



№1-2019

ISSN 1999-9429

ИЗВЕСТИЯ ЮФУ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Перспективы применения робототехнических комплексов
- Системы управления и моделирования
- Системы энергетики, приводная и датчиковая аппаратура
- Связь, навигация и наведение
- Техническое зрение

ИЗВЕСТИЯ ЮФУ. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ IZVESTIYA SFedU. ENGINEERING SCIENCES

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

ПИ № ФС77-28889 от 12.07.2007

Научно-технический и прикладной журнал

Издается с 1995 года, до середины 2007 года под названием «Известия ТРТУ»

Подписной индекс 41970

№ 1 (203). 2019 г.

Тематический выпуск

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ И ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ

Журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».

Редакционный совет

Каляев И.А. (председатель); Курейчик В.М. (зам. председателя); Бородинский И.М. (ученый секретарь); Абрамов С.М.; Агеев О.А.; Бабенко Л.К.; Вагин В.Н.; Веселов Г.Е.; Гонкальвес Ж.; Колесников А.А.; Коноплев Б.Г.; Курейчик В.В.; Левин И.И.; Макаревич О.Б.; Маркович И.И.; Микрин Е.А.; Никитов С.А.; Обуховец В.А.; Осипов Г.С.; Панатов Г.С.; Панич А.Е.; Петров В.В.; Петровский А.Б.; Пшихопов В.Х.; Редько В.Г.; Румянцев К.Е.; Саламах М.; Солдатов А.В.; Стемповский А.Л.; Сухинов А.И.; Сысоев В.В.; Тарасов С.П.; Фрадков А.Л.; Хашемипур М.; Чаплыгин Ю.А.; Чердниченко Д.И.; Четверушкин Б.Н.; Чичков Б.Н.

Учредитель Южный федеральный университет.

Издатель Южный федеральный университет.

Ответственный за выпуск Пшихопов В.Х.

Технический редактор Ярошевич Н.В.

Оригинал-макет выполнен Ярошевич Н.В.

Подписано к печати 18.07.2019. Формат 70×108 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Офсетная печать. Усл. печ. л. – 27,7. Уч.-изд. л. – 25,4.

Заказ № 7151. Тираж 250 экз.

Адрес издателя: 344091, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1. Тел. 8(863)2478051.

Адрес типографии: Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕД ЦЕНТРА ЮФУ. 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел (863) 247-80-51

Адрес редколлегии: 347928, г. Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44, Ю Д-225, телефон/факс: +7(8634)371071. E-mail: onti@tgn.sfedu.ru, <http://izv-tn.tti.sfedu>

16+

Цена свободная

ISSN 1999-9429 (Print)

ISSN 2311-3103 (Online)

© Южный федеральный университет, 2019



СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ I. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

В.В. Чернышев, В.В. Арыканцев СТРУКТУРА ЭНЕРГОЗАТРАТ ШАГАЮЩИХ МАШИН И РОБОТОВ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ БОЛЬШИХ ТЯГОВЫХ УСИЛИЙ.....	6
Н.А. Рудианов, В.С. Хрущев ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ.....	18
К.З. Лаптев, А.В. Багницкий ЗАДАЧА ДЛЯ АНПА ДАЛЬНОГО РАДИУСА ДЕЙСТВИЯ ПО ПОИСКУ ПОЛЫНЕЙ ПРИ ПЛАВАНИИ В АРКТИЧЕСКИХ РАЙОНАХ	28
В.С. Тарадонов, А.П. Блинков, И.В. Кожемякин, Д.Н. Шаманов КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ОБЛИК РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО ПОДВОДНО-НАДВОДНОГО АППАРАТА ПОВЫШЕННОЙ АВТОНОМНОСТИ С ИЗМЕНЯЕМОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ КОРПУСА	38
В.К. Абросимов, М.В. Гайдин ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ СИТУАЦИОННОЙ ОСВЕДОМЛЕННОСТИ ГРУППОЙ АВТОНОМНЫХ РОБОТОВ В УСЛОВИЯХ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ УГРОЗ	49
А.Р. Гайдук, А.Н. Каркищенко, В.Х. Пшихопов О ВЛИЯНИИ РТК ВН НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВВТ.....	61
И.А. Пшенокова, О.В. Нагоева, З.А. Сундуков ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИИ РАСПОЗНАВАНИЯ И ПОНИМАНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ САМООБУЧАЮЩИМСЯ РОБОТОМ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ НЕЙРОКОГНИТИВНЫХ АРХИТЕКТУР	75
В.Ю. Дорофеев, А.А. Курносков, А.В. Лопота, С.А. Половко ГЛОБАЛЬНЫЕ ЦЕЛИ, ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, МЕХАНИЗМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ, ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИЕ ЭФФЕКТЫ И РАЦИОНАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ РАЗРАБОТКИ RIS-СИСТЕМ	85
С.Ф. Яцун, В.И. Королёв, В.Е. Бондырев, Б.В. Лушников РАЗВИТИЕ МАЛЫХ И СРЕДНИХ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ БИОНИЧЕСКИХ (РЫБОПОДОБНЫХ) ПРИНЦИПОВ ДВИЖЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ВМФ РФ.....	98

РАЗДЕЛ II. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

П.Л. Новиков, К.В. Павский, А.В. Двуреченский МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АТОМНОЙ ДИФФУЗИИ НА СТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОДЛОЖКАХ КРЕМНИЯ	110
А.М. Винограденко, А.В. Пасхальный ЭЛЛИПСОИДАЛЬНАЯ АДАПТАЦИЯ ОБЛАСТИ ДОПУСКОВ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ	118
О.В. Карсаев АВТОНОМНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ЗАДАЧ НАБЛЮДЕНИЯ В ГРУППИРОВКАХ СПУТНИКОВ	129
В.И. Городецкий ПОВЕДЕНЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КИБЕР-ФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ГРУППОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ: ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ	144
В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев, В.В. Соловьев ГИБРИДНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ БЕЗЭКИПАЖНОГО СУДНА В ЗАДАННУЮ ТОЧКУ	163

Е.Я. Рубинович ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ИГРА ПООЧЕРЕДНОГО ПРЕСЛЕДОВАНИЯ С КРИТЕРИЕМ «ПРОМАХ ПО ИСТИННОЙ ЦЕЛИ».....	176
Г.В. Горелова МОДЕЛИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И УПРАВЛЕНИИ ОБЪЕКТАМИ В УСЛОВИЯХ ВЕРОЯТНОСТНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ	188
В.Ф. Петров, О.В. Петров, А.И. Терентьев, С.Б. Симонов, Д.Н. Корольков ОПЫТ ПОСТРОЕНИЯ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННОГО ИНТЕРФЕЙСА ОПЕРАТОРА ДИСТАНЦИОННОГО И СУПЕРВИЗОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ РТС.....	199

РАЗДЕЛ III. СИСТЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ, ПРИВОДНАЯ И ДАТЧИКОВАЯ АППАРАТУРА

В.В. Костенко, А.Ю. Толстоногов ЗАДАЧА ДЕКОМПОЗИЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ АНПА С УЧЕТОМ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ОГРАНИЧЕНИЙ МАРШЕВЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ	210
Л.А. Мартынова МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА БОЛЬШОЙ ДАЛЬНОСТИ	223

РАЗДЕЛ IV. СВЯЗЬ, НАВИГАЦИЯ И НАВЕДЕНИЕ

И.И. Маркович ЦИФРОВАЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В МНОГОЛУЧЕВОМ ГИДРОЛОКАТОРЕ МОРСКОГО ПОДВОДНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА	239
В.Т. Минлигареев, А.В. Алексеева, Ю.М. Качановский, А.Ю. Репин, Е.Н. Хотенко КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ.....	248
С.А. Савельев, И.В. Соловьев АЛГОРИТМ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ УГЛОМЕРНОЙ НАП ГНСС И ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОРИЕНТАЦИИ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА	258

РАЗДЕЛ V. ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗРЕНИЕ

В.А. Бондаренко, Г.Э. Каплинский, В.А. Павлова, В.А. Тупиков, Н.Г. Холод НЕЙРОСЕТЕВЫЕ АЛГОРИТМЫ В ЗАДАЧАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ И СОПРОВОЖДЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ВСТРАИВАЕМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЕЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ.....	271
В.А. Бондаренко, Г.Э. Каплинский, В.А. Павлова, В.А. Тупиков МЕТОД ПОИСКА И СОПОСТАВЛЕНИЯ КЛЮЧЕВЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ И СОПРОВОЖДЕНИЯ ОБЪЕКТОВ	281
К.И. Морев МЕТОД СОПОСТАВЛЕНИЯ ОБЛАКОВ ОСОБЫХ ТОЧЕК ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ЗАДАЧ ТРЕКИНГА, ОСНОВАННЫЙ НА ИНТУИЦИОНИСТСКОЙ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКЕ.....	293
М.Ю. Бутенко МЕТОД АППРОКСИМАЦИИ ОБЛАКА ТОЧЕК СТЗ ДЛЯ СТАЦИОНАРНОЙ 2D СЦЕНЫ	306

CONTENT

SECTION I. PROSPECTS OF APPLICATION OF ROBOTIC SYSTEMS

V.V. Chernyshev, V.V. Arykantsev THE STRUCTURE OF ENERGY CONSUMPTION OF WALKING MACHINES AND ROBOTS DURING REALIZATION OF LARGE TRACTIVE EFFORT	7
N.A. Rudianov, V.S. Khrushchev FUNCTIONAL APPROACH TO THE DESIGN OF SPECIALIZED ROBOTIC COMPLEXES	19
K.Z. Laptev, A.V. Bagnitckii THE PROBLEM OF ICE-HOLES SEARCHING BY LONG-RANGE AUV SAILING IN THE ARCTIC AREAS	28
V.S. Taradonov, A.P. Blinkov, I.V. Kozhemyakin, D.N. Shamanov THE CONCEPTUAL IMAGE OF THE ROBOTIC UNDERWATER – SURFACE VEHICLE OF THE INCREASED AUTONOMY WITH CHANGEABLE GEOMETRY OF THE HULL	39
V.K. Abrosimov, M.V. Gaydin THE SITUATIONAL AWARENESS MODEL BY A GROUP OF AUTONOMOUS ROBOTS IN THE POTENTIAL THREATS ENVIRONMENT	49
A.R. Gaiduk, A.N. Karkischenko, V.Kh. Pshikhopov ABOUT INFLUENCE OF THE MILITARY RTK ON EFFICIENCY USE OF AME	62
I.A. Pshenokova, O.V. Nagoeva, Z.A. Sundukov SIMULATION MODEL OF RECOGNITION AND UNDERSTANDING OF STATIC OBJECTS BY A SELF-LEARNING ROBOT BASED ON MULTI-AGENT NEUROCOGNITIVE ARCHITECTURES	75
V.Yu. Dorofeev, A.A. Kurnosov, A.V. Lopota, S.A. Polovko GLOBAL AIMS, DESIGN PRINCIPLES, INTERACTION MECHANISMS, DESTABILIZING EFFECTS AND RATIONAL ORGANIZATION OF RIC- SYSTEM DEVELOPMENT	85
S.F. Jatsun, V.I. Korolev, V.E. Bondyrev, B.V. Lushnikov THE DEVELOPMENT OF SMALL AND MEDIUM-SIZED AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES BASED ON BIONIC (ICHTHYOID) OF THE PRINCIPLES OF MOVEMENT FOR SOLUTION OF TASKS OF SPECIAL FORCES OF THE RUSSIAN NAVY	99

SECTION II. CONTROL AND SIMULATION SYSTEMS

P.L. Novikov, K.V. Pavskiy, A.V. Dvurechenskiy MOLECULAR DYNAMICS SIMULATIONS USING HIGHLY EFFECTIVE ALGORITHMS FOR STUDY OF ATOMIC DIFFUSION ON PRE-PATTERNED SI SUBSTRATES	111
A.M. Vinogradenko, A.V. Pashal'niy ELLIPSOIDAL ADAPTATION OF THE FIELD OF TOLERANCES MULTIVARIABLE SYSTEMS	118
O.V. Karsaev AUTUNOMOUS PLANNING OF OBSERVATION TASKS IN SATELLITE CONSTELLATION	130
V.I. Gorodetsky BEHAVIORAL MODEL FOR CYBER-PHYSICAL SYSTEM FOR GROUP CONTROL: THR BASIC BEHAVIOR ONTOLOGY CONCENTS	144
V.Kh. Pshikhopov, M.Y. Medvedev, V.V. Solovjev A HYBRID CONTROL SYSTEM OF MOVEMENT OF UNMANNED VESSEL TO A GIVEN POINT	163
E.Ya. Rubinovich A DIFFERENTIAL GAME OF ALTERNATE PURSUIT WITH CRITERION «A MISS ON THE TRUE TARGET»	177

G.V. Gorelova	
MODELS OF DECISION-MAKING WHEN DESIGNING AND MANAGING THE OBJECTS UNDER CONDITIONS PROBABILITY UNCERTAINTY	189
V.F. Petrov, O.V. Petrov, A.I. Terentev, S.B. Simonov, D.N. Korolkov	
IMPLEMENTATION EXPERIENCE OF OPERATOR'S HUMAN-MACHINE INTERFACE FOR REMOTE AND SUPERVISORY CONTROL OF ROBOT MOTION.....	200

SECTION III. ENERGY SYSTEM, DRIVE AND SENSOR EQUIPMENT

V.V. Kostenko, A.Yu. Tolstonogov	
AUV'S MOTION CONTROL ALLOCATION WITH VARIABLE PROPERTIES OF PROPULSION SYSTEM	210
L.A. Martynova	
RESULTS OF WORK MODELING HYBRID ENERGY SYSTEM LONG-DEPTHS AUTONOMOUS UNDERWATER APPARATUS	223

SECTION IV. COMMUNICATION, NAVIGATION AND GUIDANCE

I.I. Markovich	
DIGITAL SPACE-TIME SIGNAL PROCESSING IN MULTI-BEAM SONAR OF UNDERWATER ROBOTIC SYSTEM	239
V.T. Minligareev, A.V. Alekseeva, Y.M. Kachanovsky, A.Y. Repin,	
E.N. Khotenko	
CARTOGRAPHIC SECURITY OF MAGNETOMETRIC NAVIGATION SYSTEMS OF ROBOTIC COMPLEXES	249
S.A. Savelyev, I.V. Solovyev	
AN ALGORITHM FOR INFORMATION FUSION OF GNSS/GYROS ATTITUDE SENSORS OF A MOVING VEHIHLCLE.....	259

SECTION V. TECHNICAL VISION

V.A. Bondarenko, G.E. Kaplinskiy, V.A. Pavlova, V.A. Tupikov, N.G. Holod	
NEURAL NETWORK ALGORITHMS IN THE PROBLEMS OF AUTOMATIC RECOGNITION AND TRACKING OF OBJECTS FOR OPTICAL-ELECTRONIC SYSTEMS EMBEDDED PLATFORMS	272
V.A. Bondarenko, G.E. Kaplinskiy, V.A. Pavlova, V.A. Tupikov	
A METHOD FOR DETECTION AND MATCHING OF IMAGE KEYPOINTS FOR OBJECT RECOGNITION AND TRACKING	281
K.I. Morev	
THE METHOD OF FEATURE MATCHING FOR TRACKING TASKS BASED ON INTUITIONISTICS FUZZY SETS	293
M.Yu. Butenko	
METHOD OF APPROXIMATION OF A POINT CLOUD OF A TECHNICAL VISION SYSTEM FOR A STATIONARY 2D SCENE	307

Раздел IV. Связь, навигация и наведение

УДК 681.883

DOI 10.23683/2311-3103-2019-1-239-248

И.И. Маркович

ЦИФРОВАЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В МНОГОЛУЧЕВОМ ГИДРОЛОКАТОРЕ МОРСКОГО ПОДВОДНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Рассматриваются особенности цифровой пространственно-временной обработки сигналов (ПВОС) в многолучевых гидролокаторах (МЛГ) морских подводных робототехнических комплексов (РТК), предназначенных для мониторинга подводной обстановки по направлению движения подводного аппарата и обнаружения потенциально опасных для навигации препятствий. Приведены параметры впередсмотрящего лоатора препятствий для универсального многоканального буксируемого комплекса глубоководного необитаемого подводного аппарата, созданного в Научно-конструкторском бюро цифровой обработки сигналов Южного федерального университета. Показывается, что, при использовании зондирующих сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), позволяющих обеспечить высокое разрешение и заданную дальность, в случае обнаружения неизвестных движущихся подводных объектов появляются дополнительные погрешности измерения дальности, обусловленные влиянием эффекта Доплера на частоту отраженных сигналов. Это приводит к повышению навигационной опасности эксплуатации автономных и телеуправляемых, необитаемых и обитаемых подводных аппаратов различного назначения. Целью работы является оценка дополнительных погрешностей измерения дальности и синтез алгоритмов цифровой ПВОС в МЛГ, позволяющих исключить указанный недостаток и повысить безопасность навигации морских подводных РТК. В статье рассматривается алгоритм цифровой ПВОС, позволяющий при работе с движущимися потенциально опасными для навигации подводными объектами повысить точность определения дистанции до них, а также определять их скорость и направление движения относительно подводных аппаратов. Информация о скорости и направлении движения обнаруженных подводных объектов позволит дополнительно повысить навигационную безопасность и расширить функциональные возможности морских подводных РТК различного назначения. Приводится структурная схема алгоритма и дается описание ее функционирования во впередсмотрящих МЛГ морских подводных РТК различного назначения.

Морской подводный робототехнический комплекс; многолучевой гидролокатор; цифровая пространственно-временная обработка сигналов; согласованный фильтр; сигнал с линейной частотной модуляцией; формирователь характеристики направленности.

I.I. Markovich

DIGITAL SPACE-TIME SIGNAL PROCESSING IN MULTI-BEAM SONAR OF UNDERWATER ROBOTIC SYSTEM

The peculiarities of digital space-time signal processing (DSTSP) in multi-beam sonar (MBS) of marine underwater robotic systems (URS) for monitoring the situation in the direction of underwater vehicle movement and detecting potentially dangerous for navigation obstacles are considered. Specifications of the forward looking sonar for universal multichannel towed complex of the deep-water unmanned underwater vehicle, created in the Scientific and Design Bureau of Digital Signal Processing of the Southern Federal University, are given. It is shown that when using the probing signals with linear frequency modulation (LFM) to achieve high resolution and

given range, in the case of unknown moving underwater objects detection extraneous errors of distance measurement occur due to the Doppler effect influence on the frequency of reflected signals. This leads to an increased navigational hazard of various purposes autonomous and remotely controlled, manned and unmanned underwater vehicle operation. The purpose of this paper is to estimate additional errors of distance measurement and synthesis of DSTSP algorithms in the MBS, which allow excluding the specified drawback and increasing the safety of URS navigation. The article considers the algorithm of DSTSP, which allows operation with moving underwater objects, potentially dangerous for navigation, to improve the accuracy of determining the distance to them, as well as to determine their speed and direction of movement relative to URS. The speed and direction of the detected underwater objects motion will allow increasing the navigation safety and expanding the functional capabilities of marine URS of various purposes. Structural scheme of the algorithm and description of its functioning in forward looking MBS marine submarine RTK for different purposes is given.

Marine underwater robotic complex; multi-beam sonar; digital space-time signal processing; signal detection filter; signal with linear frequency modulation; beam-pattern generator.

Введение. Одним из перспективных направлений развития науки и техники сегодня является разработка технологий создания морских подводных робототехнических комплексов (РТК) двойного назначения, позволяющих успешно решать задачи изучения Мирового океана, освоения его природных ресурсов, охраны протяженных морских районов, проведения поисково-спасательных работ в глубоководных, опасных и недоступных для других средств регионов, а также вопросы обеспечения национальной безопасности Российской Федерации.

Разнообразие проблем, стоящих перед учеными и исследователями, нефтяниками и газовиками, спасателями и военными привело к появлению автономных и телеуправляемых, обитаемых и необитаемых, больших и малых, глубоководных и рассчитанных на малые глубины морских подводных аппаратов, актуальность разработки которых очевидна.

Важнейшим прибором в составе морских подводных РТК различного назначения является вперёдсмотрящий многолучевой гидролокатор (МЛГ), предназначенный для мониторинга подводной обстановки по направлению движения подводного аппарата и обнаружения потенциально опасных для навигации препятствий.

В современных МЛГ, как и в других гидроакустических системах и комплексах различного назначения, широко используется цифровая пространственно-временная обработка сигналов (ПВОС), методы и алгоритмы которой определяются конкретными требованиями к решению поставленных задач [1–10]. Так для решения задач мониторинга подводной обстановки по ходу движения подводных морских РТК с целью обнаружения потенциально опасных для навигации препятствий и других неизвестных подводных объектов успешно используются разработанные алгоритмы цифровой ПВОС [5, 6, 11, 12].

В МЛГ в передающем тракте формируются и излучаются зондирующие сигналы, а в приемном тракте после предварительной обработки сигнал поступает в формирователь статического веера характеристики направленности (ХН). По запаздыванию принятого сигнала определяется дистанция до цели, а по ХН – направление прихода сигнала. Обработка производится в реальном масштабе времени для обеспечения высокой оперативности наблюдения за подводной обстановкой по ходу движения подводного аппарата. Для обнаружения препятствий в МЛГ широко используются сложные сигналы с большой базой – сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), позволяющие получить одновременно высокое разрешение по дальности и требуемую дальность обнаружения.

В Научно-конструкторском бюро цифровой обработки сигналов Южного федерального университета создан вперёдсмотрящий локатор препятствий для универсального многоканального буксируемого комплекса глубоководного необитае-

мого подводного аппарата, в котором используются зондирующие ЛЧМ сигналы с несущей частотой в диапазоне 150÷200 кГц, длительностью до 8 мс и девиацией частоты до 10 кГц [5, 6, 11, 12].

Постановка задачи. На примере используемых в МЛГ зондирующих ЛЧМ сигналов покажем ухудшение точности измерения дальности до неизвестного обнаруженного движущегося объекта по сравнению с неподвижным препятствием, потенциальная точность измерения которого при данной полосе сигнала составляет величину менее 10 см.

Для этого воспользуемся изображением сечения в виде эллипса функции неопределенности Вудворда на рис. 1, из которого следует, что тангенс угла наклона указанного сечения к оси абсцисс, равен частному от деления девиации частоты Δf_d на длительность сигнала T_c [13–15].

Отсюда следует, что сдвиг во времени $\pm \Delta t_V$ максимума отклика согласованного фильтра (СФ) приемника МЛГ, обусловленный движением обнаруженного неизвестного подводного объекта, движущегося со скоростью V до 30 узлов, может составить:

$$\pm \Delta t_V = f_{\text{доп}} \frac{T_c}{\Delta f_d} = \frac{2V}{c} f_0 \frac{T_c}{\Delta f_d} = (2,5 \div 3,3) \text{ мс}, \quad (1)$$

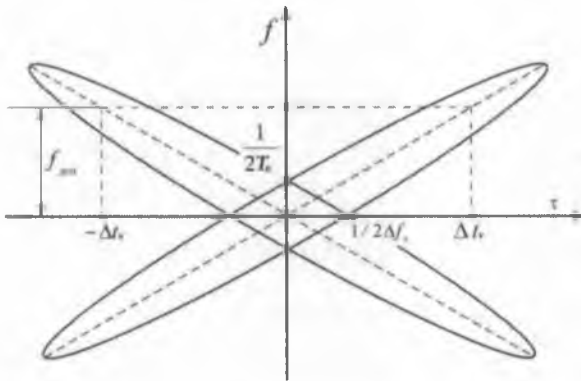


Рис. 1. Диаграммы функций неопределенности ЛЧМ сигналов с возрастающей и убывающей ЧМ

где c – скорость распространения звука в воде; $f_{\text{доп}}$ – доплеровский сдвиг частоты отраженного сигнала; f_0 – несущая частота зондирующего сигнала.

В этом случае, дополнительная погрешность измерения дальности до обнаруженного подводного объекта, движущегося с неизвестной скоростью, составит:

$$\pm \Delta D = \frac{c \Delta t_V}{2} = (1,9 \div 2,5) \text{ м}, \quad (2)$$

что может оказаться недопустимым для безопасного движения морского подводного РТК.

Поэтому задача разработки перспективного алгоритма цифровой ПВОС впересмотрящего МЛГ, позволяющего исключить указанные погрешности измерения дальности до движущихся потенциально опасных подводных объектов, является актуальной. Получение информации о параметрах движения указанных подводных объектов (например, скорости и направления движения) позволит дополнительно повысить навигационную безопасность РТК подводного базирования.

Для исключения погрешностей измерения дальности, обусловленных влиянием эффекта Доплера на частоту отраженного от движущегося подводного объекта сигнала, предлагается использовать в МЛГ зондирующие ЛЧМ сигналы с чередованием знака девиации частоты.

Из рис. 1, на котором приведены диаграммы сечений функций неопределенности ЛЧМ сигналов с возрастающей и убывающей мгновенной частотой заполнения, следует, что при постоянной скорости движения цели (например, приближающейся) из-за возникшего доплеровского сдвига несущей частоты отраженного сигнала $f_{\text{доп}}$ происходит дополнительный сдвиг отклика согласованного фильтра (СФ) во времени относительно момента, соответствующего истинной дистанции до цели: запаздывание – плюс Δt_V для сигнала с возрастающей ЛЧМ и опережение – минус Δt_V для сигнала с убывающей ЛЧМ.

Фиксируя моменты обнаружения двух эхосигналов от движущегося объекта в двух соседних зондированиях можно определить его уточненную дальность, а последовательность следования во времени эхосигналов позволит определить направление движения объекта.

Алгоритм работы МЛГ для мониторинга подводной обстановки можно пояснить с помощью приведенной на рис. 2 его обобщенной структурной схемы, состоящей из следующих устройств:

- ◆ аналого-цифровой преобразователь (АЦП) в каждом входном элементарном канале i , предназначенный для дискретизации и квантования отсчетов входных аналоговых эхосигналов промежуточной частоты (N_e – количество входных элементарных каналов);

- ◆ цифровой формирователь квадратурных составляющих (ЦФКС), содержащий умножитель на комплексную последовательность, два цифровых фильтра (ЦФ) низких частот и устройство децимации отсчетов сигнала [3, 16];

- ◆ объединенный фильтр (ОФ), содержащий согласованный фильтр (СФ), реализуемый во временной области с помощью ЦФ с конечной импульсной характеристикой (КИХ), ЦФ с заданной частотной характеристикой, необходимый для выполнения весовой обработки (ВО) сигналов в частотной области, и устройство децимации [17];

- ◆ формирователь характеристики направленности (ФХН), реализованный для используемых ЛЧМ сигналов во временной области фазовым методом с помощью умножителя на комплексные коэффициенты и сумматора [2];

- ◆ вычислитель модуля (ВМ) в каждом пространственном канале m , осуществляющий выделение огибающей сигнала (N_b – количество выходных пространственных каналов);

- ◆ вычислитель параметров объектов (ВПО), определяющий по результатам обработки эхосигналов двух соседних зондирований номер пространственного канала в секторе обзора, уточненную дальность, скорость и направление движения движущегося подводного объекта.

На рис. 2 приняты дополнительно следующие обозначения:

$x_i(nT)$ – последовательность отсчетов i -го элементарного канала;

$\tilde{x}_i(nT_1)$ – последовательность отсчетов комплексной огибающей (КО) сигнала в i -м канале;

$\tilde{x}_i^{0\Phi}(nT_2)$ – последовательность отсчетов входного сигнала ФХН;

$\tilde{y}_m(nT_1)$ – последовательность отсчетов выходного сигнала ФХН m -го пространственного канала;

$M_m(nT_1)$ – последовательность отсчетов выходного сигнала ВМ m -го пространственного канала.

МЛГ морского подводного РКТ с предлагаемым алгоритмом цифровой ПВОС работает следующим образом.

В каждом i -том входном элементарном канале аналоговый экосигнал $x_i(t)$ поступает последовательно в АЦП, ЦФКС и ОФ.

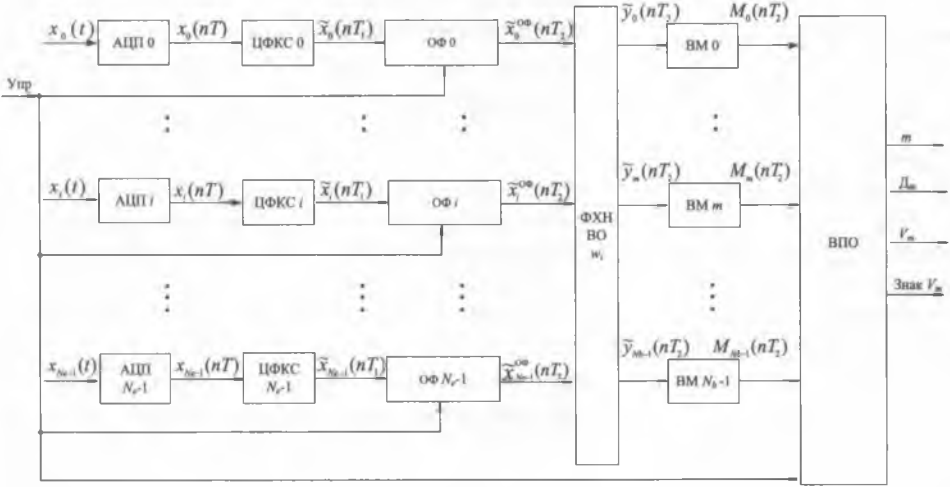


Рис. 2. Обобщенная структурная схема алгоритмов цифровой ПВОС МЛГ

В СФ объединенного фильтра во время четных зондирований СФ согласован с ЛЧМ сигналами с положительным знаком девиации частоты, а при нечетных зондированиях – с отрицательным знаком девиации частоты. ИХ фильтров отличаются лишь знаком мнимой части, который изменяется по командам управления, поступающим из МЛГ.

Сигнал на выходе СФ можно представить в виде свертки двух последовательностей отсчетов $\bar{x}_i(nT_1)$ и $\bar{h}^{СФ}(nT_1)$:

$$\bar{x}_i^{СФ}(nT_1) = \bar{x}_i(nT_1) \circledast \bar{h}^{СФ}(nT_1) = \sum_{l=0}^n \bar{x}_i(lT_1) \cdot \bar{h}^{СФ}((n-l)T_1),$$

где \circledast – обозначение операции свертки; $\bar{h}^{СФ}(nT_1)$ – импульсная характеристика СФ для комплексного входного сигнала:

$$\bar{h}^{СФ}(nT_1) = e^{-j \frac{\pi}{N_{c1} F_{д1}} \left(\frac{N_{c1} - n}{2} \right)^2},$$

где N_{c1} – количество отсчетов в дискретном зондирующем сигнале; $T_1 = 1/F_{д1}$ – период и частота дискретизации.

ВО в частотной области для подавления боковых лепестков отклика СФ во временной области осуществляется с помощью дополнительного ЦФ. Одним из методов синтеза требуемого ЦФ, является метод частотных выборок, позволяющий проектировать КИХ-фильтры с произвольной частотной характеристикой. Процедуру согласованной фильтрации и фильтрации с целью подавления боковых лепестков можно описать в виде свертки:

$$\bar{x}_i^{ЦФ}(nT_1) = \bar{x}_i^{СФ}(nT_1) \circledast h^{ЦФ}(nT_1),$$

где $h^{ЦФ}(nT_1)$ – ИХ синтезированного фильтра.

Децимация частоты следования отсчетов выходного сигнала ОФ до частоты $F_{д2}=1/T_2$ осуществляется после ОФ.

Далее осуществляется ВО по пространству для уменьшения уровня боковых лепестков в ХН антенны. При использовании окна Хемминга в качестве весовой функции коэффициенты W_i вычисляются по формуле:

$$w_i = 0,54 + 0,46 \cos \left[2\pi \left(\frac{i}{N_e} - 0,5 \right) \right].$$

В разработанном МЛГ используются достаточно узкополосные сигналы (менее 10 %), что позволяет формировать ХН фазовым методом, сущность которого заключается в замене задержки сигналов во времени в каждом входном канале на сдвиг фазы колебания с центральной частотой.

Выходной сигнал каждого пространственного канала можно представить в виде комплексной последовательности $\bar{y}_m(nT_2)$:

$$\bar{y}_m(nT_2) = \sum_{i=0}^{N_E-1} \bar{x}_i^{0\Phi}(nT_2) \cdot \exp(-j i \varphi_m),$$

где $\varphi_m = 2\pi f_0 \cdot \frac{\Delta x}{c} \cdot \sin \theta_m$ – фазовый множитель для m -го луча ХН; Δx – период АР; θ_m – угол, соответствующий направлению m -ного луча ХН.

Формирование ХН и взвешивание в пространственной области можно выполнять одновременно.

Следующим этапом цифровой ПВОС в МЛГ является вычисление модуля $M_m(nT_2)$ в каждом пространственном канале.

В состав ВПО входят в каждом пространственном канале пороговые устройства, сумматор и вычитатель, суммирующие и вычитающие времена запаздывания моментов максимальных огибающих $n_{\max 0}T_2$ и $n_{\max 1}T_2$, в четных (0, 2, 4, ...) и нечетных (1, 3, 5, ...) периодах зондирования.

Погрешность измерения дальности до движущегося объекта можно представить следующим образом [13–15, 18–20].

$$\Delta t = \Delta t_D \pm \Delta t_v, \quad (3)$$

где $\Delta t_D = \frac{2D}{c}$ – запаздывание, определяемое расстоянием до цели; D – дальность до подводного объекта; $\pm \Delta t_v$ – дополнительное запаздывание, обусловленное эффектом Доплера.

Знак дополнительного запаздывания определяется направлением движения объекта и знаком девиации частоты.

Уточненную дальность до движущегося объекта, соответствующую среднему значению запаздываний максимальных значений откликов СФ соседних зондирований, можно определить:

$$D = \frac{(n_{\max 0}T_2 + n_{\max 1}T_2)c}{4}, \quad (4)$$

Модуль радиальной скорости движущегося объекта можно найти из выражения (1):

$$|V| = |n_{\max 0}T_2 - n_{\max 1}T_2| \frac{\Delta f_D c}{4T_c f_0}. \quad (5)$$

Направление движения обнаруженного объекта можно определить по соотношению знаков полученного дополнительного запаздывания и девиации частоты ЛЧМ сигнала, используемого в четном или нечетном периоде зондирования.

Например, если объект приближается (радиальная скорость отрицательна), то максимум сигнала в нечетном периоде излучения (с отрицательной Δf_d) будет опережать максимум в четном периоде излучения (с положительной Δf_d), т.е. ($n_{\max 1} T_2 < n_{\max 0} T_2$). Таким образом, в нечетном периоде излучения знак радиальной скорости подводного объекта (отрицательный), характеризующий его направление движения, будет всегда соответствовать знаку разности ($n_{\max 1} - n_{\max 0}$).

В ВПО в соответствии с командами управления в нечетные периоды излучения ЛЧМ сигналов формируется знак скорости «+», если разность ($n_{\max 1} - n_{\max 0}$) положительная (объект удаляется) или знак скорости «-», если разность ($n_{\max 1} - n_{\max 0}$) отрицательная (объект приближается).

Выводы. Представленный алгоритм цифровой ПВОС повысит безопасность эксплуатации морских подводных РТК при работе с движущимися потенциально опасными для навигации подводными объектами, благодаря повышению точности определения дистанции до них.

Информация о скорости и направлении движения обнаруженных подводных объектов позволит дополнительно повысить навигационную безопасность и расширить функциональные возможности морских подводных РТК различного назначения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Применение цифровой обработки сигналов / под ред. Э. Оппенгейма. – М.: Мир, 1980. – 552 с.
2. Найт У.С., Придэм Р.Г., Кэй С.М. Цифровая обработка сигналов в гидролокационных системах // ТИИЭР. – 1981. – Т. 69, № 11. – С. 84-155.
3. Маркович И.И. Цифровая обработка сигналов в системах и устройствах: монография. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2012. – 236 с.
4. Маркович И.И. Цифровая пространственно-временная обработка сигналов в гидроакустических системах и комплексах. Подводные технологии и средства освоения Мирового океана. – М.: Изд. дом «Оружие и технологии», 2011. – С. 366-373.
5. Маркович И.И. Методы и алгоритмы цифровой пространственно-временной обработки гидроакустических сигналов в многолучевых эхолотах и локаторах препятствий // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – СПб.: Наука, 2014. – Т. 7, № 2. – С. 58-71.
6. Маркович И.И., Душенин Ю.В. Применение многолучевых гидроакустических средств с цифровой пространственно-временной обработкой для экологического мониторинга водных районов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015 – № 12 (173). – С. 85-98.
7. Маркович И.И., Душенин Ю.В. Применение поисковых многолучевых гидроакустических средств с цифровой пространственно-временной обработкой сигналов в амфибийной авиации // Сб. докладов X Международной научной конференции по гидроавиации «Гидроавиасалон-2014». – М.: ЦАГИ, 2014. – Ч. II. – С. 231-237.
8. Маркович И.И. Многофункциональный гидроакустический комплекс авиационного базирования. Морская, авиационная и ракетно-космическая техника, радиотехника, автоматика и управление: состояние и перспективы развития в ЮФУ: монография / под ред. И.И. Марковича. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2011. – С. 7-38.
9. Маркович И.И., Котов И.Н., Семеняк П.Л., Ковалев Э.П., Жирнов В.С., Насыров В.Г. Аппаратная реализация и натурные испытания глубоководного гидроакустического комплекса с цифровым формированием и обработкой сигналов // Матер. Международной научно-технической конференции «Многопроцессорные вычислительные и управляющие системы» (МВУС-2009). – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – Т. 2. – С. 202-204.
10. Маркович И.И., Душенин Ю.В., Губанов Ю.Н., Ковалев Э.П., Жирнов В.С., Примаков В.П. Результаты натурных испытаний многолучевого эхолота с цифровой пространственно-временной обработкой // Материалы Международной научно-технической конференции «Многопроцессорные вычислительные и управляющие системы» (МВУС-2009). – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – Т. 2. – С. 194-196.

11. *Маркович И.И., Душенин Ю.В., Жирнов В.С., Семеняк П.П., Ковальчук Д.В.* Локатор препятствий глубоководного носителя // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 3(16). – С. 128-135.
12. *Маркович И.И., Душенин Ю.В., Шелестенко Е.Ю.* Применение современных вычислительных средств в перспективных гидролокаторах переднего обзора // Матер. Второй Всероссийской научно-технической конференции «Суперкомпьютерные технологии» (СКТ-2012). – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2012. – С. 230-234.
13. *Кук Ч., Бернфельд М.* Радиолокационные сигналы: пер. с англ. / под ред. В.С. Кельзона. – М.: Сов. радио, 1971. – 568 с.
14. *Маркович И.И., Копытин А.С., Марьев А.А.* Цифровая обработка сигналов в радиолокационном комплексе, использующем зондирующие сигналы с линейной частотной модуляцией и изменяющимся знаком девиации частоты // Матер. Третьей Всероссийской научно-технической конференции «Суперкомпьютерные технологии» (СКТ-2014). – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2014. – Т. 2. – С. 235-239.
15. *Маркович И.И.* Алгоритм селекции движущихся целей с череспериодной компенсацией огибающих сигналов. Радиолокационные системы специального и гражданского назначения 2015–2017 / под ред. Ю.И. Белого. – М.: Радиотехника, 2016. – С. 426-438.
16. *Маркович И.И.* Реализация алгоритмов цифрового формирования квадратурных составляющих в локационных комплексах различного назначения // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2006. – № 6. – С. 16-21.
17. *Маркович И.И., Андриенко В.А., Еришова О.В.* Цифровая обработка сигналов в гидроакустических комплексах // Матер. 2-й Всероссийской научно-технической конференции «Суперкомпьютерные технологии» (СКТ-2012). – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2012. – Т. 2. – С. 230-234.
18. Пат. 2626380 РФ: МПК-2015.01 G01S 13/52; G01S 13/58. Система селекции движущихся целей с измерением дальности, радиальной скорости и направления движения / Маркович И.И., Марьев А.А.; заявитель и правообладатель ФГАОУ «Южный федеральный университет». – № 2016141527; заявл. 21.10.2016, опубл. 26.07.2017, Бюл. № 21.
19. *Маркович И.И., Марьев А.А.* Селекция движущихся целей с измерением дальности, радиальной скорости и направления движения // Вестник воздушно-космической обороны. – 2019. – № 1 (21). – С. 31-40.
20. *Маркович И.И.* Алгоритм цифровой обработки сигналов локатора препятствий с измерением скорости и направления движения подводных объектов // Матер. 5-й Всероссийской научно-технической конференции «Суперкомпьютерные технологии» (СКТ-2018). – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2018. – Т. 2 – С. 150-155.

REFERENCES

1. *Primenenie tsifrovoy obrabotki signalov* [Application of digital signal processing], ed. by E. Oppengeyma. Moscow: Mir, 1980, 552 p.
2. *Nayt U.S., Pridem R.G., Key S.M.* TSifrovaya obrabotka signalov v gidrolokatsionnykh sistemakh [Digital signal processing in sonar systems], *TIIER* [Proceedings of the Institute of electronics and electronics engineers], 1981, Vol. 69, No. 11, pp. 84-155.
3. *Markovich I.I.* TSifrovaya obrabotka signalov v sistemakh i ustroystvakh: monografiya [Digital signal processing in systems and devices: monograph]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2012, 236 p.
4. *Markovich I.I.* TSifrovaya prostranstvenno-vremennaya obrabotka signalov v gidroakusticheskikh sistemakh i kompleksakh. Podvodnye tekhnologii i sredstva osvoeniya Mirovogo okeana [Digital space-time signal processing in hydroacoustic systems and complexes. Underwater technologies and means of development of the world ocean]. Moscow: Izd. dom «Oruzhie i tekhnologii», 2011, pp. 366-373.
5. *Markovich I.I.* Metody i algoritmy tsifrovoy prostranstvenno-vremennoy obrabotki gidroakusticheskikh signalov v mnogoluchevykh ekholotakh i lokatorakh prepyatstviy [Methods and algorithms of digital space-time processing of hydroacoustic signals in multibeam echo sounders and obstacle locators], *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika* [Fundamental and applied Hydrophysics]. Saint Petersburg: Nauka, 2014, Vol. 7, No. 2, pp. 58-71.

6. *Markovich I.I., Dushenin Yu.V.* Primenenie mnogoluchevykh gidroakusticheskikh sredstv s tsifrovoy prostranstvenno-vremennoy obrabotkoy dlya ekologicheskogo monitoringa vodnykh rayonov [The application of multibeam sonar means with the digital spatial-temporal processing for environmental monitoring of water areas], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskije nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 12 (173), pp. 85-98.
7. *Markovich I.I., Dushenin Yu.V.* Primenenie poiskovykh mnogoluchevykh gidroakusticheskikh sredstv s tsifrovoy prostranstvenno-vremennoy obrabotkoy signalov v amfibiynoy aviatsii [The application of multibeam sonar search tools with digital], *Sb. dokladov X Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii po gidroaviatsii «Gidroaviasalon-2014»* [Proceedings of the X International scientific conference on hydroaviation "hydroaviasalon-2014"]. Moscow: TSAGI, 2014, Part II, pp. 231-237.
8. *Markovich I.I.* Mnogofunktsional'nyy gidroakusticheskiy kompleks aviatsionnogo bazirovaniya. Morskaya, aviatsionnaya i raketno-kosmicheskaya tekhnika, radiotekhnika, avtomatika i upravlenie: sostoyanie i perspektivy razvitiya v YuFU: monografiya [Multifunctional hydroacoustic aircraft-based complex. Marine, aviation and space-rocket engineering, radio engineering, automatics and management: state and prospects of development of southern Federal University: monograph], ed. by I.I. Markovicha. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2011, pp. 7-38.
9. *Markovich I.I., Kotov I.N., Semenyak P.L., Kovalev E.P., Zhirnov V.S., Nasyrov V.G.* Apparatnaya realizatsiya i naturnye ispytaniya glubokovodnogo gidroakusticheskogo kompleksa s tsifrovym formirovaniem i obrabotkoy signalov [Hardware implementation and field testing of deep water sonar system with digital formation and processing of signals], *Mater. Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Mnogoprotsessornye vychislitel'nye i upravlyayushchie sistemy» (MVUS-2009)* [Proceedings of the international scientific and technical conference "Multiprocessor computing and control systems" (mvus-2009)]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2009, Vol. 2, pp. 202-204.
10. *Markovich I.I., Dushenin Yu.V., Gubanov Yu.N., Kovalev E.P., Zhirnov V.S., Primak V.P.* Rezul'taty naturnykh ispytaniy mnogoluchevogo ekholota s tsifrovoy prostranstvenno-vremennoy obrabotkoy [Results of full-scale tests of multibeam echo sounder with digital space-time processing], *Mater. Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Mnogoprotsessornye vychislitel'nye i upravlyayushchie sistemy» (MVUS-2009)* [Proceedings of the International scientific and technical conference "Multiprocessor computing and control systems" (MVUS-2009)]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2009, Vol. 2, pp. 194-196.
11. *Markovich I.I., Dushenin Yu.V., Zhirnov V.S., Semenyak P.P., Koval'chuk D.V.* Lokator prep'yatstviy glubokovodnogo nositelya [Deep-sea carrier obstacle locator], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskije nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 3 (16), pp. 128-135.
12. *Markovich I.I., Dushenin Yu.V., Shelestenko E.Yu.* Primenenie sovremennykh vychislitel'nykh sredstv v perspektivnykh gidrolokatorakh perednego obzora [Application of modern computational tools in advanced sonar forward review], *Mater. Vtoroy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Superkomp'yuternye tekhnologii» (SKT-2012)* [Proceedings of the Second all-Russian scientific and technical conference "Supercomputer technologies" (SKT-2012)]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2012, pp. 230-234.
13. *Kuk Ch., Bernfel'd M.* Radiolokatsionnye signaly [Radar signals]: transl. from engl., ed. by V.S. Kel'zona. Moscow: Sov. radio, 1971, 568 p.
14. *Markovich I.I., Kopytin A.S., Mar'ev A.A.* TSifrovaya obrabotka signalov v radiolokatsionnom komplekse, ispol'zuyushchem zondiruyushchie signaly s lineynoy chastotnoy modulyatsiey i izmenyayushchimsya znakom devyatsii chastoty [Digital signal processing in the radar complex using probing signals with linear frequency modulation and changing sign of frequency deviation], *Mater. Tre'tey Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Superkomp'yuternye tekhnologii» (SKT-2014)* [Proceedings of the Third all-Russian scientific and technical conference "Supercomputer technologies" (SCT-2014)]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2014, Vol. 2, pp. 235-239.
15. *Markovich I.I.* Algoritm selektsii dvizhushchikhsya tseley s cheresperiodnoy kompensatsiey ogibayushchikh signalov. Radiolokatsionnye sistemy spetsial'nogo i grazhdanskogo naznacheniya 2015–2017 [The algorithm of selection of moving targets with carisprodol compensation envelopes of the signals. Special and civil radar systems 2015-2017], ed. by Yu.I. Belogo. Moscow: Radiotekhnika, 2016, pp. 426-438.

16. *Markovich I.I.* Realizatsiya algoritmov tsifrovogo formirovaniya kvadraturnykh sostavlyayushchikh v lokatsionnykh kompleksakh razlichnogo naznacheniya [Implementation of algorithms for digital formation of quadrature components in location complexes for various purposes], *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy* [Bulletin of computer and information technologies], 2006, No. 6, pp. 16-21.
17. *Markovich I.I., Andrienko V.A., Ershova O.V.* Tsifrovaya obrabotka signalov v gidroakusticheskikh kompleksakh [Digital signal processing in sonar systems], *Mater. 2-y Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Superkomp'yuternye tekhnologii» (SKT-2012)* [Proceedings of the 2nd all-Russian scientific and technical conference "Supercomputer technologies" (SCT-2012)]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2012, Vol. 2, pp. 230-234.
18. *Markovich I.I., Mar'ev A.A.* Sistema selektsii dvizhushchikhsya tseley s izmereniem dal'nosti, radial'noy skorosti i napravleniya dvizheniya [System of selection of moving targets with measurement of range, radial speed and direction of movement]. Patent 2626380 RF: MPK-2015.01 G01S 13/52; G01S 13/58; applicant and copyright holder of Southern Federal University. No. 2016141527; stated 21.10.2016, published 26.07.2017, Bull. No. 21.
19. *Markovich I.I., Mar'ev A.A.* Seleksiya dvizhushchikhsya tseley s izmereniem dal'nosti, radial'noy skorosti i napravleniya dvizheniya [Selection of moving targets with the measurement of range, radial speed and direction of movement], *Vestnik vozdushno-kosmicheskoy oborony* [Bulletin of aerospace defense], 2019, No. 1 (21), pp. 31-40.
20. *Markovich I.I.* Algoritm tsifrovoy obrabotki signalov lokatora prepyatstviy s izmereniem skorosti i napravleniya dvizheniya podvodnykh ob'ektov [Algorithm of digital processing of signals of the locator of obstacles with measurement of speed and the direction of movement of underwater objects], *Mater. 5-y Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Superkomp'yuternye tekhnologii» (SKT-2018)* [Proceedings of the 5th all-Russian scientific and technical conference "Supercomputer technologies" (SCT-2018)]. Rostov-on-Donu: Izd-vo YuFU, 2018, Vol. 2, pp. 150-155.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Р. Ильчук.

Маркович Игорь Ильич – Научное конструкторское бюро цифровой обработки сигналов федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет»; e-mail: marko@sfedu.ru, 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2; тел.: 88634394055; директор-главный конструктор; к.т.н.; с.н.с.

Markovich Igor P'ich – SFedU Research and Design Bureau of Digital Signal Processing – Federal State-Owned Educational of Higher Education «Southern Federal University»; e-mail: marko@sfedu.ru, Russia, 2, Shevchenko st., Taganrog, 347922, Russia; phone: +78634394055; director-chief designer; cand. of eng. sc.; senior scientist.

УДК 550.383+550.389

DOI 10.23683/2311-3103-2019-1-248-258

**В.Т. Минлигареев, А.В. Алексева, Ю.М. Качановский,
А.Ю. Репин, Е.Н. Хотенко**

КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

В публикации показана актуальность картографического и программного обеспечения аномальной составляющей магнитного поля Земли (АМПЗ) для применения в магнитометрических навигационных системах робототехнических комплексов. Приведены теоретические данные о составляющих магнитного поля Земли, смещении магнитных полюсов и международных моделях главного магнитного поля Земли. Проведены исследования, направленные на определение фактического состояния картографического и программного обеспечения, выданы рекомендации для их применения в корреляционно-экстремальных навигационных системах (КЭНС). Проведённый анализ показал, что карты АМПЗ территории Российской Федерации были составлены до введения в агрогеофизическую практику