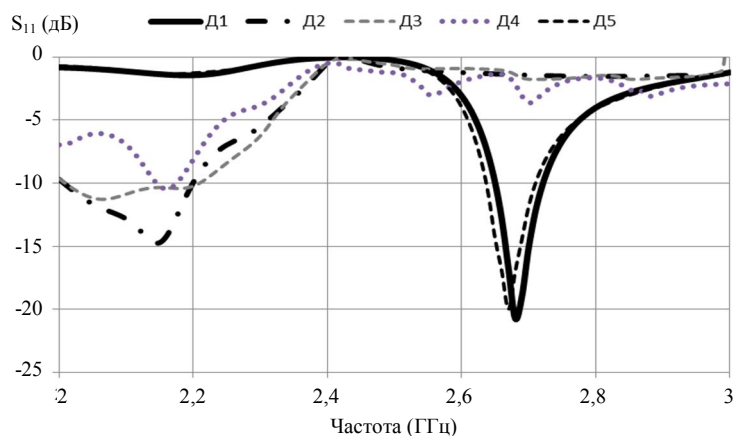


Рис. 3. Частота согласования: D1 – без диэлектрического укрытия, D2 – с диэлектрическим покрытием ($X_d - X_s = 0$ мм), D3 – ($X_d - X_s = 57$ мм), D4 – ($X_d - X_s = 114$ мм), D5 – ($X_d - X_s = 171$ мм)

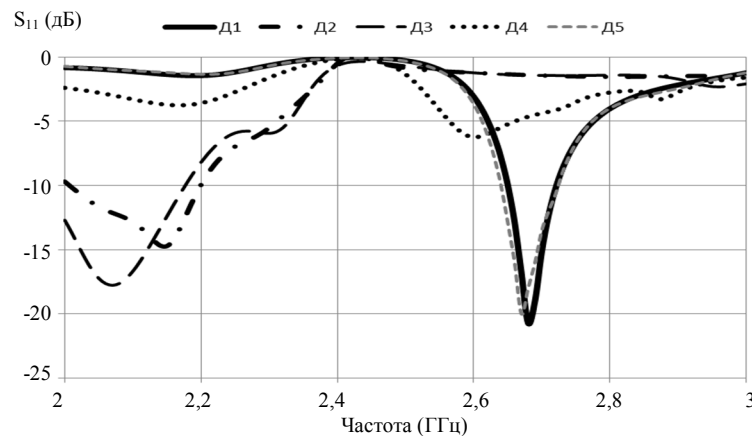


Рис. 4. Частота согласования: Д1 – без диэлектрического укрытия, Д2 – с диэлектрическим покрытием ($Y_d - Y_s = 0$ мм), Д3 – ($Y_d - Y_s = 70$ мм), Д4 – ($Y_d - Y_s = 150$ мм), Д5 – ($Y_d - Y_s = 230$ мм)

Измерение диаграммы направленности антенны. Диаграмма направленности антенны является одной из основных её характеристик. Для передающей антенны она характеризует относительную величину напряжённости поля, создаваемого антенной в различных направлениях, в случае приёмной антенны – представляет собой относительную величину ЭДС (электродвижущая сила), наводимой в антенне волной, приходящей с различных направлений. На практике пространственную характеристику излучения определяют диаграммами направленности в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Для антенны с линейной поляризацией эти плоскости совпадают с плоскостью электрического и магнитного векторов. Для диаграммы направленности наиболее важными характеристиками являются форма и ширина основного лепестка, а также величины и направления ближайших к нему боковых лепестков. Методика снятия диаграммы направленности в основном определяется диапазоном частот. Однако независимо от рабочей волны расстояние между приёмной и передающей антеннами не должно быть малым. В противном случае экспериментально снятые характеристики будут отличаться от характеристик антенны в дальней зоне. Для измерения диаграммы направленности антенны используют две антенны (рис.5): вспомогательную (справа) и исследуемую

(слева) и анализатор спектра Rohde&Schwarz FSH8 (РФ1 – входной радиочастотный сигнал, РФ2 – выходной радиочастотный сигнал), расстояние $l_{\min}$ в сантиметрах между приёмной и передающей антеннами не менее: $l_{\min} = 2(D_{\text{иссл}} + D_{\text{всп}})^2 / \lambda$, где $D_{\text{иссл}}, D_{\text{всп}}$ – наибольшие размеры раскрывов передающей и приёмной антенн (см), λ – длина волны (см).

Вспомогательная рупорная антенна Пб-23М излучает постоянную не меняющуюся во времени мощность, а исследуемой антенной принимается часть электромагнитной волны и исследователь может фиксировать уровень принимаемого сигнала в зависимости от угла. Таким образом, снимается диаграмма направленности в плоскости Н. Для снятия ДН в плоскости Е обе антенны поворачивают на 90° по общей оси. Габаритные размеры и масса антенны Пб-23М в упаковке $936 \times 416 \times 320$ мм, 26 кг. Размеры раскрыва рупора 342×256 мм. Вход приёмной и передающей антенны стандартный коаксиальный с характеристическим сопротивлением 50Ω .

Были выбраны следующие практические значения параметров антенн $\{D_{\text{всп}} = 34,2$ см, $D_{\text{иссл}} = 6$ см, $f = 2,68$ ГГц, $\lambda = 11,2$ см $\Rightarrow l_{\min} \approx 289$ см $\}$, в соответствии с предыдущими расчётами расстояния l было выбрано 400 см.

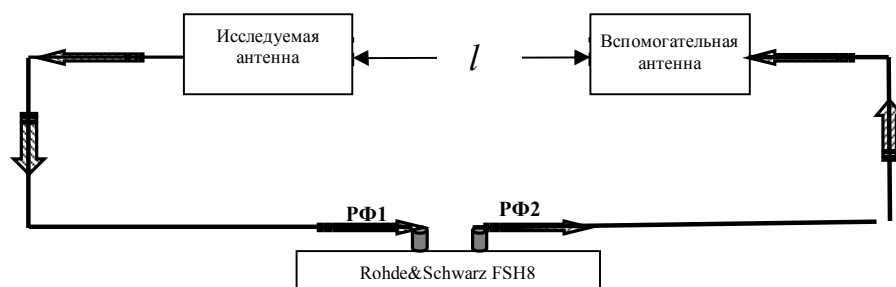


Рис.5. Схема устройства для измерения диаграммы направленности антенны

Полученные экспериментальные диаграммы направленности строятся в полярной системе координат на том же рисунке, что и расчётные диаграммы направленности, и обязательно нормируются по излучению в главном направлении, определяется ширина диаграммы направленности по половинной мощности.

Результаты экспериментального исследования диаграммы направленности изучаемой антенны в сравнении с теоре-

тическими приведены на рис.6. Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с теоретическими расчётами: экспериментальная и теоретическая диаграммы направленности антенны в плоскостях Е и Н без искажений имеют схожую форму и достаточно близки друг к другу (А,Б), влияние диэлектрического слоя укрытия на искажения, появляющиеся в диаграмме направленности антенны (В).

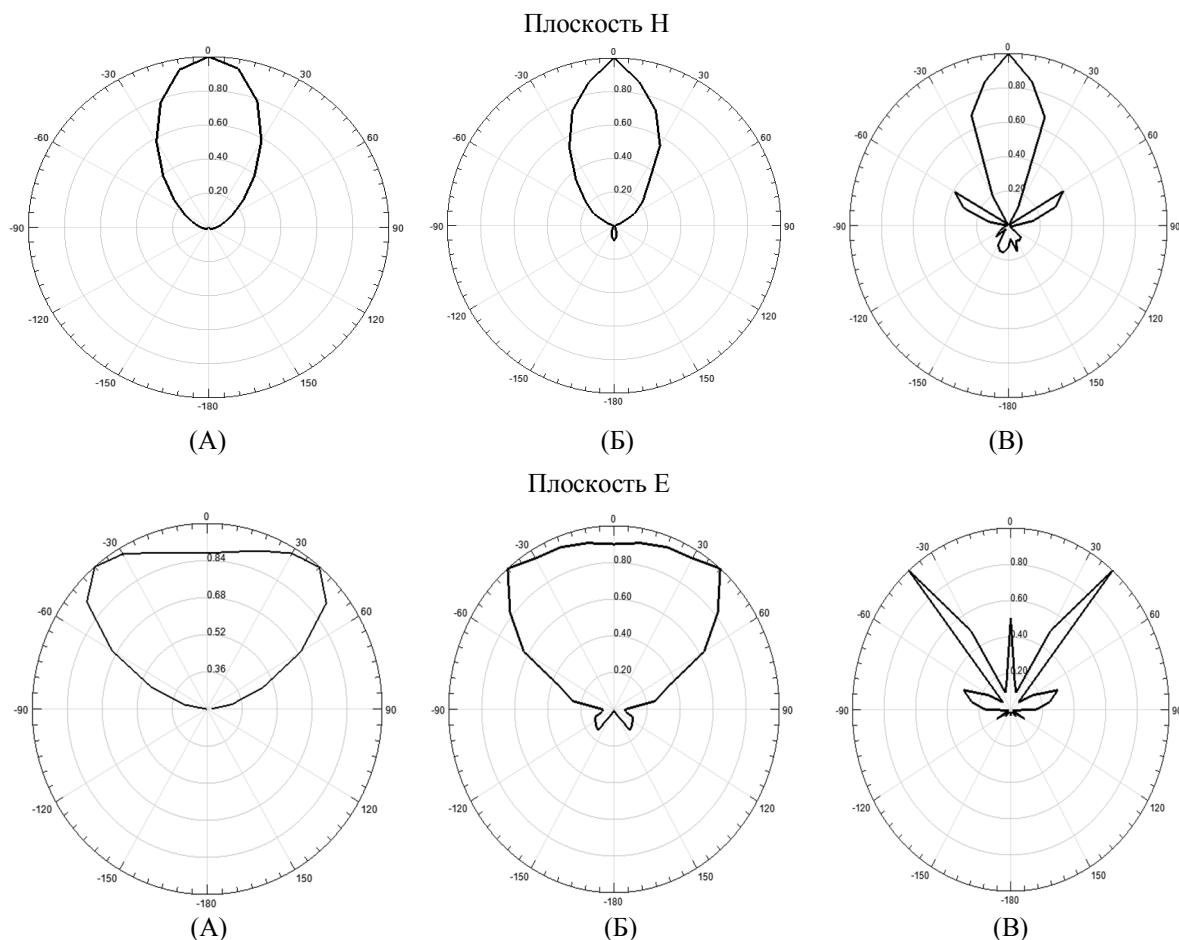


Рис.6. Диаграмма направленности ($f = 2,67 \text{ ГГц}$). Результаты расчёта с помощью программы HFSS без диэлектрического укрытия — А, результаты эксперимента без диэлектрического укрытия — Б, с диэлектрическим укрытием — В

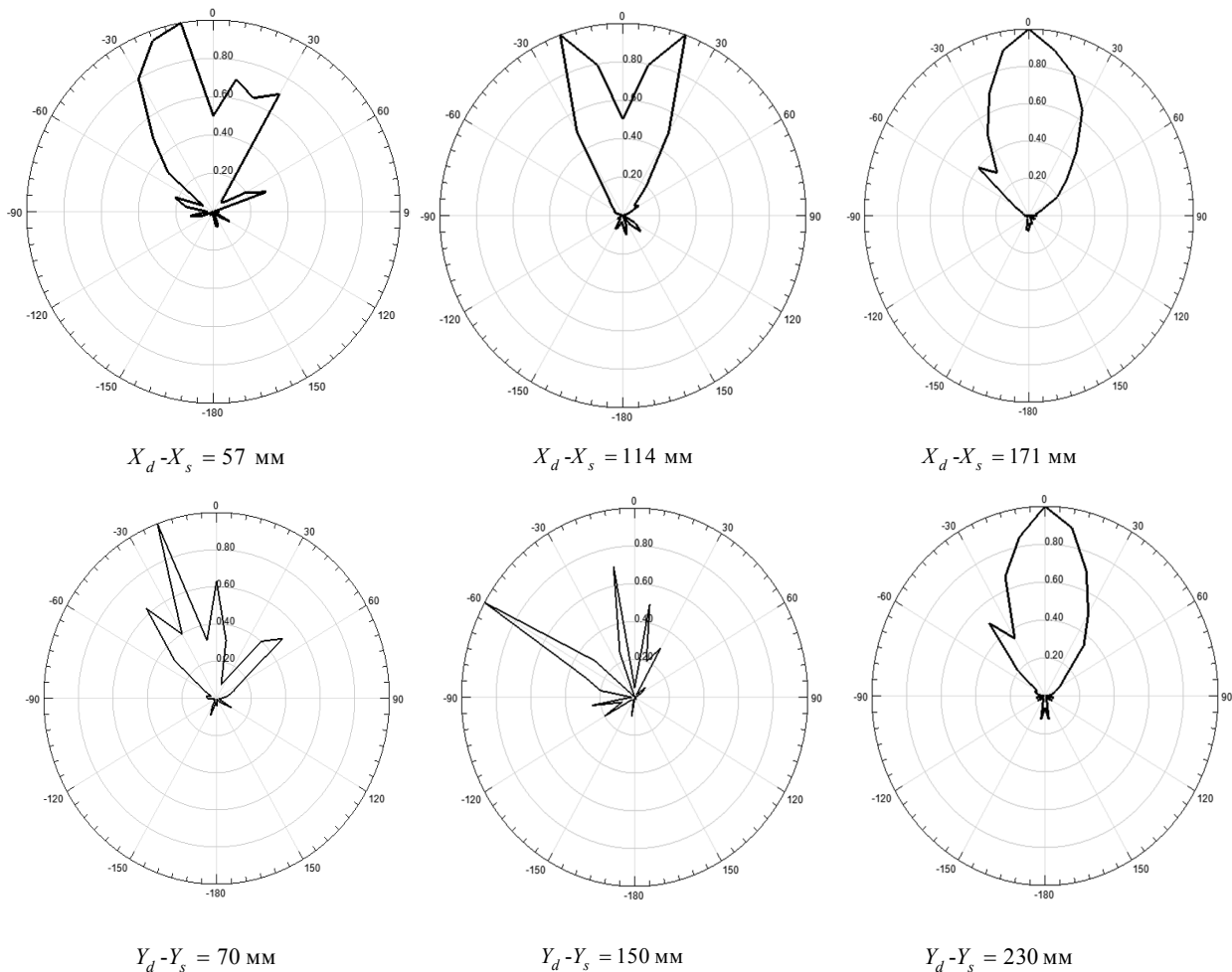


Рис. 7. Диаграмма направленности в плоскости H ($f = 2,67$ ГГц).

Результаты эксперимента с диэлектрическим покрытием

Из приведённых на рис.7 результатов эксперимента видна степень влияния диэлектрического покрытия на диаграмму направленности не только, когда покрытие накрывает щель, но и при достаточно большом сдвиге, при котором покрытие уже почти не влияет на антенну, и чем больше расстояние между осью диэлектрического слоя и осью щели, тем меньше искажения, появляющиеся в диаграмме направленности антенны. Это важно для оценки влияния покрытия на соседние антенны.

Заключение. Наряду с этими резуль-

Список литературы

1. Даутов, О.Ш. Влияние плоского диэлектрического укрытия на характеристики щелевых антенн / О.Ш. Даутов, Ибрахим Салем // Вестник

татами, как значимый результат работы в целом можно рассматривать разработку метода 3D-анализа и проектирование прямоугольной щелевой антенны, покрытой слоем диэлектрика и возбуждаемой СПЛ в объёмном резонаторе с воздушным заполнением. Исследование рассматриваемой щелевой антенны, покрытой слоем диэлектрика, показало степень влияния слоя на её частотное согласование и искажение диаграммы направленности, в частности, на глубину провалов, что представляет интерес для разработчиков антенн с диэлектрическим укрытием.

References

1. Dautov O. Sh., Ibrahim Salem. Vliyanie ploskogo dielektricheskogo ukrytiya na kharakteristiki shchelevykh antenn [The Influence of the Flat Dielectric

КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2012. – № 4, Вып.1. – С. 124 – 130.

2. Даутов, О.Ш. Эквивалентная схема щелевой антенны, возбуждаемой симметричной полосковой линией в объёмном резонаторе с воздушным заполнением / О.Ш. Даутов, Н.Г. Воробьев, Ибрахим Салем // Антенны. – 2013. – № 6. – С. 23–27.

3. Даутов, О.Ш. Возбуждение диэлектрического покрытия щелевой антенной / О.Ш. Даутов, Ибрахим Салем // Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций»: матер. Всеросс. НТК. – Самара: СГАУ, 2012. – С. 63-65.

4. Даутов, О.Ш. Прямоугольная щель в стенке резонатора с однородным заполнением как элемент СВЧ-схемы / О.Ш. Даутов, Н.Г. Воробьев, Ибрахим Салем // X Международная IEEE Сибирская конференция по управлению и связи SIBCON-2013, International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – Krasnoyarsk: Siberian Federal University. Russia, Krasnoyarsk, September 12–13, 2013. IEEE Catalog Number: CFP13794-CDR. ISBN: 978-1-4799-1060-1.

5. Каплун, В. А. Обтекатели СВЧ / В.А. Каплун. – М.: Советское радио, 1974. – 240 с.

6. Пригода, Б. А. Обтекатели антенн летательных аппаратов / Б. А. Пригода, В. С. Кокунько. – М.: Машиностроение, 1978. – 120 с.

7. Воробьев, Е. А. СВЧ-диэлектрики в условиях высоких температур / Е. А. Воробьев, В.Ф. Михайлов, А. А. Харитонов. – М.: Советское радио, 1977. – 208 с.

8. Резников, Г. Б. Антенны летательных аппаратов / Г. Б. Резников. – М.: Советское радио, 1967. – 416 с.

9. Кириллов, Л. Г. Особенности современных щелевых антенн: Обзор / Л. Г. Кириллов, Ю.А. Жуков // Зарубежная радиоэлектроника. – 1976. – № 6. – С. 120 - 138.

Cover on Slot Antenna Characteristics]. Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva [Bulletin of KSTU named after A. N. Tupolev]. 2012. No 4, Issue 1. P. 124 – 130.

2. Dautov O. Sh., Vorobyev N. G., Ibrahim Salem. Ekvivalentnaya skhema shchelevoy antennoy, vzbuzhdaemoy simmetrichnoy poloskovoy liniey v ob''emnom rezonatore s vozdushnym zapolneniem [The Equivalent Circuit of a Slot Antenna, Excited by a Balanced Strip Line in an Air-filled Cavity Resonator]. Antenny [Antennas]. 2013. No 6. P. 23–27.

3. Dautov O. Sh., Ibrahim Salem. Vzbuzhdenie dielektricheskogo pokrytiya shchelevoy antennoy [The Excitation of the Dielectric Cover by a Slot Antenna]. Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Aktual'nye problemy radioelektroniki i telekommunikatsiy»: mater. Vseros. NTK [The Proceedings of All-Russian Scientific and Technical Conference «Urgent problems of Radio Electronics and Telecommunications»]. Samara: SSAU, 2012. P. 63-65.

4. Dautov O. Sh., Vorobyev N. G., Ibrahim Salem. Pryamougol'naya shchel' v stenke rezonatora s odnorodnym zapolneniem kak element SVCH – skhemy. X mezhdunarodnaya IEEE Sibirskaya konferentsiya po upravleniyu i svyazi SIBCON-2013 [The Rectangular Slot in a Resonator Wall with Homogeneous Filling as an Element of Microwave Circuit. The Proceedings of the 10th International IEEE Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University. Russia, Krasnoyarsk, September 12–13, 2013. IEEE Catalog Number: CFP13794-CDR. ISBN: 978-1-4799-1060-1.

5. Kaplun V. A. Obtekateli SVCH [Microwave Frequency Radomes]. Moscow: Sovetskoe radio, 1974. 240 p.

6. Prigoda B. A., Kokun'ko V. S. Obtekateli anten letatel'nykh apparatov [Radomes of Aircrafts]. - Moscow: Mashinostroyeniye, 1978. 120 p.

7. Vorobyev E. A., Mikhailov V. F., Haritonov A. A. SVCH-dielektriki v usloviyakh vysokikh temperatur [Microwave Dielectrics in High Temperature Conditions]. Moscow: Sovetskoe radio, 1977. 208 p.

8. Reznikov G. B. Antenny letatel'nykh apparatov [Aircraft Antennas]. Moscow: Sovetskoe radio, 1967. 416 p.

9. Kirillov L. G., Zhukov Yu. A. Osobennosti sovremennykh shchelevykh anten [Regularities of Modern Slot Antennas]: Review. Zarubezhnaya radioelektronika [Foreign Radio Electronics]. 1976. No 6. P. 120 - 138.

Статья поступила в редакцию 07.11.13.

ДАУТОВ Осман Шакирович – доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектронных и телекоммуникационных систем, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ) (Российская Федерация, Казань). Область научных интересов – антенны в неоднородных средах, электромагнитное зондирование и воздействие. Автор 102 публикаций.

E-mail: dautov_kstu@mail.ru

ИБРАХИМ Салем – аспирант кафедры радиоэлектронных и телекоммуникационных систем Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ) (Российская Федерация, Казань). Область научных интересов – антенны в неоднородных средах, моделирование устройств СВЧ. Автор пяти публикаций.

E-mail: salemibrahim@mail.ru

DAUTOV Osman Shakirovich – Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Chair of Radio Engineering and Telecommunication Systems at Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev (Kazan, Russian Federation). The sphere of scientific interests is antennas in inhomogeneous mediums, electromagnetic sounding and action. The author of 102 publications.

E-mail: dautov_kstu@mail.ru

IBRAHIM Salem – a postgraduate student of the Chair of Radio Engineering and Telecommunication Systems at Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev (Kazan, Russian Federation). The sphere of scientific interests is antennas in inhomogeneous mediums, microwave frequency device modeling. The author of 5 publications.

E-mail: salemibrahim@mail.ru

O. Sh. Dautov, Ibrahim Salem

RESEARCH ON THE DIRECTIONAL PATTERN AND FREQUENCY MATCHING OF THE RECTANGULAR SLOT ANTENNA, COVERED BY A DIELECTRIC LAUER AND EXCITED BY THE BALANCED STRIP LINE IN A CAVITY RESONATOR

Key words: *rectangular slot antenna; air-filled cavity resonator; balanced strip line; dielectric coating.*

ABSTRACT

The article considers the results of the research on a rectangular slot antenna, covered by a dielectric layer and excited by the balanced strip line (BSL) in the air-filled cavity resonator. In the introduction the urgency of the article for the security of the antenna system covered by dielectric layers to defend it from climatic and ecological effects is grounded. Protective dielectric layers have a considerable effect on such antenna characteristics as resonance frequency, input resistance, directional pattern, amplification coefficient and etc. The purpose of the article is the investigation of the matching frequency and the directional pattern of the rectangular slot antenna of a decimetric wave band, excited by the balanced strip line in the air-filled cavity resonator and covered by a dielectric layer on the exterior.

In the problem statement section the analysis is carried out and the antenna design method is presented. In the section where modeling using HFSS program and experimental results are discussed it is stated that the more the distance between a dielectric layer axis and a slot axis is the less the influence on the matching frequency change is. The received experimental data are well matched with theoretical calculations; experimental and theoretical antenna directional patterns in planes E and H without distortions have a similar form and they are quite close to each other. The influence of the dielectric layer cover on antenna directional pattern distortions is experimentally investigated. The experimental results show the degree of the dielectric cover influence on the directional pattern not only when it covers the slot but when the cover shifts and practically doesn't influence the antenna and the more the distance between the dielectric layer axis and the slot axis is the less are distortions, arising in the antenna directional pattern. It is significant for the estimation of the cover influence on adjacent antennas. In conclusion it should be noted that the results of the work can be considered as the development of 3D analysis method and the design of the rectangular slot antenna, covered by the dielectric layer and excited by BSL in the air-filled cavity resonator.

УДК 621.391.83

**Д. В. Иванов, В. А. Иванов, Н. В. Рябова,
А. А. Елсуков, М. И. Рябова, А. А. Чернов**

SDR-ИОНОЗОНД С НЕПРЕРЫВНЫМ ЛЧМ-СИГНАЛОМ НА ПЛАТФОРМЕ USRP

Решалась задача создания и исследования приёмного терминала ионозонда с непрерывным ЛЧМ-сигналом на платформе USRP и сопоставления полученных результатов с данными аналогового ЛЧМ-зонда. Установлено, что созданный терминал обеспечивает более высокую помехоустойчивость, отсутствие перегрузок собственным сигналом, возможность одновременного исследования характеристик прямого и кругосветного распространения. Однако он обладает меньшей, чем аналоговый, чувствительностью при приёме слабых ЛЧМ-сигналов. Для интерпретации результатов зондирования в интересах КВ-связи развита модель ионосферного радиоканала путём представления импульсных характеристик широкополосного канала в виде суммы импульсных характеристик узкополосных примыкающих каналов.

Ключевые слова: SDR; USRP; GNU Radio; ЛЧМ; chirp; sounder; ионозонд; зондирование; ДКМ; короткие волны.

Введение. Известно высказывание видного учёного Дж. Бернала о том, что «схемная радиотехника – это экспериментальная математика». Действительно, аналоговые схемы выполняют над сигналами различные математические действия. Обычно технологические возможности ограничивают точность математических операций примерно 5–10 %, а это приводит к заметным системным шумам. Кроме того, чисто аппаратная реализация радиотехнических устройств не позволяет изменять их функциональные возможности и для реализации новых функций необходима разработка новых аппаратных средств [1,2], требующая больших затрат времени. Развитие вычислительной техники привело к тому, что математические операции в радиотехнических устройствах выполняются средствами дискретной математики. При этом обеспечивается существенно более высокая точность ма-

тематических операций, а задача создания новых устройств переносится в область программирования. Появляется возможность создания универсальных аппаратных платформ, реализующих программными средствами радиотехнические системы (РТС) с различными функциональными возможностями.

В последнее время активно развивается направление, названное программно определяемым радио (SDR), способное реализовывать универсальные радиотехнические системы. Одним из наиболее гибких аппаратных реализаций SDR является семейство универсальных программируемых приёмопередатчиков (USRP) компании Ettus Research [3] в конфигурациях с различными частотными диапазонами и поддерживающее для управления и программирования такое программное обеспечение, как GNU Radio, NI LabVIEW, MathWorks Matlab, HDSDR и др. Функцио-

нальные возможности некоторых систем связи и радиолокации, реализованные на платформе USRP, были исследованы и доказали свою перспективность. Нерешённой актуальной научной задачей является программная реализация и исследование на базе этой платформы устройств, выполняющих иные функции. В частности, актуальной является задача создания на базе USRP и открытого программного обеспечения GNU Radio сетевого ионозонда с непрерывным ЛЧМ-сигналом, требующая развития модели радиоканала и на её основе – алгоритма первичной обработки зондирующих сигналов в USRP-приёмнике.

Цель работы – исследование возможности создания на платформе USRP приёмного терминала ионозонда с непрерывным ЛЧМ-сигналом и сопоставление полученных результатов зондирования ионосферы с данными аналогового ЛЧМ-зонда.

Развитие модели многомерного ВЧ-

радиоканала с учётом зависимости характеристик одномерных каналов от средней полосы частот. В общем случае радиотехнические системы радиолокации, радиопеленгации, связи и радиозондирования имеют структуру, представленную на рис. 1. При использовании радиоволн среду называют радиоканалом и считают его составной частью РТС [1, 4].

Обычно сигналы определяются рядом параметров, которые имеют важное значение при их обработке в приёмнике с целью выделения полезной информации. Радиоканал имеет свои характеристики (параметры), которые могут быть не согласованы с параметрами сигнала. Это приводит к тому, что в радиоканале параметры сигнала изменяются, что негативно сказывается на работе РТС [5–7].

На рис. 2 приведены факторы, воздействующие на характеристики ионосферного ВЧ-канала.

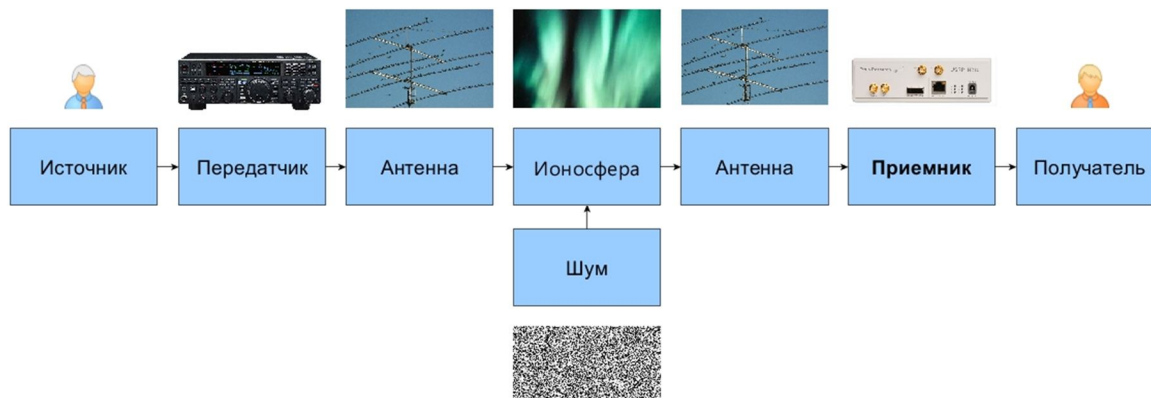


Рис. 1. Общая структура РТС, использующих для связи физическую среду (ионосферу)

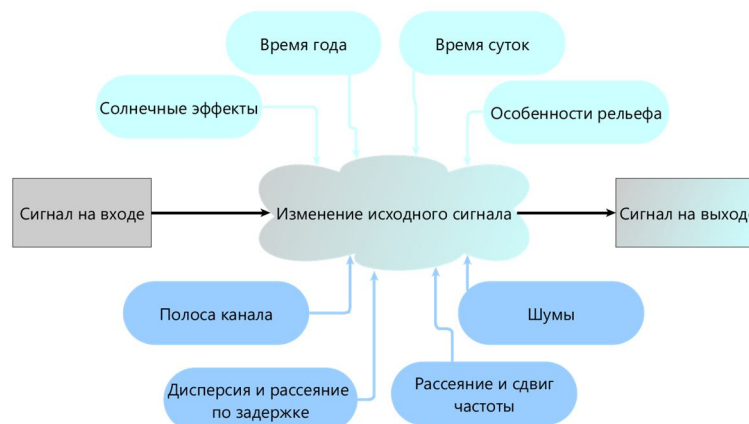


Рис. 2. Факторы, влияющие на характеристики ионосферного ВЧ-канала

Для преодоления их негативного влияния применяется предсеансовое радиозондирование среды (радиоканала) и оценка на его основе параметров канала для адаптации к ним параметров РТС [8, 9].

Известно, что теоретической основой описания прохождения радиоволн в средах является электродинамика, основанная на уравнениях Максвелла. В РТС имеют дело с сигналами, представляющими собой «группы» радиоволн с близкими частотами. При распространении в среде амплитудно-фазовые соотношения составляющих в группе нарушаются, что приводит к искажению сигналов в точке приёма. Существует несколько подходов к описанию распространения радиосигналов в средах. Однако наибольшее развитие получил радиотехнический подход, когда физическая среда распространения заменяется эквивалентной линейной системой (одномерной или многомерной по числу входов). В этом случае одной из задач является установление связей между параметрами среды и эквивалентной РТС [10, 11]. Эта задача наиболее легко решается, когда электродинамическая проблема распространения рассматривается в лучевом приближении. В этом случае каждому приходящему на приёмник лучу можно поставить в соответствие свой вход (тракт) эквивалентной системы (см. рис.3).

Обычно линейная система описывается системными характеристиками: частотной (ЧХ) и импульсной (ИХ):

$$H = H(f, t) \quad (1)$$

$$h(\tau, t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(f, t) \exp(i2\pi f\tau) df.$$

Если среда испытывает вариации во времени, то и характеристики линейной системы будут зависеть от времени t [12]. Аргумент τ также является временем, характеризующим задержку ИХ. Однако масштаб его изменения значительно меньше, чем масштаб изменения аргумента t , поэтому он называется «быстрым», а t – медленным временем. Для многолучевого радиоканала системные функции представляют собой суммы парциальных системных характеристик лучей – трактов линейной системы:

$$h(\tau, t) = \sum_{k=1}^K h_k(\tau, t). \quad (2, a)$$

Известно, что $(\partial \varphi_k / \partial f) / 2\pi = \tau_{gk}$ называется временем группового запаздывания, поэтому в случае $\varphi_k(f, t) = \varphi_k(f)$ набег фазы равен:

$$\varphi_k(f) = \int_0^f \tau_{gk}(f) df. \quad (2, б)$$

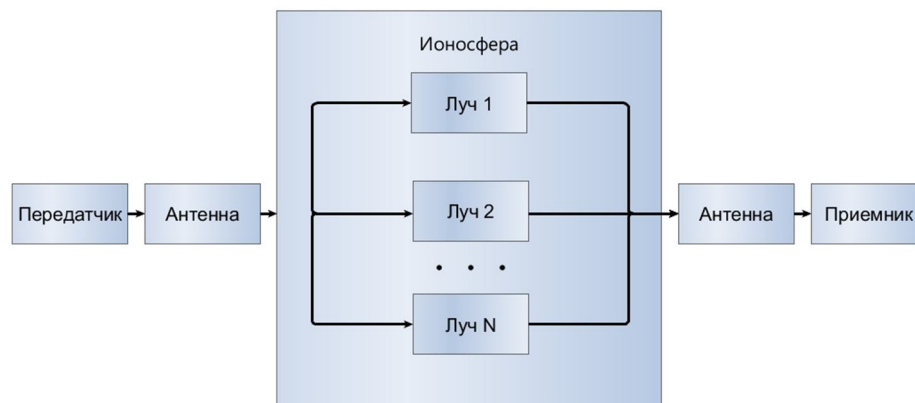


Рис. 3. Многомерная система с множеством входов и одним выходом

Многолучевость и вариации во времени среды распространения приводят к двум типам замираний системных характеристик в медленном времени: медленным (крупномасштабным) и быстрым (мелкомасштабным). Медленные замирания отражают изменения во времени средних характеристик среды и связанное с этим ослабление уровня системных характеристик и перераспределения средней мощности между лучами. Быстрые замирания представляют собой значительные вариации амплитуды и фазы системных характеристик на масштабах, обратных смещению частоты несущей. Быстрые замирания, как правило, связаны с изменением разности фаз принимаемых лучей из-за движения среды (или приёмника). Они носят сугубо случайный характер, поэтому системные характеристики радиоканала являются стохастическими функциями «медленного» времени. Медленные и быстрые замирания происходят одновременно. При расширении полосы частот канала могут возникнуть дисперсионные искажения, связанные с зависимостью от частоты диэлектрической проницаемости среды, по-разному влияющей на частотные составляющие сигнала. Очевидно, что искажения сигналов тем более значимы, чем шире их полоса частот. Однако, если полоса частот сигнала меньше полосы когерентности канала (полосы когерентного распространения), то такими искажениями можно пренебречь. Исследования [13] показали, что полоса когерентности зависит от протяжённости трассы и для коротких трасс (менее 1000 км) не превышает 20 кГц, а для длинных (более 1000 км) – 40 кГц.

Известно, что от передатчика T к приёмнику R , находящемуся на расстоянии D_{TR} , приходят сигналы со средней частотой спектра от $f_L = \text{НПЧ}(D_{TR})$ (наименьшая применимая частота – LUF) до $f_M = \text{МПЧ}(D_{TR})$ (максимально применимая частота – MUF). Если полоса частот сигнала

составляет B , то на линии связи можно организовать $J = \text{INT}[(f_M - f_L) / B] = \text{INT}[B_{LM} / B]$ примыкающих парциальных частотных каналов. При перекрытии каналов, когда шаг по частоте составляет $\bar{f}_j - \bar{f}_{j-1} = B_{ш} < B$, коэффициент перекрытия k_n равен:

$$k_n = \frac{B - B_{ш}}{B} = 1 - \frac{B_{ш}}{B}, \quad (3)$$

где $0 \leq k_n < 1$.

Очевидно, что с ростом k_n число каналов увеличивается. При B кратном $B_{ш}$ $n = \frac{B}{B_{ш}} + 1$ канала будут занимать полосу, равную $2B$. Таким образом, при перекрытии каналов их число увеличивается в $n/2$ раз или:

$$\frac{n}{2} = \frac{1 - k_n}{1 - k_n}. \quad (4)$$

Например, при перекрытии каналов на половину их число возрастает в 1,5 раза.

Произвольный j -й парциальный канал имеет свои ЧХ и ИХ, которые флуктуируют в медленном времени, поэтому при выборе перекрытия важно, чтобы эти флуктуации были независимыми.

Параметром, отличающим парциальные каналы между собой, является их средняя частота $\bar{f}$, которую обычно называют рабочей. Всё множество парциальных каналов можно представить в виде одного многомерного (векторного) канала, размерностью J , у ЧХ и ИХ которого компонентами является упорядоченное множество соответствующих характеристик парциальных (одномерных) каналов. В таком случае положение скалярного канала можно задать номером j его средней частоты:

$$\begin{aligned} \vec{H}(t, f) &= \{H_j(f, t, \bar{f}_j)\}, \\ \vec{h}(t, \tau) &= \{h(\tau, t, \bar{f}_j)\}, \text{ где } j = \{1 \dots J\}. \end{aligned} \quad (5)$$

Всю полосу частот B_{mM} , занимаемую возможными каналами, можно назвать полосой пропускания многомерного канала.

Далее будем рассматривать прохождение сигналом произвольного скалярного канала. Для этого нам необходимо построить модель такого канала. Очевидно, что она будет зависеть от полосы канала. Физические обстоятельства при ионосферном распространении ВЧ-сигналов таковы, что в канале имеет место дискретная многолучевость, диффузная многолучевость и частотная дисперсия. Первая связана со скачковым характером распространения мод от передатчика к приёмнику, вторая – с рассеянием скачковых мод на неоднородностях среды, а третья – с частотной зависимостью диэлектрической проницаемости. Диффузная многолучевость, как правило, не разрешается в ИХ по быстрому времени (задержке) при полосах канала до 1 МГц, а скачковые моды не разрешаются в ИХ каналов с полосой меньше $\sim 4\text{--}5$ кГц и поэтому все они интерферируют между собой.

Обобщая сказанное, для ионосферного ВЧ-канала с полосой 20–40 кГц будем иметь следующую физическую картину: скачковые моды (лучи) ИХ разрешаются по быстрому времени, а диффузные моды не разрешаются; влиянием частотной дисперсии на форму ИХ можно пренебречь. Разрешение мод по быстрому времени позволяет считать, что эквивалентная линейная система имеет число выходов, совпадающих с числом входов. Для не разрешающихся диффузных мод суммарная ЧХ в полосе канала будет испытывать случайные замирания общего характера. В случае общих замираний можно считать, что в линейной системе в каждом тракте действует своя мультипликативная помеха.

Для каналов с меньшей полосой ($\sim 3\text{--}6$ кГц) ИХ дискретных мод также не разрешаются и приходится считать, что линейная система имеет один выход. В этом случае на выходе все моды интерферируют между собой.

Рассмотрим физическую картину многомерного канала, определяющую алгоритм обработки сигналов. Будем считать, что многомерный канал имеет полосу пропускания, равную $B_{LM} = f_M - f_L$. Разобьём её на m примыкающих частей (парциальных каналов) с полосами $\sim B_k$, несколько меньшими, чем полоса когерентности (20–40 кГц). Тогда для ИХ суммарного канала будем иметь:

$$\begin{aligned} h_k(\tau, t) &= h_{k1}(\bar{f}_1, \tau, t) + \\ &+ h_{k2}(\bar{f}_2, \tau, t) + \dots + h_{km}(\bar{f}_m, \tau, t) = \\ &= \sum_m h_{km}(\bar{f}_m, \tau, t). \end{aligned} \quad (6)$$

Основное отличие слагаемых связано с различными средними частотами парциальных каналов, поэтому ФЧХ парциального канала можно записать в следующем виде:

$$\varphi_{km}(\bar{f}_m, f, t) = \varphi_{km}(\bar{f}_m, \bar{t}) - 2\pi F_{dkm}(t - \bar{t}) + 2\pi\tau_{gkm}(f - \bar{f}_m), \quad (7)$$

а АЧХ:

$$H_{0km}(\omega) \approx H_{0km}(\bar{\omega}_m), \quad (8)$$

где F_{dkm} – доплеровское смещение частоты в парциальном канале.

Формула (7) позволяет перейти к разностной частоте и разностному времени [14]. Обозначим их буквами F и T соответственно. При этом T также является медленным временем с новым началом отсчёта в точке $\bar{t}$. В этом случае формула для низкочастотной модели ЧХ канала (эквивалентной линейной системы) с учётом диффузной многолучевости примет вид:

$$\begin{aligned} H_{km}(\bar{f}_m, F, T) &= \sum_{v=1}^V H_{0kmv}(0) \times \\ &\times \exp i \{ -\varphi_{kmv}(0, 0) + 2\pi F_{dkmv}T - 2\pi\tau_{gkmv}F \} = \\ &= \exp i \{ 2\pi\bar{F}_{dk}T - 2\pi\tau_{gkm}F \} \times \\ &\times \sum_{v=1}^V H_{0kmv}(0) \cdot \exp i \{ 2\pi\Delta F_{dkmv}T \} = \\ &= \alpha_{0k}(\bar{f}_m, T) \exp i \{ 2\pi\bar{F}_{dk}T - 2\pi\tau_{gkm}F \}. \end{aligned} \quad (9)$$

Было учтено, что диффузные лучи не разрешаются по быстрому времени, что

позволяет применить равенство $\tau_{gkmv} = \tau_{gkm}$, означающее, что все задержки ИХ диффузных мод равны между собой (не зависят от индекса v). Кроме того, что доплеровское смещение диффузной моды можно представить в виде $F_{dkmv} = \bar{F}_{dk} + \Delta F_{dkmv}$. Первое слагаемое здесь есть среднее значение доплеровского смещения по диффузному ансамблю, а второе – величина рассеяния (отклонения) от него. В этом случае ИХ парциального канала будет иметь вид:

$$\begin{aligned} h_{km}(\bar{f}_m, \tau, T) &= \\ &= \sum_v \int_{f_{m-1}}^{f_m} \alpha_{0k}(\bar{f}_m, T) \exp i \{ 2\pi \bar{F}_{dk} T - \\ &\quad - 2\pi \tau_{gkm} F \} \exp \{ i 2\pi F \tau \} dF = \quad (10, a) \\ &= \alpha_{km}(\bar{f}_m, T) \sin c \pi B(\tau - \tau_{gkm}) \approx \\ &\approx \alpha_{km}(\bar{f}_m, T) \delta(\tau - \tau_{gkm}), \end{aligned}$$

где $\alpha_{km}(\bar{f}_m, T)$ – случайная комплексная функция с нормальным законом распределения квадратур.

Отсюда для модуля ИХ получим:

$$|h_{km}(\bar{f}_m, \tau, T)| = |\alpha_{km}(\bar{f}_m, T)| \times |\sin c \pi B(\tau - \tau_{gkm})|. \quad (10, б)$$

Для стохастического канала вводится статистически устойчивая характеристика, называемая в литературе профиль задержки мощности (ПЗМ) (англ. – power delay profile – PDP) [10], равная:

$$P_\tau(\tau) = E_T \left[|h(\tau, T)|^2 \right], \quad (11)$$

где $E_T[\dots]$ – среднее по медленному времени, $|h(\tau, T)|^2$ – мгновенное значение ПЗМ.

С учётом формулы (10) ПЗМ можно записать в следующем виде:

$$P_\tau(\bar{f}, \tau) = \sum_k E_T \left[|\alpha_k(\bar{f}, \tau)|^2 \right] \cdot \delta(\tau - \tau_{gk}). \quad (12)$$

На практике обычно имеют дело с выборочными ПЗМ, поэтому в зависимости от интервала усреднения его принято называть краткосрочным или долгосрочным.

При рэлеевских замираниях $E_T \left[|\alpha_k(\bar{f}, \tau)|^2 \right] = \sigma_{\alpha k}^2$ является средней мощностью ИХ k -й скачковой моды и ПЗМ имеет вид:

$$P_\tau(\bar{f}, \tau) = \sum_k^K \sigma_{\alpha k}^2(\bar{f}, \tau) \cdot \delta(\tau - \tau_{gk}). \quad (13)$$

Выберем максимальное значение из множества чисел $\{\sigma_{\alpha k}^2(\bar{f}, \tau)\}$ и разделим на него правую и левую части равенства (13). Получим нормированный ПЗМ вида:

$$\hat{P}_\tau(\bar{f}, \tau) = \sum_k^K \hat{\sigma}_{\alpha k}^2(\bar{f}, \tau) \cdot \delta(\tau - \tau_{gk}), \quad (14)$$

где $\hat{\sigma}_{\alpha k}^2(\bar{f}, \tau) \leq 1$.

Обычно ПЗМ позволяет оценивать задержку ИХ скачковых мод в канале и рассеяние по задержке.

В случае, когда полоса частот канала составляет 3–5 кГц, приближённым равенством в формуле (10) воспользоваться нельзя. С учётом этого для ПЗМ будем иметь:

$$P_\tau(\bar{f}, \tau) = \sum_k^K \sigma_{\alpha k}^2(\bar{f}, \tau) \cdot |\sin c \pi B(\tau - \tau_{gkm})|^2 \quad (15)$$

и

$$\hat{P}_\tau(\bar{f}, \tau) = \sum_k^K \hat{\sigma}_{\alpha k}^2(\bar{f}, \tau) \cdot |\sin c \pi B(\tau - \tau_{gkm})|^2.$$

В данном случае рассеяние по задержке можно оценить, измеряя уширение функции $|\sin c \pi B(\tau - \tau_{gkm})|^2$ из-за суммирования по индексу k .

При обосновании алгоритмов обработки сигналов в приёмнике ЛЧМ-ионозонда необходимо установить функциональные связи между измеряемыми характеристиками сигнала и характеристиками канала распространения.

Аналоговый и SDR (на платформе USRP) приёмники ЛЧМ-ионозонды. Аналоговый ЛЧМ-ионозонд ПГТУ описывался в работах [1,2,13]. Внешний вид приёмного терминала ионозонда представлен на рис.4, а его упрощённая блок-схема – на рис. 5. Она включает: аналоговый приёмник Icom IC-R75 (и/или

IC-R78), КВ- и GPS-антенны, ЛЧМ-синтезатор [14] и персональный компьютер (ПК) со специальным ПО. Icom IC-R75 принимает ЛЧМ-радиосигналы в диапазоне 1,5–30 МГц. Он построен по супергетеродинному принципу с тройным преобразованием частоты. Сжатие принимаемого ЛЧМ-сигнала в частотной области происходит посредством первого гетеродина, который формирует сигнал, идентичный излучаемому. На выходе приёмника имеем низкочастотный сигнал (разностной частоты) в диапазоне 700–1200 Гц, соответствующий анализируемому временному окну 5 мс.

ЛЧМ-синтезатор приёмника содержит систему частотно-временной синхронизации на основе GPS-технологии [16]. Синхронизатор также управляет приёмником по CI-V интерфейсу. Управляющие команды и синхронизация времени с ПК осуществляются через RS-232 интерфейс.

Персональный компьютер с помощью звуковой карты осуществляет оцифровку и вычисление амплитудного спектра сигнала разностной частоты до 1500 Гц. Он также формирует все необходимые команды для управления оборудованием.

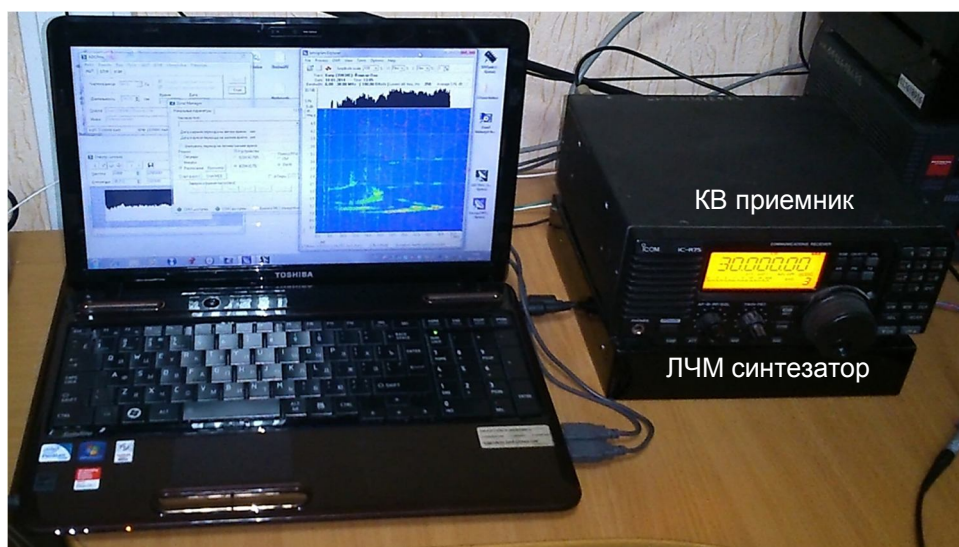


Рис. 4. Приёмный терминал программно-аппаратного комплекса ЛЧМ-ионозонда с аналоговым приёмником

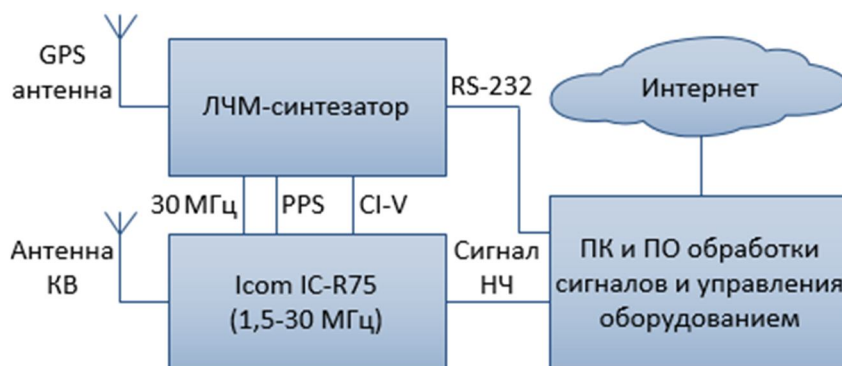


Рис. 5. Блок-схема приёмного терминала программно-аппаратного комплекса ЛЧМ-ионозонда с аналоговым приёмником Icom IC-R75

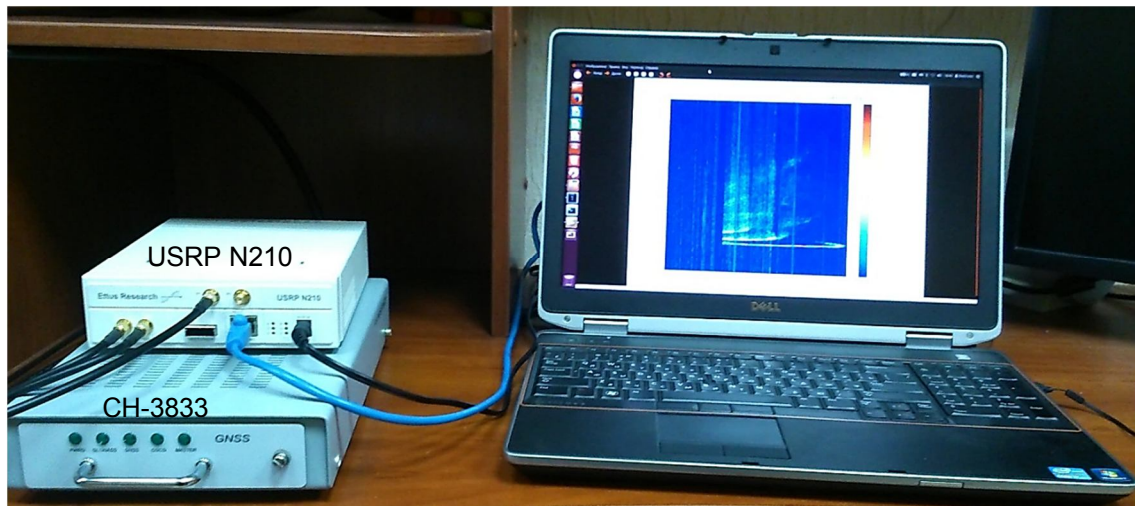


Рис. 6. Приёмный терминал программно-аппаратного комплекса ЛЧМ-ионозонда с цифровым приёмником

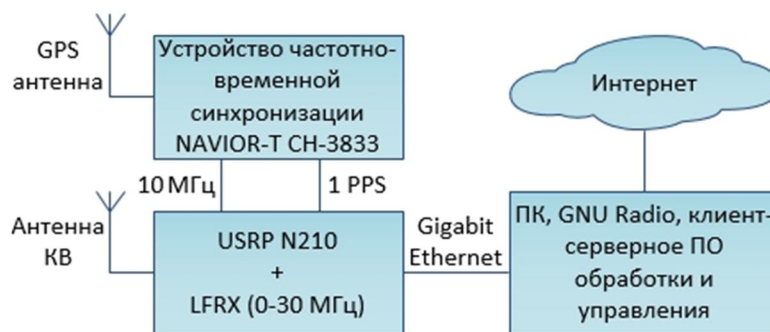


Рис. 7. Блок-схема приёмного терминала программно-аппаратного комплекса ЛЧМ-ионозонда с цифровым приёмником USRP N210

Приёмный терминал ЛЧМ-ионозонда ПГТУ с SDR-приёмником, построенный на платформе USRP N210 [3] с дочерней платой LFRX, представлен на рис. 6, а его упрощённая блок-схема – на рис. 7. Она включает KB-антенну, устройство частотно-временной синхронизации NAVIOR-T CH-3833 с GPS-антенной и персональный компьютер с ОС Ubuntu Linux, GNU Radio со специализированным клиент-серверным программным обеспечением. Приёмник реализован по принципу «АЦП к антенне» и квадратурным преобразованием оцифрованного сигнала к нулевой промежуточной частоте (принцип переноса частоты «вниз» – DDC – Digital Down Conversion).

Дальнейшая обработка сигнала осуществляется в комплексной плоскости. USRP N210 с дочерней платой LFRX обеспечивает приём сигналов в полосе 0–

30 МГц. Комплексный ЛЧМ-сигнал с нулевой средней частотой спектра поступает на ПК для последующей обработки и хранения.

Устройство частотно-временной синхронизации NAVIOR-T CH3833 обеспечивает необходимые требования к синхронизации приёмного терминала [17].

В персональном компьютере происходит сжатие цифрового комплексного ЛЧМ-сигнала, для чего он умножается на отсчёты комплексно сопряжённого аналога излучаемого сигнала с нулевой средней частотой спектра. Полоса анализа по разностной частоте составляет 0–20000 Гц, что соответствует временному окну 0,2 с и позволяет одновременно исследовать прямой и кругосветный сигналы. В ПК вычисляется амплитудный спектр сигнала разностной частоты, строится ионограмма

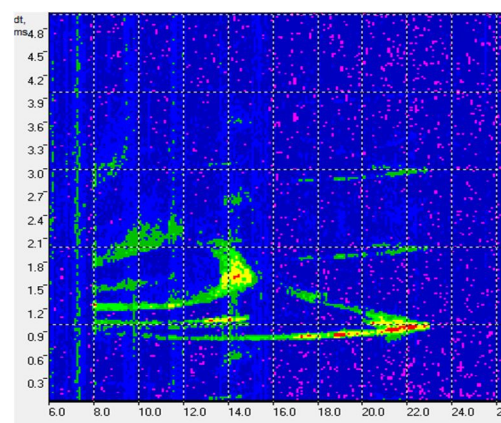
наклонного зондирования, а также формируются все необходимые команды для управления оборудованием. Для вычисления спектров сигнал разбивается на элементы длительностью 1 с. Середина элемента соответствует средней частоте канала, а его длительности – его полоса. Упорядоченное множество спектров образует на плоскости частота–задержка ионограмму (см. рис. 8).

Сопоставление ионограмм наклонного зондирования ионосферы. В работе [17] было показано, что амплитудный спектр сигнала разностной частоты подобен ПЗМ ионосферного радиоканала, что позволяет исследовать характеристики всех возможных каналов из полосы $[f_L, f_M]$, т.е. многомерного ионосферного канала.

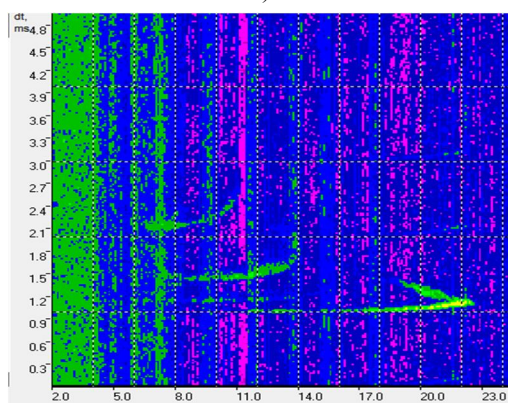
Представленные на рис. 8 примеры ионограмм получены одновременно аналоговым (а, в) и цифровым (б, г) приёмными терминалами ионозондов в натур-

ных экспериментах на двух трассах о. Кипр – г. Йошкар-Ола (а, б) и о. Диксон [18, 19] – г. Йошкар-Ола (в, г).

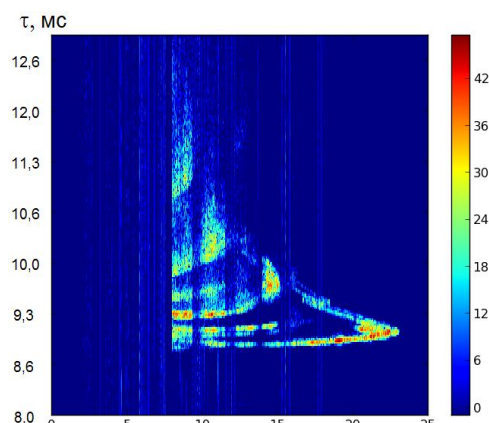
Анализ ионограмм показал, что полностью цифровая обработка сигнала по принципу «АЦП к антенне» позволяет получить более высокую помехоустойчивость (на ионограмме цифрового приёмника меньше мешающих сигналов) при отсутствии перегрузок приёмника «сильными» собственными сигналами (на цифровой ионограмме отсутствуют дополнительные следы выше следа моды 1F1), что каждая из реализаций ионозонда обладает своими достоинствами и недостатками. Однако цифровой приёмник обладает меньшей чувствительностью (на ионограмме (г) регистрируется меньше следов полезного сигнала, чем на ионограмме (в)). Кроме того, цифровой приём ЛЧМ-сигнала позволяет одновременно исследовать прямой и кругосветный сигналы.



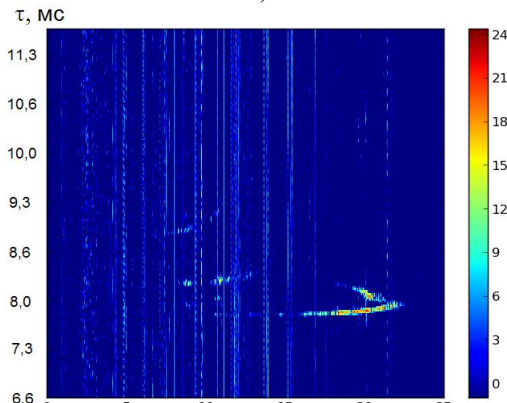
а)



в)



б)



г)

Рис. 8. Ионограммы, полученные на аналоговом (а, в) и цифровом (б, г) ионозондах

Выводы. Созданный на платформе USRP приёмный терминал ЛЧМ-ионозонда продемонстрировал более высокую помехоустойчивость, отсутствие перегрузок собственным сигналом, возможность одновременного исследования характеристик прямого и кругосветного распространения. Однако он обладает меньшей, чем аналоговый приёмник, чувствитель-

ностью при приёме слабых ЛЧМ-сигналов. Показано, что ИХ широкополосного канала может быть представлена суммой ИХ узкополосных примыкающих каналов, что позволяет интерпретировать результаты зондирования и более наглядно описывать процессы (замирания, частотную дисперсию) при распространении широкополосных сигналов в ионосфере.

Работа выполнена при поддержке РФФИ: гранты 13-07-00371-а; 13-02-00524-а; 13-07-97041.

Список литературы

1. Иванов, В.А. Зондирование ионосферы и декаметровых каналов связи сложными радиосигналами / В.А. Иванов, Д.В. Иванов, Н.В. Рябова // Вестник Марийского государственного технического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2010. – № 1 (8). – С. 3-37.
2. Иванов, В.А. Зондирование ионосферных каналов высокочастотной связи с поверхности Земли / В.А. Иванов, Д.В. Иванов, Н.В. Рябова, А.В. Мальцев, М.И. Рябова, И.Е. Царев // Вестник Марийского государственного технического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2008. – № 1. – С. 3-20.
3. Vierinen, J. On statistical theory of radar measurements. Doctoral dissertation. Aalto University, Helsinki, 2012. – 185 p.
4. Иванов, В.А. Диагностика функции рассеяния декаметровых узкополосных стохастических радиоканалов / В.А. Иванов, Н.В. Рябова, И.Е. Царев // Радиотехника и электроника. – 2009. – Т. 55, № 3. – С. 285-292.
5. Иванов, В.А. Искажение сложных декаметровых радиосигналов в дисперсных ионосферных радиоканалах при квазизенитном распространении / В.А. Иванов, Д.В. Иванов, М.И. Рябова, Н.А. Соколин // Вестник Марийского государственного технического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2010. – № 1 (8). – С. 43-53.

References

1. Ivanov V. A., Ivanov D. V., Ryabova N. V. Zondirovanie ionosfery i dekametrovykh kanalov svyazi slozhnymi radiosignalami [The Sounding of the Ionosphere and Decameter Communication Channels by Complex Radio Signals]. Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy [Vestnik of Mari State Technical University. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems]. 2010. No 1 (8). P. 3-37.
2. Ivanov V. A., Ivanov D. V., Ryabova N. V., Mal'tsev A. V., Ryabova M. I., Tsarev I. E. Zondirovanie ionosfernnykh kanalov vysokochastotnoy svyazi s poverkhnosti Zemli [The Sounding of the Ionospheric Channels of High-frequency Communication from the Surface of the Earth]. Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy [Vestnik of Mari State Technical University. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems]. 2008. No 1. P. 3 - 20.
3. Vierinen J. On statistical theory of radar measurements. Doctoral dissertation. Aalto University, Helsinki, 2012. 185 p.
4. Ivanov V. A., Ryabova N. V., Tsarev I. E. Diagnostika funktsii rasseyaniya dekametrovykh uzkopolosnykh stokhasticheskikh radiokanalov [Diagnostics of Scattering Function of Decameter Narrowband Stochastic Radio Channels]. Radiotekhnika i elektronika [Radio Engineering and Electronics]. 2009. Vol. 55, No 3. P. 285-292.
5. Ivanov V. A., Ivanov D. V., Ryabova M. I., Sorokin N. A. Iskazhenie slozhnykh dekametrovykh radiosignalov v dispersnykh ionosfernnykh radiokanalakh pri kvazizenitnom rasprostraneni [The Distortion of Complex Decameter Radio Signals in Dispersive Ionospheric Radio Channels During their Quasi-zenithal Propagation]. Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy [Vestnik of Mari State Technical University. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems]. 2010. No 1(8). P. 43-53.

6. Иванов, Д.В. Искажения в ионосфере декаметровых сигналов с псевдослучайной рабочей частотой / Д. В. Иванов // Радиотехника и электроника. – 2006. – Т. 51, № 7. – С. 807-815.
7. Крюковский, А. С. Классификация и равномерное асимптотическое описание пространственно-временных трехмерных краевых фокусировок волновых полей / А.С. Крюковский, Д.С. Лукин, Д.В. Растягаев // Радиотехника и электроника. – 2005. – Т. 50, № 10. – С. 1221-1230.
8. Иванов, В.А. Численные и полунатурные исследования функции рассеяния узкополосных декаметровых радиоканалов / В.А. Иванов, Д.В. Иванов, Н.В. Рябова, И.Е. Царев // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2009. – Т. 14, № 8. – С. 46-54.
9. Крюковский, А. С. Исследование особенностей распространения коротких радиоволн в неоднородной анизотропной ионосфере / А.С. Крюковский, Д.С. Лукин, Д.В. Растягаев // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2009. – Т. 14, № 8. – С. 17-26.
10. Иванов, В.А. Исследование факторов, приводящих к искажению высокочастотных сигналов с расширенным спектром при их квазизенитном распространении в ионосфере / В.А. Иванов, Д.В. Иванов, М.И. Рябова // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2011. – Т. 16, № 8. – С. 33-39.
11. Иванов, В.А. Исследования коррекции дисперсионных искажений, возникающих в ионосферных радиоканалах с полосой 1 МГц / В.А. Иванов, Д.В. Иванов, М.И. Рябова, А.Р. Лашчевский // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2008. – Т. 13, № 8. – С. 58-66.
12. Иванов, В.А. Исследование регулярной и стохастической дисперсии в ионосферных широкополосных высокочастотных радиоканалах / В.А. Иванов, Д.В. Иванов, Н.Н. Михеева, М.И. Рябова // Нелинейный мир. – 2012. – Т. 10, № 10. – С. 678-686.
13. Иванов, Д. В. Оптимальные полосы частот
6. *Ivanov D. V. Iskazheniya v ionosphere dekametrovykh signalov s psevdosluchainoy rabochey chistotoy* [Distortions of Decameter Signals with Pseudorandom Operating Frequency in the Ionosphere]. Radiotekhnika i elektronika [Radio Engineering and Electronics]. 2006. Vol. 51, No 7. P. 807-815.
7. *Kryukovsky A. S., Lukin D. S., Rastyagaev D. V. Klassifikatsiya i ravnomernoe asimptoticheskoe opisanie prostranstvenno-vremennykh trekhmernykh kraevykh fokusirovok volnovykh poley* [Classification and Uniform Asymptotic Description of Spatio-temporal Three-dimensional Edge Focusing of Wave Fields]. Radiotekhnika i elektronika [Radio Engineering and Electronics]. 2005. Vol. 50, No 10. P. 1221-1230.
8. *Ivanov V. A., Ivanov D. V., Ryabova N. V., Tsarev I. E. Chislennye i polunaturnye issledovaniya funktsii rasseyaniya uzkopolosnykh dekametrovykh radiosignalov* [Numerical and Seminatural Investigations of Narrowband Decameter Radio Signal Scattering Function]. Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy [Electromagnetic Waves and Electronic Systems]. 2009. Vol. 14, No 8. P. 46-54.
9. *Kryukovsky A. S., Lukin D. S., Rastyagaev D. V. Issledovanie osobennostey rasprostraneniya korotkikh radiovoln v neodnorodnoy anizotropnoy ionosphere* [Investigation of Regularities of Short Radio Wave Propagation in Heterogeneous Anisotropic Ionosphere]. Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy [Electromagnetic Waves and Electronic Systems]. 2009. Vol. 14, No 8. P. 17-26.
10. *Ivanov V. A., Ivanov D. V., Ryabova M. I. Issledovanie faktorov, privodyashchikh k iskazheniyu vysokochastotnykh signalov s rasshirennym spektrom pri ikh kvazizenitnom rasprostraneni v ionosfere* [The Research on the Factors Leading to the Distortion of High-frequency Spread-spectrum Signals during their Quasi-zenithal Propagation in the Ionosphere]. Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy [Electromagnetic Waves and Electronic Systems]. 2011. Vol. 16, No 8. P. 33-39.
11. *Ivanov V. A., Ivanov D. V., Ryabova M. I., Lashchevsky A. R. Issledovaniya korrektsii disperсионnykh iskazheniy, vznikayushchikh v ionosfernykh radiokanalakh s polosoi 1 MGt* [Investigations of the Correction of Dispersive Distortions Occurring in Ionospheric Radio Channels with a Band 1 MHz]. Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy [Electromagnetic Waves and Electronic Systems]. 2008. Vol. 13. No 8. P. 58-66.
12. *Ivanov V. A., Ivanov D. V., Mikheeva N. N., Ryabova M. I. Issledovanie regul'yarnoy i stokhasticheskoy dispersii v ionosfernykh shirokopolosnykh vysokochastotnykh radiokanalakh* [Research on Regular and Stochastic Dispersion in Ionospheric Broadband High-frequency Radio Channels]. Nelineyny mir [Nonlinear world]. 2012. Vol. 10, No 10. P. 678-686.
13. *Ivanov D. V. Optimal'nye polosy chastot*

сложных сигналов для декаметровых радиолиний / Д.В. Иванов // Радиотехника и электроника. – 2006. – Т. 51, № 4. – С. 389-396.

14. Грозов, В.П. Методы обработки и интерпретации данных зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ сигналом / В.П. Грозов, В.И. Куркин, С.Н. Пономорчук // Физические основы приборостроения. – 2012. – Т. 1, № 3 (4). – С. 33-41.

15. Иванов, В.А. Теоретические основы метода прямого цифрового синтеза радиосигналов для цифровых систем связи / В.А. Иванов, Д.В. Иванов, А.А. Чернов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2012. – № 1 (15). – С. 3-34.

16. Иванов, В.А. Устройство и алгоритмы синхронизации радиотехнических систем связи и зондирования ионосферных высокочастотных радиоканалов / В.А. Иванов, Е.В. Катков, А.А. Чернов // Вестник Марийского государственного технического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2010. – № 2 (9). – С. 114-126.

17. Иванов, В.А. Развитие теории синхронизации РТС декаметровой связи и панорамного зондирования ионосферы / В.А. Иванов, А.А. Чернов // Телекоммуникации. – 2012. – № 2. – С. 16-22.

18. Arctic stations. About stations. [Интернет-ресурс]. URL: http://geophys.aari.ru/station_arc.html (дата обращения: 17.10.2013).

19. Бельгибаев, Р.Р. Автоматическое обнаружение работы и поддержание синхронизации станций в мировой сети ЛЧМ ионозондов / Р.Р. Бельгибаев, Д.В. Иванов, В.А. Иванов, М.И. Рябова // Вестник Марийского государственного технического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2009. – № 2 (6). – С. 3-12.

slozhnykh signalov dlya dekametrovykh radioliniy [Optimal Frequency Bands of Complex Signals for Decameter Radio Lines]. Radiotekhnika i elektronika [Radio Engineering and Electronics]. 2006. Vol. 51, No 4. P. 389-396.

14. Grozov V. P., Kurkin V. I., Ponomorchuk S. N. Metody obrabotki i interpretatsii dannykh zondirovaniya ionosfery nepreryvnym LCHM signalom [Methods of Processing and Interpretation of the Data of Ionospheric Sounding by Continuous LFM Signal]. Fizicheskie osnovy priborostroeniya [Basic Physics of Instrument Engineering]. 2012. Vol. 1, No 3 (4). P. 33-41.

15. Ivanov V. A., Ivanov D. V., Chernov A. A. Teoreticheskie osnovy metoda pryamogo tsifrovogo sinteza radiosignalov dlya tsifrovyykh sistem svyazi [The Theory of the Method of Direct Digital Synthesis of the Radio Signals for Digital Communication Systems]. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser. Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems. 2012. No 1 (15). P. 3-34.

16. Ivanov V. A., Katkov E. V., Chernov A. A. Ustroistvo i algoritmy sinkhronizatsii radiotekhnicheskikh sistem svyazi i zondirovaniya ionosfernykh vysokochastotnykh radiokanalov [The Construction and Synchronization Algorithms of Radio Engineering Communication Systems and Ionospheric High-Frequency Radio Channel Sounding]. Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy [Vestnik of Mari State Technical University. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems. 2010. No 2 (9). P. 114-126.

17. Ivanov V. A., Chernov A. A. Razvitie teorii sinkhronizatsii RTS dekametrovoy svyazi i panoramnogo zondirovaniya ionosfery [The Development of Synchronization Theory of Radio Engineering Systems of Decameter Communication and Panoramic Ionospheric Sounding]. Telecommunications. 2012. No 2. P. 16-22.

18. Arctic stations. About stations. [Internet resource]. URL: http://geophys.aari.ru/station_arc.html (Access date: 17.10.2013).

19. Belgibaev R. R., Ivanov D. V., Ivanov V. A., Ryabova M. I. Avtomaticheskoe obnaruzhenie raboty i podderzhanie sinkhronizatsii stantsiy v mirovoy seti LCHM ionozondov [Auto Detection of Work and the Support of Station Synchronization in the World Network of LFM Ionosondes]. Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy [Vestnik of Mari State Technical University. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems. 2009. No 2 (6). P. 3-12.

Статья поступила в редакцию 24.10.13.

ИВАНОВ Дмитрий Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, проректор по научной работе и инновационной деятельности, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – моделирование технических систем, широкополосные сигналы, распространение радиоволн. Автор более 100 публикаций.

E-mail: IvanovDV@volgatech.net

ИВАНОВ Владимир Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – ионосфера, распространение радиоволн, моделирование, широкополосные сигналы. Автор более 250 публикаций.

E-mail: IvanovVA@volgatech.net

РЯБОВА Наталья Владимировна – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники и связи, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – информационно-телекоммуникационные системы, ионосфера, распространение радиоволн, прогнозирование, моделирование, адаптивные системы. Автор более 130 публикаций.

E-mail: RyabovaNV@volgatech.net

ЕЛСУКОВ Алексей Александрович – инженер-исследователь кафедры радиотехники и связи, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – дистанционное зондирование ионосферы. Автор 15 публикаций.

E-mail: ElsukovAA@volgatech.net

РЯБОВА Мария Игоревна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – моделирование технических систем, распространение радиоволн. Автор более 35 публикаций.

E-mail: RyabovaMI@volgatech.net

ЧЕРНОВ Андрей Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники и связи, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – синхронизация систем ВЧ-связи и зондирования ионосферы, программно-определяемые радиосистемы. Автор более 25 публикаций.

E-mail: ChernovAS@volgatech.net

IVANOV Dmitry Vladimirovich – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Vice-Rector for Research and Innovation Activity at Volga State University of Technology (Yoshkar-Ola, Russian Federation). The sphere of scientific interests is the modeling of technical systems, wideband signals and the propagation of radio waves. The author of more than 100 publications.

E-mail: IvanovDV@volgatech.net

IVANOV Vladimir Alekseevich – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, the Head of the Chair of Higher Mathematics at Volga State University of Technology (Yoshkar-Ola, Russian Federation). The sphere of scientific interests is the ionosphere, the propagation of radio waves, modeling and broadband signals. The author of more than 250 publications.

E-mail: IvanovVA@volgatech.net

RYABOVA Natalia Vladimirovna – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, the Head of the Chair of Radio Engineering and Communication at Volga State University of Technology (Yoshkar-Ola, Russian Federation). The sphere of scientific interests is information and telecommunication systems, the ionosphere, the propagation of radio waves, forecasting, modeling, adaptive systems. The author of more than 130 publications.

E-mail: RyabovaNV@volgatech.net

ELSUKOV Aleksey Aleksandrovich – research engineer of the Chair of Radio Engineering and Communication at Volga State University of Technology (Yoshkar-Ola, Russian Federation). The sphere of scientific interests is remote ionospheric sounding. The author of 15 publications.

E-mail: ElsukovAA@volgatech.net

RYABOVA Maria Igorevna – Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor of the Chair of Higher Mathematics at Volga State University of Technology (Yoshkar-Ola, Russian Federation). The sphere of scientific interests is the modeling of technical systems, the propagation of radio waves. The author of more than 35 publications.

E-mail: RyabovaMI@volgatech.net

CHERNOV Andrey Alekseevich – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Chair of Radio Engineering and Communication at Volga State University of Technology (Yoshkar-Ola, Russian Federation). The sphere of scientific interests is synchronization of HF communication systems and ionospheric sounding, software-defined radio systems. The author of more than 25 publications.

E-mail: ChernovAS@volgatech.net

D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, A. A. Elsukov, M. I. Ryabova, A. A. Chernov

SDR-IONOSONDE WITH CONTINUOUS LFM-SIGNAL ON THE PLATFORM USRP

Key words: SDR; USRP; GNU Radio; LFM; chirp; sounder; ionosonde; sounding; decameter radio channel; short waves.

ABSTRACT

Recently, the direction of software-defined radio or software-defined radio systems (SDR), capable of realizing universal radio engineering systems with different functional capabilities actively develops. One of the most flexible hardware implementation SDR is the series of Universal Software Radio Peripherals (USRP) of the company Ettus Research (the USA) in configurations with different frequency ranges and supporting such solutions as GNU Radio, National Instruments LabVIEW, MathWorks Matlab, HDSDR and others for control and programming. Functional capabilities of some communication and radiolocation systems implemented on the platform USRP were investigated and their availability was proved. The implementation and the investigation of client-server network ionosonde with a continuous LFM-signal on the basis of this platform is an unsolved urgent scientific problem, which requires the development of a radio channel model and the algorithm of the primary processing of probing signals on its basis.

The problem of the development and the investigation of the laboratory pattern of the receiving terminal of the ionosonde with a continuous LFM-signal on the platform USRP and the comparison of received results with the data of the analogous LFM-probe, developed in the laboratory of radio wave propagation at Volga State University of Technology was solved. It is stated that N210 terminal created on USRP provides higher noise immunity, the lack of congestion caused by its own signal, the possibility of simultaneous investigation of characteristics of direct and round-the world propagation. However, it has lower sensitivity than analogous one, when receiving weak LFM-signals. For the interpretation of sounding results in the interests of short-wave communication the model of an ionospheric radio channel is developed by means of the representation of the impulse response of a broadband channel in the form of the sum of the impulse responses of narrowband adjoining channels.

НОВИНКИ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ. ОБЗОРЫ. КОНФЕРЕНЦИИ. ВАЖНЫЕ ДАТЫ

УДК: 378.662(470.343):001.38

Д. В. Иванов, Ю. С. Андрианов, П. А. Нехорошков

III ФЕСТИВАЛЬ НАУКИ В РЕСПУБЛИКЕ МАРИЙ ЭЛ, ИТОГИ ГОДА

Приведены итоги проведения мероприятий III Фестиваля науки в Республике Марий Эл и участия Поволжского государственного технологического университета в мероприятиях, проводимых на центральных площадках III Всероссийского фестиваля науки в г. Москве в МГУ имени М. В. Ломоносова.

Ключевые слова: фестиваль науки; привлечение молодёжи в сферу науки; научно-техническое творчество молодёжи.

В 2013 году проводился III Фестиваль науки в Республике Марий Эл в рамках III Всероссийского фестиваля науки, проводимого под эгидой МГУ имени М. В. Ломоносова. Основной целью Фестиваля является популяризация науки, привлечение молодёжи в сферу науки, демонстрация новейших научных достижений и знаний в различных областях науки и техники.

Для Поволжского государственного технологического университета, являющегося основателем фестивального движения в Республике Марий Эл, на базе которого в 2010 году был проведен первый Фестиваль науки в республике, тогда еще в рамках V Московского фестиваля, это уже четвертый Фестиваль науки [1, 2].

Фестивали науки давно и успешно развиваются во многих странах мира, а начало этой традиции положила Великобритания. Еще в начале XIX века там задумались над тем, как важно объяснить обществу, что происходит в лабо-

раториях учёных, насколько меняется качество жизни, благодаря научным исследованиям.

Первый в России Фестиваль науки был проведён в МГУ имени М. В. Ломоносова в 2006 году, за три дня мероприятия посетили более 20 000 человек. В 2012 году II Всероссийский фестиваль науки прошёл в 65 регионах России, состоялось более 3 500 мероприятий научной направленности, количество посетителей превысило 800 000 человек, более 500 организаций-участников – вузов, музеев, научных центров, других научно-исследовательских организаций.

В 2013 году III Всероссийский фестиваль науки проводился на трёх площадках:

- Центральная площадка Фестиваля – МГУ имени М. В. Ломоносова (фундаментальная библиотека и ЦВК «Экспоцентр»).
- Центральная региональная площадка – город Курск (более 30 000 посетителей).

- Центральная региональная площадка Сибирского федерального округа – город Иркутск (более 20 000 посетителей).

В 2013 году фестивальные мероприятия проходили в более чем 70 регионах страны, состоялось более 5 000 научно-популярных мероприятий и выставок. Количество посетителей превысило 1 000 000 человек.

Традиционно богатая программа мероприятий представлена на центральных площадках в г. Москве – аудиториях Фундаментальной библиотеки МГУ и Шуваловского корпуса, где выступили видные отечественные и зарубежные учёные, включая нобелевских лауреатов, проведены мастер-классы, дискуссии, «круглые столы» и телеконференции с зарубежными научными центрами. В фойе представлена выставочная экспозиция, посвящённая последним достижениям науки и технологий.

Центральная выставочная площадка Фестиваля, расположенная на ЦВК «Экспоцентр», занимает площадь более 10 000 квадратных метров, на которой представлены последние разработки в области робототехники, космонавтики, компьютерных технологий, строительства, нано- и биотехнологий, медицины, интерактивные и мультимедийные экспозиции.

В 2013 году открытие III Фестиваля науки в Республике Марий Эл прошло на базе Межрегионального открытого социального института. Нововведение III Фестиваля – творческие научные площадки, распределённые между вузами республики в соответствии с их приоритетными научными направлениями:

1. Рациональное природопользование – Поволжский государственный технологический университет.

2. Инфотелекоммуникационные технологии – Поволжский государственный технологический университет.

3. Биоэкология – Марийский государственный университет.

4. Информационные технологии в

образовании и бизнесе – Межрегиональный открытый социальный институт.

5. Психология – Межрегиональный открытый социальный институт.

В течение года все научные мероприятия, проводимые в республике в рамках Фестиваля, распределялись между площадками в зависимости от их научного тяготения.

На базе ПГТУ работали две научные площадки: рациональное природопользование и инфотелекоммуникационные технологии.

Площадка «Рациональное природопользование». Координатор – доктор технических наук, профессор, декан лесопромышленного факультета Войтко Петр Филиппович. Рациональное природопользование является одним из приоритетных направлений развития науки в ПГТУ, имеет развитую инновационную инфраструктуру, включающую в себя центр коллективного пользования, межрегиональный отраслевой ресурсный центр в области лесного хозяйства, центр автоматизированного машиностроения и совместные лаборатории с институтами РАН. Основная цель – создание такой системы природопользования, при которой достаточно полно используются добываемые природные ресурсы, обеспечивается восстановление возобновляемых природных ресурсов, в полной мере и многократно используются отходы производства, уменьшается загрязнение окружающей природной среды.

Площадка «Инфотелекоммуникационные технологии». Координатор – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники и связи Рябова Наталья Владимировна. Основной научной тематикой работы площадки является интересная для молодёжи сфера развития российского телекома: внедрение мультисервисных услуг, 3G и 3,5G, сетей широкополосного доступа, цифрового телевидения, использования технологий ГЛОНАСС в современных инфотелекоммуникациях.

В рамках Фестиваля науки на базе Поволжского государственного технологического университета состоялись следующие крупные мероприятия:

- Первый в регионе Поволжский научно-образовательный форум «Мой первый шаг в науку», где более 500 школьников обсуждали результаты научных исследований, проведённых ими под руководством преподавателей вуза и школ, а также аспирантов и магистрантов ПГТУ (26 марта 2013 г.).

- Региональный этап Всероссийского студенческого форума, проводимого в Республике Марий Эл на базе Поволжского государственного технологического университета, в соответствии с приказом Министерства образования и науки РФ. На региональный этап было представлено 53 проекта студентов и обучающихся учреждений ВПО, СПО, лицеев и колледжей нашей республики. 44 из них прошли экспертизу по формальным признакам и были допущены к участию. Экспертный совет, состоящий из представителей вузов и Министерства образования и науки Республики Марий Эл, определил победителей по пяти номинациям форума (май – июль 2013 г.).

- С 12 по 15 октября в г. Нови Сад (Воеводина, Сербия) состоялся Международный фестиваль инноваций, знаний и изобретательства «Тесла Фест». От Поволжского государственного технологического университета были представлены пять научных проектов. Разработки учёных получили высокую оценку экспертов – все они были отмечены золотыми медалями. А «Волгатех» по итогам получил ГРАН-ПРИ фестиваля!

- 10–12 сентября в Нижнем Новгороде состоялся образовательно-промышленный форум «Инновационное образование – локомотив технологического прорыва России» и XI Ярмарка «Российским инновациям – российский капитал». От ПГТУ было представлено восемь проектов. По итогам защит проектов перед экс-

пертными комиссиями два проекта получили серебряные медали.

- С 1 по 5 апреля на территории Эко-Центра «Сокольники» в Москве состоялся Московский международный Салон изобретений и инновационных технологий «Архимед». Поволжский государственный технологический университет представил 12 новых и наиболее перспективных разработок. Все проекты ПГТУ в этом году были заслуженно отмечены дипломами и наградами. Золотые медали Салона получили шесть проектов. Серебряными медалями Салона отмечены четыре проекта. Бронзовыми медалями Салона награждены два проекта.

- 27 октября получили две золотые медали за проекты на российско-британском Форуме в Великобритании (Лондон).

Всего в рамках III Фестиваля науки ПГТУ принял участие в 42 международных и всероссийских научных конференциях и олимпиадах, в котором приняло участие более 2 300 участников, было проведено более 30 лекций ведущих учёных ПГТУ в школах города и республики, состоялось 38 конкурсов и выставок студенческих работ различного уровня.

Помимо республиканских мероприятий ПГТУ традиционно принимал участие в мероприятиях, проводимых на центральных площадках в г. Москве:

- Экспозиция ПГТУ на центральной выставочной площадке Фестиваля в Экспоцентре на Красной Пресне. Были представлены новейшие разработки и готовые к коммерциализации проекты в области приоритетных направлений развития университета: рациональное природопользование и инфотелекоммуникационные системы и технологии, подготовленные победителями программы «У.М.Н.И.К.» и малыми инновационными предприятиями, созданными при университете.

- Выступление на торжественной церемонии закрытия Фестиваля, проходившей в Фундаментальной библиотеке МГУ, вокалистки Ирины Соболевой.

Закрытие III Фестиваля науки в республике проходило на базе Марийского государственного университета. В рамках программы закрытия проводились лекции ведущих учёных и мастер-классы для учащихся школ города и республики. На торжественной церемонии закрытия выступили министр образования и науки Г. Н. Швецова, заместитель Председателя Правительства Республики Марий Эл, министр промышленности, транспорта и дорожного хозяйства В. П. Пашин, ректора вузов и руководители творческих площадок.

По итогам проведения Фестиваля за высокие научные достижения и высокие показатели научной работы со студентами были награждены шесть сотрудников ПГТУ:

- В. И. Шулёпов, кандидат экономических наук, доцент – грамота Правительства Республики Марий Эл;
- В. А. Грязин, кандидат технических наук, доцент – грамота Министерства образования и науки Республики Марий Эл;

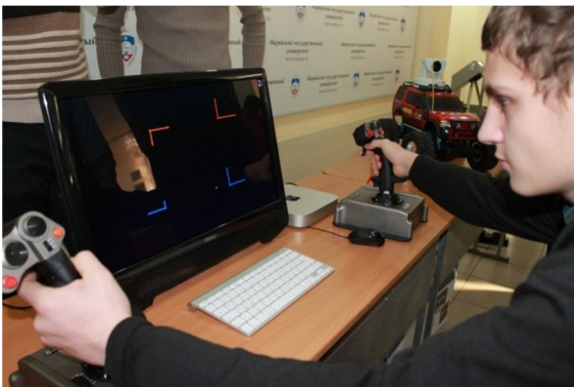
- Л. В. Смоленникова, кандидат экономических наук, доцент – грамота Министерства образования и науки Республики Марий Эл;

- Н. И. Сущенцов, кандидат технических наук, доцент – грамота ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет»;

- Е. С. Васяева, кандидат технических наук, доцент – грамота ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет»;

- Д. И. Мухортов, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент – грамота ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет».

Сегодня Фестиваль науки проходит на более чем 100 площадках России и всё больше молодёжи включается в фестивальное движение. Ведь именно молодые люди очень быстро воспринимают всё новое, умеют быстро разбираться в последних разработках науки и техники. Синтез опыта научных школ и творческого задора молодых – это и есть правильно организованная наука.



Список литературы

1. Нехорошков, П.А. Фестиваль науки впервые в Республике Марий Эл / П. А. Нехорошков // Вестник Марийского государственного технического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2010. – № 3(10). – С. 91-95.
2. Иванов, В.А. II Фестиваль науки в Республике Марий Эл, итоги года / В. А. Иванов, Ю. С. Андрианов, П. А. Нехорошков // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2012. – № 2 (16). – С. 94-96.

References

1. P. A. Nekhoroshkov. Festival' nauki v pervyye v Respublike Mariy El [For the first time Science Festival in the Republic of Mari El]. Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy [Vestnik of Mari State Technical University. Ser. Radio Engineering and Infocommunication Systems]. 2010. No 3(10). P. 24-29.
2. V. A. Ivanov, Yu. A. Andrianov, P. A. Nekhoroshkov. II Festival' nauki v Respublike Mariy El, itogi goda [Second science Festival in the Republic of Mari El, the results of the year]. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser. Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser. Radio Engineering and Infocommunication Systems]. 2012. No 2 (16). P. 67-75.

Статья поступила в редакцию 24.10.13.

ИВАНОВ Дмитрий Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, проректор по научной работе и инновационной деятельности, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – моделирование технических систем, широкополосные сигналы, распространение радиоволн. Автор более 100 публикаций.
E-mail: IvanovDV@volgatech.net

АНДРИАНОВ Юрий Семенович – кандидат технических наук, доцент, начальник управления научной и инновационной деятельности, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – транспортные системы в промышленных кластерах. Автор более 160 публикаций.
E-mail: AndrianovYS@volgatech.net

НЕХОРОШКОВ Петр Аркадьевич – кандидат технических наук, доцент, начальник отдела научных программ и НИРС, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – рациональное лесопользование, транспорт леса, оптимизация и моделирование транспорта леса, геоинформационные и логистические системы. Автор 38 публикаций.
E-mail: NekhoroshkovPA@volgatech.net

IVANOV Dmitry Vladimirovich – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Vice-Rector for Research and Innovation Activity at Volga State University of Technology (Yoshkar-Ola, Russian Federation). The sphere of scientific interests is the modeling of technical systems, wideband signals and the propagation of radio waves. The author of more than 100 publications.
E-mail: IvanovDV@volgatech.net

ANDRIANOV Yuri Semenovich – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Research and Innovation Department, Volga State University of Technology (Yoshkar-Ola, Russian Federation). The sphere of scientific interests is transport systems in industrial clusters. The author of more than 160 publications.
E-mail: AndrianovYS@volgatech.net

NEKHOROSHKOV Petr Arkadyevich – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Scientific Programs and Students' Research Work, Volga State University of Technology (Yoshkar-Ola, Russian Federation). The sphere of scientific interests is efficient forest exploitation, forest transport, optimization and modeling of forest transport, geo information and logistic systems. The author of 38 publications.
E-mail: NekhoroshkovPA@volgatech.net

D. V. Ivanov, Yu. S. Andrianov, P. A. Nekhoroshkov

III FESTIVAL OF SCIENCE IN THE REPUBLIC OF MARI EL, THE RESULTS OF THE YEAR

Key words: science festival; youth involvement in science sphere; scientific and technical creative work of the youth.

The results of the events of the third Festival of Science in the Republic of Mari El and the participation of Volga State University of Technology in the activities conducted on the central platforms of the third All-Russian Festival of Science in Lomonosov Moscow State University are presented.

**УКАЗАТЕЛЬ МАТЕРИАЛОВ,
ОПУБЛИКОВАННЫХ
В ЖУРНАЛЕ В 2013 ГОДУ**

**ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
И РАДИОТЕХНИКА**

В. А. Бурдин, И. В. Григоров. Применение нелинейных фазовых фильтров в высокоскоростных волоконно-оптических системах передачи со спектральным уплотнением

В. С. Дубровин, В. В. Никулин. Управляемый формирователь квадратурных гармонических сигналов

Д. В. Иванов, В. А. Иванов, М. И. Рябова, Н. Н. Михеева, Е. В. Катков. Искажения широкополосного радиосигнала в ионосфере, вызванные нелинейной частотной дисперсией

О. Г. Морозов, М. Р. Нургазизов, А. А. Талипов, А. А. Василец, П. Е. Денисенко. Измерение мгновенной частоты СВЧ-радиосигналов в оптическом диапазоне на основе преобразования «частота-амплитуда» в волоконной решётке Брэгга с фазовым π -сдвигом

Н. В. Рябова, М. И. Бастрасова. Энергетический выигрыш при использовании потока смены частот на автоматизированных ионосферных радиоприемниках

Н. С. Хохлов, А. В. Сидоров. Оценка устойчивости системы радиосвязи и управления к деструктивным электромагнитным воздействиям

А. А. Чернов. Обобщенный алгоритм синхронизации терминалов ЛЧМ-ионозонда

Л. Ф. Черногор, С. В. Кацко. Возмущение параметров ионосферного канала распространения радиоволн в течение геокосмических бурь

А. Ю. Чернышев, В. Г. Шибанаев. Обеспечение тактовой синхронизации в цифровых системах передачи на основе многоуровневых кодов с внутренней избыточностью

Ю. В. Ясюкевич, А. А. Мыльникова, В. В. Демьянов, В. А. Иванов, Н. В. Рябова, А. В. Зувев, М. И. Рябова, А. А. Кислицын. Суточная динамика вертикального полного электронного содержания над городами Иркутск и Йошкар-Ола по данным GPS/ГЛОНАСС и модели IRI-2012

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И ИНФОРМАТИКА**

Н. П. Вашкевич, С. А. Зинкин, Н. С. Карамышева. Облачная платформа для реализации агентно-ориентированных метакомпьютерных систем

**LIST OF MATERIALS
PUBLISHED
IN THE JOURNAL IN 2013**

**TELECOMMUNICATION
AND RADIO ENGINEERING**

V. A. Burdin, I. V. Grigorov. Application of nonlinear phase filters in high-speed, fibre-optical transmission systems with the spectral multiplex

V. S. Dubrovin, V. V. Nikulin. Controlled shaper of quadrature harmonic signals

D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, M. I. Ryabova, N. N. Miheeva, E. V. Katkov. Broadband signal distortion in the ionosphere, caused by nonlinear frequency dispersion

O. G. Morozov, M. R. Nurgazizov, A. A. Talipov, A. A. Vasilets, P. E. Denisenko. Instantaneous frequency measurement of microwave radio signals in the optical range based on the «frequency-amplitude» transformation in a fibre bragg grating with a phase π -shift

N. V. Ryabova, M. I. Bastrakova. Energy gain when using the flow of the frequency change on automated ionospheric radio lines

N. S. Hohlov, A. V. Sidorov. Estimation of radio communication and control system resistance to destructive electromagnetic effect

A. A. Chernov. Generalized algorithm of the synchronization of LFM-ionosonde terminals

L. F. Chernogor, S. V. Katsko. The disturbance of parameters of ionospheric radio waves propagation channel during of geospace storms

A. Yu. Chernyshev, V. G. Shibanaev. Clock synchronization support in digital systems of transmission on the basis of multilevel codes with built-in redundancy

Yu. V. Yasukevich, A. A. Mylnikova, V. V. Demyanov, V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, A. V. Zuev, M. I. Ryabova, A. A. Kislitsin. Diurnal variation of vertical total electron content over the cities irkutsk and yoshkar-ola according to the data of GPS/GLONASS and IRI-2012 model

**COMPUTER ENGINEERING
AND INFORMATION TECHNOLOGY**

N. P. Vashkevich, S. A. Zinkin, N. S. Karamyшева. The cloud platform for the implementation of agent-oriented metacomputer systems

А. В. Горохов, А. В. Маслобоев, А. Г. Олейник. Технология формирования спецификаций среды имитационного моделирования задач управления

3

A. V. Gorokhov, A. V. Masloboev, A. G. Oleynik. Technology for the formation of specifications of control problem simulation environment

А. О. Евдокимов, А. В. Зувев, А. А. Кислицын. Комплексирование алгоритмов обработки радионавигационных данных и анализа изображений для корректировки маршрута движения наземного транспортного средства

2

A. O. Evdokimov, A. V. Zuev, A. A. Kislitsin. Complexation of radio-navigation data processing algorithms and image analysis for land-based vehicle route correction

А. Г. Коробейников, С. Ю. Блинов, А. В. Лейман, Г. Л. Маркина, И. М. Кутузов. Алгоритм определения спамности документов на базе фейеровских отображений

2

A. G. Korobeynikov, S. Yu. Blinov, A. V. Leyman, G. L. Markina, I. M. Kutuzov. Algorithm of spam document detection on the basis of feyer mappings

А. Н. Леухин, А. С. Петухов, Н. А. Коковихина. Система шифрования с открытым распределением ключей на основе пр-полной задачи в некоммутативных группах, индуцированных алгебрами Клиффорда-Грассмана

1

A. N. Leukhin, A. S. Petukhov, N. A. Kokovikhina. Encryption system with open distribution of keys based on np-complete problem in noncommutative groups induced by Clifford and Grassmann algebras

Н. В. Парсаев, А. Н. Леухин, Д. В. Гайворонский. Новые р-фазные унимодулярные дельта-коррелированные последовательности

1

N. V. Parsaev, A. N. Leukhin, D. V. Gaivoronsky. New p-phase unimodular delta-correlated sequences

А. А. Роженцов, К. В. Морозовский, А. А. Баев. Оптимизация вычислительных операций модифицированного трехмерного обобщенного преобразования Хоха

1

A. A. Rozhentsov, K. V. Morozovsky, A. A. Baev. Optimization of computing operations of the modified three-dimensional generalized Hough transform

Д. Г. Хафизов, А. О. Евдокимов. Анализ методов оценки параметров вращений пространственных групповых точечных объектов

1

D. G. Hafizov, A. O. Evdokimov. Analysis of estimation methods of rotational variables of spatial group point objects

Р. Г. Хафизов, Т. В. Яранцева, Т. П. Киселева, А. М. Суслова. Распознавание изображений со случайной формой

2

R. G. Hafizov, T. V. Yarantseva, T. P. Kiseleva, A. M. Suslova. Recognition of images with a random shape

ЭЛЕКТРОНИКА

О. Ш. Даутов, Ибрахим Салем. Исследование диаграммы направленности и частоты согласования прямоугольной щелевой антенны, покрытой слоем диэлектрика и возбуждаемой симметричной полосковой линией в объемном резонаторе

3

O. Sh. Dautov, Ibrahim Salem. Research on the directional pattern and frequency matching of the rectangular slot antenna, covered by a dielectric layer and excited by the balanced strip line in a cavity resonator

Д. В. Иванов, В. А. Иванов, Н. В. Рябова, А. А. Елсуков, М. И. Рябова, А. А. Чернов. SDR-ионозонд с непрерывным ЛЧМ-сигналом на платформе USRP

3

D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, A. A. Elsuikov, M. I. Ryabova, A. A. Chernov. SDR-ionosonde with continuous LFM-signal on the platform USRP

Д. И. Касимова, А. А. Кузнецов, П. П. Крыницкий, О. Г. Морозов, И. И. Нуреев, А. Ж. Сахабутдинов, С. М. Кучев, А. В. Петров. Оценка возможностей применения волоконных решеток Брэгга с гауссовым профилем отражения в качестве датчика температуры

2

D. I. Kasimova, A. A. Kuznetsov, P. P. Krynitsky, O. G. Morozov, I. I. Nureev, A. Zh. Sahabutdinov, S. M. Kuchev, A. V. Petrov. Estimation of possibilities of the application of fibre bragg gratings with a gaussian reflection profile as a temperature sensor

Т. А. Лежнина, В. В. Роженцов. Время обучения измерению разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий

1

T. A. Lezhnina, V. V. Rozhentsov. Time of training in measurement of eyesight resolution by light flicker frequency

А. В. Мороз. Система контроля кристаллического строения пленок нитрида алюминия в процессе их получения

2

A. V. Moroz. Control system of the crystal structure of aluminum nitride films in the process of their production

И. В. Рябов, Д. А. Чернов. Применение процессора 1892BM10Я для повышения точности

1

I. V. Ryabov, D. A. Chernov. Application of processor 1892BM10Я for the increase in the accuracy

ELECTRONICS

определения координат глобальной навигационной системы

Н. М. Скулкин, Е. В. Михеева. Стабилизация металлокерамических спаев на этапе металлизации пластичных заготовок коммутационных плат

2

НОВИНКИ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ. ОБЗОРЫ. КОНФЕРЕНЦИИ. ВАЖНЫЕ ДАТЫ

В. А. Иванов, Ю. С. Андрианов, Н. В. Рябова, П. А. Нехорошков. Первый шаг в науку школьников Приволжского федерального округа

Д. В. Иванов, Ю. С. Андрианов, П. А. Нехорошков. III Фестиваль науки в Республике Марий Эл, итоги года

И. И. Попов, А. В. Мороз. Новые горизонты фотоники и нанoeлектроники

1

3

2

of the determination of position of a global navigation system

N. M. Skulkin, E. V. Miheeva. Stabilization of metal-ceramic seals at the stage of the metallization of plastic blanks of switching boards

THE NOVELTIES IN THE FIELD OF ENGINEERING AND TECHNOLOGIES. REVIEWS.CONFERENCES. IMPORTANT DATES

V. A. Ivanov, Yu. S. Andrianov, N. V. Ryabova, P. A. Nekhoroshkov. Schoolchildren of the Volga federal district take the first step towards science

D. V. Ivanov, Yu. S. Andrianov, P. A. Nekhoroshkov. III Festival of science in the Republic of Mari El, the results of the year

I. I. Popov, A. V. Moroz. New horizons of photonics and nanoelectronics

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция журнала «Вестник Поволжского государственного технологического университета» принимает к публикации статьи, соответствующие профилю издания, объемом не более 15 страниц, включая рисунки.

Статья должна содержать только оригинальный материал, отражающий результаты завершённых исследований автора, ранее не публиковавшихся.

К печати принимаются материалы, которые не опубликованы и не переданы в другие редакции. Рукописи проходят обязательное рецензирование. В «Вестнике ...» печатаются только статьи, получившие положительные рецензии.

Отклоненные в результате рецензирования материалы возвращаются в одном экземпляре (с приложением копии рецензии).

Требования к оригиналам предоставляемых работ*Структура научной статьи*

1. Аннотация (3–4 предложения).
2. Ключевые слова или словосочетания (не более 10) отделяются друг от друга точкой с запятой.
3. Введение (оценка состояния вопроса, основанная на обзоре литературы с мотивацией актуальности; выявленное противоречие, позволяющее сформулировать проблемную ситуацию).
4. Цель работы, направленная на преодоление проблемной ситуации (1–2 предложения).
5. Решаемые задачи, направленные на достижение цели.
6. Математическое, аналитическое или иное моделирование.
7. Техника эксперимента и методика обработки или изложение иных полученных результатов.
8. Интерпретация результатов или их анализ.
9. Выводы, отражающие новизну полученных результатов, показывающих, что цель, поставленная в работе, достигнута.

Требования к оформлению статьи

Статья должна быть предоставлена в электронном виде и компьютерной распечатке (2 экз.) на бумаге формата А4. Шрифт Times New Roman, размер шрифта 12 пт, межстрочный интервал одинарный. Поля: внутри – 2 см, верхнее, нижнее, снаружи – 3 см (зеркальные поля), абзацный отступ первой строки на 0,75 см.

На первой странице статьи слева печатается УДК (размер шрифта 12 пт, прямой, светлый) без отступа. Ниже, справа – инициалы, фамилия автора (размер шрифта 14 пт, курсив, полужирный). Ниже, по центру – название статьи (размер шрифта 14 пт, прямой, полужирный, прописной).

Далее размещается аннотация (выравнивание по ширине, размер шрифта 12 пт, курсив, отступ слева и справа 1 см). Аналогично оформляются ключевые слова. Аннотация и ключевые слова статьи предоставляются на **русском и английском языках**.

Также необходимо предоставить **авторское резюме** статьи на русском и английском языках (не менее 250–300 слов).

Формулы и отдельные символы набираются с использованием редакторов формул Microsoft Equation или Math Type (не вставлять формулы из пакетов MathCad и MathLab, а также не следует использовать стандартную вставку математических формул или построение собственных формул с помощью библиотеки математических символов).

Иллюстрации. Схемы, графики, диаграммы и т.п. принимаются только в векторных форматах (Word, Excel, Visio, CorelDraw, Adobe Illustrator и др.). Графический материал принимается только в черном-белом изображении, должен быть четким и не требовать перерисовки. Графики должны выделяться линиями разного стиля (**не делать их цветными**) или отмечаться цифрами. Фотографии и скриншоты должны выполняться в растровых форматах (tiff, bmp, png и др.) достаточного расширения (300 dpi) и четкости.

Таблицы и рисунки должны быть вставлены в текст после абзацев, содержащих ссылку на них.

Размеры иллюстраций не должны превышать размеров текстового поля (не более 15 см).

Список литературы оформляется согласно порядку ссылок в тексте (где они указываются в квадратных скобках) и обязательно в соответствии с ГОСТ 7.1-2003 в двух вариантах:

- 1) на русском;
- 2) на языке оригинала латинскими буквами (References). Если русскоязычная статья была переведена на английский язык и опубликована в английской версии, то необходимо указывать ссылку из переводного источника. Библиографические описания российских публикаций составляются в следующей последовательности: авторы (транслитерация), перевод названия статьи (монографии) в транслитерированном варианте, перевод названия статьи (монографии) на английский язык в квадратных скобках, название источника (транслитерация, курсив), выходные данные с обозначениями на английском языке.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Статья должна быть подписана автором(ами). После подписи автора и даты указываются его фамилия, имя, отчество (полностью), ученая степень, должность, место работы, область научных интересов, количество опубликованных работ, телефон, e-mail, домашний адрес.

К статье прилагаются следующие **документы**:

- авторское заявление с указанием рубрики журнала;
- рекомендация кафедры;
- экспертное заключение о возможности опубликования;

Материалы, не соответствующие вышеуказанным требованиям, не рассматриваются.

Адрес для переписки: 424000 Йошкар-Ола, пл. Ленина 3, ПГТУ, редакция журнала «Вестник ПГТУ», e-mail: vestnik@volgatech.net

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Подробнее – на сайте ПГТУ: <http://www.volgatech.net>

Подписка на журнал осуществляется по «Объединенному каталогу. Пресса России. Газеты и Журналы» (подписной индекс **42916**, тематический указатель: Научно-технические издания. Известия РАН. Известия вузов).