

ISSN 2220-0983

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
НАВИГАЦИОННО-ГИДРОГРАФИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

37/2014

НАВИГАЦИЯ И ГИДРОГРАФИЯ



Санкт-Петербург

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
НАВИГАЦИОННО-ГИДРОГРАФИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

НАВИГАЦИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

ИЗДАЕТСЯ С 1995 ГОДА

**37
2014**

МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Санкт-Петербург

**Главный редактор
А. Ф. Зеньков**

Редакционная коллегия:

д. т. н., проф. С. П. Алексеев (первый заместитель главного редактора),
д. в. н., проф. П. Г. Бродский (заместитель главного редактора),
д. т. н. П. И. Малеев (научный редактор); к. г.-м. н. И. Ю. Бугрова (редактор);
к. в. н. В. Ю. Бахмутов (ответственный за выпуск);
д. т. н., профессор Э. С. Зубченко, д. в. н., проф. А. И. Исмаилов;
д. в. н., проф. В. А. Катенин; к. т. н. Н. И. Леденёв; д. т. н. С. И. Мاستрюков;
д. т. н., проф. Н. Н. Неронов; акад. РАН В. Г. Пешехонов;
к. в. н. Ю. В. Румянцев; чл.-кор. РАН А. И. Сорокин;
д. т. н., профессор К. Г. Ставров; к. т. н. В. А. Титлянов,
к. т. н. А. М. Шарков, д. ф.-м. н., профессор Г. Г. Щукин

Журнал «Навигация и гидрография» включен в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук»

Электронная версия журнала размещена на сайте www.gningi.ru

**© Открытое акционерное общество
«Государственный научно-исследовательский
навигационно-гидрографический институт»
2014**

**THE STATE RESEARCH NAVIGATION-HYDROGRAPHIC
INSTITUTE**

NAVIGATION AND HYDROGRAPHY

PUBLISHED SINCE 1995

**37
2014**

RUSSIAN FEDERATION MINISTRY OF DEFENCE

Saint-Petersburg

Editor-in-chief

A. Zenkov

Editorial board

S. Alekseyev, DSc, professor (first vice-editor-in-chief),
P. Brodsky, DSc, professor (vice-editor-in-chief) P. Maleyev, DSc (science editor);
I. Bugrova (editor), CandSc; V. Bakhmutov (the issue manager), CandSc;
E. Zubchenko, DSc, professor; A. Ismailov, DSc, professor;
V. Katenin, DSc, professor; N. Ledenev, CandSc; S. Mastryukov, DSc;
N. Neronov, DSc, professor; V. Peshekhonov, DSc, Acad. RAS;
Yu. Rumyantsev, CandSc; A. Sorokin, DSc, CM RAS; K. Stavrov, DSc, professor;
V. Titlyanov, CandSc; A. Sharkov, CandSc; G. Shchukin, DSc, professor.

© Open Joint Stock Company
«The State Research Navigation-Hydrographic Institute»

2014

СОДЕРЖАНИЕ

К 45-летию ОАО «780 Ремонтный завод технических средств кораблевождения» Д. М. Бухов	7
---	---

НАВИГАЦИЯ

Обоснование перечня функциональных характеристик адаптивных информационно-измерительных навигационных систем. А. Д. Голяков, И. В. Фоминов	11
Гироскопические чувствительные элементы: классификация и уровень развития. П. И. Малеев	18
Методы адаптивной обработки навигационных измерений бортовыми средствами искусственных спутников Земли. А. Д. Голяков, И. В. Фоминов	28
Новые способы создания электромагнитных абсолютных лагов. П. И. Малеев	35

ГИДРОГРАФИЯ И МОРСКАЯ КАРТОГРАФИЯ

«Универсалия» рельефа земли. Ю. Н. Жуков	43
Автоматизация проверки корректности картографического образа подводного рельефа. Ю. Н. Жуков	47
Сравнение результатов магнитной съемки акватории, выполненные бортовым и буксируемым магнитометрами. В. А. Бледнов	51
Перспективы использования автономных подводных необитаемых аппаратов для обеспечения ВМФ гидрографической и океанологической информацией. Э. С. Зубченко, А. М. Шарков	58
Теоретико-игровая модель поддержки принятия решений в интересах навигационно-гидрографического обеспечения сил флота. В. Н. Завгородний	64
Современная технология спутниковой батиметрии. А. Г. Алексеев, Э. С. Зубченко	72

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ

Краткий обзор исследований в области изменений климата и оценки их влияния на военно-морскую деятельность. С. И. Мастрюков, Н. В. Червякова	81
---	----

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	93
----------------------------------	----

РЕФЕРАТЫ	96
-----------------------	----

C O N T E N T S

On the Occasion of the 45-th Anniversary of the 780 Repair Plant of the Navigational Technical Equipment. D. M. Bukhov	7
---	----------

NAVIGATION

Substantiation for the List of Functional Characteristics of Adaptive Information-Measuring Navigation Systems. A. D. Golyakov, I. V. Fominov	11
Gyroscopic Sensing Elements, Their Classification and Development Level. P. I. Maleyev	18
Methods of Adaptive Processing of Navigation Measurements Obtained by Satellites. A. D. Golyakov, I. V. Fominov	28
New Techniques of Creating the Electromagnetic Absolute Logs P. I. Maleyev	35

HYDROGRAPHY AND MARINE CARTOGRAPHY

“Universalia” of the Earth’s Relief. Y. N. Zhukov	43
Automation of Checking the Correctness of the Cartographic Image of the Submarine relief. Y. N. Zhukov.....	47
Comparison of Results of the Water Area Survey Carried Out by the Shipborne and Towed Magnetometers. V. A. Blednov	51
Prospects of Using the Autonomous Underwater Unmanned Vehicles to Provide the Oceanographic and Oceanology Information for the Navy. E. S. Zubchenko, A. M. Sharkov	58
The Game-Theoretic Model of Decision-Making in the Interests of the Navigation and Hydrographic Support for the Navy. V. N. Zavgorodny	64
The Present-Day Technique of Satellite Bathymetry. A. G. Alekseyev, E. S. Zubchenko	72

HYDROMETEOROLOGY

Brief Review of Explorations in the Sphere of Climate Change and Evaluation of its Influence on the Naval Activities. S. I. Mastryukov, N. V. Chervyakova.....	81
---	-----------

INFORMATION ABOUT AUTHORS.....	93
---------------------------------------	-----------

ABSTRACTS.....	96
-----------------------	-----------

УДК 629.12.004.67

**К 45-ЛЕТИЮ ОАО «780 РЕМОНТНЫЙ ЗАВОД ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ
КОРАБЛЕВОЖДЕНИЯ»**

Д. М. БУХОВ (ОАО «780 РЗ ТСК»)

Приведены сведения об истории создания и современной деятельности ОАО «780 Ремонтный завод технических средств кораблевождения».

16 мая 2014 г. открытому акционерному обществу «780 Ремонтный завод технических средств кораблевождения» (ОАО «780 РЗ ТСК») Министерства обороны исполнилось 45 лет.

Создание предприятия неразрывно связано с развитием Военно-морского флота, и, прежде всего, его навигационной техники.

В начале для целей навигации использовались простейшие приборы: магнитные компасы, чертёжные инструменты, зрительные трубы, песочные и солнечные часы и пр. Для проверки правильности работы этих приборов и их ремонта создавались специальные мастерские. Это были небольшие помещения с минимальным набором оборудования. Флот рос. Появлялись новые корабли, а вместе с ними более совершенное навигационное оборудование – лаги, лоты, хронометры, измерители скорости.

До 1917 г. на всех флотах Российской империи при Гидрографических службах существовали инструментальные камеры, которые поддерживали в постоянной готовности штурманское вооружение кораблей. Эти камеры (мастерские) продолжили существование и после революции. Но их ремонтные возможности были ограничены. В 1937 г. Советом Народных комиссаров была утверждена программа создания большого флота Союза ССР. Программой предусматривалось и расширение возможностей ремонтных мастерских Гидрографических служб флотов.

В середине 1950-х гг. в СССР начались работы по созданию океанского ракетно-ядерного флота. В строй вводились современные надводные корабли и подводные лодки, оснащённые сложнейшими средствами кораблевождения: навигационными комплексами, инерциальными, спутниковыми и астронавигационными системами, эхолотами, абсолютными лагами и т. п. Для обслуживания и ремонта этой навигационной техники в 1969 г. в соответствии с директивой Главного штаба Военно-Морского Флота был создан «780 Ремонтный завод технических средств кораблевождения ВМФ». Заводские цеха и оборудование разместились в помещении бывшей офицерской стрелковой школы в городе Ломоносов (бывший Ораниенбаум) (см. рисунок).

У истоков создания завода стояли капитаны 1 ранга А. М. Игнатьев, В. П. Сарычев, Г. А. Шляховский, которые руководили строительством новых цехов, расширяли производственную базу и номенклатуру ремонтируемых технических средств навигации.

В 2009 г. 780 Ремонтный завод был преобразован в открытое акционерное общество «780 Ремонтный завод технических средств кораблевождения». Функции единоличного исполнительного органа завода выполняет ОАО «ГНИНГИ».



Рис. Основной корпус ОАО «780 РЗ ТСК»

В настоящее время ОАО «780 РЗ ТСК» является единственным в системе Минобороны РФ предприятием, способным выполнить все виды ремонта и обслуживания морских средств навигации, устанавливаемых на кораблях и судах ВМФ: капитальный ремонт, средний ремонт, текущий аварийный и оперативные ремонты, сервисное обслуживание. Номенклатура ремонтируемых средств весьма разнообразна: сложные навигационные комплексы, приемники спутниковых навигационных систем, инерциальные и радионавигационные системы, гирокомпасы, автопрокладчики, геофизические и гидрометеорологические приборы, океанографическое оборудование и другие изделия.

Сегодня ОАО «780 Ремонтный завод технических средств кораблевождения» осуществляет свою деятельность по двум основным направлениям.

Первое направление – выполнение государственных оборонных заказов по ремонту и обслуживанию морских средств навигации.

Ремонтные бригады специалистов завода трудятся на подводных лодках, надводных кораблях и судах всех объединений Военно-Морского Флота. Высококвалифицированных специалистов предприятия ценят за качество, надежность и оперативность ремонта. Работники завода неоднократно получали благодарности от командования подводных сил флотов, авианесущего крейсера «Адмирал Кузнецов», ракетных крейсеров «Петр Великий», «Москва», «Маршал Устинов», «Варяг» и других.

За последние несколько лет объем работ по ремонту и обслуживанию средств кораблевождения вырос в несколько раз. Соответственно растут и производственные мощности завода. В 2011 г. было создано шесть филиалов предприятия – региональных ремонтно-технических центров: Северный с производствами в Мурманске и Североморске; Южный – в Новороссийске и теперь уже российском Севастополе; Западный – в Балтийске Калининградской области; Каспийский – в Астрахани и Махачкале; Дальневосточный – во Владивостоке; Камчатский – в Петропавловске-Камчатском. Создание этих центров позволяет заводу решать проблему оперативного ремонта и сервисного обслуживания морских средств навигации.

ОАО «780 РЗ ТСК» успешно сотрудничает с ведущими предприятиями судоремонтной отрасли России – Северодвинским «Центром судоремонта «Звёздочка», Прибалтийским судостроительным заводом «Янтарь», Дальневосточным заводом «Звезда». Во взаимодействии с головными заказчиками решаются вопросы судоремонта и модернизации кораблей и судов.

Вторым направлением деятельности предприятия является разработка и производство современных средств навигационного оборудования (СНО) в интересах обеспечения безопасности мореплавания: морских буёв и вех, береговых знаков, специальных навигационных фонарей на светодиодах с системой электроснабжения, использующей возобновляемые экологически чистые источники питания – солнечные батареи. Одна из последних разработок – фонарь электрический навигационный секторный, сканирующий. Это изделие является уникальным.

На предприятии большое внимание уделяется качеству ремонтируемой и выпускаемой продукции. С этой целью разработана и успешно функционирует система менеджмента качества, которая обеспечивает выполнение требований международных и государственных стандартов ИСО серии 9001. Успешно пройдя сертификацию, ОАО «780 РЗ ТСК» получило все необходимые лицензии на ремонт, производство и техническое обслуживание навигационной техники. Предприятие предлагает потребителям собственную систему сопряжения аналоговых изделий радиоэлектроники предыдущего поколения и современных цифровых систем.

Значительные усилия руководство завода уделяет поддержанию и повышению квалификации персонала. Чтобы соответствовать требованиям времени, специалисты ОАО «780 РЗ ТСК» участвуют в регулярных технических совещаниях, организуемых на отраслевых предприятиях Санкт-Петербурга. Кроме того, по договорённости с руководством предприятий, создающих новые технические средства навигации, специалисты завода изучают на предприятиях эту технику. Одним из таких предприятий является флагман отечественного навигационного приборостроения ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Для эффективного решения кадровых вопросов на ОАО «780 РЗ ТСК» создан и оборудован современной техникой учебный класс. Сегодня в нём проходят обучение все вновь принимаемые на работу сотрудники. В течение последних лет на завод охотно приходит молодёжь, чему немало способствует интересная работа, командировки, позволяющие увидеть всю страну и омывающие её моря и океаны, а также достойная и регулярно индексируемая заработная плата.

Сильные позиции ОАО «780 Ремонтный завод ТСК» на рынке труда объясняются и тем фактором, что на заводе была разработана и успешно реализуется серьёзная социальная программа. Ведь атмосфера стабильности и социальной защищённости – весьма важная составляющая высоких производственных показателей ОАО «780 РЗ ТСК».

В последние годы заводской портфель заказов обновляется – к привычным оборонным контрактам добавились договоры по оказанию услуг гражданским судовладельцам, работы по обеспечению безопасности общего мореплавания.

ОАО «780 РЗ ТСК» успешно взаимодействует с ФГУП «Росморпорт» в сфере навигационного обеспечения активно развивающихся российских портов, включая порты Владивосток, Находка, Приморск и некоторых других.

Сформировавшиеся прочные связи с предприятиями-разработчиками и поставщиками штурманской техники позволяют заводу успешно участвовать в решении задач навигационно-гидрографического обеспечения гражданского судоходства.

Уделяя внимание повышению качества разработки средств навигационного оборудования и ремонта навигационной техники, предприятие эффективно использует и зарубежный опыт. С этой целью ОАО «780 РЗ ТСК» регулярно участвует в работе технических комитетов, комиссий и конференций Международной Ассоциации Маячных служб, Международной Гидрографической организации. Новейшие зарубежные технические разработки, методы создания и ремонта средств навигации и навигационного оборудования находят применение в отечественной технике.

Трудовые успехи ОАО «780 Ремонтный завод технических средств кораблевождения» связаны с напряжённым трудом его руководства, рабочих и служащих: радиомехаников, регулировщиков, электрослесарей, сварщиков, маляров, работников бухгалтерии, планово-экономического, технологического отделов, отдела материально-технического обеспечения, производственно-диспетчерского отдела, опытного производства.

Завод – это единый сплочённый коллектив. Опираясь на него, высокий профессионализм и самоотверженный труд работников ОАО «780 РЗ ТСК» в день своего 45-летия уверенно смотрит в будущее.

ON THE OCCASION OF THE 45-TH ANNIVERSARY OF THE 780 REPAIR PLANT OF THE NAVIGATIONAL TECHNICAL EQUIPMENT

D. M. Bukhov (Executive Director, «780 RS TSK» JSC)

The information about the history of establishment and present-day activities of «The 780 Repair Plant of the Navigational Technical Equipment» JSC is presented.

НАВИГАЦИЯ

УДК 681.518

ОБОСНОВАНИЕ ПЕРЕЧНЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АДАПТИВНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

А. Д. ГОЛЯКОВ, И. В. ФОМИНОВ
(ВКА им. А. Ф. Можайского)

В статье на основании проведенных исследований обоснован перечень функциональных характеристик адаптивных информационно-измерительных навигационных систем. Приведены аналитические выражения для их количественного оценивания.

Введение

Эффективность функционирования подвижных наземных, морских, воздушных и космических объектов определяется рядом факторов, среди которых важную роль играет способность их информационно-измерительных навигационных систем выполнить возложенную на них целевую функцию. При этом, как известно [1], под информационно-измерительной системой (ИИНС) понимается совокупность функционально объединенных измерительных, вычислительных и других вспомогательных технических средств для получения измерительной информации, ее преобразования, обработки с целью представления потребителю в требуемом виде либо автоматического осуществления функций контроля, диагностики, идентификации.

Целевая функция ИИНС заключается в том, чтобы предоставить потребителю информацию о навигационных параметрах подвижных объектов, например, информацию о координатах и составляющих вектора скорости центра масс космического аппарата в заданной системе отсчета [2]. При этом предоставленная потребителю информация должна обладать заданными характеристиками.

Функционирование большинства подвижных объектов, содержащих ИИНС, происходит, как правило, под действием дестабилизирующих факторов, имеющих априорно неопределенный характер. Последствиями воздействия дестабилизирующих факторов на ИИНС является потеря ее способности к выполнению целевой функции.

Одним из способов противодействия этим факторам при проведении измерений навигационных параметров в процессе эксплуатации подвижных объектов является использование адаптивных ИИНС [3]. Однако до настоящего времени не определен перечень функциональных характеристик этих систем, т. е. таких характеристик, с помощью которых определяется способность адаптивных ИИНС выполнять заданные функции. Кроме того, не обоснованы аналитические выражения, обеспечивающие проведение количественного оценивания функциональных характеристик и определение показателей эффективности применения адаптивных ИИНС.

В связи с этим возникает задача теоретического обоснования перечня функциональных характеристик адаптивных ИИНС и определения аналитических выражений для их количественного оценивания. Целью настоящей статьи является решение этой задачи.

Обоснование перечня функциональных характеристик адаптивных ИИНС

Для выполнения целевой функции, необходимой для последующего управления движением объекта, адаптивная ИИНС должна предоставить потребителю результаты измерений навигационных параметров.

Причем результаты этих измерений должны поступать к потребителю:

- 1) с заданными показателями точности;
- 2) с задержкой начала выдачи результатов измерений, не превышающей заданное значение;
- 3) с заданной периодичностью (частотой).

Кроме того, поступление навигационной измерительной информации к потребителю должно происходить как при отсутствии дестабилизирующих факторов, т. е. в режимах и условиях, установленных в конструкторской документации, так и при воздействии на ИИНС факторов, способных привести к потере способности системы выполнять заданные функции.

Анализ перечисленных требований показывает, что для обеспечения способности ИИНС выполнить целевую функцию она должна обладать определенной совокупностью функциональных характеристик, в которую входят характеристики точности, готовности, быстродействия, надежности и стойкости. Причем количественные значения этих характеристик должны находиться в заданных диапазонах.

Особенность адаптивной ИИНС состоит в её способности приспосабливаться к условиям эксплуатации, в том числе к воздействиям со стороны внешних дестабилизирующих факторов. При этом выбирается некоторая мера качества функционирования или эффективности применения адаптивной ИИНС, которая зависит от значений её функциональных характеристик.

При воздействии дестабилизирующих факторов, способных привести к ухудшению одной или нескольких функциональных характеристик ИИНС, происходит изменение выбранной меры. Реакцией адаптивной ИИНС являются изменения параметров и алгоритмов её работы или изменение её структуры. При этом адаптация производится таким образом, чтобы выбранная мера, например, вероятность выполнения установленных функций, принимала значение не менее заданного.

Задача обнаружения дестабилизирующего фактора решается либо путем анализа отличительных признаков его появления, либо с помощью дополнительных источников информации, реагирующих на дестабилизирующий фактор. Принятие решения на адаптацию и последующие действия, направленные на ее реализацию, производятся специальными аппаратными и программными средствами адаптивной ИИНС. Эти средства, наряду с дополнительными источниками информации, входят в состав контура адаптации, который является отличительной чертой адаптивной ИИНС.

В число функциональных характеристик адаптивных ИИНС подвижных объектов, наряду с перечисленными характеристиками, может входить также безопасность. Это обусловлено тем, что ошибки, которые могут возникнуть при функционировании контура адаптации, или несвоевременная его реакция, направленная на па-

рирование дестабилизирующих факторов, способны привести в отдельных ситуациях к угрозе происшествия в процессе эксплуатации подвижного объекта.

Аналитические выражения для количественного оценивания функциональных характеристик адаптивных ИИНС

Одной из важнейших функциональных характеристик адаптивных ИИНС является точность, которая характеризует близость полученных системой значений измеряемых навигационных параметров к их истинным значениям. При этом результат измерений включает сочетание систематической и случайной погрешностей.

Появление случайных и систематических погрешностей результатов измерений адаптивных ИИНС обусловлено:

- несовершенством средств измерений, которые установлены в основном и дополнительных измерительных каналах;
- ошибками, которые допускаются контуром адаптации при идентификации дестабилизирующего фактора и принятии решения на проведение адаптации;
- погрешностями дополнительных источников информации при измерениях параметров окружающей среды, например, вибрации, влажности, температуры и т. п.;
- погрешностями, возникающими при проведении калибровки средств измерений, и т. п.

Для решения задач, связанных с оценкой эффективности применения адаптивных ИИНС или определением их обобщенной функциональной характеристики, целесообразно использовать вероятностные показатели. В качестве такого показателя при оценивании точности измерений навигационного параметра может выступать вероятность того, что погрешность результата измерений в момент времени t не превышает заданного значения Δ_c . Формула для расчета этой вероятности имеет вид:

$$P^T(t) = \int_0^{\Delta_c} f(\Delta, t) d\Delta, \quad (1)$$

где $f(\Delta, t)$ – плотность распределения вероятности погрешности измерений Δ , которая является функцией времени t и соответствует, как правило, нормальному закону распределения.

Для оценивания точности результатов навигационных измерений, содержащих случайные и систематические погрешности, может быть использован также подход, основанный на концепции «неопределенности измерений» [4].

Наряду с точностью, одной из важнейших характеристик, входящих в перечень функциональных характеристик ИИНС, является оперативность. Оперативность (или быстроедействие) ИИНС характеризует способность системы формировать и передавать в систему управления движением судна искомые параметры в течение заданного интервала времени. Показателями оперативности ИИНС являются скорость (частота) измерений, временной интервал от момента поступления команды (запроса) на проведение измерений до момента выдачи в систему управления движением судна вектора измеряемых параметров и другие показатели.

В связи с существованием при эксплуатации ИИНС ряда естественных и специально организованных возмущающих факторов, которые носят случайный харак-

тер, для количественного оценивания оперативности системы целесообразно применять вероятностные показатели, как, например, вероятность того, что задержка (τ) времени проведения измерения навигационного параметра не превышает заданное значение τ_c , т. е.

$$R(\tau) = \int_0^{\tau_c} \varphi(\tau) d\tau, \quad (2)$$

где $\varphi(\tau)$ – плотность распределения задержки времени τ проведения измерения.

Появление задержки τ при функционировании адаптивной ИИНС обусловлено, как правило, необходимостью проведения некоторой совокупности последовательно выполняемых операций, в том числе операций, связанных с анализом условий эксплуатации подвижного объекта. Если время выполнения i -ой операции ($i = \overline{1, m}$, где m – количество операций) подчиняется экспоненциальному закону распределения, то функция $\varphi(\tau)$ является плотностью гамма-распределения [5].

В момент поступления на вход ИИНС запроса на проведение измерений с заданными показателями точности и быстродействия система должна быть в состоянии готовности к выполнению своих функций. Однако в этот момент времени адаптивная система может находиться в режиме перестройки своей структуры, вызванной, например, противодействием возмущающего фактора, в плановых режимах эталонирования или калибровки, а также в режиме восстановления работоспособного состояния, обусловленного отказом, или профилактического технического обслуживания.

В связи с этим реакция адаптивной ИИНС на полученный запрос может иметь некоторое запаздывание. Поэтому в состав функциональных характеристик ИИНС целесообразно ввести характеристику готовности.

Под готовностью ИИНС понимается способность системы к выполнению заданных функций (к проведению навигационных измерений с установленной в нормативной документации точностью и оперативностью) в течение заданного интервала времени. Показателем готовности при этом может применяться, например, вероятность того, что система способна проводить измерения после поступления соответствующего запроса. Значение этой вероятности зависит от режимов, в которых эксплуатируется ИИНС. Например, для систем, которые имеют два эксплуатационных режима – применение по назначению и восстановление работоспособного состояния, показатель готовности при экспоненциальном законе распределения времени отказов и восстановлений рассчитывается по формуле [5]:

$$K_{\Gamma}(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} e^{-(\mu + \lambda)t}, \quad (3)$$

где λ – интенсивность отказов ИИНС; μ – интенсивность восстановления ИИНС.

Соотношение (3) может применяться при необходимости оценивания готовности адаптивной ИИНС к проведению измерений при воздействии возмущающего

фактора и последующей реакцией системы, направленной на приспособление к эксплуатации в новых условиях. При этом законы распределения времени появления дестабилизирующего фактора и времени, необходимого для адаптации ИИНС к этому фактору, должны подчиняться экспоненциальному распределению с соответствующими интенсивностями появления дестабилизирующего фактора и проведения адаптации.

Создание адаптивных ИИНС сопряжено с необходимостью усложнения ее структуры и алгоритмов функционирования, что влечёт за собой, как правило, снижение надежности системы. Поэтому к важнейшим функциональным характеристикам адаптивных ИИНС относится надежность.

Для большинства ИИНС главное внимание при этом уделяется одной из характеристик надежности – безотказности, т. е. способности системы непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки [5]. Анализ показателей безотказности показал, что при решении ряда практических задач, например, задачи определения эффективности адаптивных ИИНС [6], в качестве показателя безотказности целесообразно применять вероятность безотказной работы, которая рассчитывается по формуле:

$$P^H(t) = \exp \left\{ - \int_0^t \lambda(t) dt \right\}. \quad (4)$$

Вероятность, определяемая с помощью выражения (4), является условной вероятностью, поскольку она рассчитывается при условии, что характеристики внешних факторов, воздействующих на систему, находятся в заданных пределах.

Для оценки способности ИИНС проводить навигационные измерения в условиях, которые отличаются от заданных (штатных) условий, используются характеристика стойкости. Эта характеристика отличается от надежности, поскольку она проявляется, например, при возникновении внешних воздействующих дестабилизирующих факторов.

Таким образом, стойкостью ИИНС называется способность системы выполнять свои функции во время и после воздействия дестабилизирующего фактора, т. е. способность системы к защите от неблагоприятных воздействий. При этом в зависимости от вида воздействующего фактора стойкость может выражаться, например, следующими характеристиками: ударопрочность и вибропрочность; устойчивость к воздействию внешнего магнитного поля и устойчивость к воздействию тяжелых заряженных частиц.

Показатели стойкости имеют параметрический и вероятностный вид [7]. Параметрический показатель стойкости ИИНС представляет собой такой уровень Φ воздействующего фактора, при котором значения функциональных характеристик системы с заданной вероятностью находятся в установленных пределах. Вероятностный показатель стойкости $P^C(t)$ задает вероятность сохранения всех функциональных характеристик ИИНС в заданных пределах при установленных уровнях воздействующих факторов. Параметрические показатели находят применение при испытаниях систем на стойкость, а вероятностные показатели – при решении ряда теорети-

ческих и прикладных задач, например, задачи определения эффективности применения адаптивных ИИНС.

Реакцией адаптивной ИИНС на появление воздействующего фактора является, например, замена одного средства измерений, не способного в интервале времени действия этого фактора выдавать потребителю результаты измерений навигационного параметра с заданными функциональными характеристиками, на другое (дополнительное) средство измерений. Причем для дополнительного средства измерений и контура адаптации условия, при которых происходит воздействие внешнего фактора, соответствуют заданным условиям их эксплуатации.

В этом случае показатель стойкости принимает вид:

$$P^C(t) = P_{\text{доп}}^H(t) P_A^H(t), \quad (5)$$

где $P_{\text{доп}}^H(t)$ – показатель надежности адаптивной ИИНС, в которой результаты измерений формируются с помощью дополнительного средства измерений;

$P_A^H(t)$ – показатель надежности контура адаптации ИИНС.

При этом для расчета вероятности выдачи потребителю результатов измерений навигационных параметров с заданными функциональными характеристиками (точности, оперативности, готовности, надежности и стойкости) может быть использована формула

$$W(t, \tau) = P^T(t) R(\tau) K_{\Gamma}(t) \left[P_{\text{осн}}^H(t) Q(\Phi, t) + P_{\text{доп}}^H(t) P_A^H(t) (1 - Q(\Phi, t)) \right], \quad (6)$$

где $Q(\Phi, t)$ – вероятность отсутствия в течение времени t внешнего возмущающего фактора.

Выражение (6) справедливо при условии, что характеристики точности, быстродействия и готовности адаптивной ИИНС не зависят от типа используемого (основного или дополнительного) средства измерений. В связи с тем, что в большинстве случаев основное и дополнительное средства измерений имеют неодинаковые функциональные характеристики, выражение для расчета искомой вероятности принимает вид:

$$W(t, \tau) = P_{\text{осн}}^T(t) R_{\text{осн}}(\tau) K_{\Gamma_{\text{осн}}}(t) P_{\text{осн}}^H(t) Q(\Phi, t) + P_{\text{доп}}^T(t) R_{\text{доп}}(\tau) K_{\Gamma_{\text{доп}}}(t) P_{\text{доп}}^H(t) P_A^H(t) (1 - Q(\Phi, t)), \quad (7)$$

где, индексы «осн» и «доп» соответствуют характеристикам адаптивной ИИНС, эксплуатация которой происходит с использованием основного и дополнительного средства измерений.

Выводы

На основании проведенных исследований, анализа структуры и выполняемых функций, а также особенностей функционирования адаптивных информационно-измерительных навигационных систем подвижных объектов обоснован перечень функциональных характеристик и приведены примеры для расчета их показателей.

В состав функциональных характеристик адаптивных ИИНС входят:

- точность;

- оперативность;
- готовность;
- надежность;
- стойкость.

При решении ряда прикладных задач, посвященных исследованиям эффективности использования адаптивных информационно-измерительных систем, например, при построении математической модели контура адаптации, оценке уровня достоверности его функционирования или способности к выполнению целевых функций, могут применяться соотношения (1) – (7). Эти соотношения позволяют оценивать вероятности выдачи потребителю результатов измерений адаптивной ИИНС с заданными функциональными характеристиками в условиях воздействия дестабилизирующих факторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 8.437-81 Информационно-измерительные системы. Метрологическое обеспечение. Основные положения. – М.: Госстандарт, 1981. – 12 с.
2. Аншаков Г. П., Голяков А. Д., Петрищев В. Ф., Фурсов В. А. Автономная навигация космических аппаратов. – Самара: Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс», 2011. – 486 с.
3. Голяков А. Д., Фоминов И. В. Анализ влияния надежности и стойкости адаптивных информационно-измерительных навигационных систем на эффективность их использования // Навигация и гидрография. – 2013. – №36. – С. 9–16 .
4. Мокров Ю. В. Метрология, стандартизация и сертификация. – Дубна: Международный университет природы, общества и человека, 2007. – 132 с.
5. Антонов Ю. В., Белов В. П., Голяков А. Д. и др. Надёжность и безопасность информационно-управляющих систем. Методы оценивания и контроля. – СПб.: НИИ ТМ, 2004. – 326 с.
6. Голяков А.Д., Фоминов В.И. Методика оценки эффективности использования адаптивных информационно-измерительных навигационных систем // Навигация и гидрография. – 2013. – №35. – С. 24–29.
7. Голяков А. Д., Миронов В. И., Смирнов В. В. Испытания систем ракетно-космической техники. – СПб: ВИКИ им. А. Ф. Можайского, 1992. – 398 с.

SUBSTANTIATION FOR THE LIST OF FUNCTIONAL CHARACTERISTICS OF ADAPTIVE INFORMATION-MEASURING NAVIGATION SYSTEMS

A. D. Golyakov, I. V. Fominov (A. F. Mozhaiyskiy Military-Space Academy)

Based on the research, the list of the functional characteristics of adaptive information-measuring navigation systems is substantiated. Examples of indicators of the functional characteristics and expressions for their quantitative estimation are given.

ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ: КЛАССИФИКАЦИЯ И УРОВЕНЬ РАЗВИТИЯ**П. И. МАЛЕЕВ**
(ОАО «ГНИНГИ»)

Приведена разработанная классификационная таблица гироскопических чувствительных элементов, рассмотрены их особенности, результаты оценки возможной точности и достигнутого уровня развития.

Классификация гироскопических чувствительных элементов (гироскопов)

ГИРОСКОП (от греч. γυρεύω – кружусь, вращаюсь, σκοπέω – смотрю).

В отличие от классического определения гироскопа как «быстро вращающегося твердого тела» [1], которое явно устарело, в основе работы современных гироскопических чувствительных элементов (ГЧЭ) лежат инерционные свойства не только вращающихся твердых тел, но и колеблющихся твердых, жидких и других тел, а также электромагнитных и других полей. Благодаря способности сохранять неизменным положение оси вращения тел или плоскости их колебаний, плоскости поляризации электромагнитных и других волн, а также потока частиц, они способны реагировать на угловые отклонения, угловые скорости или угловые ускорения изменения своего основания [2]. Таким образом, гироскоп – это прибор, включающий инерционное тело (ротор), ось которого может изменять свое направление в пространстве; элементы его подвеса и разгона, а также съема положения оси. Для обеспечения свободного перемещения ротора в пространстве гироскоп обычно закрепляют в рамках (кардановых подвесах). Поскольку точностные и ряд других параметров гироскопических навигационных систем и систем управления определяются в первую очередь используемыми гироскопами, их развитию уделяется особое внимание.

Гироскопы подразделяются на:

- *астатические (свободные)*, ротор которых может поворачиваться вокруг трех взаимно перпендикулярных осей в двух рамках (кардановых подвесах) – внутренней и внешней;
- *дифференцирующие*, внешняя рамка которых связана с объектом (ротор дифференцирующего гироскопа может поворачиваться только вокруг двух взаимно перпендикулярных осей); такой гироскоп реагирует на угловую скорость поворота объекта;
- *интегрирующие*, которые представляют собой гироскопический интегратор угловой скорости объекта (с помощью таких гироскопов определяют угол поворота объекта путем интегрирования составляющей его угловой скорости вокруг оси измерения).

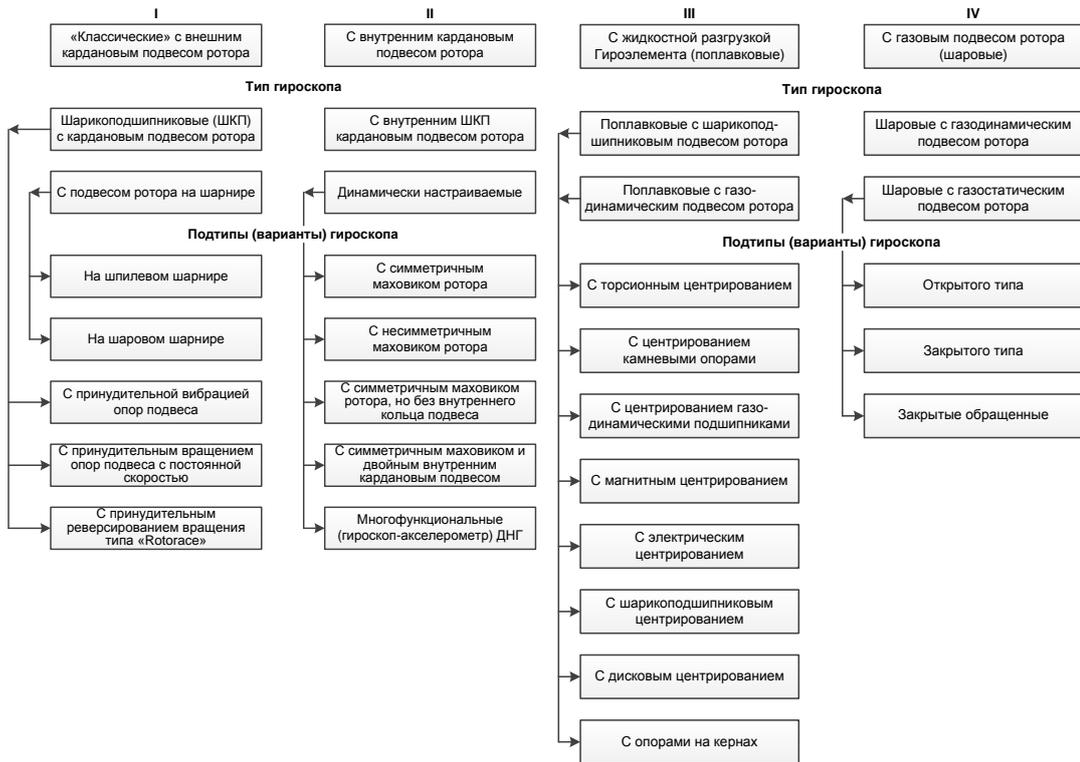
Создание в послевоенные годы атомных подводных лодок, а также ракетно-ядерного оружия привело к необходимости существенного повышения точностных и других характеристик гироскопических чувствительных элементов. Совершенствование существовавших в то время гироскопов на шарикоподшипниковом и газовом подвесах ротора не могло удовлетворять предъявляемым требованиям. Необходимо

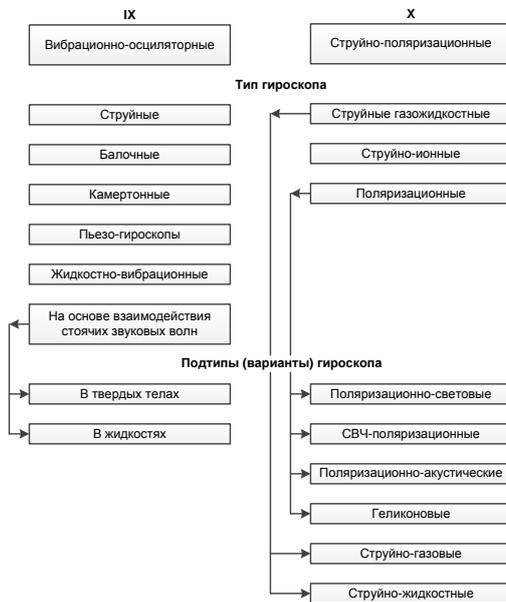
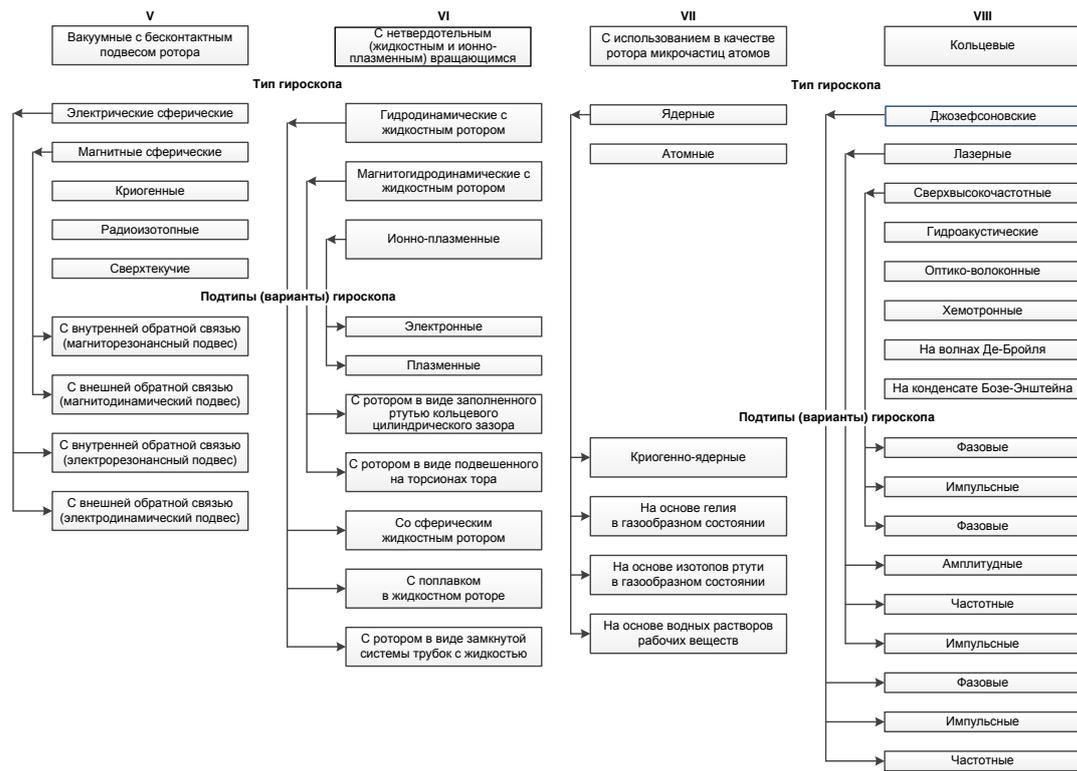
было найти новые пути, новые подходы к решению проблемы создания прецизионных гироскопов.

К настоящему времени нами выявлено более 30 типов гироскопов, существенно отличающихся один от другого, в первую очередь, физическим эффектом или явлением, заложенным в основу их работы, и более 50 подтипов или вариантов, различающихся менее существенными признаками. Все это многообразие гироскопов можно для удобства рассмотрения свести в 10 групп, близких по принципу устройства и работы (табл. 1).

Таблица 1

Классификация гироскопов





Особенности построения гироскопов, ожидаемые и достигнутые точности

1. «Классические» гироскопы с внешним кардановым подвесом ротора

К этой группе относятся два типа гироскопов: *шарикоподшипниковые (ШКП) с кардановым подвесом ротора и с подвесом ротора на шарнире*. Первые получили широкое распространение. Погрешность используемых гироскопов достигает единиц и даже десятков градусов в час. Основная причина погрешностей – трение в опоре. Неизбежный износ подшипников приводит к нарушению балансировки гироскопа, ограничивает срок его службы. Для улучшения характеристик гироскопа в ряде случаев сообщают опорам принудительную вибрацию, вращение с постоянной скоростью, реверсирование, вращение с помощью промежуточных колец подшипника и ряд других мер.

Гироскопы с подвесом ротора на шарнире не получили должного развития.

2. Гироскопы с внутренним кардановым подвесом ротора

Эта группа гироскопов включает два типа: *с внутренним шарикоподшипниковым подвесом ротора и динамически настраиваемые гироскопы (ДНГ)*. Первые не получили развития, а ДНГ, возникнув в начале 1960-х годов, к настоящему времени стали широко распространенными. Известно более шести вариантов гироскопов этого типа.

ДНГ могут быть использованы как в дифференцирующем, так и в интегрирующем режимах. Они отличаются относительно малыми массо-габаритными характеристиками и сравнительно высокими точностными параметрами. Масса большинства из них около 300 г, длина – не более 50 мм, диаметр – около 60 мм, случайная составляющая дрейфа – порядка 0,01 град./ч.

Отличительной особенностью ДНГ является наличие резонансной (динамической) настройки частоты вращения ротора, при которой подвес становится «безмоментным» по отношению к малым углам поворота основания. В результате ось ротора оказывается практически неподвижной в инерциальном пространстве. Преимущество этих гироскопов заключается в отсутствии моментов трения в подшипниках подвеса, в возможности обеспечения большой скорости вращения ротора (десятки тысяч об./мин.), что обеспечивает значительный кинетический момент ротора при малых габаритах, а также в возможности удаления от ротора статорных обмоток двигателя, что ведет к уменьшению влияния температурных полей.

3. Гироскопы с жидкостной разгрузкой гироэлемента (поплавковые)

В гироскопах этой группы подвес по оси чувствительности осуществляется в основном за счет разгрузки жидкостью поплавка, включающего ротор, двигатель и внутренний карданов подвес, что приводит к уменьшению вредных моментов. Применяемые для фиксации определенного положения поплавка торсионы, камневые и другие опоры также имеют относительно малое трение, что обеспечивает сравнительно высокую чувствительность и точность гироскопа. К этой группе относятся два типа интегрирующих гироскопов, отличающихся один от другого лишь способом подвеса ротора, который может быть шарикоподшипниковым или газодинамическим. Последний представляет собой газовую пленку между двумя керамическими частями гироскопа, одна из которых связана с вращающимся ротором, а вторая – с поплавком.

Применение керамики приводит к увеличению срока службы гироскопа и ряду других преимуществ, связанных с положительными особенностями керамики, по сравнению со сталью или другими металлами. Благодаря очень малой толщине газовых пленок, жесткость газовых подшипников примерно такая же, как и шариковых.

Работы по созданию поплавковых гироскопов были начаты в 1946 г. К середине 1960-х гг. они получили широкое распространение. Технология их хорошо отработана, и выпускаются они в значительных количествах.

Различные варианты поплавковых гироскопов обладают дрейфом от 10 до 10^{-3} град./ч. Основная область применения – объекты боевой и ракетно-космической техники.

К недостаткам поплавковых гироскопов следует отнести необходимость обеспечения жестких требований по терморегулировке (порядка $0,01^{\circ}\text{C}$), а также значительную стоимость.

4. Гироскопы с газовым подвесом ротора (шаровые)

В конструкции таких гироскопов, как и в поплавковых с газодинамическим подвесом, используется газовая пленка, которая образуется между ротором и элементом системы подвеса, жестко связанным не с поплавком, а с корпусом гироскопа.

В этой группе также различают гироскопы двух типов: *с газодинамическим и с газостатическим подвесом ротора*, отличающиеся друг от друга способом создания опорной силы. В гироскопах с газостатическим подвесом опорная сила создается за счет принудительного поддува газа.

В гироскопах с газодинамическим подвесом при быстром вращении ротора за счет подсоса газа между шаром (ротором) и опорной чашей образуется газовая пленка, которая и удерживает ротор. Основные достоинства гироскопов с газовым подвесом ротора – малый момент трения, большая долговечность, простота конструкции и высокая надежность. Достигнутая точность рассматриваемых гироскопов – $0,1-0,01$ град./ч.

5. Вакуумные гироскопы с бесконтактным подвесом ротора

Эта группа включает три типа гироскопов: *электростатические, магнитные и сверхпроводниковые (криогенные)*. Их объединяет использование неконтактного подвеса твердотельного ротора и вакуума в зазоре ротор-камера. Подвес ротора в первом типе гироскопов этой группы осуществляется электростатическим полем, во втором – магнитным, а в криогенных – магнитным полем токов сверхпроводимости. Сверхпроводящий подвес обладает наибольшей устойчивостью, т. к. в этом случае используются не силы притяжения, а силы отталкивания. Криогенные гироскопы использованы для проверки теории относительности. Их дрейф составляет около 10^{-11} град./ч., что на 5–6 порядков лучше, чем у самых совершенных гироскопов других типов [3, 4].

Магнитные и электростатические подвесы подразделяются на подвесы с внешней и внутренней обратной связью (последние используют резонансные свойства цепи подвеса).

Подвесы с внутренней связью отличаются простотой схемы, и поэтому гироскопы, использующие резонансные свойства цепи подвеса, более компактны. Добротность электростатических и магнитных подвесов на несколько порядков выше добротности опор обычных гироскопов, что улучшает стабильность их работы и увеличивает срок службы.

Из трех типов гироскопов этой группы наибольшее развитие получили гироскопы с электростатическим подвесом ротора. Идея его создания была высказана впервые в 1952 г. В настоящее время он является наиболее точным гироскопом. Гироскоп разработан в двух вариантах: с полым сферическим бериллиевым ротором диаметром около 40 мм и сплошным – диаметром 10 мм и массой 1 г. Достигнутая точность этих гироскопов характеризуется дрейфом порядка 10^{-5} град./ч. Роторы магнитных гироскопов также делаются сферическими, материалом для них служит феррит. По точности эти гироскопы уступают электростатическим, однако они технологичнее и дешевле.

6. Гироскопы с нетвердотельным (жидкостным и ионно-плазменным) вращающимся ротором

Кинетические моменты гироскопов этой группы создаются вращающейся жидкостью или облаком ионов. Различают три основных типа гироскопов этой группы: *гидродинамические, магнитно-гидродинамические и ионно-плазменные.*

По точности гироскопы этой группы уступают ряду гироскопов других типов, но по устойчивости к перегрузкам, вибрациям, стоимости и ряду других параметров некоторые варианты этих гироскопов представляют несомненный интерес. Первые сообщения о разработке гироскопов с жидкостным ротором появились в 1959 г. В настоящее время известно более 15 различных вариантов гироскопов с жидкостным ротором и несколько вариантов – с ионным. Точность их, однако, невысока.

7. Гироскопы с микрочастицами атомов в качестве ротора

Данная группа включает два типа гироскопов: *ядерные и атомные.* Первые из них представляют большой практический интерес, поскольку атомные значительно более чувствительны к воздействию магнитных полей и менее чувствительны к угловым перемещениям.

В основе работы *ядерных* гироскопов лежит использование механических и магнитных моментов ядер атомов. В них применяется не принудительное вращение тел, как в большинстве гироскопов, а естественное «вращение» микрочастиц (протонов и нейтронов), входящих в состав ядер. Благодаря этому, появляется возможность избавиться от трудностей технологического характера по изготовлению, подвесу и обеспечению питанием основной детали обычных гироскопов – вращающейся массы. Достигнутая точность их на макетных образцах составляет 0,01 град./ч.

Наиболее привлекательной стороной этих гироскопов является возможность их миниатюризации. В США такие гироскопы в последнее десятилетие разрабатываются в рамках программы «Micro RNT» (RNT-Positioning, Navigation, Timing – позиционирование, навигация, время) [5–7].

Предполагается, что эти гироскопы могут обладать уходом менее 0,01 град./ч., стабильностью масштабного коэффициента порядка $5 \cdot 10^{-5}$, объемом без источников питания – менее 1 см^3 , потребляемой мощностью – менее 5 мВт. По сравнению с микромеханическими гироскопами на базе кремниевой электроники они менее чувствительны к вибрациям, имеют на порядок меньшие габариты и значительно меньшее энергопотребление.

Разработки микроядерных гироскопов финансируются Управлением перспективных исследований и разработок МО США (DARPA) и выполняются тремя фирмами: *Northron Grumman, Boeing и Archangel Systems.*

8. Кольцевые гироскопы

Эта группа охватывает большое число гироскопов, различающихся видом носителя информации об угловых перемещениях (электромагнитная или акустическая волна, ток сверхпроводимости и др.) и принципами использования кольцевого контура, по которому циркулирует волна или ток (резонансный или нерезонансный). Группа включает следующие типы гироскопов: *лазерные, сверхвысокочастотные, волоконно-оптические, ионные* и др. (см. табл. 1). В основе работы кольцевых гироскопов лежит изменение под действием поворота (вращения) фазы или частоты электромагнитных волн или тока, циркулирующих в контуре в противоположных направлениях.

Важнейшей частью *лазерного* гироскопа является резонатор, под которым понимают систему зеркальных отражающих поверхностей, образующих замкнутый контур, внутри которого располагается источник излучения (лазер). Благодаря образованию стоячих волн в резонаторе, генерация происходит только на определённой частоте. Для вывода из резонатора излучения, несущего информацию о повороте, одно из зеркал делается полупрозрачным. Лазерные гироскопы (ЛГ) подразделяются на двухволновые и четырёхволновые. В первых используется линейная поляризация световой волны, во вторых – круговая. Для борьбы со взаимным влиянием («захватом») лучей, распространяющихся в противоположных направлениях (что проявляется при малых скоростях поворота гироскопа), разработан ряд мер. Они сводятся к колебанию корпуса гироскопа или одного из его зеркал, либо к ведению в кольцевой контур специальных оптических элементов. По конструкции ЛГ подразделяются на модульные и монолитные, треугольной и четырёхугольной формы. Начало работ по созданию ЛГ относится к 1962 г. Массовое их производство начато в 1982 г. Достигнутая точность составляет порядка 0,01 град./ч. Положительными качествами ЛГ являются малое время входа в режим работы и нечувствительность к ускорению силы тяжести.

Сверхвысокочастотные (СВЧ) кольцевые гироскопы отличаются от ЛГ тем, что в отличие от световых волн в замкнутых контурах этих гироскопов циркулируют СВЧ-волны. Высокую чувствительность к вращению от этих гироскопов можно ожидать лишь при использовании сверхдобротных контуров, что возможно при использовании сверхнизких температур.

В *волоконно-оптических гироскопах (ВОГ)*, возникших в середине 1970-х годов, чувствительным элементом является катушка с намотанным на нее оптическим волокном, по которому навстречу друг другу пропускаются световые лучи, например, от лазерного диода. В отличие от ЛГ, источник излучения, как и в СВЧ-гироскопах, в ВОГ располагается вне замкнутого контура. Относительно высокая чувствительность (порядка 0,01 град./ч.) достигается за счет использования многовитковости волокна. Отличительной особенностью ВОГ является низкая стоимость, способность выдерживать значительные ударные нагрузки и долговечность.

Кольцевые гироскопы на основе волн де Бройля

$$\Delta\varphi = 8\pi S\Omega / c\lambda, \quad (1)$$

где $\Delta\varphi$ – разность фаз между встречными лучами, возникающая при вращении кольцевого контура, по которому лучи циркулируют;

S – площадь контура;

Ω – проекция вектора абсолютной угловой скорости на нормаль контура;
 c – скорость света;
 λ – длина волны.

Из этой формулы следует, что для повышения чувствительности гироскопов кольцевого типа, наряду с повышением площади контура S , (что весьма ограничено), необходимо использовать излучения с меньшими длинами волн λ . Поскольку переход от длин волн оптического диапазона к более коротким, рентгеновским и гамма-лучам затруднено из-за сложности организации их перемещения по замкнутому контуру, повышение чувствительности можно добиться за счет использования волновых свойств частиц вещества. Известно, что любой частице, обладающей импульсом P , соответствует волна, длина которой вычисляется по формуле де Бройля:

$$\lambda = h / P = h / mv, \quad (2)$$

где h – постоянная Планка, равная $6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с = $6,62 \cdot 10^{-27}$ эрг·с;

$P = mv$, есть импульс частицы, обладающей массой m и скоростью v .

Волновыми свойствами обладают частицы любой массы. Однако для макрочастицы длина волны де Бройля чрезвычайно мала. Для частицы массой 1 г, движущейся со скоростью 1 см/с, в частности, длина волны де Бройля равна $6,62 \cdot 10^{-27}$ см. Такая длина волны лежит далеко за пределами возможности ее обнаружения. Интерес могут представлять лишь частицы с малой массой, сравнимой с массой электрона или протона. У таких частиц длина волны де Бройля имеет порядок нескольких ангстрем, что доступно для обнаружения их волновых свойств. При создании кольцевых гироскопов на волнах де Бройля обычно используют интерферометры Маха-Цендера, в которых встречные волны проходят половину замкнутого контура.

Первые интерферометры на частицах для измерения вращения Земли начали разрабатываться еще в 1970-х гг. В качестве частиц в них использовались нейтроны. Позднее (с 1990-х гг.) для этой цели использовались электроны, атомы и молекулы [8–14]. По имеющимся оценкам чувствительность гироскопов на волнах де Бройля превосходит чувствительность лазерных и волоконно-оптических гироскопов на 9–11 порядков, что позволяет существенно (на четыре порядка с учетом шумов) превзойти уровень точности, доступной для лазерных и волоконно-оптических гироскопов [14]. По данным [15] уже в 2006 г. достигнута нестабильность нуля (1σ) менее $7 \cdot 10^{-5}$ град./ч., стабильность масштабного коэффициента лучше 5 ppm, случайный дрейф нуля – около $3 \cdot 10^{-6}$ град./ч.

Кольцевые гироскопы на основе конденсата Бозе-Эйнштейна. Известно, что частицы, обладающие целым ($0, 1, 2, \dots$) спином (в единицах $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-27}$ эрг·с) подчиняются квантовой статистике Бозе-Эйнштейна. А частицы с полуцелым спином – квантовой статистике Ферми-Дирака. Характерной особенностью первой является то, что в каждом квантовом состоянии может находиться произвольное число частиц, тогда как в случае частиц с полуцелым спином в каждом квантовом состоянии может находиться не более одной частицы. Эти различия весьма существенным образом влияют на поведение частиц при низких температурах. Для частиц, подчиняющихся статистике Бозе-Эйнштейна, при температуре ниже некоторой критической (так называемой температуре вырождения) конечная доля всех частиц скапливается в состоянии с нулевым импульсом. Это состояние получило название Бозе-Эйнштейна конденсация.

Частицами, подчиняющимися квантовой статистике Бозе-Эйнштейна, являются: фотон с массой покоя, равной 0, и спином 1, π -мезоны со спином 0 и массой, отличной от нуля, а также атомные ядра с четным числом нуклонов. При температуре вырождения такие частицы перестают быть независимыми друг от друга. На внешние воздействия они реагируют как единое целое.

К частицам, подчиняющимся квантовой статистике Ферми-Дирака относятся: электроны и ядра с нечетным числом частиц.

Отмеченные выше особенности частиц, подчиняющихся квантовой статистике Бозе-Эйнштейна, могут быть положены в основу создания гироскопов кольцевого типа, использующих сверхтекучие фазы газа, которые представляет собой Бозе-Эйнштейна конденсат (БЭК).

Впервые такой конденсат экспериментально наблюдали в 1991 г. [16], а интерференцию двух БЭК на основе атомов натрия – в 1997 г. [17]. В настоящее время интерферометры на БЭК усиленно исследуются, в том числе и в интересах их использования для измерения вращения. В работе [18], в частности, описаны результаты эксперимента по созданию БЭК-гироскопа. С этой целью БЭК сигарообразной формы, удерживаемый начально в ловушке, расщеплялся когерентно в поперечном направлении на две части, каждая из которых перемещалась по контуру в продольном направлении навстречу друг другу, затем они накладывались, образуя интерференционную картину, которая регистрировалась по плотности атомов.

На основе БЭК могут быть созданы также атомный лазер, который будет излучать вещества, а не электромагнитные излучения, и атомный компьютер.

9. Вибрационно-осцилляторные гироскопы

Данная группа включает большое число типов гироскопов, использующих инерционные свойства колеблющихся тел (струн, балок, камертонов, пьезокристаллов, полусфер, жидкости и др.). Начало работ по созданию наиболее простых из них относится к концу 1930-х гг.

Наиболее перспективным является, так называемый *полусферический твердотельный вибрационный гироскоп (ТВГ)*, начало работ, над которым относится к 1980-м годам. Чувствительным элементом этого типа гироскопов является полая вибрирующая полусфера, изготовленная из кварца и покрытая тонким слоем металла (хрома). Края полусферы приводятся в колебательное движение. Эти колебания на частоте около 2500 Гц образуют картину стоячих волн. Угол поворота корпуса регистрируется с помощью емкостного датчика угла, размещаемого под полусферой. Таким образом, в ТВГ полезным выходным сигналом является информация о положении в резонаторе волнового поля как некоторого тела, подвешенного в точке без трения. В зависимости от выбранной электроники ТВГ может работать либо в качестве измерителя абсолютной угловой скорости, либо в режиме интегрирования этой скорости, т. е. в качестве датчика угла. Весьма существенно, что ТВГ выдает полезную информацию в течение нескольких секунд и при сбоях питания.

Из-за технологических трудностей этот тип гироскопа все еще находится на этапе разработки и исследования экспериментальных образцов.

Начало работ над *микромеханическими вибрационными гироскопами* в России относится к концу 1990-х гг. К настоящему времени микромеханические датчики параметров движения за рубежом получили широкое развитие и применение в автомобилестроении и управляемых игрушках. Их точность находится в пределах единиц и

десятков градусов в час. По прогнозам точность таких гироскопов может в перспективе достигнуть 0,01 град./ч. В интересах навигации морских подвижных объектов они могут найти применение в составе интегрированных систем, где точностные характеристики обеспечиваются спутниковой навигационной системой (СНС), а инерциальный модуль на микромеханических гироскопах будет использоваться для сглаживания шумов СНС и хранения навигационных данных в случае кратковременных перерывов информации от СНС. Привлекательным моментом такого использования является малые массогабаритные характеристики и потребляемая мощность.

Остальные типы кольцевых гироскопов не получили должного развития.

10. Струйно-поляризационные гироскопы

Эти гироскопы основаны на использовании инерционных свойств струй (газа, жидкости, ионов) и плоскости поляризации электромагнитных и других волн.

Струйные газо-жидкостные и ионные гироскопы представляют собой систему специально выполненных трубопроводов, по которым прокачивается жидкость, поток ионов или газ. Поворот такой системы приводит к возмущению среды в трубопроводе, что и регистрируется.

Поляризационные гироскопы в общем виде содержат источник излучения того или иного вида (световая, СВЧ или акустическая волна), поляризатор, резонатор, анализатор и детектор излучения. При наличии вращения система поворачивается по отношению к плоскости поляризации на некоторый угол, что и регистрируется. Этот тип гироскопа к настоящему времени не получил должного развития.

Выводы

1. Гироскопы являются наиболее ответственными элементами инерциальных навигационных систем и систем курсоуказания, поэтому их развитию уделяется особое внимание. В основе работы гироскопов лежат инерционные свойства вращающихся и колеблющихся твердых, жидких и других тел, а также плоскости поляризации электромагнитных волн.

2. К настоящему времени выявлено более 30 типов гироскопов, существенно отличающихся один от другого физическим эффектом или явлением, заложенным в основу их работы, и более 50 подтипов или вариантов, различающихся менее существенными признаками.

3. Все это многообразие гироскопов целесообразно распределить на 10 групп, обладающих определенной общностью. Такое распределение позволяет по аналогии с уже созданными гироскопами группы оценивать потенциальные возможности других, еще не разработанных.

4. Уровень развития гироскопов характеризуется широким спектром точностей, от единиц град./ч. до 10^{-11} град./ч.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гироскоп. Большая Советская энциклопедия. 3-е изд. – 1971. – С. 1659.
2. Малеев П. И. Новые типы гироскопов. – Л.: Судостроение. – 1971 г. – 160 с.
3. Пешехонов В. Г. Уникальный гироскоп обеспечил проверку общей теории относительности // Гироскопия и навигация. – 2007. – № 4(59). – С. 111–114.
4. Журавлев В. Ф. О некоторых деталях уникального эксперимента «Gravity Probe – В» // Гироскопия и навигация. – 2009. № 1(64). – С. 3–7.
5. DARPA. Broad Agency Announcement Chip-Skale Combinatorial Atomik Navigator (C SCAN). Mikrosystems Tehnology Office (MTO) DARPA – BAA. – 12–44, April 16, 2012.

6. Shkel A. M. Microtechnology Comes of Age // GPS World. – 2011. – No 9. – P. 43–50. (Перевод на сайте inetsrv: No 635).
7. Березин А. США задумались о новой системе инерциальной навигации на базе микроядерного магнитного резонанса (<http://compulenta.computerra.ru/tehnika/weapons/673918/>)
8. Вароко Е., Вароко Г. Эффект Саньяка в сверхтекучих жидкостях // Успехи физических наук. – 2008. – Т. 178. – № 2. – С. 217–221.
9. Page L. A. Effect of Earth's Rotation in Neutron Interferometry // Phys. Rev. Lett. – 1975. – Vol. – 35. – No.8. – P.543.
10. S. A. Werner, J.-L. Staudenmann, R. Colella. Effekt of Earth's Rotation on the Quantum Mechanical Phase of the Neutron // Phys. Rev. Lett. – 1979. – Vol. 42. –No. 17. – P. 1103–1106.
11. Hasselbach F. Sagnac experiment with electrons: Observation of the rotational phase shift of electron waves in vacuum / F. Hasselbach, M. Nicklaus // Phys. Rev. A. – 1993. – Vol. 48. – No. 1. – P. 143–151.
12. Neutze R. Sagnac experiment with electrons: Reanalysis of a rotationally induced phase shift for charged particles / R. Neutze, F. Hasselbach // Phys. Rev. A. – 1993. –Vol. 58. – No. 1. – P. 557–565.
13. Riehle F. et al. Optical Ramsey spectroscopy in a rotating frame: Sagnac effect in a matter-wave interferometer // Phys. Rev. Lett. – 1991. – Vol. 67. –No 2 – P. 177–180.
14. M. S. Chapman et al. Optics and Interferometry with Na₂ Molecules // Phys. Rev. Lett. – 1995. – Vol. 74. – No. 24. – P. 4783–4786.
15. D. S. Durfee et al. Long-Term Stability of an Area-Reversible Atom – Interferometer Sagnac Gyroscope // Phys. Rev. Lett. – 2006. – Vol. 497. – No. 24. – P. 240801.
16. Davis K. B. et al. Bose-Einstein Condensation in a Gas of Sodium Atoms // Phys. Rev. Lett. – 1995. – Vol. 75. – N. 22. – Pp. 3969–3973.
17. Andrews R. et al. Observation of Interference Between Two Bose Condensates // Science. – 1997. – Vol. 275. – N. 5300. – P. 637–641.
18. Tolstikhin O. I. et al. Gyroscopic effects in interference of matter waves // Phys. Rev. A. – 2005. – Vol. 72. – P. 05160 (R).

GYROSCOPIC SENSING ELEMENTS, THEIR CLASSIFICATION AND DEVELOPMENT LEVEL

P. I. Maleyev («GNINGI» OJSC)

The classification table of gyroscopic sensing elements developed by the author is presented. Their specific features, results of evaluation of the possible accuracy and the current development level are considered.

УДК 629.7

МЕТОДЫ АДАПТИВНОЙ ОБРАБОТКИ НАВИГАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ БОРТОВЫМИ СРЕДСТВАМИ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ

А. Д. ГОЛЯКОВ, И. В. ФОМИНОВ
(ВКА имени А. Ф. Можайского)

В статье рассмотрены методы адаптивной обработки навигационных измерений, проводимых бортовыми средствами искусственных спутников Земли. Проведен сравнительный анализ статических и динамических методов, показаны их достоинства и недостатки. Предложены пути дальнейшего развития теоретических основ аналитического оценивания точности навигации ИСЗ.

Для автономного определения параметров движения центра масс искусственных спутников Земли (ИСЗ) применяется большой арсенал методов навигации, кото-

рые можно классифицировать по ряду признаков [1]. Одним из таких признаков является способ математической обработки навигационной измерительной информации. В соответствии с этим признаком методы автономной навигации ИСЗ разделяются на детерминированные и статистические [2]. Последние, в свою очередь, делятся на методы обработки полной выборки измерений (статические методы) и методы обработки выборки нарастающего объема (динамические методы).

Наибольшее распространение на практике получили статистические методы. Особенность статистических методов заключается в том, что при их реализации производится обработка существенного избытка результатов навигационных измерений. При этом удается в значительной степени усреднить случайную составляющую погрешности измерений и в некоторых случаях «отфильтровать» ее отдельные систематические компоненты. В связи с этим процесс статистической обработки измерений получил название статистической фильтрации, а соответствующие алгоритмы – название статистических фильтров [1].

В основу традиционных методов обработки навигационных измерений положено допущение о том, что законы распределения случайных погрешностей измерений являются известными и инвариантными во времени [3]. Однако в процессе летной эксплуатации ИСЗ воздействующие на средства навигационных измерений факторы могут превысить свои номинальные значения, т. е. такие значения, в пределах которых обеспечиваются заданные характеристики законов распределения погрешностей навигационных измерений. Такие изменения, называемые дестабилизирующими, могут привести не только к снижению точности решения навигационной задачи, но и к расходимости процессов функционирования применяемых статистических фильтров, что может вызвать потерю работоспособного состояния системы навигации.

К дестабилизирующим факторам бортовых средств навигационных измерений относятся следующие явления и процессы:

- термические воздействия, обусловленные тепловым излучением Солнца и вызывающие повышение температуры конструктивных элементов бортовых приборов;
- ионизирующее излучение, обусловленное радиационными полями Земли, вспышками на Солнце и на сверхновых звездах и пульсарах;
- вибрации корпуса ИСЗ, обусловленные функционированием его механических систем;
- удары, связанные с кратковременным механическим воздействием твердых тел при их столкновении с корпусом ИСЗ, например, микрометеорные воздействия.

Воздействие дестабилизирующих факторов способно привести не только к кратковременному изменению функциональных характеристик бортовых средств навигационных измерений, но и к форсированию деградиационных процессов. Так, например, тепловое возмущение оказывает значительное дестабилизирующее воздействие на элементы инерциальных датчиков, оптические элементы звездных и солнечных датчиков. Накопленная доза ионизирующего излучения может являться причиной отказа электронных компонентов измерительных приборов и систем. Длительное воздействие микродисперсных частиц создает абберацию на оптических поверхностях оптико-электронных приборов. Солнечное излучение, помимо нагрева конструктивных элементов бортовых приборов, является источником засветки высокочувствительных звездных датчиков, которые являются одним из основных средств получения измерительной информации при автономной навигации ИСЗ.

Одним из способов противодействия возмущающим факторам является использование адаптивных методов обработки результатов навигационных измерений и разработанных на их основе статистических алгоритмов. В связи с этим цель настоящей статьи заключается в проведении анализа статических и динамических адаптивных методов обработки результатов навигационных измерений, выполняемых бортовыми средствами ИСЗ, для автономного решения навигационной задачи.

Отличительной чертой бортовых навигационных систем, основанных на адаптивных методах обработки измерений, является наличие контура адаптации, который в общем случае представляет собой совокупность аппаратных и программных средств [4]. С помощью этого контура производится корректировка весовых параметров алгоритмов (матричных коэффициентов усиления фильтров) с целью адаптации процедуры решения навигационной задачи к воздействию возмущающих факторов. В результате этого удается ослабить или полностью устранить нежелательное воздействие этих факторов на результаты процесса статистического оценивания навигационных параметров.

Принцип действия адаптивного алгоритма в общем случае основан на оценивании характеристик воздействующего фактора с проведением последующей коррекции весовых коэффициентов статистического фильтра. При этом характеристика воздействующего фактора подвергается непосредственным измерениям, которые производятся соответствующими бортовыми средствами. Результаты этих измерений поступают на дополнительный вход фильтра. На основании известной детерминированной или стохастической зависимости между характеристикой воздействующего фактора и погрешностями измеряемых навигационных параметров в адаптивном фильтре выполняется вычитание из результатов измерений навигационных параметров мешающей компоненты, или вводится соответствующая поправка в характеристики законов распределения погрешностей измерений, которые хранятся в памяти вычислителя.

Рассмотрим адаптивный алгоритм обработки навигационных измерений по методу наименьших квадратов, целью которого является уточнение шестимерного вектора параметров движения центра масс ИСЗ, соответствующего некоторому начальному моменту времени t_0 . При этом будем полагать, что вектор невязок, сформированный в процессе j -го сеанса навигационных измерений, находится с помощью выражения [1]:

$$\Delta\tilde{F}(t_j) = W(t_j, t_0) \Delta Q(t_0) + \delta(t_j), \quad j = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где $\Delta\tilde{F}(t_j)$ – m -мерный вектор разностей между измеренными и опорными значениями первичных навигационных параметров в момент времени t_j ;

m – количество измеряемых в момент времени t_j параметров, например, при измерениях высоты полета ИСЗ и зенитных углов двух звезд $m = 3$;

$W(t_j, t_0)$ – матрица размера $m \times 6$, компонентами которой являются частные производные от измеряемых в момент t_j первичных навигационных параметров по определяемым в момент t_0 параметрам движения центра масс ИСЗ;

$\Delta Q(t_0)$ – искомый шестимерный вектор поправок к опорным параметрам движения центра масс ИСЗ;

$\delta(t_j)$ – случайный m -мерный вектор погрешностей результатов измерений в момент времени t_j , характеристики которого зависят от значения воздействующего фактора;

n – количество сеансов навигационных измерений.

Тогда адаптивный алгоритм расчета оценки искомого вектора, минимизирующий сумму квадратов невязок (1), определяется из матричного выражения [2]:

$$\Delta \hat{Q}(t_0) = C^{-1}(t_0) \cdot \tilde{d}(t_0), \quad (2)$$

где $C(t_0)$ – матрица весовых коэффициентов размера 6×6 :

$$C(t_0) = \sum_{j=1}^n C(t_j, t_0) = \sum_{j=1}^n W^T(t_j, t_0) K^{-1}(t_j) W(t_j, t_0);$$

$K(t_j)$ – корреляционная матрица погрешностей измерений, которая функционально связана с текущим моментом времени, поскольку ее диагональные элементы являются функциями от значений характеристик дестабилизирующих факторов, воздействующих на средства навигационных измерений в момент времени t_j ;

n – количество сеансов навигационных измерений, выполняемых в процессе навигационного режима функционирования ИСЗ;

$\tilde{d}(t_0)$ – шестимерный вектор взвешенных измерений:

$$\tilde{d}(t_0) = \sum_{j=1}^n \tilde{d}(t_j, t_0) = \sum_{j=1}^n W^T(t_j, t_0) \cdot K^{-1}(t_j) \cdot \Delta \tilde{F}(t_j).$$

Процесс определения оценок вектора $\Delta Q(t_0)$ с помощью выражений (2) основан на совместной статистической обработке всей навигационной измерительной информации, которая получена в ходе выполнения навигационного режима. Поэтому рассмотренный адаптивный фильтр относится к группе не рекуррентных статических алгоритмов обработки навигационных измерений.

В ряде случаев оказывается полезным находить оценку параметров движения ИСЗ по имеющейся в данный момент времени информации, последовательно уточняя ее по мере поступления новых данных. Процесс получения последовательно уточняемых оценок параметров движения центра масс ИСЗ называется рекуррентной фильтрацией [2].

Можно показать, что рекуррентный алгоритм адаптивной фильтрации по методу наименьших квадратов имеет вид:

$$\Delta \hat{Q}_j(t_0) = \Delta \hat{Q}_{j-1}(t_0) + U_j^{\text{HK}} [\Delta \tilde{F}(t_j) - W(t_j, t_0) \Delta \hat{Q}_{j-1}(t_0)]$$

$$K_{q_j} = [K_{q_{j-1}}^{-1} + W^T(t_j, t_0) K^{-1}(t_j) W(t_j, t_0)]^{-1}, \quad (3)$$

где $\Delta\hat{Q}_{j-1}(t_0)$ – оценка искомых параметров движения ИСЗ, которая получена по результатам навигационных измерений на интервале времени $[t_j, t_{j-1}]$;

$$U_j^{HK} = \left[K_{q_{j-1}}^{-1} + W^T(t_j, t_0) P_{j-1} W(t_j, t_0) \right]^{-1} W^T(t_j, t_0) K^{-1}(t_j) - \text{матричный коэффициент усиления адаптивного статического рекуррентного фильтра, который построен на основании критерия наименьших квадратов;}$$

$K_{q_{j-1}}$ – ковариационная матрица погрешностей оценки $\Delta\hat{Q}_{j-1}(t_0)$;

$$P_{j-1} = \begin{bmatrix} P(t_1) & & & 0 \\ & P(t_2) & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & P(t_{j-1}) \end{bmatrix} - \text{весовая матрица диагонального вида}$$

размера $(m \cdot j - 1) \times (m \cdot j - 1)$, в которой стоящие на главной диагонали блоки $P(t_1) = K^{-1}(t_1)$, $P(t_2) = K^{-1}(t_2)$, ..., $P(t_{j-1}) = K^{-1}(t_{j-1})$ имеют размер $m \times m$;

K_{q_j} – ковариационная матрица погрешностей оценки $\Delta\hat{Q}_j(t_0)$.

По сравнению с традиционным алгоритмом рекуррентной статической фильтрации результатов навигационных измерений, рассмотренным, например, в работе [1], в алгоритме, основанном на соотношениях (3), элементы весовой матрицы P_{j-1} , входящие в матричный коэффициент усиления фильтра, изменяются при воздействии на средства измерений дестабилизирующих факторов.

При этом анализ выражения (3) показывает, что искомая оценка вектора $\Delta Q(t_0)$ формируется путем сложения предыдущей оценки $\Delta\hat{Q}_{j-1}(t_0)$ с некоторой поправкой, которая в качестве множителя имеет матричный коэффициент усиления U_j^{HK} . Причем, если в течение j -го сеанса навигационных измерений на бортовую аппаратуру ИСЗ воздействует дестабилизирующий фактор, который приводит к росту погрешностей навигационных измерителей, то весовые коэффициенты в матрице U_j^{HK} уменьшаются, т.е. происходит адаптация алгоритма к действию дестабилизирующего фактора. В результате адаптивной подстройки характеристик фильтра снижается вклад навигационного измерения, содержащего высокий уровень помех, в суммарную оценку параметров движения ИСЗ.

Ковариационная матрица K_{q_j} , диагональные элементы которой представляют собой дисперсии погрешностей оценки вектора $\Delta\hat{Q}_j(t_0)$, формируется на каждом сеансе навигационных измерений. При этом в случае появления в момент времени t_j дестабилизирующего фактора, вызывающего рост дисперсий результатов навигационных измерений, элементы матрицы $K^{-1}(t_j)$, входящей в выражение для расчета матрицы K_{q_j} , уменьшаются. Это приводит к тому, что прирост характеристики точ-

ности оценки вектора $\Delta\hat{Q}_j(t_0)$, обусловленный появлением в момент времени t_j дополнительной навигационной информации, снизится в связи с ее низким качеством.

Достоинство статических адаптивных методов состоит в простоте их реализации в бортовом вычислительном устройстве, достаточно высокой устойчивости к воздействующим факторам и хорошей сходимости процесса оценивания при использовании итерационной процедуры. Однако с помощью этих методов удастся уточнять только такие параметры движения центра масс ИСЗ, которые он имел до начала навигационного режима, т. е. параметры движения в момент времени t_0 .

Для определения поправки к текущим координатам и составляющим вектора скорости ИСЗ, т. е. вектора $\Delta Q(t_j)$, необходимо прогнозировать движение центра масс ИСЗ с помощью известных алгоритмов [2]. При этом алгоритмы прогнозирования не являются абсолютно точными. Они содержат методические погрешности, которые увеличиваются с ростом прогнозируемого интервала времени. Это в наибольшей степени проявляется при прогнозировании параметров движения ИСЗ с помощью бортового вычислителя.

Кроме того, для решения ряда целевых задач бортовыми средствами ИСЗ требуется достаточно короткий интервал времени для определения текущих параметров орбиты. Поэтому в автономных системах навигации ИСЗ нашли применение статистические алгоритмы, которые представляют собой динамические фильтры. Эти алгоритмы позволяют уточнять параметры движения ИСЗ и точность их оценивания, т. е. находить оценку $\Delta\hat{Q}(t_j)$ и ковариационную матрицу погрешностей оценок $K_q(t_j)$ параметров движения после каждого сеанса навигационных измерений. Одним из таких алгоритмов является динамический фильтр Калмана.

Используя теорию калмановского оценивания [5] и принятые ранее обозначения, динамический алгоритм адаптивной фильтрации результатов навигационных измерений принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \Delta\hat{Q}(t_j) &= B(t_j, t_{j-1}) \Delta\hat{Q}(t_{j-1}) + U^{DF}(t_j) \cdot [\Delta\tilde{F}(t_j) - W(t_j, t_{j-1}) \Delta\hat{Q}(t_{j-1})] \\ K_q(t_j) &= [E - U^{DF}(t_j) A(t_j)] B(t_j, t_{j-1}) K_q(t_{j-1}) B^T(t_j, t_{j-1}) \end{aligned} \quad , (4)$$

где $B(t_j, t_{j-1})$ – переходная матрица, расчет элементов которой производится аналитическим или численным способами [2];

$\Delta\hat{Q}(t_{j-1})$ – известный вектор оценок параметров движения ИСЗ, который получен по результатам измерений, выполненных на предыдущем навигационном сеансе, т.е. в момент времени t_{j-1} ;

$U^{DF}(t_j)$ – матричный коэффициент усиления динамического фильтра:

$$U^{DF}(t_j) = B(t_j, t_{j-1}) K_q(t_{j-1}) B^T(t_j, t_{j-1}) [K(t_j) + A(t_j) B(t_j, t_{j-1}) K_q(t_{j-1}) B^T(t_j, t_{j-1}) A^T(t_j)]^{-1} ;$$

$K_q(t_{j-1})$ – ковариационная матрица оценок параметров движения ИСЗ, соответствующих моменту времени t_{j-1} ;

$A(t_j)$ – градиентная матрица.

Формулы (4) весьма удобны с вычислительной точки зрения. Действительно, на основе первичных результатов измерений навигационных параметров и характеристик дестабилизирующего фактора в текущий момент времени t_j , а также известной оценки $\Delta\hat{Q}(t_{j-1})$ и ковариационной матрицы $K_q(t_{j-1})$, которые получены в процессе предыдущего навигационного сеанса, формируется оценка $\Delta\hat{Q}(t_j)$, которая характеризует отклонение истинной орбиты ИСЗ относительно опорной.

При этом начальный вектор $\Delta\hat{Q}(t_0)$, соответствующий моменту времени t_0 , считают, как правило, нулевым, поскольку информация об отклонении реального движения ИСЗ относительно опорного в момент начала решения навигационной задачи t_0 отсутствует. Начальную ковариационную матрицу $K_q(t_0)$ формируют на основании результатов аналитических исследований точности навигации, моделирования процесса решения навигационной задачи на ЭВМ или результатов предыдущего навигационного режима функционирования ИСЗ.

Основное преимущество адаптивного фильтра, основанного на соотношениях (4), по сравнению со статическим рекуррентным адаптивным фильтром (3) заключается в том, что оценка параметров движения ИСЗ формируется в темпе поступления измерительной информации во время навигационного сеанса. При отсутствии в момент проведения навигационных измерений t_j дестабилизирующего фактора, воздействующего на средства измерений, алгоритм (4) представляет собой традиционный фильтр Калмана, рассмотренный, например, в работе [1]. Адаптация фильтра к воздействию фактору происходит при его возникновении, например, в момент времени t_{j+1} . При этом происходит адекватная дестабилизирующему фактору подстройка весовых коэффициентов фильтра. В результате удается предотвратить снижение точности вырабатываемых фильтром оценок и предотвратить возможность появления расходящегося процесса оценивания параметров движения центра масс ИСЗ.

Однако на пути использования адаптивного фильтра (4) в бортовых комплексах управления ИСЗ стоит ряд задач, среди которых наиболее актуальной является задача построения математических моделей, связывающих характеристики бортовых измерительных средств навигационных параметров с уровнем возмущающего фактора.

Для практической реализации рассмотренных в настоящей статье алгоритмов адаптивной обработки навигационных измерений необходимо ввести в бортовой вычислительный комплекс ИСЗ дополнительное устройство ввода информации, подключенное к средствам измерений характеристик дестабилизирующего фактора, и на основе математических моделей процессов воздействия дестабилизирующего фактора на характеристики погрешностей навигационных измерений разработать специальное программное обеспечение.

Дальнейшие теоретические исследования методов адаптивной обработки навигационных измерений целесообразно проводить в области аналитического оценивания точности автономной навигации ИСЗ, поскольку соответствующая теория, элементы которой приведены в работе [6], разработаны с учетом ряда допущений. Одно из них заключается в том, что параметры закона распределения погрешностей измерений в процессе решения навигационной задачи сохраняют свои значения, т. е. счи-

тается, что на этапе орбитального полета ИСЗ средства измерений не подвергаются возмущающим воздействиям, способным приводить к росту характеристик погрешностей результатов измерений. Поэтому одним из перспективных направлений развития теоретических основ аналитического оценивания точности навигации ИСЗ является переход к адаптивным методам обработки навигационных измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аншаков Г. П., Голяков А. Д., Петришев В. Ф., Фурсов В. А. Автономная навигация космических аппаратов. – Самара: Изд-во ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс», 2011. – 569 с.
2. Голяков А. Д., Лукашевский А. А., Смирнов В. В. Системы навигации космических аппаратов. – СПб.: МО РФ, 2003. – 267 с.
3. Адаптивные фильтры / Под ред. К. Ф. Н. Коуэна и П. М. Гранта. – М.: Мир, 1988. – 392 с.
4. Голяков А. Д., Фоминов В. И. Методика оценки эффективности использования адаптивных информационно-измерительных навигационных систем // Навигация и гидрография. – 2013. – № 35. – С. 24–29.
5. Эльясберг П. Е. Определение движения по результатам измерений. – М.: Наука, 1976. – 416 с.
6. Голяков А. Д. Методы аналитического оценивания точности системы автономной навигации искусственных спутников Земли // Навигация и гидрография. – 2010. – № 30. – С. 47–58.

METHODS OF ADAPTIVE PROCESSING OF NAVIGATION MEASUREMENTS OBTAINED BY SATELLITES

A. D. Golyakov, I. V. Fominov (A. F. Mozhaiyskiy Military-Space Academy)

Methods of adaptive processing of the results of onboard navigation measurements of artificial Earth satellites are considered. Based on the comparative analysis of static and dynamic methods, the ways for further development of theoretical principles of analytical evaluation of satellite navigation accuracy are suggested.

УДК 621.396 933

НОВЫЕ СПОСОБЫ СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ АБСОЛЮТНЫХ ЛАГОВ

П. И. МАЛЕЕВ
(ОАО «ГНИНГИ»)

Рассмотрены четыре новых способа создания абсолютных лагов, работающих по электромагнитному полю. Три из них основаны на использовании эффекта Доплера, а четвертый – на регистрации «профиля» электромагнитного поля разнесенными приемниками. Показано, что в отличие от известных способов (запросный и беззапросный) предлагаемые способы обладают рядом преимуществ.

Скорость объекта относительно Земли (абсолютная скорость) относится к числу важнейших навигационных параметров. В настоящее время основным измерителем абсолютной скорости морских объектов являются гидроакустические доплеровские и корреляционные лаги. Помимо гидроакустических волн, для измерения скорости объекта могут быть использованы и электромагнитные волны. Ряд рассматривае-

мых ниже измерителей абсолютной скорости по электромагнитному полю основан, как и гидроакустические лаги, на использовании эффекта Доплера, другие – на регистрации профиля электромагнитного поля разнесенными приемниками. При этом источник поля может быть как неподвижным, установленным на берегу, так и подвижным, установленным, в частности, на борту навигационного спутника Земли. Эти измерители являются неавтономными. Они могут быть использованы для калибровки лагов, скоростных испытаний кораблей и судов, при обеспечении плавания в прибрежной зоне, узкостях и т. п.

Известны два способа построения подобных измерителей скорости: беззапросный и запросный [1]. В беззапросном способе частота принятого сигнала от наземного передатчика сравнивается с частотой бортового опорного генератора. Достоинством способа является возможность одновременного измерения скорости неограниченным числом объектов, серьезным недостатком – чрезвычайно высокие требования к долговременной стабильности частоты бортового и наземного генераторов. Практически эти требования могут быть удовлетворены только при использовании атомных стандартов частоты.

В запросном способе предусматривается измерение разности частот двух сигналов: излучаемого корабельным генератором и ретранслированного. В виду сравнения частот сигналов от одного и того же генератора требования к его стабильности на несколько порядков ниже и удовлетворяются обычными кварцевыми генераторами. К недостаткам этого способа следует отнести определенные ограничения при одновременном измерении скорости несколькими объектами, что обусловлено необходимостью ретрансляции сигналов.

Ниже рассмотрен предложенный нами способ электромагнитного измерения абсолютной скорости, обладающий достоинствами обоих рассмотренных выше способов, но свободный от их недостатков [2]. Существо способа поясняется рис. 1.

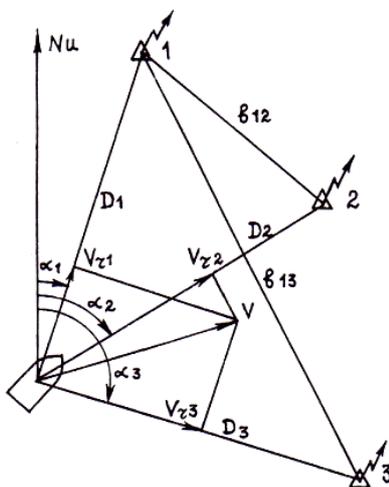


Рис. 1. Схема первого способа измерения абсолютной скорости по электромагнитному полю. Пояснения в тексте

Сигналы наземного передатчика 1 ретранслируются с заданным коэффициентом (для селекции сигналов) береговыми ретрансляторами 2 и 3. В корабельном приемнике сравниваются попарно частоты сигналов, принятых от берегового передатчика и ретрансляторов. Частота принятого сигнала i -го передатчика равна

$$f_i = f_0 + f_{gi}, \quad (1)$$

где f_0 – частота излучения;

$f_{gi} = f_i(U, \alpha_i)$ – доплеровский сдвиг частоты, определяемый проекцией вектора скорости на направление α_i -го передатчика:

U – вектор скорости.

Разность частот принятых сигналов i -го и j -го передатчиков равна разности доплеровских сдвигов частоты

$$\Delta_{ij} = f_{gi} - f_{gj} = F_{ij}(U, \alpha_i, \alpha_j) \quad (2)$$

Это уравнение при количестве ретрансляторов два и более позволяет при известных направлениях α определить вектор скорости в горизонтальной плоскости. Для определения вектора скорости в пространстве необходимо, как минимум, три ретранслятора. Значения α могут быть получены пеленгованием или рассчитаны по известным координатам корабля, береговых ретрансляторов и передатчика.

В рассмотренном способе, как и в запросном, сравниваются частоты одного и того же генератора. С другой стороны, как и в беззапросном, возможно определение скорости неограниченным числом объектов одновременно.

Принципиальная схема второго предложенного нами способа измерения абсолютной скорости по электромагнитному полю поясняется рис. 2 [3].

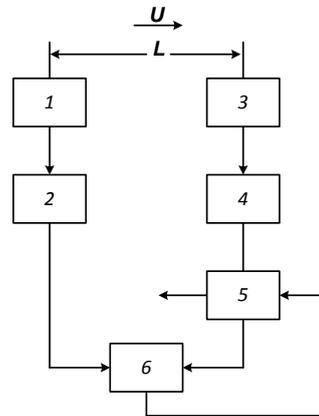


Рис. 2. Схема второго способа измерения абсолютной скорости по электромагнитному полю. Пояснения в тексте

Измеряемым параметром в данном случае является разность фаз принимаемых сигналов.

Для нормальной работы известных устройств измерения скорости с помощью приемоиндикатора фазовой разностно-дальномерной радионавигационной системы (РНС) требуется точное знание ширины дорожки, заложенной в постоянный масштабный коэффициент. Это ограничивает применение устройства в районах с малым изменением ширины дорожки при смещении объекта по гиперболической изолинии, а также приводит к погрешностям измерения скорости при плавании в других районах и при любых изменениях ширины дорожки. Предложенный нами способ измерения скорости исключает необходимость знания ширины дорожки, что позволяет повысить точность измерения скорости и расширить диапазон его использования практически на всю рабочую зону РНС.

С этой целью к основной антенне 1 (рис. 2) и приемоиндикатору 2 фазовой разностно-дальномерной РНС предложено ввести дополнительную антенну 3 с приемоиндикатором 4, отнесенную на расстояние L по направлению движения объекта от антенны 1, а также блок задержки 5 и фазометр 6. Схема подключения этих дополнительных блоков указана на рис. 2. Устройство, реализующее предложенный способ, работает следующим образом: при движении объекта антенна 1 через некоторый промежуток времени занимает в пространстве положение, которое ранее занимала антенна 3. При этом приемоиндикаторы 2 и 4 фиксируют значение разности фаз ведущей и ведомой станций. Сигнал приемоиндикатора 2 антенны 1 повторяет сигнал приемоиндикатора 4 антенны 3, но отстает от него на промежуток τ , необходимый для прохождения объектом расстояния L . Сигнал с приемоиндикатора 4 антенны 3 поступает на один из входов фазометра 6. На другой его вход поступает текущий сигнал с приемоиндикатора 2 антенны 1. Фазометр сравнивает сигналы и вырабатывает сигнал рассогласования, воздействующий на управляющий вход блока задержки 5. Изменение задержки прекращается при достижении равенства сигналов приемоиндикаторов 2 и 4. В результате, как легко показать, скорость объекта определяется выражением:

$$U = L/\tau \quad (3)$$

Отсюда следует, что скорость, измеренная предложенным способом, не зависит ни от ширины дорожки, ни от формы сигнала, что ведет к повышению точности.

Для расширения функциональных возможностей разностно-дальномерной РНС нами предложен [4] способ измерения не только скорости, но и ускорения подвижного объекта, что в ряде случаев необходимо при скоростных испытаниях объекта, уменьшении числа пробегов объекта при тарировании относительных лагов и ряде других работ.

Предлагаемый способ поясняется рис. 3, где 1 – приемоиндикатор фазовой разностно-дальномерной РНС; 2 – блок задержки; 3 – фазометр; 4 – блок для измерения разности частот и 5 – индикатор.

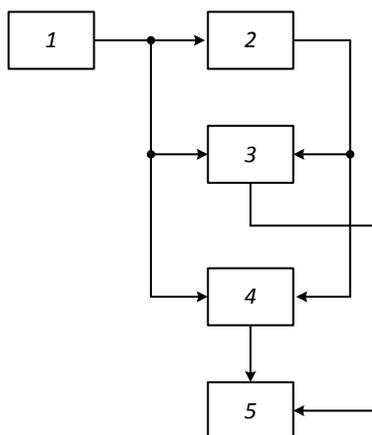


Рис. 3. Схема третьего способа измерения абсолютной скорости (и ускорения) по электромагнитному полю. Пояснения в тексте.

Приемоиндикатор 1 вырабатывает сигнал разности фаз береговых станций фазовой РНС. Изменение фазы этого сигнала определяется законом движения подвижного объекта относительно семейства гиперболических линий положения. При движении объекта по базовой линии фазовой РНС сигнал на выходе приемоиндикатора 1 изменяется по синусоидальному закону с частотой:

$$\omega = 2\pi/T = 2\pi \cdot U/x, \quad (4)$$

где x – ширина дорожки (расстояние между гиперболами с нулевой фазой);
 U – скорость объекта.

Текущее значение фазы сигнала приемоиндикатора 1 описывается выражением:

$$\varphi = \omega t, \quad (5)$$

где t – время.

В блоке задержки 2 сигнал задерживается на время τ_3 . С другой стороны, сигнал φ поступает на первые входы фазометра 3 и блока 4, на вторые входы которых поступает задержанный сигнал

$$\varphi_{\text{зад}} = \omega(t - \tau_3). \quad (6)$$

При этом если подвижный объект движется без ускорения, с некоторой постоянной скоростью U , то сигнал на входе фазометра 3 определяется разностью фаз текущего и задержанного сигналов:

$$\Delta\varphi = \varphi - \varphi_{\text{зад}} = \omega t - \omega(t - \tau_{\text{зад}}) = \omega\tau_3 = 2\pi\tau_3 \cdot U/x, \quad (7)$$

а сигнал на выходе блока 4 равен нулю.

При наличии ускорения объекта

$$\alpha = du/dt$$

происходит изменение фаз

$$d(\Delta\varphi)/dt$$

А так как величина

$$d(\Delta\varphi)/2\pi dt = \Delta\varphi \quad (8)$$

характеризует разность частот, на выходе блока 4 появляется сигнал, который зависит от ускорения и описывается выражением:

$$\Delta\varphi = \tau_3/x \cdot du/dt = \alpha \tau_3/x \quad (9)$$

С выхода блока 4 сигнал поступает в индикатор 5, реализующий зависимость:

$$\alpha = x\Delta\varphi/\tau_3 = k\Delta\varphi \quad (10)$$

где $k = x/\tau_3$ – масштабный коэффициент.

Принципиальная схема предложенного четвертого способа повышения технических возможностей фазовой РНС в качестве измерителя абсолютной скорости можно пояснить рис. 4 [5].

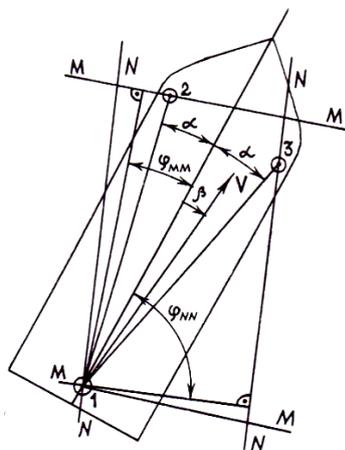


Рис. 4. Четвертый способ измерения абсолютной скорости по электромагнитному полю. Пояснения в тексте

Семейство изолиний фазового поля (в пределах длины измерительной базы) аппроксимированы прямыми MM и NN . На объекте устанавливаются три датчика параметра поля 1, 2, 3, образующие две скрещенные измерительные базы 1 – 2 и 1 – 3 длиной L , развернутые относительно диаметральной плоскости объекта на равные

углы α . Измерения по каждой измерительной базе производится одновременно по обоим семействам изолиний.

Из рис. 4 следует, что искомые задержки в данном случае описываются выражениями:

$$\tau_{12}^{MM} = \frac{L \cos(\varphi_{mm} - \alpha)}{U \cos(\varphi_{mm} + \beta)}, \quad \tau_{13}^{MM} = \frac{L \cos(\varphi_{mm} + \alpha)}{U \cos(\varphi_{mm} + \beta)}, \quad (11)$$

$$\tau_{12}^{NN} = \frac{L \cos(\varphi_{nn} + \alpha)}{U \cos(\varphi_{nn} - \beta)}, \quad \tau_{13}^{NN} = \frac{L \cos(\varphi_{nn} - \alpha)}{U \cos(\varphi_{nn} - \beta)},$$

где $\tau_{12}^{MM}, \tau_{13}^{MM}, \tau_{12}^{NN}, \tau_{13}^{NN}$ – задержки сигналов на измерительных базах 1 – 2 и 1 – 3;

$\varphi_{mm}, \varphi_{nn}$ и – углы между диаметральной плоскостью объекта и градиентами поля;

U и β – модуль вектора скорости объекта и угол сноса.

Решая систему уравнений (11), можно найти составляющие вектора скорости в корабельной системе координат. Отметим, что при измерении скорости в данном случае (по профилю поля) не требуются знания координат береговых передатчиков.

Электрическая схема устройства, поясняющая данный способ, приведена на рис. 5.

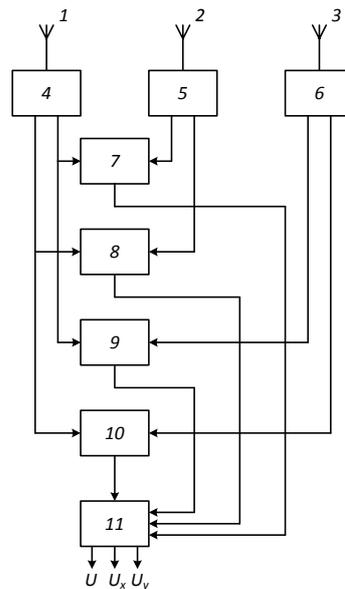


Рис. 5. Способ измерения абсолютной скорости по электромагнитному полю. Пояснения в тексте

Устройство содержит антенны 1, 2 и 3; приемоиндикаторы 4, 5 и 6 разностно-дальномерной РНС; блоки 7, 8, 9 и 10 измерения временного сдвига сигналов и вычислитель 11.

При движении объекта антенна 1 через некоторый промежуток времени достигает соответствующих изолиний семейства MM и NN (рис. 4), на которых ранее находились антенны 2 и 3, т. е. фиксируют те же значения разности фаз ведущей и ведомой станций РНС. Таким образом, сигналы на выходе приемоиндикатора 4 повторяют сигналы приемоиндикаторов 5 и 6 по каждой паре станций РНС, но отстают от них на определенные интервалы запаздывания. Эти интервалы запаздывания равны времени, необходимому объекту для прохождения расстояния, равного расстоянию между соответствующими изолиниями по линии пути.

Для измерения скорости объекта сигналы с выходов приемоиндикаторов 4, 5 и 6 подаются на входы соответствующих блоков 7–10 для измерения временного сдвига сигналов. С выхода этих блоков сигналы, пропорциональные интервалам запаздывания, а следовательно, и скорости объекта, поступают в вычислитель 11.

Предложенный способ и реализующее его устройство обеспечивает измерение двух составляющих скорости относительно Земли. При этом устраняются погрешности за счет сноса.

Выводы

1. Работа электромагнитных абсолютных лагов основана на использовании либо эффекта Доплера, тогда они аналогичны гидроакустическим доплеровским лагам, либо профиля электромагнитного поля, и тогда измерение скорости осуществляется путем сравнения сигналов двух разнесенных датчиков поля.

2. В отличие от известных способов построения таких измерителей скорости (запросный и беззапросный) рассмотренные четыре новых способа обладают повышенной точностью и рядом других достоинств: первый из них свободен от недостатков известных способов, второй исключает необходимость точного знания ширины дорожки фазовой разностно-дальномерной РНС, третий позволяет измерять не только скорость, но и ускорение объекта, четвертый не требует знания координат береговых передатчиков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теоретические основы радиолокации. Под ред. В. Е. Дулевича. – М.: Сов. Радио, 1978. – 608 с.
2. А. С. 953903 (СССР). Устройство для измерения скорости подвижного объекта / Виноградов К. А., Кошкарев В. Н., Малеев П. И. и др. Приоритет от 19 июля 1979 г.
3. А. С. 728498 (СССР). Устройство для измерения скорости подвижного аппарата / Малеев П. И., Осюхин Б. А. и др. Приоритет от 10 мая 1978 г.
4. А. С. 837204 (СССР). Устройство для измерения скорости подвижного аппарата. / Малеев П. И., Осюхин Б. А. и др. Приоритет от 15 февраля 1980 г.
5. А. С. N 702853 (СССР) Устройство для измерения скорости подвижного аппарата / Авторы: Виноградов К. А., Малеев П. И. и др. Приоритет от 12 января 1978 г.

NEW TECHNIQUES OF CREATING THE ELECTROMAGNETIC ABSOLUTE LOGS

P. I. Maleyev, («GNINGI» OJSC)

Four new techniques of creating the absolute (bottom-speed) logs operating on the electromagnetic field are considered. Three of them are based on using the Doppler effect and the fourth – on registration of the electromagnetic field “profile” by the spaced receivers. It is shown that, unlike the well-known techniques (interrogation and noninterrogation ones) the suggested techniques have a number of advantages.

ГИДРОГРАФИЯ И МОРСКАЯ КАРТОГРАФИЯ

УДК 528.92

«УНИВЕРСАЛИЯ» РЕЛЬЕФА ЗЕМЛИ

Ю. Н. ЖУКОВ
(ОАО «ГНИНГИ»)

В статье вводится и обосновывается понятие единого описания формы рельефа Земли. Дается описание способа построения единого картографического образа рельефа.

Человечество за время своего существования создало громадное число различных видов карт, на которых, кроме всего прочего, представлен образ рельефа всей Земли или ее части. Карт такое обилие, что нельзя даже пытаться перечислить основные работы из этого множества картоматериалов. С появлением компьютеров разработано немало больших массивов данных, представляющих всю или региональную поверхность Земли в виде регулярной сетки точек со значениями высот или глубин в них, например, общая батиметрическая карта океанов (ГЕВСО) [1], рельеф Земной поверхности (ЕТОРО1, ЕТОРО2, ЕТОРО5) [2], международная батиметрическая карта Арктического океана (ИВСаО) [3].

Возникает естественный вопрос: какой из существующих образов рельефа Земли наиболее точен, наиболее представительен, наиболее соответствует реальной форме рельефа или его части? Ответа нет. Действительно, несмотря на столетия работы огромного числа картографов, несмотря на наличие мощных вычислительных машин, единый образ рельефа Земли остается неизвестным.

Учитывая это, автор предлагает для обозначения единого образа рельефа Земли или его части использовать понятие «универсалия» рельефа. Значение этого понятия восходит к латинскому слову *universalis* – общий, всеобщий, относящийся к целому. В нашем случае оно конкретизируется. Будем называть универсалией какое-либо (картографическое, математическое) представление рельефа или его части, имеющее только общие формы неровностей поверхности для всего набора имеющихся представлений рельефа. Тем самым универсалия единообразно представляет формы рельефа во всех масштабах. Эта статья посвящена обоснованию необходимости введения в картографическую практику такого объекта как универсалия рельефа и описанию конструктивного способа ее построения.

Приведем конкретный пример, иллюстрирующий практическую целесообразность введения понятия «репрезентации рельефа».

Пусть имеется массив глубин, полученный в гидрографических измерениях многолучевым эхолотом. На основе этого массива глубин карту рельефа дна в районе промера можно построить с использованием ЭВМ. В этом случае формы рельефа дна и их пространственное положение будут существенно зависеть от методов интерпо-

ляции и сглаживания, используемых в алгоритмах обработки массива глубин. То есть можно получить множество картографических представлений рельефа дна на участке промера. Эти представления будут различаться между собой, хотя и представляют единственный реальный рельеф дна. Здесь естественно возникает желание каким-то образом получить тоже единственное, наиболее полное и релевантное картографическое представление реального рельефа дна на участке промера. Это представление должно содержать все те формы рельефа дна, которые присутствуют на всех картах, а формы, присутствующие только на отдельных картах, должны быть исключены, так как они являются артефактами, шумами, вносимыми вычислительными алгоритмами компьютерной обработки. Другими словами, нужно на основе построенного набора карт найти единственный образ рельефа, представляющего реальный рельеф, то есть универсалию рельефа. Учитывая с одной стороны многообразие имеющихся карт рельефа, а с другой – отсутствие «единого образа рельефа», можно утверждать, что задача построения универсалии рельефа является не эпизодической, а системной и потому постоянно явно и неявно возникающей проблемой картографической практики.

Однако автору не известны работы, в которых бы рассматривался вопрос о построении универсалии рельефа. Думается, что основная причина в отсутствии эффективных методов сравнения рельефа, представленного различными картоматериалами, что связано с чрезвычайно сложной реальной формой поверхности Земли. Эта сложность рельефа естественно проявляется в картографическом образе – карте или информационном образе – массиве компьютерных данных.

Различные карты неявно зависят от опыта создававших их специалистов-картографов. Кроме того, карты различаются масштабом. Компьютерные массивы данных различаются пространственным разрешением и алгоритмами, применявшимися для их построения, а те и другие различаются по наборам исходных данных, используемых для построения образов рельефа.

В этих условиях выявление общих форм рельефа, имеющихся на всех различных картах, является чрезвычайно сложной задачей, которая усугубляется тем, что отсутствуют способы аналитического сравнения разнообразных локальных форм образов рельефа между собой. Это обстоятельство, а также практическая невозможность нахождения прямого соответствия между образом рельефа и объективной поверхностью рельефа являются причиной отсутствия универсалии рельефа. Если найти эффективный способ сравнения формы образов рельефа между собой, то универсалию рельефа можно построить. Действительно, все образы рельефа описывают единственный физический объект – рельеф Земли, а поэтому у каждого из них с необходимостью должно быть что-то общее в форме поверхности, которую каждый образ представляет. Именно форма, присущая большинству образов, будет наиболее репрезентативна форме рельефа, и именно это сходство форм образов позволяет нам эту общность форм считать универсалией рельефа. Достоверность построенной так универсалии рельефа будет изменяться от региона к региону в зависимости от степени сходства форм, от числа имеющихся образов, от точности, разрешающей способности исходной информации, использованной для построения образов рельефа. Поэтому с появлением новых измерений рельефа Земли универсалия рельефа будет постоянно модифицироваться, повышая свою достоверность.

Для построения универсалии рельефа необходимо иметь способ оценки сходства форм образов рельефа. Этот способ должен на основе исходных данных в виде

любых существующих измерений рельефа и образов рельефа выявлять общую форму в них. Объем и разнообразие входной информации требуют компьютеризации метода вычислений этого способа.

Последнее требует строго математического описания терминологии, связанной с решаемой задачей, а именно, следует формализовать понятия «рельефа» и «формы». Поэтому приведенное ранее определение понятия «рельеф Земли» неэффективно для целей автоматизации решения задачи. Сложно подходящим образом формализовать слова «неровности» или «очертания». Для наших целей следует определить рельеф только посредством математических понятий. Это сделано в статье автора [4], и здесь повторяться не будем.

Что же касается понятия «форма», то с ним дело обстоит сложнее. Прямолинейное использование понятий элементарной геометрии [5] или даже дифференциальной геометрии [6], используемых в геоморфологии, не приводит к цели. Локальные «неровности» рельефа далеки от чистых геометрических образов. Эти «неровности», с одной стороны, сами являются частью, элементами других, больших по размеру, а с другой, они включают в себя меньшие по размеру «неровности». Разделить эту иерархически сложно устроенную систему «неровностей» на отдельные «неровности» невозможно. Учитывая, что нет одинаковых образов рельефа, нет и взаимно однозначного поточечного соответствия между какими-либо двумя образами рельефа, то есть отсутствует равенство, эквивалентность поверхностей. Однако мы претендуем на выявление всего лишь сходства в форме образов рельефа. В отличие от эквивалентности понятие сходства означает более слабое свойство одинаковости. Сходство определяет лишь частичное подобие двух форм, то есть частичную эквивалентность, одинаковость с некоторыми допустимыми потерями.

Для решения нашей задачи – построения способа выявления общей формы в образах рельефа – нужно уточнить, то есть формализовать, понятие сходства поверхностей.

Для этого следует использовать математический аппарат топологии. Действительно, понятие «сходства» определяет лишь частичное подобие двух форм, и в этом смысле такое подобие форм изучает топология. Это область геометрии, исследующая в самом общем виде явление непрерывности, а также свойства обобщенных геометрических объектов, не меняющиеся при малых деформациях и не зависящие от способа их задания. В топологии не рассматриваются метрические свойства объектов. Например, с точки зрения топологии кружка и бублик неотличимы. Важной чертой топологии является необычайная широта класса геометрических объектов, попадающих в сферу действия ее законов. Это вызвано тем, что топология не использует никаких классических геометрических понятий типа расстояния, прямолинейности, линейности и т. д.

Детальная связь между картографическими образами поверхности рельефа и формальными понятиями топологии изложена в статье [7]. В ней показано, что топологические свойства образа рельефа в картографии полностью соответствуют топологическим свойствам гладкой функции Морса. При этом возникает противоречие между дискретным характером картографических данных о рельефе Земли и непрерывным характером гладкой функции Морса. Конечно, можно, используя некоторый интерполяционный алгоритм, получить аналитический вид поверхности, например, в виде некоторых сплайнов, но любой алгоритм интерполяции будет вносить непредсказуемые возмущения в конечный образ поверхности. Поэтому следует отказаться

от удержания свойства непрерывности для поверхностей, а использовать дискретные инструменты для их описания. Компьютерные вычислительные технологии также предполагают дискретность информации, описывающей исследуемые объекты.

Таким дискретным математическим инструментом может служить граф Кронрода-Риба, соответствующий некоторому образу рельефа. Основные свойства графа Кронрода-Риба изложены в статье [7], более подробную информацию об этих графах можно получить в литературе, цитированной в статье.

Наша задача сводится к определению и уточнению понятия «сходства» для графов Кронрода-Риба.

Граф Кронрода-Риба представляет собой неориентированный граф без петель, у которого все концевые вершины имеют степень, равную единице, а все внутренние вершины – трем. Напомним, что вершины графа Кронрода-Риба являются образами критических точек образа рельефа, причем, концевые вершины являются образами локальных минимумов и максимумов, а внутренние – образами седловых точек.

Неориентированные графы можно сравнивать между собой как объекты, представляющие собой множество вершин с отношениями между ними – ребрами. Отношение сходства между двумя графами называется отношением гомоморфизма (или просто гомоморфизмом). Гомоморфизм (греч. *isos* – одинаковый, *homoios* – подобный, *morphe* – форма) – понятия, характеризующие соответствие между структурами объектов. Гомоморфизм двух графов Кронрода-Риба следует интерпретировать как сходство формы двух образов рельефа. Таково же отношение между образом рельефа и местностью.

На основе понятия гомоморфизма можно определить понятие изоморфизма. Изоморфизм есть отношение взаимного гомоморфизма систем. Изоморфизм есть уточнение понятия одинаковости по форме: форма есть то общее, что имеется у всех изоморфных систем. Изоморфизм буквально означает эквивалентность или сходство формы (*iso-morphism*).

Таким образом, задачей выявления сходства между образами рельефа является задача выявления изоморфных подграфов в исходных графах.

Алгоритмы вычисления изоморфных подграфов графов для общего случая известны, но это сложная комбинаторная задача [8]. Упростить ее решение можно путем оснащения вершин графов Кронрода-Риба соответствующими им значениями высот (глубин) критических точек и их пространственных координат. Очевидно, что координаты разных графов не могут быть равны. Поэтому изоморфные подграфы следует выявить, находя ближайшие по евклидову расстоянию между вершинами различных графов.

На основе найденных изоморфных подграфов можно вычислить вершины изоморфного графа Кронрода-Риба, соответствующего универсалии рельефа, путем вычисления среднего арифметического значения координат и высот (глубин) для каждой вершины подграфа. Очевидно, что достоверность изоморфного графа Кронрода-Риба будет тем выше, чем для большего числа графов Кронрода-Риба он является изоморфным подграфом.

Безусловно, изложенные в статье основные положения построения универсалии рельефа требуют детального уточнения и тщательной проработки. Автор надеется, что среди картографов и гидрографов найдутся энергичные специалисты, которые смогут это осуществить. Ясно, что главная задача это построение автоматизированной технологии оценки сходства образов рельефа.

ЛИТЕРАТУРА

1. General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) URL: <http://www.gebco.net/>
2. ETPO1 Global Relief Model URL: <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>
3. International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) URL: <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/arctic/>
4. Жуков Ю. Н. Рельеф как математический объект // Навигация и гидрография. – 2011. – № 32. – С. 49–59
5. Грейсух В. Л. Образное представление геоморфологической информации // Рельеф Земли и математика. – М.: Мысль, 1967. – С. 18–43.
6. Симонов Ю. Г. Объяснительная морфометрия рельефа. – М.: ГЕОС, 1999. – 263 с.
7. Жуков Ю. Н. Математические инструменты описания картографического отображения рельефа Земли // Навигация и гидрография. – 2011. – № 32. – С. 60–69.
8. Малинин Л. И., Малинина Н. Л. Изоморфизм графов в теоремах и алгоритмах. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 256 с.

«UNIVERSALIA» OF THE EARTH'S RELIEF

Y. N. Zhukov («GNINGI» OJSC)

The problem of creating the single description of the Earth's relief form, the universalia of the relief, is considered. To solve the problem, the possibility to use the mathematical structures describing the topological characteristics of smooth surfaces – the Kronrod-Reeb tree – is suggested and substantiated. The scheme of the technique for constructing the universalia of the relief is presented.

УДК 528.92

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОВЕРКИ КОРРЕКТНОСТИ КАРТОГРАФИЧЕСКОГО
ОБРАЗА ПОДВОДНОГО РЕЛЬЕФА**

Ю. Н. ЖУКОВ
(ОАО «ГНИНГИ»)

Приводится список количественно оцениваемых характеристик, которые определяют корректность картографического представления рельефа. Формулируются требования к функциональности программной системы для автоматизированной оценки корректности картографического представления рельефа.

Текущий век стал временем повсеместного использования геопространственной информации во всех областях человеческой деятельности. Это обстоятельство во многом определено широким внедрением компьютерных технологий в практику обработки и применения картографических данных. В настоящее время разработано большое число разнообразных программных средств компьютерной обработки и визуализации данных о рельефе Земли. Они наиболее известны как ГИС-приложения (геопространственные информационные системы). Исходной информацией о рельефе для таких систем являются два источника: либо векторная копия печатной карты, либо массивы высот рельефа. Первый набор данных в основном представляет собой изолинии высот рельефа. Второй получают либо обработкой стереоснимков земной

поверхности, либо путем использования многолучевых эхолотов. Программные средства позволяют конвертировать эти два различных набора данных друг в друга.

На этой основе разработано и функционирует огромное число локальных и интернет приложений, коммерческих и бесплатных, представляющих данные о рельефе и многочисленных средств их преобразования и обработки. Однако ни одна из существующих систем не позволяет сравнить форму рельефа, полученного из различных источников, но для одной и той же области Земли. Можно сравнивать различные статистические характеристики, можно сравнивать графики высот на «разрезах» по произвольному направлению, но сравнивать форму поверхности участка земли нельзя! Другими словами, что такое форма рельефа и как ее описывать, эти системы не знают. Существуют многочисленные варианты так называемых «моделей» рельефа Земли, например [1–3]. Однако нет никаких данных о том, какие различия в форме присутствуют между этими «моделями», и неизвестно, какая из них более корректно представляет реальный рельеф и в каких масштабах.

Это существенная проблема, имеющая особую значимость для гидрографии. В отличие от топографии, где рельеф явно можно наблюдать, подводный рельеф доступен только косвенным измерениям. Восстановление формы рельефа по точечным данным – чрезвычайно сложная задача, доступная только высококлассным гидрографам. Прямое переложение экспертных методов восстановления формы подводного рельефа в компьютерных технологиях невозможно.

Автор полагает искать решение проблемы на пути применения современных вычислительных методов описания гладких поверхностей – вычислительной топологии [4]. Достаточным основанием служит то обстоятельство, что математическая топология позволяет описывать форму гладкой поверхности как в непрерывном, так и в дискретном ее представлении. Это особенно важно для компьютерной обработки данных о рельефе, так как картографический образ рельефа является гладкой непрерывной функцией, а способ представления этой функции в компьютере является принципиально дискретным.

С точки зрения топологии, картографическое представление рельефа описывается двумя формальными структурами – клетками Морса-Смейла и деревьями Кронрода-Риба. Важной положительной особенностью этих формальных структур является то, что они являются дискретными объектами, представляющими непрерывный картографический образ рельефа. Это обстоятельство согласуется с дискретным характером представления данных в компьютере.

Дерево Кронрода-Риба представляет собой структуру, описывающую критические точки картографического представления рельефа: точки вершин, впадин и перевалов. Клетки Морса-Смейла представляет собой структуру, описывающую критические точки картографического представления рельефа и линии гребней, соединяющие вершины с перевалами, и тальвегов, соединяющие впадины с перевалами. Эти структуры дополняют друг друга (рис. 1).

Для картографического представления рельефа дерево Кронрода-Риба представляет собой плоский граф, имеющий T штук тройных точек ветвления, $K = T + 2$ концевых точек и $P = 2T + 1$ ребро, соединяющие $K + T = 2T + 2$ вершины графа. Эти соотношения носят имя Л. Эйлера. Клетки Морса-Смейла представляют собой одномерный плоский остов картографического представления рельефа. Он называется критической сетью. Можно считать, что клетка Морса-Смейла представляет собой четырехугольник с искривленными сторонами.

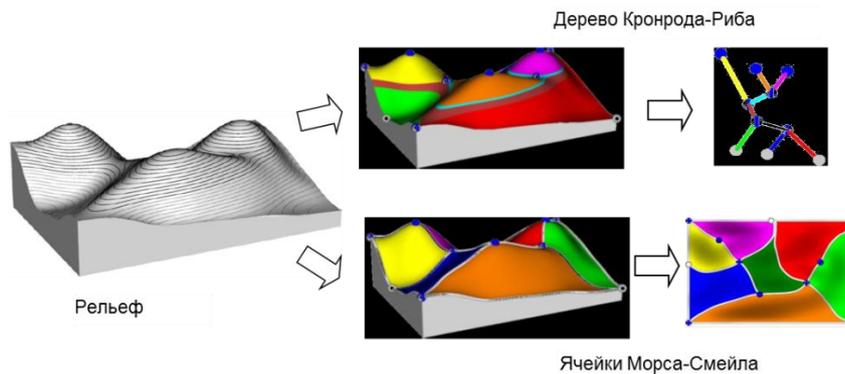


Рис. 1. Соответствие между локальными формами картографического представления рельефа, клетками Морса-Смейла и деревьями Кронрода-Риба

Известны все возможные простейшие структуры ячеек Морса-Смейла и деревьев Кронрода-Риба для картографического представления рельефа. Существуют всего семь различных простейших деревьев Кронрода-Риба. Все они представлены на рис. 2. Простейших клеток Морса-Смейла – три. Они представлены на рис. 3 (с точностью до симметрии относительно вертикальной оси).

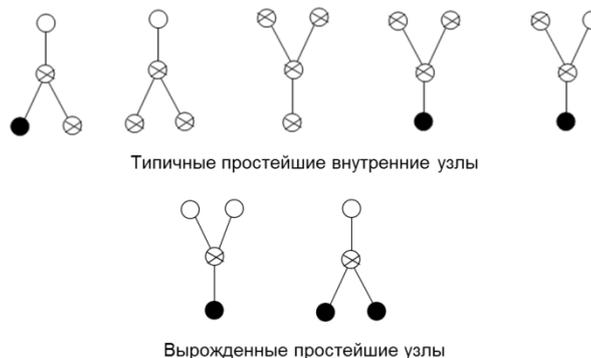


Рис. 2. Простейшие структуры дерева Кронрода-Риба для картографического представления рельефа.

Условные обозначения: ○ – вершина, ● – впадина, ⊗ – перевал

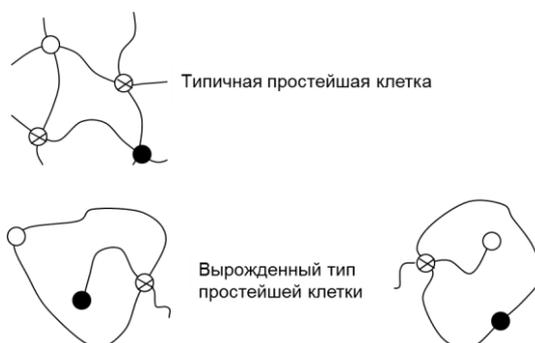


Рис. 3. Три возможных типа клетки Морса-Смейла для картографического представления рельефа. См. условные обозначения к рис. 2

Подобное описание локальных форм поверхности возможно для любой скалярной гладкой функции, заданной на сфере.

Эти абстрактные структуры описания локальных форм картографического представления рельефа и соотношение Эйлера позволят разрешить проблему оценки корректности построения карт рельефа. Действительно, для проверки корректности заданной карты достаточно построить соответствующие клетки Морса-Смейла, дерево Кронрода-Риба и проверить для них:

- выполнение соотношения Эйлера;
- соответствие каждой ячейки Морса-Смейла одной из трех простейших ячеек,
- соответствие каждого внутреннего узла дерева Кронрода-Риба одному из простейших узлов;
- пространственную изолированность критических точек.

Для автоматизации этой рутинной работы необходима программная система, которая должна включать следующие подсистемы: ввода исходных данных, построения структур клеток Морса-Смейла и Кронрода-Риба, сравнения этих структур для различных исходных данных, выявления совпадающих частей, отчета.

Представляется, что исходные данные должны включать:

- растровый тип файлов, векторный тип файлов, представляющих копии как навигационных, так и топографических печатных карт;
- массивы глубин (высот) в узлах регулярной сетки, например, данные измерений многолучевым эхолотом;
- массивы данных, представляющие клетки Морса-Смейла и деревья Кронрода-Риба.

Минимальная функциональность программной системы должна обеспечивать:

- построение и гридирование поверхности по векторным картографическим данным;
- вычисление клеток Морса-Смейла и деревьев Кронрода-Риба по гридированным данным;
- построение клеток Морса-Смейла по растровым картам экспертным путем;
- построение 3D поверхности по клеткам Морса-Смейла;
- количественную оценку сходства между двумя массивами клеток Морса-Смейла;
- количественную оценку сходства между двумя массивами деревьев Кронрода-Риба;
- упрощение (картографическую генерализацию) клеток Морса-Смейла;
- упрощение (картографическую генерализацию) деревьев Кронрода-Риба;
- вывод с сохранением клеток Морса-Смейла и деревьев Кронрода-Риба;
- проверку корректности клеток Морса-Смейла и деревьев Кронрода-Риба.

Внедрение новых вычислительных топологических методов описания рельефа дна позволит повысить точность составления карт рельефа дна и навигационных карт, автоматизировать решение прикладных задач баллистики стрельбы артиллерией кораблей по береговым целям, учесть изменчивость рельефа дна на мелководье в системах управления роботизированными подводными аппаратами ВМФ, повысить эффективность гидрографического обеспечения морской деятельности на шельфе морей.

Представляется, что ГНИНГИ является организацией, наиболее заинтересованной в разработке и внедрении этой компьютерной системы, которая может служить

методологической основой для создания нового направления в области компьютерной обработки и анализа данных о рельефе Земли в различных сферах деятельности человека.

ЛИТЕРАТУРА

1. General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) URL: <http://www.gebco.net/>
2. ETPO1 Global Relief Model URL: <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>
3. International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) URL: <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/arctic/>
4. Жуков Ю. Н. Математические инструменты описания картографического отображения рельефа Земли // Навигация и гидрография. – 2011. – №32. – С. 60–69.

AUTOMATION OF CHECKING THE CORRECTNESS OF THE CARTOGRAPHIC IMAGE OF THE SUBMARINE RELIEF

Y. N. Zhukov («GNINGI» OJSC)

The notion of the single description of the Earth's relief form is introduced and substantiated. The technique for constructing the single cartographic image of the relief is described.

УДК. 52.337 + 629.051

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МАГНИТНОЙ СЪЕМКИ АКВАТОРИИ, ВЫПОЛНЕННОЙ БОРТОВЫМ И БУКСИРУЕМЫМ МАГНИТОМЕТРАМИ

В. А. БЛЕДНОВ
(СПбФ ИЗМИРАН)

Приведено сравнение результатов определения угловых компонент магнитного поля Земли, выполненных на борту движущегося ферромагнитного объекта (судна), с данными измерений магнитного поля, полученных буксируемым магнитометром. По результатам съемки построены карты распределения магнитного поля Земли на одном и том же полигоне. Показано, что измерение угловых компонент магнитного поля Земли с сопоставимой чувствительностью легче, чем его силовые компоненты.

Магнитная съемка на морских акваториях обычно осуществляется с помощью буксируемых за судном магнитометров. Основной помехой, препятствующей измерениям, осуществляемым непосредственно на движущемся ферромагнитном объекте, является его *собственное магнитное поле*. В СПбФ ИЗМИРАН был разработан *метод определения угловых компонент* (МОУК) магнитного поля Земли (МПЗ) на борту ферромагнитного объекта, осуществляемый по результатам измерений суммарного магнитного поля (сумма собственного магнитного поля объекта и магнитного поля Земли) [1–4]. При реализации МОУК собственное магнитное поле объекта, на котором установлена магнитометрическая аппаратура, *принципиально* не влияет на результаты измерений.

Векторная диаграмма составляющих суммарного магнитного поля на ферромагнитном объекте представлена на рис. 1.

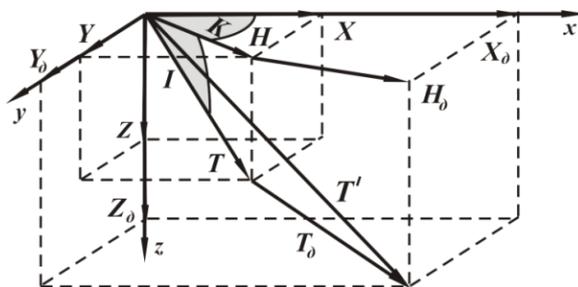


Рис. 1. Векторная диаграмма составляющих суммарного магнитного поля на ферромагнитном объекте. Объяснения в тексте

На рисунке T, X, Y, Z – модуль вектора магнитной индукции (ВМИ) поля Земли и его силовые компоненты [2]. На борту ферромагнитного объекта обычно измеряется модуль ВМИ, равный: $T' = T + T_0$, где T_0 – модуль ВМИ поля объекта. Если же осуществляются компонентные измерения, то получаемая информация о компонентах суммарного магнитного поля, следующая: $X' = X + X_0$, $Y' = Y + Y_0$, $Z' = Z + Z_0$, где X_0, Y_0, Z_0 – соответствующие компоненты ВМИ поля объекта. В такой системе измерений угловыми компонентами являются углы K и I (рис. 1). Как следует из векторной диаграммы (рис. 1), эти величины определяют направление ВМИ поля Земли.

Собственное магнитное поле объекта характеризуется наличием магнитомягкой и магнитотвердой намагниченности. Если объект движется в однородном магнитном поле, постоянно переориентируясь в трех взаимно ортогональных плоскостях, то в любой точке на его борту величина компонент суммарного магнитного поля, фиксируемых магнитометром, будет:

$$\bar{T}' = \{ E + W \} \cdot |S| \cdot \bar{T} + \bar{G}, \quad (1)$$

где \bar{T}' – ВМИ суммарного поля;

E – единичная матрица;

$W = \begin{vmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & k \end{vmatrix}$ – матрица параметров Пуассона;

$|S| = |S_i| \cdot |S_j| \cdot |S_k|$ – матрица, определяющая ориентацию объекта;

\bar{T} – ВМИ поля Земли;

$$\bar{G} = \begin{vmatrix} P \\ Q \\ R \end{vmatrix} \text{ – ВМИ постоянного поля объекта.}$$

Уравнение (1) дает возможность решить корректно задачу определения угловых компонент ВМИ поля Земли: K и I .

Лабораторные измерения подтвердили работоспособность разработанного метода измерений (МОУК). Независимо от количества ферромагнитных масс и ориентации их собственного магнитного поля, определение угловых компонент K и I осуществлялось с погрешностью 0,01–0,02 угл. град.

На рис. 2 показана схема размещения измерительно-вычислительного комплекса, реализующего МОУК на гидрографическом судне ГС-403 (1500 т). С целью проверки его работоспособности в различных условиях формирования суммарного магнитного поля, магнитометры были установлены в двух точках. Точка 1 расположена в непосредственной близости от главного магнитного компаса, точка 5 – в непосредственной близости от размагничивающих магнитов, обеспечивающих его работу. Гироскопическая система «минута» (точка 3) была установлена на специальных ферромагнитных балках, обеспечивающих жесткую механическую связь с магниточувствительным преобразователем (магнитометром), установленным в точке 2. Вычислительный комплекс (точка 4) был установлен в ходовой рубке. Для контроля результатов измерений магнитного поля Земли использовался стандартный буксируемый магнитометр МБМ-1 (точка 6).



Рис. 2. Схема установки магнитометрического комплекса на ферромагнитном судне ГС-403

Экспериментальные исследования были выполнены на двух полигонах, расположенных на акватории Финского залива. Первый полигон, на котором проводились измерения, расположен между островами Мощный и Сескар. Сейчас этот район является фарватером для прохода в Лужский порт.

Данный район интересен тем, что он расположен между островами на разломе коренных пород. В таких местах распределение магнитного поля практически всегда имеет характерные особенности. И хотя до проведения измерений никаких количественных данных известно не было, но сведения о формировании магнитных аномалий позволяли предположить, что измеряемое поле должно иметь определенную специфику. Коренные породы, определяющие характер этого поля, разошлись, образовав продольный желоб, в результате которого магнитные силовые линии должны

были «выстроиться» в меридиональном направлении. Подобная структура магнитного поля характерна практически для всех узкостей (проливов) вне зависимости от их географической ориентации. Важно было установить, подтвердят ли проведенные измерения, осуществленные по методу определения угловых компонент, эту гипотезу.

Методика съемки была построена следующим образом. В начале судно двигалось вдоль галсов, ориентированных в меридиональном направлении (9 проходов). Затем была выполнена съемка в поперечном направлении (10 галсов). Данные, полученные в точках пересечения, сравнивались, для определения точности выполненных измерений. В связи с тем, что не была обеспечена необходимая точность контроля магнитного курса судна, было решено ограничиться определением только магнитного наклона. Однако специфика решения уравнений (1) такова, что обе величины – как магнитное наклонение I , так и магнитный курс K движущегося объекта, определяются по результатам решения одного и того же уравнения. Поэтому погрешность получения этих величин практически одна и та же. По оценкам показаний в точках пересечения, было установлено, что средняя величина погрешности составила 0,03–0,1 угл. град.

В результате измерений была построена карта магнитного наклона поля Земли, сформировавшегося между указанными островами (рис. 3).

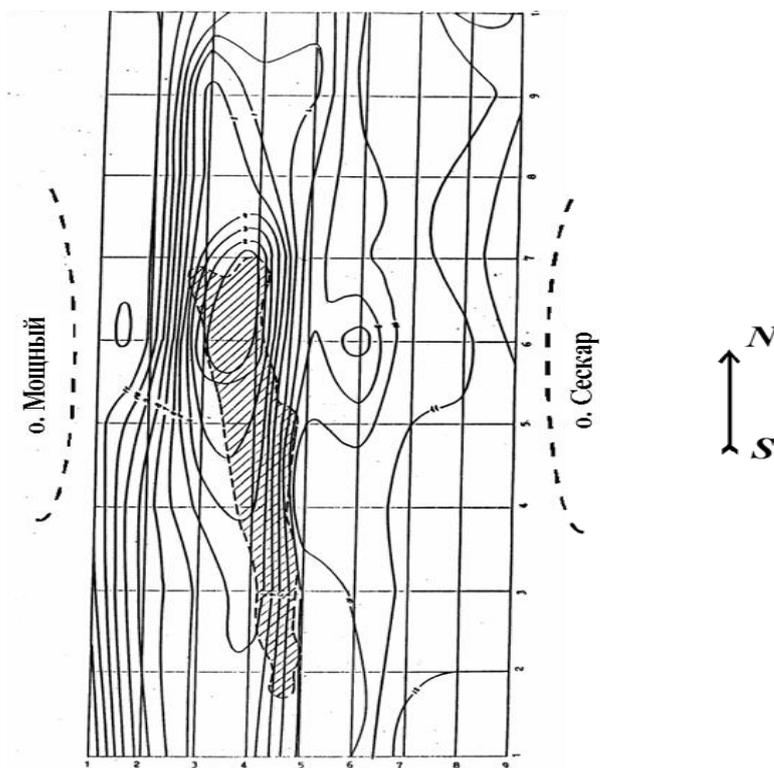


Рис. 3. Карта магнитного наклона, составленная по результатам измерений, выполненных на борту ферромагнитного судна ГС-403

Геомагнитный полигон 1,8 x 4,5 мили. Межгалсовые расстояния 0,2 и 0,5 мили соответственно.

Значения цифр на карте (угловые градусы): 7 – 71,04; 2 – 71,17; 3 – 71,30; 4 – 71,43; 5 – 71,56; 6 – 71,69; 7 – 71,82; 8 – 71,95; 9 – 42,08; 10 – 72,21; 11 – 72,34; 12 – 72,47; 13 – 72,60.

(- - - - -) – 50-метровая изобата

Как видно, магнитные силовые линии имеют строго ориентированную направленность, подтверждая высокую точность определения направления ВМИ поля Земли. Так как в момент проведения измерений структура морского дна была неизвестна, то сравнение характера изменения магнитного наклонения с рельефом морского дна, существующего между островами, было проведено позже. На рис. 4, 5 показаны результаты сравнения структуры магнитного поля с рельефом морского дна, выполненные по одному выбранному сечению. Видно, что существующая корреляция между указанными характеристиками вполне достаточна для того, чтобы использовать результаты подобных съемок для получения информации о рельефе морского дна и движении судна вдоль этого «магнитного желоба».

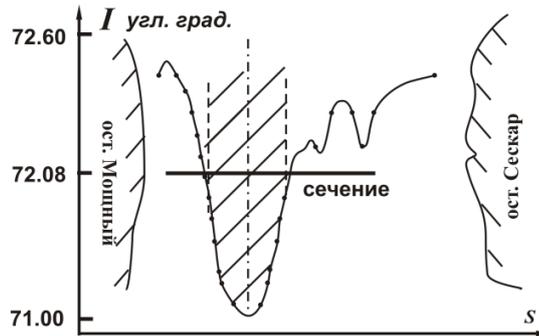


Рис. 4. Изменение наклонения магнитного поля Земли вдоль избранного «сечения»

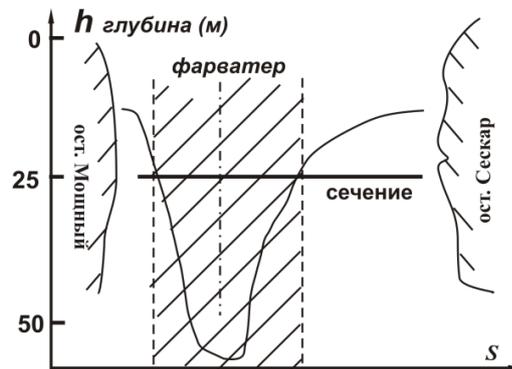


Рис. 5. Изменение глубины вдоль избранного «сечения»

Следующий этап проверки, выполненный на ГС-403, заключался в сравнении данных магнитной съемки одного и того же полигона двумя методами измерений. Первый из них был реализован на борту судна по разработанному методу определения угловых компонент. Второй – путем использования буксируемой гондолы с установленным в ней магнитометром. Задача состояла в том, чтобы построить две магнитные карты одного и того же района. По результатам измерений на борту судна строилась карта магнитного наклонения поля Земли I , а с помощью измерений, выполненных в буксируемой гондоле, строилась карта модуля вектора магнитной индукции T того же района. Построенные карты приведены на рис. 6 (распределение модуля ВМИ) и на рис. 7 (распределение магнитного наклонения).

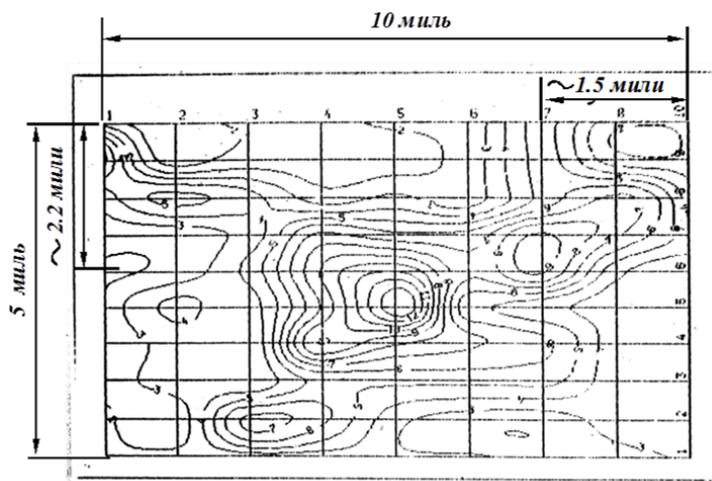


Рис. 6. Карта полигона, построенная по результатам измерений модуля ВМИ с помощью буксируемого прибора

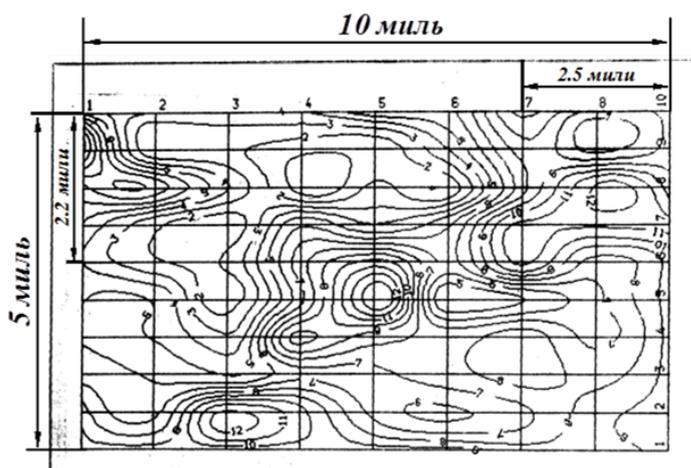


Рис. 7. Карта полигона, построенная по результатам измерений магнитного наклона поля Земли на борту ГС-403

Для более объективного сравнения результатов выполненных измерений был выбран маршрут, «рассекающий» самый аномальный участок (шестой сверху горизонтальный галс «запад-восток»). Максимальная аномалия модуля ВМИ поля Земли на этом маршруте составляет более 1000 нТл, а соответствующая ей аномалия магнитного наклона – порядка 1,8 угл. град. Результаты сравнения показаны на рис. 8.

На этом же галсе была обнаружена синусоидальная аномалия, позволяющая сопоставить по чувствительности результаты измерения модуля ВМИ (нТл) и магнитного наклона (угл. град.). Окантовка сравниваемых показаний приведена на этом же рисунке. Затем был построен график в большем масштабе (приведен на рис. 9).

Как следует из показанного на рис. 9 графика, изменение магнитного наклона ВМИ составляет 0,5 угл. град., а изменение модуля этого же вектора равно

15 нТл. Считая, что чувствительность МОУК составляет 0,1 угл. град. (на самом деле она выше), строилось отношение, определяющее возможность фиксации самого малого изменения магнитного наклонения, вычисляемое из отношения: $\alpha = 0,5/0,1$. Следовательно, при определении чувствительности, которую необходимо обеспечить при измерении модуля ВМИ на борту судна, нужно исходить из следующего соотношения: $\beta = 15/5$. Таким образом, для обеспечения чувствительности системы определяющей модуль ВМИ, сопоставимой с чувствительностью определения угловых компонент, необходимо измерять модуль ВМИ с точностью порядка 3 нТл. Насколько известно, обеспечить такую точность, когда при качке собственное магнитное поле судна меняется на 5000–10000 нТл, практически невозможно.

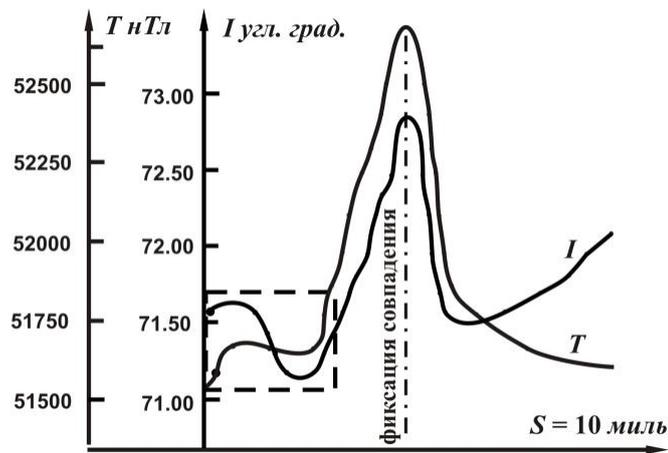


Рис. 8. Оценка результатов измерений на одном и том же галсе: магнитного наклонения – на борту судна ГС-403 (I), модуля ВМИ – буксируемым магнитометром (T)

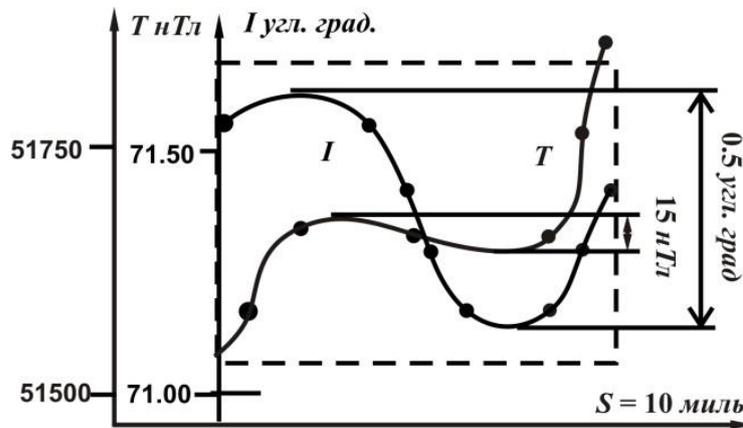


Рис. 9. Сравнение чувствительности магнитометрической аппаратуры при фиксации наклонения I и модуля T ВМИ поля Земли

Таким образом, обеспечить с сопоставимой чувствительностью измерение силовых компонент магнитного поля значительно труднее, чем его угловых компонент.

ЛИТЕРАТУРА

1. Способ определения направления вектора магнитной индукции геомагнитного поля Бледнова: а. с. 854155 СССР / Бледнов В. А. – 1979.
2. Бледнов В. А. Основные принципы определения компонент магнитного поля Земли на движущихся ферромагнитных объектах (основы теории разделения полей) // Успехи физических наук. – 1997. – Т. 167. – № 10. – С. 1113–1118.
3. Бледнов В. А. Метод определения угловых компонент вектора индукции геомагнитного поля на борту движущихся ферромагнитных носителей // Доклады Академии наук. – 1995. – Т. 341 – № 2. – С. 251–254.
4. Бледнов В. А. Метод определения угловых компонент вектора индукции геомагнитного поля на борту движущихся ферромагнитных носителей // Доклады Академии наук. – 1997. – Т. 355 – № 1. – С. 101–103.

COMPARISON OF RESULTS OF THE WATER AREA SURVEY CARRIED OUT BY THE SHIPBORNE AND TOWED MAGNETOMETERS

V. A. Blednov (SPb Branch ISMIRAN)

The results of determining the angular components of the Earth's magnetic field carried out on board the moving ferromagnetic object (vessel) are compared with magnetic field measurement data obtained by towed magnetometer. Based on the survey results, the maps of the Earth's magnetic field distribution at the same proving range are drawn. It is shown that the angular components measurement enables the accuracy and sensitivity of the magnetometric measurements techniques to be increased.

УДК 623:658.562

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОНОМНЫХ ПОДВОДНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВМФ ГИДРОГРАФИЧЕСКОЙ И ОКЕАНОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ

Э. С. ЗУБЧЕНКО (ВУНЦ ВМФ «ВМА»),
А. М. ШАРКОВ (ОАО «ГНИНГИ»)

В статье рассмотрены перспективы использования необитаемых подводных аппаратов в интересах решения задач НГО и ГМО ВМФ. Приведены примеры их использования в зарубежных странах.

В решении задач гидрографического и океанологического мониторинга Мирового океана в интересах обеспечения ВМФ гидрографической и океанологической информацией значительная роль отводится автономным необитаемым подводным аппаратам (АНПА), оснащенным измерительной и навигационной аппаратурой для сбора информации в автоматическом режиме.

Такие аппараты могут работать либо на поверхности, либо в толще воды, либо непосредственно у дна как в строго зондирующем режиме по вертикали, так и в режиме пространственного зондирования по горизонтали и вертикали.

Наиболее целесообразным следует считать применение АНПА для:

- 1) гидрографической разведки районов развертывания сил ВМФ и высадки морских десантов;
- 2) океанологической разведки для получения оперативных данных о параметрах морской среды в районах предстоящих операций (боевых действий) сил ВМФ;
- 3) комплексного обследования в навигационно-гидрографическом и океанологическом отношении районов проведения аварийно-спасательных работ;
- 4) скрытной съемки навигационных геофизических полигонов, создания морских опорных гравиметрических пунктов для морской гравиметрической съемки;
- 5) скрытной оперативной съемки рельефа дна акваторий десантно-доступных участков побережья;
- 6) океанологической съемки для получения климатических (режимных) параметров состояния морской среды.

АНПА, используемые ВМФ, обладают возможностью:

- выполнения комплексных океанографических измерений, перемещаясь по системе запланированных галсов (профилей) в течение продолжительного времени при одновременной работе навигационных и океанографических измерительных приборов (использование этих средств обеспечивается при этом развертыванием их с гидрографических судов, кораблей, подводных лодок и самолетов ВМФ);
- осуществления навигации АНПА и координатной привязки получаемых данных измерений с требуемой точностью;
- передачи данных измерений и приема управляющих команд по различным каналам, в том числе и по каналам спутниковой связи через надводное судно или плавающий в районе работ буй.

Большинство АНПА работают совместно с надводным судном, обеспечивающим их навигацию, хотя потребляемая мощность делает возможным автономное выполнение ими работ в течение недель и даже месяцев. В этот период целесообразно осуществлять периодическую передачу данных на береговые и корабельные приемные пункты через спутник до возвращения аппарата.

Развитие обеспечивающих работу АНПА систем происходит в направлении повышения их автономности и точности координатного обеспечения за счет оснащения современной навигационной аппаратурой. На АНПА устанавливаются наиболее современные с технической точки зрения технические средства.

В табл. 1 приведен обзор технических характеристик зарубежных АНПА [1].

Таблица 1

Технические характеристики зарубежных АНПА

Наименование изделия	<i>ATLAS MARIDAN Sea Otter MkI</i>	<i>ATLAS MARIDAN Sea Otter MkII</i>	<i>C-Surveyor-III Hugin 4500</i>	<i>Fugro Hugin 3000</i>
Наименование фирмы-изготовителя	<i>ATLAS MARIDAN ApS</i>	<i>ATLAS ELECTRONIC GmbH</i>	<i>C+C Technologies</i>	<i>Echo Surveyor</i>
Общее число построенных АПА	5	Находится в разработке	–	2
Функциональные возможности	Съемка рельефа дна и его обследование	Съемка рельефа дна и его обследование	Геофизическая съемка, съемка трасс кабеля и трубопроводов, измерение океанологических параметров	–

Наименование изделия	<i>ATLAS MARIDAN Sea Otter MkI</i>	<i>ATLAS MARIDAN Sea Otter MkII</i>	<i>C-Surveyor-III Hugin 4500</i>	<i>Fugro Hugin 3000</i>
Вес АПА (в воздухе), кг	1500	110	–	1400
Полезная нагрузка, кг	300	–	–	–
Размеры	4,5×1,2×0,6	3,45×0,98×0,48	6,53×1,05×1,06	5,35×1×1
Максимальная глубина погружения	600 м	600 м	4500 м	3000 м
Минимальный радиус поворота	10 м	Менее 10 м	15 м	15 м
Штатные навигационные системы	<i>MARPAS</i> – инерциальная навигационная система в сочетании с доплеровским лагом, <i>DGPS</i> , датчики проводимости, температуры, плотности и давления воды	<i>MARPAS</i> – инерциальная навигационная система в сочетании с доплеровским лагом, <i>DGPS</i> , датчики проводимости, температуры, плотности и давления воды	Инерционная навигационная система	Инерционная навигационная система <i>iXSEA IMU 90</i> , гидроакустическая навигационная система <i>Simrad HiPAP 500 USBL</i> , глубоководный датчик давления <i>Parascientific Digiquartz</i> , доплеровский лаг – <i>RDI, WHN-300, 307</i> кГц
Дополнительные навигационные системы	Гидроакустическая навигационная система с ультракороткой базой, с длинной базой и искусственной длинной базой	Гидроакустическая навигационная система с ультракороткой базой, с длинной базой и искусственной длинной базой		–
Навигационные системы, используемые для коррекции позиции АНПА	–	–	Доплеровский лаг, приемник СНС системы <i>HiPaP</i>	<i>DGPS, USBL, IMU</i> , доплеровский лаг, датчик давления
Штатные системы	ГБО Klein 2000, МЛЭ Reson 8125, профилометр стратификации донных отложений <i>Geochirp</i>	<i>ATLAS</i> – гидролокатор с синтетизированной апертурой	<i>Kongsberg Simrad EM2000 Multi beam</i> , ГБО со сверхузким динамически фокусируемым лучом <i>DW 106 220/410</i> кГц фирмы <i>Edgetech</i> , профилометр осадочных пород работающий на частоте 1-6 кГц	Многочувствительный эхолот <i>EM 2000</i> , гидролокатор бокового обзора фирмы <i>Edgetech</i> , профилометр донных отложений, зонд измерения скорости звука в воде
Дополнительные датчики	Дополнительные датчики по выбору покупателя	Дополнительные датчики по выбору покупателя	Измеритель температуры и солености – <i>Seabird SBE 19</i> фирмы <i>Methane Sensor</i>	Метановый пробник
Продолжительность подводного плавания при номинальной мощности	7–15 час.	24 часа на скорости 4 уз.	75 час.	60–70 часов

Наименование изделия	<i>ATLAS MARIDAN Sea Otter MkI</i>	<i>ATLAS MARIDAN Sea Otter MkII</i>	<i>C-Surveyor-III Hugin 4500</i>	<i>Fugro Hugin 3000</i>
Средняя скорость/максимальная скорость, узел	3/5	4/8	4	3,5/6
Использование акустической телеметрии	Акустический модем	Акустический модем	Акустическая линия связи для передачи данных на частотах 12,75–21,25 кГц, Акустическая линия связи для передачи команд на частотах 24–28 кГц	<i>LinkQuest</i> 3,5–22,5 кГц, 4250 бит/с
Использование радиотелеметрии	да	да	Радиобуй на частоте 160, 785 мГц	Приемопередатчик серии SX-450 для передачи данных и телеметрии
Какие данные передаются	–	–	Данные многолучевого эхолота, ГБО и профилометра	Данные измерений эхолота, данные гидролокатора бокового обзора и профилометра
Текущее применение ПА	Обследование морского дна, съемка рельефа дна, геологоразведка, сбор океанологических данных	Геологоразведка, сбор океанологических данных, съемка рельефа дна	–	Съемка дна, геологоразведка месторождений газа и нефти на глубине более 500 м

Примером развития АНПА является создание и применение в США автономных подводных аппаратов *Seagliders* для измерения проводимости, температуры и глубины в слое воды на глубинах от 0 до 1000 м [2].

Такие свободно плавающие (без движителей) АНПА могут проводить измерения до 10 месяцев и через спутниковую телеметрическую систему передавать данные в пункты приема и обработки в установленные программой сеансы связи.

После каждого цикла погружения и всплытия АНПА поднимает антенну из воды и с помощью приемника GPS определяет свое местоположение, а с помощью передатчика по запросу информация о положении и данные измерений передаются на пролетающий спутник телеметрической системы сбора данных. Затем АНПА принимает и регистрирует файл с новым заданием.

АНПА рассматриваемого типа может перемещаться в воде по траекториям, имеющим соотношение наклона к протяженности трассы от 1:5 до 3:1.

Для получения океанологических характеристик в интересующих районах Мирового океана, помимо АНПА, ВМС стран НАТО с 2007 г. используют растущий парк океанских глайдеров (*Gliders*) [3]. Выполненные с их помощью измерения к настоящему времени проведены по более чем 25000 заблаговременно запланированным океанским профилям. Текущий состав средств подобного типа в распоряжении ВМС стран НАТО включает двенадцать глайдеров *Seagliders* (производства фирмы *iRobot*), четыре глайдера *Slocum* (производитель – *Teledyne Webb Research*) и два глайдера *Sprau* (производитель – Скриппсовский Институт Океанографии). ВМС

стран НАТО для продолжения исследований на следующие пять лет планируют получать 150 глайдеров типа LBS-G (Littoral Battlespace Sensing-Glider) от Командования Космических и Военно-морских сил, что позволит довести количество обследованных в Мировом океане профилей до 50000 единиц. Технические характеристики глайдеров приведены в табл. 2.

Таблица 2

Технические характеристики глайдеров, используемых для океанологического обеспечения ВМС США

Наименование характеристики	Значение характеристики			
	iRobot 1KA Seaglider	Slocum Glider	Scripps Spray Glider	LBS-G (Littoral Battlespace Sensing-Glider)
Измеряемые параметры	Температура, проводимость, глубина	Акустический доплеровский профилометр течения (ADCP), Измеритель показателя ослабления света, коэффициент обратного рассеяния света, датчик растворенного кислорода	-	Погружение на глубину 1000 м, с измерением температуры, солености, скорости звука и набора оптических параметров в зависимости от конфигурации датчика
Операционный диапазон глубин, метр	20–1000	Варианты конфигурации: 4–200 или 40–1000	Максимальная глубина 1500	4–1000
Максимальная дальность плавания / продолжительность функционирования	4600 км (650 погружений на 1-километровую глубину)/ до 10 месяцев	Варианты: 600–1500 км (A) / 4000–6000 км (L); 15–50 дней (A) / 4–8 месяцев (L)	6666 часов	3000 км / 5 месяцев
Скорость	25 см/с (0,5 узла)	0,35 м/с (0,68 узла)	-	0,5 узла
Управление и координирование	Счисление пути между поверхностными наблюдениями по GPS с использованием цифрового компаса с тремя осями; гидроакустический высотомер для придонных погружений	GPS приемник, определение оптимального пути, датчик давления	-	-
Телеметрия данных	Через спутниковую систему Iridium	Радиомодем RF, через спутниковую систему Iridium (RUDICS), Argos, Акустический модем	-	Iridium, Freewave/Argos

Данные, получаемые от разворачиваемой НИТО сети глайдеров, используются для обеспечения ВМС океанологическими данными при ведении ими противолодочных операций, минных постановок и противоминных действий, специальных операций.

Проведя анализ технических возможностей существующих АНПА, можно сформулировать обобщенные технические требования к перспективным АНПА, предназначенных для решения задач НГО и ГМО ВМФ (табл. 3).

Таблица 3

Обобщенные технические требования по оснащению и возможностям перспективных АНПА, предназначенных для решения задач НГГМО ВМФ

Наименование аппаратуры, наименование технического параметра	Состав аппаратуры, Значение параметра
Продолжительность подводного плавания при номинальной потребляемой мощности	75–100 час.
Средняя скорость/ максимальная скорость, узел	4/8
Максимальная глубина погружения	4500 м
Функциональные возможности	Съемка рельефа дна и его обследование, магнитная и гравиметрическая съемка, измерение океанологических параметров
Масса, кг	1000
Полезная нагрузка, %	60
Размеры, метр	4,5×1,2×0,6
Бортовые навигационные системы	Интегрированная навигационная система – (инерциальная навигационная система и приемник глобальной спутниковой навигационной системы), доплеровский лаг, гироскоп, гидроакустические навигационные системы
Датчики для сбора гидрографических данных	Гидролокатор бокового обзора, многолучевой эхолот, грунтовой профилометр (стратификация донных отложений)
Датчики для сбора геофизических данных	Гравиметр, дифференциальный и компонентный магнитометры
Датчики для сбора океанологических данных	Датчики проводимости, температуры, плотности и давления воды (зонд STD), доплеровский гидроакустический профилометр течения
Гидроакустическая телеметрия	Гидроакустическая линия связи для передачи данных на судно носитель и передачи управляющих команд
Радиотелеметрия	Радиобуй, приемопередатчик спутниковой системы связи
Передаваемые данные	Данные измерений многолучевого эхолота, ГБО и грунтового профилометра, параметры состояния морской среды

Из рассмотренного материала следует, что использование АНПА для сбора данных о навигационно-гидрографических условиях и исследования состояния морской среды на акваториях в океанских районах и морских зонах ВМФ является одним из приоритетных направлений развития технических средств ВМФ, нацеленных на решение задач навигационно-гидрографического обеспечения деятельности ВМФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Product survey. AUVs // Hydro International. – 2009. – Vol. 13. – No 7.
2. Seagliders fly through the water <http://www.apl.washington.edu/projects/seaglider/summary.html>.
3. Ocean Glider Program Douglas A. May, Robert J. Wahl, Richard K. Myrick, Kenneth P. Grembowicz Operational Oceanography at the Naval Oceanographic Office: Real-time Oceanographic Measurements [html: https://abstracts.congrex.com/.../FCXNL-09A02-1655542-1-Operational](https://abstracts.congrex.com/.../FCXNL-09A02-1655542-1-Operational)

PROSPECTS OF USING THE AUTONOMOUS UNDERWATER UNMANNED VEHICLES TO PROVIDE THE OCEANOGRAPHIC AND OCEANOLOGY INFORMATION FOR THE NAVY

E. S. Zubchenko (The N. G. Kuznetsov Naval Academy), **A. M. Sharkov** («GNINGI»OJSC)

The prospects of using the unmanned underwater vehicles to solve the tasks of navigation-hydrographic and hydrometeorological support for the Navy are considered. Examples of their employment in the foreign countries are given.

УДК 519.83

**ТЕОРЕТИКО-ИГРОВАЯ МОДЕЛЬ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ
В ИНТЕРЕСАХ НАВИГАЦИОННО-ГИДРОГРАФИЧЕСКОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИЛ ФЛОТА**

В. Н. ЗАВГОРОДНИЙ
(ВИ ДПО ВУНЦ «ВМА»)

В статье излагается метод решения составных игр в теоретико-игровом подходе. Рассмотрена модель составной игры, образованной играми различных классов, в целях приложения к задачам навигационно-гидрографического обеспечения деятельности ВМФ. Предложены теоретические положения решения составных игр.

Введение

При принятии решения на ведение боевых действий командир осуществляет выбор способа решения главной и других задач с учетом предполагаемых действий противника, военно-географических условий (навигационно-гидрографических, гидрометеорологических, удаленность от пунктов базирования и др.) района боевых действий, ожидаемых результатов оперативного (боевого) обеспечения (разведки, маскировки, радиоподавления и радиоэлектронной защиты, инженерного обеспечения и др.) и материально-технического обеспечения (ресурсного, технического) операций (боевых действий) [1].

Выполнение мероприятий оперативного (боевого) обеспечения и материально-технического обеспечения создает благоприятные условия для действий своих основных сил и затрудняет действия сил противника. При этом результаты таких мероприятий могут носить неопределенный характер в смысле их влияния на действия сил сторон. Это обстоятельство позволяет при моделировании боевых действий рассматривать влияние обеспечивающих мероприятий НГО по аналогии с влиянием военно-географических условий района боевых действий.

Если заданы множества альтернативных решений каждой из сторон, множества состояний, характеризующих район боевых действий и результаты обеспечивающих мероприятий, и известны количественные оценки результатов взаимодействия указанных факторов, то для моделирования боевых действий с целью поддержки принятия решений может быть использован теоретико-игровой подход.

Случай, когда цели действий сторон противоположны, в теории игр принято описывать моделями антагонистических (матричных – при конечных множествах стратегий сторон) игр. Аппарат бескоалиционных (биматричных) игр позволяет моделировать боевые действия, когда цели сторон различны, но не противоположны (встречный бой, контратака подводной лодки, задачи оперативного прикрытия и т. п.). Для учета влияния условий района боевых действий, оперативного (боевого) обеспечения, материально-технического обеспечения могут использоваться критерии теории статистических решений (игры с «природой») [2].

Постановка задачи

Особенность исследуемой задачи заключается в необходимости одновременно моделирования выбора сторонами способа действий (стратегий) и влияния состояний среды, что в общем случае требует использования различных методов [3].

Такой характер воздействия сторон друг на друга выражается элементами общей матрицы составной игры (функцией выигрыша для игр на бесконечных множествах стратегий), которые представляют отображение игровых ситуаций как результат взаимодействия сторон. Многомерная общая матрица состоит из двумерных матриц подигр-компонент составной игры.

В практике исследования процессов принятия решений возможен случай, когда моделируется игра, в которой участвуют I сторон ($I = \{1, 2, \dots, n\}; n \in N$), и каждая из сторон одновременно участвует еще в одной в игре с $(n + 1)$ -ой стороной.

Пусть Φ, Δ, Θ – это множества стратегий (решений, состояний) сторон 1, 2 и 3 соответственно. Рассмотрим матричную игру $\Gamma_A = \langle \Phi, \Delta, \Theta, H \rangle$, в которой сторонами 1 и 2 осуществляется выбор пары стратегий (φ_i, δ_j) соответственно ($\varphi_i \in \Phi, i=1, \dots, m; \delta_j \in \Delta, j=1, \dots, n$). На результат этого выбора сторона 3 оказывает непреднамеренное воздействие, которое представляет собой факторы среды («природы»), т. е. условия, в которых действуют стороны 1 и 2, и характеризуется состояниями $\theta_k \in \Theta (k = 1, \dots, l)$.

Каждый элемент матрицы игры A (функция выигрыша H) есть значение отображения в множество действительных чисел R ситуации $(\varphi_i, \delta_j, \theta_k)$, заданной на прямом произведении $\Phi \times \Delta \times \Theta$:

$$A = \left\| f_{ijk}(\varphi_i, \delta_j, \theta_k) \right\|_{m \times n \times l}$$

Тогда такую игру Γ_A можно записать в следующем виде [4]:

$$\Gamma_A = \langle \Phi, \Delta, \Theta, H \rangle = \langle \Phi, \Theta, H \mid \Delta = \delta_j (j = 1, \dots, n) \rangle \cup \bigcup \langle \Delta, \Theta, H \mid \Phi = \varphi_i (i = 1, \dots, m) \rangle \cup \langle \Phi, \Delta, H \mid \Theta = \theta_k (k = 1, \dots, l) \rangle,$$

где $\Phi = \{\phi_i, i = 1, \dots, m\}$ – множество стратегий стороны 1;
 $\Delta = \{\delta_j, j = 1, \dots, n\}$ – множество стратегий стороны 2;
 $\Theta = \{\theta_k, k = 1, \dots, l\}$ – множество состояний стороны 3;
 $H : \Phi \times \Delta \times \Theta \rightarrow A$ – функция выигрыша, заданная матрицей
 $A = \left\| a_{ijk} \right\|_{m \times n \times l}$ стратегий сторон 1, 2, 3.

Для конечных множеств Φ, Δ, Θ стратегий сторон матрица A игры Γ_A представляется l таблицами по числу состояний стороны 3 (рис. 1).

Таким образом, получена модель игры, состоящая из матричной игры сторон 1 и 2 и двух игр каждой из этих сторон с «природой» (статистических решений). В силу того, что в такой игре стороны одновременно участвуют в нескольких подиграх, принадлежащих разным классам, она названа составной игрой.

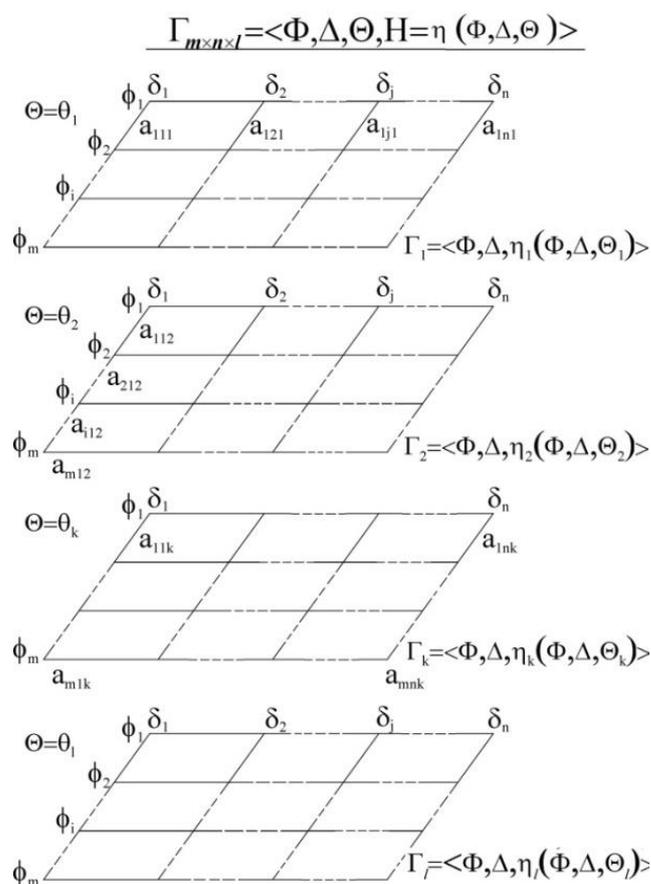


Рис. 1. Геометрическая интерпретация трехмерной матрицы составной игры Γ_A

Составная игра на матричной и статистических играх

Формализация оптимальности в составной игре должна основываться на реальных представлениях участников конфликта о том, какое решение (выбор стратегии) является для них выгодным [3]. Под принципом оптимальности понимается условие, которому должны удовлетворять ситуации, чтобы их можно было рассматривать как разумные цели для участников конфликта. Наиболее естественным представлением об оптимальном решении служит получение возможно большего выигрыша игроком в зависимости от выбора стратегий остальными участниками игры. В связи с тем, что цель достигается в результате разумных действий всех игроков, принцип оптимального поведения игроков приводит к ситуациям равновесия.

Рассмотрение подигр-компонент составной игры можно проводить в различной последовательности. Так, можно рассмотреть l матричных подигр стороны 1 и стороны 2, а затем проверить оптимальность либо устойчивость статистического решения, обобщенного на $k = 1, \dots, l$ матрицах $\bar{A} = \left\| a_{ijk} \right\|_{m \times n} \in A$. В этом случае понадобится рассмотреть в общей сложности $(l+1)$ игр-компонент. Либо можно рассмотреть по отдельности m статистических подигр стороны 1 со стороной 3, n статистических игр-компонент стороны 2 со стороной 3, а затем искать решение матричной игры стороны 1 со стороной 2. Тогда понадобится рассмотреть $(m+n+1)$ игр-компонент.

Если в результате решения l матричных игр для каждого состояния $\theta_k, k = 1, \dots, l$ среды получены множества Φ_k^* решений в чистых стратегиях, соответствующих седловым точкам, то можно рассмотреть l их пересечений $\bigcap_{k=1}^l \Phi_k^* \mid \Theta = \theta_k$. Для случая непустого ядра общего пересечения это ядро и будет решением составной игры.

Подход к решению составных игр может заключаться в сужении множеств допустимых стратегий сторон сначала последовательным решением N игр каждой из l сторон с $(n+1)$ -ой стороной, а затем нахождением решения игры между сторонами l на декартовом произведении суженных множеств их стратегий, как правило, в смешанных стратегиях.

Такой подход требует доказательства существования решения составной игры, которое может быть либо пересечением суженных множеств стратегий, либо смешанной стратегией построенной на сужениях множеств стратегий.

Другой подход состоит в нахождении оптимальных стратегий, может быть, смешанных, в частной игре одного класса (т. е. входящей как подигра-компонента в составную игру) при фиксированных стратегиях других частичных игр и последующем построении на найденных оптимальных стратегиях обобщенного вектора смешанных стратегий.

Рассмотрим применение общего подхода для построенной игры Γ_A . Найдем сужение $\bar{\Phi} \subseteq \Phi$ множества допустимых стратегий в игре с «природой» стороны 1:

$$\Gamma'_A = \langle \Phi, \Theta, A \mid \Delta = \delta_j (j = 1, \dots, n) \rangle$$

и сужение $\bar{\Delta} \subseteq \Delta$ множества допустимых стратегий в игре с «природой» стороны 2:

$$\Gamma_A = \langle \Delta, \Theta, A \mid \Phi = \varphi_i (i = 1, \dots, m) \rangle.$$

Переходя от матрицы A к матрице рисков $R: A \rightarrow R^1 = \|r_{ijk}\|$ и применяя максиминный критерий Вальда к каждой из n двумерных матриц $R_j = \|r_{ijk} \mid \delta_j = const\|$, получим сужение $\bar{\Phi}$ множества Φ :

$$\bar{\Phi} = \{\varphi_i^* : \min_j \max_i \max_k r_{ijk} \mid \delta_j = 1, \dots, n\}.$$

Аналогично для m двумерных матриц $R_i = \|r_{ijk} \mid \varphi_i = const\|$ будем иметь сужение $\bar{\Delta}$ множества Δ :

$$\bar{\Delta} = \{\delta_i^* : \min_i \max_j \max_k r_{ijk} \mid \varphi_i = 1, \dots, m\}.$$

Полученному подмножеству $\bar{\Phi} \times \bar{\Delta} \times \Theta$ соответствует подматрица выигрышей $\bar{A} = H(\bar{\Phi} \times \bar{\Delta} \times \Theta)$ (может быть, состоящая из единственного элемента).

Решение матричной игры $\Gamma_A = \langle \bar{\Phi}, \bar{\Delta}, \bar{A} \rangle$ находится в общем случае в смешанных стратегиях:

$$\Phi^* = (p, (\varphi_i^*) \mid \varphi_i^* : \max_i \min_j \bar{a}_{ijk};$$

$$\Delta^* = (p, (\delta_i^*) \mid \delta_i^* : \min_j \max_i \bar{a}_{ijk}$$

и вычисляется ее значение.

Модели составных игр

Модели составных игр, порожденные входящими в них подиграми различных теоретико-игровых классов, можно рассматривать как семейство Z составных игр.

Классами этого семейства будут комбинации классов составляющих подигр. Так, выше была рассмотрена модель матрично-статистического класса составных игр. Другими примерами могут служить матрично-биматричный, антагонистически-статистический, бескоалиционно-антагонистический, биматрично-статистический, бескоалиционно-статистический классы составных игр и т. п. Для каждого класса составных игр, очевидно, должны разрабатываться свои методы решения.

Размерность составной игры будем определять как размерность ее матрицы (пространства стратегий – для игр с непрерывными множествами альтернатив). Тогда размерность составной игры будет зависеть от числа сторон, участвующих во входящих в ее состав играх.

Например, в классе матрично-статистических игр каждая игра будет иметь размерность равную трем (трехмерная матрица составной игры). Каждая матрично-статистическая игра состоит из l матричных игр с l матрицами (по числу состояний среды) и $(m+n)$ статистических игр с $(m+n)$ матрицами (по числу стратегий сторон в

игре с нулевой суммой) и допускает lmn ситуаций игры. В общем случае эти параметры составной игры можно оценить комбинаторными методами с помощью подсчета числа сочетаний.

В заключение проиллюстрируем на двух задачах навигационно-гидрографического обеспечения десантных действий рассмотренные теоретические положения по моделированию поддержки принятия решений с использованием матрично-статистической модели составной игры.

Задача 1. Для НГО высадки десанта командир гидрографического отряда принимает решение о способе применения сил и средств гидрографических групп обеспечения разграждения, навигационного оборудования, обеспечения отряда кораблей огневой поддержки и навигационного ограждения в зависимости от вариантов противодействия противника и состояния среды. В своем замысле он определил три способа решения задач НГО: $\Phi = \{\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3\}$. Противник может оказать противодействие одним из трех способов: $\Delta = \{\delta_1, \delta_2, \delta_3\}$. Состояние гидрометеорологических условий (ГМУ) (в том числе результат выполнения обеспечивающих мероприятий по плану старшего начальника) может благоприятствовать решению задач НГО – θ_1 , не оказывать существенного влияния – θ_2 либо затруднять их решение – θ_3 , т. е. $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}$. Для оценки различных вариантов решено провести математическое моделирование с использованием теоретико-игровой модели применительно к стоящей задаче и условиям ее решения.

В результате выполнения оперативно-тактических расчетов вычислены значения обобщенного критерия эффективности $A = \|a_{ijk}\|_{3 \times 3 \times 3}$ по каждому варианту решения в зависимости от способов противодействия противника и состояния среды.

Представим модель сложной игры в виде объединения трех матричных игр для каждого состояния θ_k ГМУ и заключительной статистической игры:

$$\Gamma_A = \langle \Phi, \Delta, \Theta, H \rangle = \bigcup_{k=1,2,3} \langle \Phi, \Delta, H | \Theta = \theta_k \rangle \bigcup \Phi, \Theta, H,$$

где $\Phi = \{\varphi_i, i = 1, 2, 3\}$ – варианты решения задачи НГО;

$\Delta = \{\delta_j, j = 1, 2, 3\}$ – способы противодействия со стороны противника;

$\Theta = \{\theta_k, k = 1, 2, 3\}$ – состояния ГМУ;

$H: \Phi \times \Delta \times \Theta \rightarrow A$ – значения критерия эффективности НГО, заданные матрицей $A = \|a_{ijk}\|_{3 \times 3 \times 3}$.

Пусть матричные игры $\bigcup_{k=1,2,3} \langle \Phi, \Delta, H | \Theta = \theta_k \rangle$ имеют седловые точки для всех $\Theta = \theta_k$ и найдены в общем случае различные для каждой игры максиминные стратегии:

$$\varphi_i^* = \arg \max_i \min_j a_{ijk} | \Theta = \theta_k$$

Примем для определенности:

$$\varphi_3^* = \arg a_{321}^* = \max_i \min_j a_{ijk} | \Theta = \theta_1 ;$$

$$\varphi_1^* = \arg a_{132}^* = \max_i \min_j a_{ijk} | \Theta = \theta_2$$

$$\varphi_2^* = \arg a_{213}^* = \max_i \min_j a_{ijk} | \Theta = \theta_3$$

Тогда, матрица \bar{A} заключительной статистической игры $\langle \Phi, \Delta, H \rangle$ будет следующей:

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} a_{131} & a_{132}^* & a_{133} \\ a_{211} & a_{212} & a_{213}^* \\ a_{321}^* & a_{322} & a_{323} \end{bmatrix},$$

а соответствующая ей матрица рисков \bar{R} равна:

$$\bar{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & 0 & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & 0 \\ 0 & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix},$$

где $r_{1k} = a_{132}^* - a_{13k}$; $r_{2k} = a_{213}^* - a_{21k}$; $r_{3k} = a_{321}^* - a_{32k}$.

Используя критерий Сэвиджа, получаем оптимальный вариант замысла решения на НГО:

$$\varphi_i^* = \arg \min_i \max_j r_{ij}.$$

Задача 2. Для обеспечения перехода сил высадки морского десанта гидрографическая служба флота разрабатывает план НГО и ГМО. План включает варианты $\Phi = \{\varphi_1, \varphi_2\}$ с развертыванием РНС высокой точности или дооборудованием опасных в навигационном отношении районов по маршруту перехода. Выбор варианта осуществляется в зависимости от сильного или слабого противодействия $\Delta = \{\delta_1, \delta_2\}$ противника средствами РЭБ и благоприятных или неблагоприятных погодных условий $\Theta = \{\theta_1, \theta_2\}$. Для расчетов по оценке эффективности НГО применяется математическое моделирование.

Для моделирования используется модель сложной игры в виде объединения двух матричных игр для каждого состояния θ_k гидрометеорологических условий (ГМУ) и заключительной статистической игры:

$$\Gamma_A = \langle \Phi, \Delta, \Theta, H \rangle = \bigcup_{k=1,2} \langle \Phi, \Delta, H \mid \Theta = \theta_k \rangle \bigcup \Phi, \Theta, H,$$

где $\Phi = \{\varphi_i, i = 1, 2\}$ – варианты НГО;

$\Delta = \{\delta_j, j = 1, 2\}$ – противодействие или его отсутствие со стороны противника;

$\Theta = \{\theta_k, k = 1, 2\}$ – состояния ГМУ;

$H: \Phi \times \Delta \times \Theta \rightarrow A$ – вычисленные значения критерия эффективности НГО, заданы матрицей $A = \|a_{ijk}\|_{2 \times 2 \times 2}$.

Для обобщения рассмотренной задачи 1 предположим, что матричные игры $\bigcup_{k=1,2} \langle \Phi, \Delta, H \mid \Theta = \theta_k \rangle$ не имеют седловых точек, и для каждой игры существует решение в смешанных стратегиях:

$$\varphi_k^* = (p_k, 1 - p_k) \text{ при } \theta_k, k = 1, 2,$$

где p_k – вероятность выбора варианта с развертыванием РНС высокой точности, а $(1 - p_k)$ – вероятность выбора варианта дооборудования опасных в навигационном отношении районов.

Снова для определенности положим, что эффективность v_k^* решения φ_k^* равна:

$$v_1^* = p_1 a_{111} + (1 - p_1) a_{221};$$

$$v_2^* = p_2 a_{212} + (1 - p_2) a_{122}.$$

Тогда, матрица \bar{A} заключительной статистической игры $\langle \Phi, \Theta, H \rangle$ будет следующей:

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} p_1 a_{111} & (1 - p_2) a_{122} \\ (1 - p_1) a_{221} & p_2 a_{212} \end{bmatrix}.$$

Для определения оптимального решения с учетом влияния ГМУ воспользуемся критерием Гурвица [2]:

$$\begin{aligned} \varphi_i^* &= \arg \max_i \{ h \min_j a_{ij} + (1 - h) \max_j a_{ij} \} = \\ &= \arg \max \{ h \min \{ p_1 a_{111}; (1 - p_2) a_{122} \} + (1 - h) \max \{ p_1 a_{111}; (1 - p_2) a_{122} \} = \\ &= h \min \{ (1 - p_1) a_{221}; p_2 a_{212} \} + (1 - h) \max \{ (1 - p_1) a_{221}; p_2 a_{212} \}, \end{aligned}$$

где $h \in [0; 1]$ – коэффициент Гурвица, соответствующий требуемой эффективности решения задачи.

Замечание. Оптимальное решение задачи 2 найдено в чистых стратегиях, хотя решения матричных подигр были заданы в смешанных стратегиях. Содержательно это объясняется тем, что при незнании ГМУ, нет оснований использовать смешанные стратегии.

Выводы

Моделирование с использованием матрично-статистических игр отличается тем, что позволяет использовать в единой модели игры разных классов, что более соответствует обоснованию выбора решения в многовариантных задачах НГО. Изменяя условия формирования оценочного функционала и стратегии сторон можно устанавливать закономерности, важные для планирования НГО.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волгин Н. С. Математическое моделирование морских боев и операций. – Л.: ВМА, 1990. – 238 с.
2. Петросян Л. А., Зенкевич Н. А., Шевкопляс Е. В. Теория игр. – СПб: БХВ-Петербург, 2012. – 432 с.
3. Трухаев Р. И. Методы исследования процессов принятия решений в условиях неопределенности. – Л.: ВМА, 1972. – 438 с.
4. Суздаль В. Г. Теория игр для флота. – М.: Воениздат, 1976. – 317 с.

THE GAME-THEORETIC MODEL OF DECISION-MAKING IN THE INTERESTS OF THE NAVIGATION AND HYDROGRAPHIC SUPPORT FOR THE NAVY

V. N. Zavgorodny (The Military Educational-and-Research Centre Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N. G. Kuznetsov)

The method of solution for the composite games in the game theoretic approach is set forth. The model of a composite game formed by games of different classes and intended to provide the navigation and hydrographic support for the naval activities is considered. The theoretical principles for solution of the composite games are suggested.

УДК 623.46

СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СПУТНИКОВОЙ БАТИМЕТРИИ

А. Г. АЛЕКСЕЕВ (ОАО «ГНИНГИ»),
Э. С. ЗУБЧЕНКО (ВУНЦ ВМФ «ВМА»)

В обзорно-аналитической статье рассматривается технология определения глубин по многозональным изображениям морских акваторий, полученным современными спутниковыми оптикоэлектронными сканирующими системами.

Дистанционное зондирование рассматривается как эффективный метод гидрографического мониторинга морских акваторий, поскольку обеспечивает глобальность и оперативность получения гидрографических данных. Возможность получения точных и подробных данных о рельефе и грунте дна – основа контроля морского дна и создания навигационных морских карт в интересах обеспечения общего и военного мореплавания. Традиционная судовая батиметрическая съемка морских аква-

торий требует больших материальных и временных затрат, особенно в мелководных районах, где необходима большая ее подробность. В связи с этим в прошедшие десятилетия развивались методы точной оценки глубины по данным дистанционного зондирования.

Глубины прибрежной зоны дна Мирового океана в диапазоне от нуля до уровня, где прозрачность воды соответствует глубине исчезновения видимости белого диска, могут быть определены по данным многозональной съемки прибрежных акваторий спутниковыми спектрометрами высокого разрешения с использованием специализированных алгоритмов обработки цифровых изображений.

Рассмотрим возможности современных технологий получения глубин по данным дистанционного зондирования Мирового океана пассивными методами в оптическом диапазоне.

Реализация в современной съемочной спутниковой аппаратуре высокого пространственного и спектрального разрешения, а также возможность количественной оценки оптических свойств морской воды с помощью данных от сверхмногозональных («гиперспектральных» – в зарубежной терминологии) радиометров позволили повысить точность и разрешающую способность съемки рельефа дна прибрежных акваторий на основе обработки данных съемки многоканальных датчиков. Примером таких датчиков являются установленные на спутнике Worldview-2 (США) многозональный видеоспектрометр с восемью оптическими каналами в оптической и ближней инфракрасной зонах и *сверхмногозональный радиометр MIVIS* с двадцатью оптическими каналами.

Радиометр MODIS (США), установленный на борту спутника Aqua, предназначен для решения задачи классификации земной поверхности по получаемым спектральным образам, а также для определения оптических характеристик воды. Постановка и актуальность такой задачи определяется необходимостью получения данных о типах грунта прибрежных акваторий и береговой зоны для оценки возможности подхода корабля к берегу для высадки и посадки десанта.

Технические характеристики съемочной аппаратуры спутниковой системы Worldview-2 представлены в табл. 1 [1], а технические характеристики радиометра MODIS представлены в табл. 2 [2].

Проводимые исследования по использованию всех оптических каналов съемочной аппаратуры Worldview-2 направлены на поиск новых решений для повышения точности получения данных о глубинах прибрежных акваторий. При этом отмечается высокая корреляция данных, получаемых оптическими каналами, имеющими близкие спектральные зоны, например, 1-ой и 2-ой зон или 6-ой и 7-ой зон, что означает избыточную и бесполезную информацию при ее использовании для анализа.

Применение данных высокой пространственной и спектральной разрешающей способности, т. е. данных таких спутниковых систем дистанционного зондирования как Ikonos (США), Quickbird (США) и Worldview-2 для повышения точности определения глубин потребовало разработки новых технологий обработки многозональных изображений. В основе новых подходов используются модели статистической зависимости глубины от измеренной яркости.

Таблица 1

Технические характеристики съемочной аппаратуры, установленной на спутнике Worldview-2

Название характеристики	Режим съемки		
	панхроматический	многозональный	сверхмногозональный
Тип аппаратуры	Изображающий радиометр		Сверхмногозональный радиометр <i>MIVIS</i>
Пространственное разрешение для точек изображения (наземное расстояние между пикселями), метр: – по направлению в точку надира, метр – по направлению 20° от надира, метр	0,46 0,52	1,84 2,08	
Спектральный диапазон съёмки, микрометр	0,45-0,8	1) 0,4–0,45 2) 0,45–0,51 3) 0,51–0,58 4) 0,585–0,625 5) 0,63–0,69 6) 0,705–0,745 7) 0,77–0,895 8) 0,86–0,9	20 каналов в диапазоне 0,441–0,819 мкм с шириной зоны на уровне 0,5 регистрируемого сигнала 0,02 мкм
Ширина полосы захвата на местности, километр	16,4	16,4	
Возможность перспективной съемки (угол отклонения направления съемки от надира), градус	±45	±45	

Таблица 2

Технические характеристики радиометра среднего разрешения MODIS, установленного на спутнике Aqua

Наименование характеристики	Значение характеристики
Назначение	Определение физических свойств атмосферы, океана и поверхности суши
Тип радиометра	Многозональный среднего разрешения, поперечное трассе сканирование, измерение солнечного отражения и дневного и ночного излучения земной поверхности
Количество спектральных каналов	36
Спектральный диапазон каналов, микрометр	21 канал в спектральном диапазоне 0,4-3; 15 каналов в спектральном диапазоне 3-14,5
Пространственное разрешение, метр	250; 500; 1000
Ширина полосы захвата, километр	2300
Периодичность покрытия съемкой земной поверхности	Непрерывное глобальное покрытие каждые 1–2 суток
Точность измерения абсолютного значения яркости	5% для ширины спектральной зоны < 3 мкм; 1% > 3 мкм

Основными помехами для применения этих технологий являются ограниченная глубина проникновения света и низкая прозрачность прибрежных вод. Один из современных методов состоит в декорреляции зарегистрированных сигналов в спектральных зонах съемки от глубины [3]. Метод заключается в редуцировании данных зонального оптического канала вычитанием величины сигнала на участках акватории с оптически бесконечной глубиной (глубиной, превышающей глубину исчезновения видимости стандартного белого диска) и линеаризации зависимости редуцированной яркости от глубины путем ее логарифмирования по натуральному основанию. Затем линеаризованные данные преобразуются с учетом угла, образуемого линией регрессии, – зависимости, аппроксимирующей зависимость логарифма яркости акватории от глубины. Преобразованные таким путем данные оптических каналов декоррелированы с глубинами, но сохраняют зависимость от отражательной способности морского дна, обеспечивая таким образом возможность их дальнейшего анализа. Преимущество такого подхода в том, что преобразование для каждого канала осуществляется независимо, сохраняя информацию, полученную в данной спектральной зоне.

Для определения глубин предложены различные, перечисленные ниже, эмпирические модели, устанавливающие статистические отношения между уровнем сигнала, формирующего пиксел (от английского термина pixel – picture element) изображения, и значения глубины акватории.

1) Самый известный подход был предложен D. Lyzenga [4–6]. Он основан на факте, что отраженное дном излучение является приблизительно линейной функцией отражения дна и показательной функцией глубины.

2) D. L. B. Jupp [7] ввел алгоритм для того, чтобы определить, во-первых, глубину проникновения света (DOP) для каждой зоны съемки и, во-вторых, для того, чтобы калибровать глубины в пределах DOP.

3) R. Stumpf и др. [8], используя отношение коэффициентов отражения, представили алгоритм, который позволял определять глубины более 25 м в отличие от алгоритма линейного преобразования.

4) C. L. Conger и др. [9] предложили измененную версию модели D. Lyzenga на основе использования данных единственного оптического канала и данных измерения глубин авиационной лазерной батиметрической системой в отличие от алгоритма оптимального преобразования данных двух оптических каналов съемки.

В новом алгоритме, предложенном в работе [3], предусмотрено решение трех критических проблем для определения глубин по измеряемой яркости мелководных акваторий:

а) исключение солнечных бликов, которые присущи изображениям акватории высокого разрешения и зависят главным образом от зенитных углов Солнца и углов получения изображений;

б) учет атмосферной поправки;

в) учет влияния коэффициента отражения дна на модель батиметрии с использованием данных многоканальной съемки.

Предложенный метод удаления солнечного блика основан на применении линейных отношений между данными съемки в различных оптических зонах (каналах), включая ближнюю инфракрасную зону NIR (7-ой канал, табл. 1) в виде линейной регрессии при использовании выборки пикселей всего изображения акватории. Линейная регрессия устанавливается между типовыми пикселями оптического диапазона

(ось Y) и соответствующими пикселями изображения в NIR зоне (ось X). Все пиксели изображения исправляются согласно следующему уравнению:

$$R'_i = R_i - b_i(R_{NIR} - M_{NIR}), \quad (1)$$

где R'_i – откорректированное значение яркости, соответствующее данному пикселу;
 R_i – начальное значение яркости, соответствующее данному пикселу;
 b_i – тангенс угла наклона линии регрессии;
 R_{NIR} – значение яркости, соответствующее данному пикселу изображения в зоне NIR (канал 7, табл. 1);
 M_{NIR} – минимальное значение яркости, соответствующее данному пикселу в выборке пикселей в зоне NIR.

Для определения атмосферной поправки над морской поверхностью разработано несколько методов. Однако они обычно требуют ввода параметров состояния атмосферы и морской воды, которые трудно получить. По этой причине предпочитается применение упрощенного метода – вычитания из всех значений яркости, соответствующих пикселям зональных изображений, значений яркости пикселя изображения в той же зоне спектра, соответствующего оптически бесконечной глубине. Исправленное поправкой на атмосферу значение R_{ac} тогда можно представить в виде:

$$R_{ac} = R_i - R_{dp}, \quad (2)$$

где R_i – начальное значение яркости пикселя;
 R_{dp} – значение яркости пикселя, соответствующего оптически бесконечной глубине.

Модель регистрируемой яркости акватории может быть представлена уравнением, устанавливающим зависимость между измеренным спектральным коэффициентом отражения акватории R_w , соответствующим значением глубины z и коэффициентом отражением дна A_d :

$$R_w = (A_d - R_w) \exp(-gz) + R_{dp}, \quad (3)$$

где R_{dp} – значение спектрального коэффициента отражения в точке изображения с оптически бесконечной глубиной («темного пикселя»);
 g – функция коэффициентов ослабления.

Преобразуя уравнение (3) относительно глубины z , получим:

$$z = g^{-1}[\ln(A_d - R_w) - \ln(R_w - R_{dp})], \quad (4)$$

где $R_w - R_{dp} \geq 0$

Этот метод для случая съёмки в одной зоне предполагает, что отражательные характеристики грунта дна и оптические свойства воды однородны для всей области на анализируемом изображении. D. Lyzenga и др. [10] доказали, что при N -зональной

съемке батиметрическая модель может быть представлена уравнением множественной регрессии:

$$z = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i X_i, \quad (5)$$

где $X_i = \ln(R_{w_i} - R_{dp_i})$;

a_0, a_i, a_j – коэффициенты, определенные через множественную регрессию, с использованием известных глубин и соответственно измеренных значений яркости.

Уравнение (5) также получено для условия однородности оптических свойств воды на акватории, изобразившейся на снимке, и дает оценку глубины, которая не зависит от изменений в оптических свойствах воды и/или отражении дна. Таким образом, новый подход заключается в использовании данных съемки в нескольких оптических каналах съемки. Считается, что чем больше доступных зон спектра съемки, тем лучше оценка глубины. Однако фактически недостаток метода состоит в том, что информация, полученная в оптических каналах, не оптимальных по условиям оптической прозрачности, «работает» только до глубины проникновения света в данном спектральном диапазоне.

В этом отношении метод определения оптических свойств морской воды по данным съемки в нескольких спектральных зонах представляется перспективным. Это так называемый алгоритм HOPE (Hyperspectral Optimization Process Exemplar – экземпляр процесса гиперспектральной оптимизации), разработанный в Океанографическом отделе исследовательской лаборатории ВМС при космическом центре Д. Стенниса США. В основе алгоритма HOPE лежит уравнение зонального коэффициента отражения акватории:

$$r_{rs} \approx r_{rs}^{dp} [1 - e^{-(D_0 + 1,03(1+2,4u)^{0,5})kz}] + \frac{\rho}{\pi} e^{-(D_0 + 1,04(1+5,4u)^{0,5})kz}, \quad (6)$$

где r_{rs}^{dp} – зональный коэффициент отражения акватории в точке с оптически бесконечной глубиной;

D_0 – секанс зенитного угла Солнца;

u – отношение коэффициента обратного рассеяния к коэффициенту поглощения света;

k – сумма коэффициентов обратного рассеяния и поглощения света;

z – искомая глубина.

Для каждого оптического канала составляется уравнение, представляющее результат линеаризации уравнения (1), оно имеет вид:

$$R_{rs}(\lambda_i) = F(P, G, X, B, z), \quad (7)$$

Неизвестными в этом уравнении являются пять аргументов:

P – коэффициент пигментного поглощения на длине волны 0,44 мкм;

G – коэффициент поглощения растворенным органическим веществом на длине волны 0,44 мкм;

X – коэффициент обратного рассеяния на длине волны 0,555 мкм;
 B – коэффициент отражения грунта на длине волны 0,55 мкм;
 z – глубина.

Перечисленные параметры, вычисленные путем совместного решения системы указанных уравнений, используются для уточнения параметров явной аналитической функции для зонального коэффициента яркости, которые затем снова используются для вычисления значений зональных коэффициентов яркости акватории. Далее вычисляется погрешность между измеренным и вычисленным значением спектрального коэффициента отражения для всего спектрального диапазона съемки. Вычисления производят до тех пор, пока погрешность не приобретает минимальное значение. Полученное при этом значение глубины z принимается за окончательное.

Таким образом, рассмотренные примеры совершенствования технологии определения глубин прибрежных акваторий требуют в качестве исходных данных результаты съемки акватории в нескольких зонах спектра, а для определения оптических характеристик воды и грунта дна – съемки с помощью сверхмногозональных спектрорадиометров. Только совместное использование этих данных может привести к решению задачи съемки рельефа дна с требуемой точностью.

Для экспериментальной проверки метода были использованы данные съемки в пяти спектральных диапазонах 1, 2, 3, 4 и 5 видеоспектрометра, установленного на спутнике Worldview-2. Данные, полученные в каналах 6, 7 и 8 были исключены, поскольку они не несут информации, используемой для получения изображения дна. Для установления зависимости между глубиной и значением яркости, соответствующим пикселям изображения в каждой полосе, использовались 250 опорных глубин.

Территория исследования была разделена на три различных области: область A – с песчаным дном (глубины от 6 м до 15 м), область B – с песчаным дном и морской травой (глубины от 2,5 м до 6 м) и область C , где дно плотно покрыто морской травой (глубины от 2 м до 6 м).

Модель множественной регрессии области A построена по 103 опорным глубинам и данным съемки в зонах 2, 3 и 5 и имеет вид:

$$z = 8,999 + 1,13X_2 - 5,241X_3 + 4,491X_5, \quad (8)$$

где z – оцениваемая глубина;

X_2, X_3, X_5 – натуральные логарифмы яркости изображения, соответствующие пикселям изображения в зонах 2, 3 и 5.

Модель была проверена для 230 точек с известными глубинами. Абсолютные разности между известными и вычисленными по формуле (7) глубинами в этих точках изменяются от 0,01 м до 1,52 м. 74 % разностей – менее чем 1 м. Средняя величина равна 0,6 м, а среднеквадратичное отклонение – 0,4 м. Оценка глубин выполнена в диапазоне от 6,4 м до 14 м.

Модель для области B была построена по 67 опорным глубинам, распределенным по области, и имеет вид:

$$z = 5,347 + 0,302X_1 + 1,011X_2 - 1,673X_3 - 0,553X_4, \quad (9)$$

где z – оценочная глубина;

X_1, X_2, X_3, X_4 – натуральные логарифмы яркости изображения, соответствующие пикселям изображения в зонах 1, 2, 3 и 5.

Модель была проверена по 25 опорным глубинам в диапазоне от 2,7 м до 4,6 м. Абсолютные разности между известными и вычисленными глубинами изменяются от 0,02 м до 0,36 м, со средней величиной, равной 0,17 м, и среднеквадратичным отклонением, равным 0,08 м.

Модель для области С была построена по 75 опорным глубинам. В отличие от предыдущих приемов обработки измеренных в пяти зонах съемки яркости пикселей, соответствующих положению опорных глубин, для оптимизации зависимости измеренной яркости от глубины был применен метод главных компонент. В результате для построения модели в виде уравнения регрессии в качестве переменной использовался только один аргумент – первый главный компонент разложения по естественным ортогональным функциям ковариационной матрицы значений яркости, соответствующей пикселям изображений в пяти спектральных диапазонах съемки. Полученное уравнение регрессии имело вид:

$$z = -0,031 + 2,01(\ln PC1), \quad (10)$$

где $PC1$ – первый главный компонент разложения по естественным ортогональным функциям ковариационной матрицы значений яркости пикселей в пяти зонах съемки.

Модель была проверена в 178 точках с известными глубинами в диапазоне от 2 м до 5,8 м. Абсолютные разности между известными и вычисленными глубинами изменялись от 0,04 м до 0,93 м. 67 % разностей были менее 0,5 м. Средняя величина разности – 0,24 м, а среднеквадратичное отклонение составило 0,37 м.

Выводы

Рассмотренная технология дистанционного измерения водных глубин со спутника, основанная на использовании данных многозональной съемки для построения моделей в виде множественной регрессии, обеспечивает точность, характеризующуюся средней квадратической погрешностью от 0,08 м до 0,4 м соответственно для глубин от 2 м до 14 м. Такая высокая точность достигнута благодаря применению методики исключения бликов солнца и учета атмосферной поправки. Однако для оптимизации выбора соответствующих спектральных зон съемки необходим статистический анализ.

Таким образом, батиметрическая модель, построенная по данным многозональной съемки на основе данных многозональной съемки высокой спектральной и пространственной разрешающей способности, обеспечивает получение глубин с высокой точностью, соответствующей требованиям картографирования рельефа дна для составления навигационных морских карт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tarantino C., Adamo M., Pasquariello G., Lovergine F., Blonda P., Tomaselli V. 8-Band Image Data Processing of the Worldview-2 Satellite in a Wide Area of Applications // Earth Observation. – 2012. – Pp. 137–152. <http://www.intechopen.com/books/earth-observation/8-band-image-data-processing-of-the-worldview-2-satellite-in-a-wide-area-of-applications>
2. MODIS Web <http://modis.gsfc.nasa.gov/>

3. Doxania G., Papadopoulou M., Lafazani P., Pikridasb C., Tsakiri-Stratia M. Shallow-water bathymetry over variable bottom types using multispectral Worldview-2 image // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIX-B8, 2012 XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia.
4. Lyzenga D. Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features // Applied Optics. – 1978. Vol. 17(3). – Pp. 379–383.
5. Lyzenga D. Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data // Int. J. Remote Sensing. – 1981. Vol. 2(1). – Pp. 71–82.
6. Lyzenga D. Shallow-water bathymetry using combined lidar and passive multispectral scanner data // Int. J. Remote Sensing. – 1985. Vol. 6(1). Pp. 115–125.
7. Jupp D. L. B. Background and extension to depth of penetration (DOP) mapping in shallow coastal waters. – Proceedings of symposium on remote sensing of coastal zone, Gold Coast, Queensland. – 1989. – IV 2 (1) - IV 2 (19).
8. Stumpf R., Holderied K., Sinclair M. Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types // Limnol. Oceanogr. – 2003. – Vol. 48. Pp. 547–556.
9. Conger C. L., Hochberg E. J., Fletcher C H., and Atkinson M. J. Decorrelating remote sensing color bands from bathymetry in optically shallow waters. IEEE Trans. on Geosciences and Remote Sensing. – 2006. Vol. 44. Pp. 1655–1660.
10. Lyzenga D., Malinas N. Tanis F. Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. – 2006. – Vol. 44(8). – Pp. 2251–2259.

THE PRESENT-DAY TECHNIQUE OF SATELLITE BATHYMETRY

A. G. Alekseyev («GNINGI» OJSC), **E. S. Zubchenko** (The N. G. Kuznetsov Naval Academy)

The technique used to find the depth by multizonal images of the sea areas obtained by the present-day satellite optronic scanning systems, is considered and analyzed.

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ

УДК 551.583

КРАТКИЙ ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА И ОЦЕНКИ ИХ ВЛИЯНИЯ НА ВОЕННО-МОРСКУЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

С. И. МАСТРЮКОВ, Н. В. ЧЕРВЯКОВА
(ОАО «ГНИНГИ»)

В обзоре обобщены основные результаты современных международных и отечественных исследований в области изменения климата, проанализирована деятельность и результаты выполняемых в США исследований по оценке влияния ожидаемых изменений климата на военную и военно-морскую деятельность. Цель обзора – обоснование необходимости выполнения специальных исследований изменений климата в интересах ВМФ России.

Результаты современных международных исследований изменения климата

Большой интерес мирового сообщества к проблемам изменения климата перерос в беспрецедентные усилия по изучению изменений климатической системы Земли и оценке рисков от этих изменений для всех сторон человеческой деятельности.

На международном уровне проблемами изменения климата с 1988 г. занимается Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК). МГЭИК обобщает и анализирует научные достижения в области изучения климата и его изменений, а также последствия изменения климата. Как межправительственный орган МГЭИК отвечает за представление мировому сообществу объективных научно-технических выводов, ориентированных на их использование при выработке стратегии развития. Результаты этой работы оформляются в виде Оценочных докладов МГЭИК. Первый оценочный доклад был сделан в 1990 г. В 2013 г. опубликован Пятый оценочный доклад МГЭИК [1, 2]. О важности, комплексности и ёмкости пятого доклада свидетельствует то, что в подготовке доклада приняли участие 259 авторов из 39 стран мира и многих международных и национальных научных организаций.

Климатическая система Земли изменяется в результате сложных нелинейных взаимодействий между отдельными её компонентами (атмосфера, гидросфера, криосфера, деятельный слой суши, биосфера), а также под влиянием внешних воздействий, таких как извержения вулканов, астрономические факторы, обуславливающие поступление солнечного тепла, и хозяйственная деятельность (изменения химического состава атмосферы, землепользование).

В пятом докладе МГЭИК впервые подчёркнуто, что наблюдаемое потепление является неоспоримым фактом и, начиная с 1950 г., рост глобальной температуры составил около 1 градуса и сопровождался многочисленными изменениями в климатической системе Земли, не имеющими прецедентов за предыдущие периоды продол-

жительностью от нескольких десятилетий до тысячелетий. Причиной большей доли наблюдаемого потепления считается человеческая деятельность и, в первую очередь, выбросы парниковых газов и аэрозолей. Более того, считается, что в результате прошлых, настоящих и ожидаемых в будущем выбросов парниковых газов изменение климата неизбежно, и эти изменения будут продолжаться на протяжении многих столетий, даже если выбросы парниковых газов сократятся.

Изменения климата проявляются в вариации средних (фоновых) показателей физического состояния природной среды, экстремальных значений климатических показателей, а также повторяемости опасных гидрометеорологических явлений и процессов. Отметим, что в целом оценки изменений климата и прогноз климатических изменений для разных сценариев выбросов, полученные в четвёртом [3] и пятом [1,2] докладах, соответствуют друг другу.

Оценки текущих изменений климата сводятся к следующему:

1. Концентрация двуокиси углерода в 2011 г. по сравнению с 1750 г. возросла на 40%, метана – на 150%, окиси азота – на 20%, что выше исторических данных за последние 22 тысячи лет.

2. Радиационная нагрузка антропогенного характера на климатическую систему, вызванная воздействием основных парниковых газов, аэрозолей и изменением альбедо, по уточнённым данным в 2011 г. составила 2,29 Вт/м². Радиационная нагрузка представляет собой разность между современным радиационным воздействием того или иного фактора на климат и его воздействием в доиндустриальную эпоху (в 1750 году).

3. Средняя годовая глобальная температура за период с 1901 по 2012 гг. выросла на 0,89°C, причём за период с 1951 по 2012 гг. – на 0,72°C. При этом за каждое из трёх последних десятилетий температура была выше, чем за любое предыдущее десятилетие, начиная с 1850 г. Период с 1983 по 2012 гг. был самым тёплым 30-летним периодом за последние 1400 лет. Температура над сушей растёт быстрее, чем над океанами в обоих полушариях. Наибольшее потепление отмечено в высоких широтах северного полушария в зимний и весенний периоды. За последние 100 лет средняя температура в Арктике увеличивалась почти в два раза быстрее, чем в целом в мире. Под влиянием глобального потепления происходит изменение траекторий атмосферных образований. Так, начиная с 1950 г., отмечается интенсификация североатлантических циклонов и смещение траекторий их движения к северу.

4. Содержание водяного пара в тропосфере увеличивается с 1976 г. в тесной связи с повышением температуры, как над сушей, так и над океаном. Теоретически рост средней температуры воздуха на 1°C приводит к росту относительной влажности на 7%. Общее содержание водяного пара с 1988 по 2004 гг. увеличивается со скоростью 1,2% в десять лет. За счет увеличения влажности увеличивается потенциал для выпадения осадков. Количество осадков над сушей к северу от 30 с. ш. в целом увеличивается на несколько процентов в десятилетие, а в тропических и субтропических районах, напротив, с 1970 г. – уменьшается. Значительное увеличение осадков отмечено в восточных частях северной и южной Америки, в северной Европе, в северной и центральной Азии, в тоже время стало засушливее в Сахаре, в бассейне Средиземного моря, в южной Африке и в отдельных внутриконтинентальных районах Азии. Увеличилась повторяемость сильных осадков (с интенсивностью выше уровня 95-процентной обеспеченности), причем даже в районах, где происходит уменьшение общего количества осадков. Начиная с 1970 г., увеличивается повторе-

мость и продолжительность засух, особенно в субтропических районах. В отдельных районах отмечается усиление штормовой активности.

5. В глобальном масштабе температура верхнего 75 метрового слоя океана с 1971 по 2010 гг. выросла на 0,11°C. Для оценки климатических изменений температуры во всей толще океана данных инструментальных наблюдений недостаточно.

6. Соленость поверхностных вод в средних широтах океанов выросла, а в тропических и полярных широтах – снизилась. Контраст между районами с высокой и низкой солёностью вырос на 0,13‰.

7. Повсеместно отмечается повышение кислотности морской воды. Усвоение антропогенного углерода в индустриальную эпоху (после 1750 г.) привело к тому, что океан стал более кислым на 30%.

8. В последние два десятилетия наблюдается существенная деградация ледового щита Гренландии и Антарктиды, повсеместно продолжает сокращаться площадь ледников. Скорость потери массы ледового щита Гренландии в период с 2002 по 2011 гг. оценивается в 215 гигатонн в год, а ледового щита Антарктиды – в 147 гигатонн в год.

9. В Северном полушарии отмечается существенное сокращение площади морского льда. Скорость сокращения среднегодовой площади арктического морского льда за период с 1979 по 2012 гг. составила около 4% в десятилетие (0,5 миллиона км² в десятилетие). Скорость сокращения площади льда в период его минимального развития (сентябрь) лежит в диапазоне 9,4–13,6% в десятилетие. Считается, что в последние три десятилетия площадь морского льда в сентябре была минимальной за 1450 лет. В результате продолжительность безлёдного периода в отдельных районах Арктики (между Восточно-Сибирским морем и морем Бофорта) за период с 1979 по 2012 гг. увеличилась почти на два месяца. Сокращение средней толщины многолетнего льда в Арктическом бассейне оценивается величиной около 1,8 м. Скорость сокращения среднегодовой площади антарктического морского льда за период с 1979 по 2012 гг. составила около 1,5% в десятилетие.

10. Отмечается значимое сокращение толщины и площади вечной мерзлоты, так за период с 1971 по 2010 гг. температура в слое вечной мерзлоты на глубине 3 м на Аляске и в Российской Федерации выросла на 2–3 градуса.

11. Скорость роста среднего уровня Мирового океана за период с 1901 по 2010 гг. была выше, чем за два предыдущих тысячелетия, – рост уровня за этот период составил 0,19 м. При этом за период с 1993 по 2010 гг. средняя скорость роста уровня составила 3,2 мм в год. Основные причины роста уровня – термическое расширение воды, таяние ледников и рост стока рек. Считается, что таяние ледового щита Гренландии приведет к росту среднего уровня моря примерно на 3 метра.

Отмеченные в Пятом докладе МГЭИК изменения подтверждены многочисленными измерениями состояния природной среды и сопровождаются оценкой статистической значимости полученных выводов. Вместе с тем Доклад не охватывает весь спектр выполненных исследований в области изменений климата. В частности, хотя в Пятом докладе появились разделы с оценкой изменчивости показателей циркуляции атмосферы и океана регионального масштаба, степень изученности именно этих процессов остаётся невысокой, что является основной причиной неопределённости прогнозных оценок изменений климата.

Прогноз изменений климата в Четвертом и Пятом докладах МГЭИК [1–3] выполнен на период до 2100 г. для различных сценариев эмиссии парниковых газов и

аэрозолей (табл. 1) – от наиболее оптимистичного (RCP2.6), при которых выбросы парниковых газов меньше, чем в 1990-е годы, до пессимистичного (RCP8.5), при которых выбросы в 3–5 раз выше современного уровня. Эти сценарии идентифицируются по их радиационной нагрузке по отношению к 1750 году: 2.6 Вт/м² – для сценария RCP2.6, 4.5 Вт/м² – для сценария RCP4.5 и т. д.

Таблица 1

Прогноз среднего потепления воздуха у поверхности и среднего подъема уровня Мирового океана в конце XXI века по отношению к периоду 1986–2005 гг.

Сценарии	Эмиссия CO ₂ к 2100 г. от 2012 г., гигатонны	Рост температуры к 2100 г.		Рост уровня к 2100 г.	
		Средняя оценка, °C	Диапазон (5–95% интервал)	Средняя оценка, м	Диапазон (5–95% интервал)
RCP2.6	990	1,0	0,3–1,7	0,4	0,26–0,55
RCP4.5	2860	1,8	1,1–2,6	0,47	0,32–0,63
RCP6.0	3885	2,2	1,4–3,1	0,48	0,33–0,63
RCP8.5	6180	3,7	2,6–4,8	0,63	0,45–0,82

Для прогноза изменений климата использованы верифицированные климатические модели нового поколения, хорошо отражающие наблюдаемые климатические изменения в период с 1950 по 2012 гг.

В целом прогноз изменений климата МГЭИК к концу XXI века сводится к следующему.

1. Изменения в климатической системе Земли будут продолжаться независимо от выбранных сценариев выбросов парниковых газов. Однако только при оптимистичном сценарии RCP2.6 эти изменения (за исключением среднего уровня океана) в XXI веке стабилизируются, а при других сценариях изменения будут продолжаться и далее.

2. Ожидается, что рост средней глобальной температуры воздуха у поверхности Земли к концу XXI века для всех сценариев эмиссии парниковых газов, за исключением сценария RCP2.6, в сравнении с 1850–1900 гг. превысит 1,5°C. Считается маловероятным рост температуры свыше 4°C и менее 1°C. Рост температуры над сушей будет выше, чем над океанами. Наибольший рост температуры ожидается в арктический регионах северного полушария, где для сценария RCP4.5 рост температуры в зимний сезон ожидается на уровне 7–10 градусов, а в летний период – на 1,5–2,0°C. Возрастет повторяемость дней с высокой температурой воздуха, и снизится повторяемость волн холода в большинстве районов Земли.

3. Изменения в количестве осадков в связи с потеплением будут неоднородными. Контраст между выпадением осадков во влажных и засушливых районах, а также в дождливые и засушливые сезоны в целом увеличится. Наибольшее увеличение осадков (на 40–50%) ожидается в высоких широтах Северного полушария и в экваториальной зоне Тихого океана. Наибольшее снижение количества осадков (до 20%) ожидается в ряде субтропических районов Земли. Площадь пустынь увеличится, как и степень засушливости уже засушливых районов. Возрастет повторяемость событий с экстремальными значениями количества и интенсивности осадков, изменится положение районов с муссонной циркуляцией и её интенсивность. Ожидается рост природных вариаций в количестве осадков, вызванных явлениями регионального масштаба (Эль-Ниньо – Южное колебание, Северо-Атлантическое колебание).

4. В океане будет продолжаться рост температуры, пространственные неоднородности в проникновении тепла в толщу океана будут влиять на океаническую циркуляцию. Рост температуры верхнего слоя океана для наиболее оптимистичного сценария (RCP2.6) составит $0,6^{\circ}\text{C}$, для наиболее пессимистичного – (RCP8.5) $2,0^{\circ}\text{C}$. Наибольшее потепление в верхнем стометровом слое произойдет в тропических и субтропических районах Мирового океана. Впервые отмечено, что в Северном полушарии ожидается ослабление атлантической меридиональной циркуляции воды, так для сценариев RCP2.6 и RCP8.5 ожидается сокращение переноса вод Северо-Атлантическим течением на 11% и 34% соответственно. При этом подчёркивается, что резкое изменение циркуляции вод в Северной Атлантике для рассмотренных сценариев эмиссии парниковых газов маловероятно, но в случае продолжения потепления в XXII веке сценарий катастрофического изменения циркуляции исключать нельзя. Водородный показатель pH морской воды будет продолжать снижаться на поверхности воды в среднем с 8,1 до 7,9, т.е. кислотность (концентрация ионов водорода) возрастёт примерно в 2,5 раза.

5. Ожидается, что в XXI веке наиболее значимое влияние глобальное потепление окажет на криосферу, которая будет быстро деградировать. Среднее сокращение площади ледяного покрова арктических морей для крайних сценариев RCP2.6 и RCP8.5 в период минимального развития ледяного покрова – в сентябре составит 43% и 94% соответственно, а в период максимального развития льда – 8% и 34% соответственно. То есть к концу века по пессимистическому сценарию ожидается очищение Арктики ото льда летом и практически полное вытаявание многолетних льдов. Мировой объём ледников, за исключением ледников на периферии Антарктиды, по прогнозам сократится на величину от 15 до 55% для сценария RCP2.6 и от 35 до 85% – для сценария RCP8.5. Это означает, что весенний и летний сток горных рек, питаемых ледниками, резко сократится, что не означает снижения суммарного стока рек ввиду неоднородности изменений выпадения осадков. Площадь снежного покрова в период его максимального развития в северном полушарии в среднем сократится на 7% для сценария RCP2.6 и на 25% для сценария RCP8.5. По мере глобального потепления сократится площадь приповерхностной вечной мерзлоты. На глубине 3,5 м площадь вечной мерзлоты сократится в среднем на 37% (сценарий RCP2.6) и на 81% (сценарий RCP8.5).

6. Средний уровень океана в XXI веке будет расти для всех сценариев выброса парниковых газов. Средний рост уровня океана (табл. 1) к концу XXI века составит около полуметра. Скорость роста уровня в 2080–2100 гг. составит 8–16 мм в год. Основными причинами роста уровня океана останутся термическое расширение воды (вклад 30–55%) и таяние ледников (15–35%), остальные причины – рост стока рек и повышение количества осадков – играют меньшую роль. Причиной более быстрого роста уровня может быть только таяние антарктического ледового щита, однако оснований для значимого таяния льдов Антарктики, по мнению МГЭИК, пока нет. Повышение уровня будет неоднородным, но рост будет происходить на 95% поверхности океана.

Наряду с исследованиями глобальных климатических изменений, возрастает число работ, посвященных региональным и сезонным климатическим изменениям [4]. Отмечено, что в Пятом докладе МГЭИК [1, 2] в отличие от более ранних, хотя и включаются региональные оценки существующих и ожидаемых изменений климата, в целом они нуждаются в уточнении в региональном, национальном и даже в локаль-

ном масштабах. Поэтому не случайно в ряде стран, в том числе в России, подготовлены оценочные доклады об изменениях климата и разработаны национальные климатические стратегии, климатические стратегии для мегаполисов, включающие практические рекомендации по адаптации к изменениям климата.

*Результаты современных отечественных исследований
изменения климата*

В России оценочный доклад об изменениях климата подготовлен в 2008 г. Росгидрометом с привлечением ведущих отечественных специалистов [5–7]. Оценки изменений климата выполнены для четырёх сценариев выбросов, соответствующих сценариям, принятым в Четвертом докладе МГЭИК [3]. В двух томах Оценочного доклада Росгидромета, наряду с детализированными по регионам России сведениями о наблюдаемых и ожидаемых изменениях климатических показателей, выполнена углублённая оценка последствий изменений климата для различных сторон хозяйственной деятельности. В целом приведённые в российском докладе оценки подтверждают оценки из Четвертого доклада МГЭИК [3]. Для России важно то, что ввиду её высокоширотного положения изменения климата происходят здесь быстрее, чем в среднем на Земле. Так, при оптимистичном сценарии выбросов (B1) к концу века в Арктике средняя температура воздуха возрастёт примерно на 5° зимой и на 1,5° летом. При пессимистичном сценарии выбросов (A2) к концу века в Арктике средняя температура воздуха возрастёт на 8–10°С зимой и 3–4°С летом.

Вместе с тем между Докладами МГЭИК и Росгидромета имеются и принципиальные отличия. Отличия касаются прогнозов ледовитости арктических морей, что необходимо подчеркнуть.

В ряде работ специалистов ААНИИ [8, 9], использованных в Докладе Росгидромета [5–7], показано, что на фоне тренда, направленного на снижение площади ледяного покрова, начиная с 1880 г., происходили циклические колебания ледовитости с периодом 60, 20 и 10 лет, по-разному проявляющиеся в разных секторах Арктики. Основной причиной этих изменений в работах [8, 9] считаются не связанные с антропогенным воздействием естественные изменения потока солнечной энергии, поступающей на Землю. Исходя из выявленных циклических изменений температуры воздуха и ледовитости арктических морей, специалисты ААНИИ разработали долгосрочный прогноз ледовитости арктических морей [8, 9]. Он предполагает сохранение колебательного (а не однонаправленного) фона климатических изменений площади морских льдов в Арктике, что существенно отличается от прогноза МГЭИК [1]. Вместо повышения температуры воздуха и уменьшения ледовитости Арктики, вплоть до полного исчезновения сезонных льдов в Северном Ледовитом океане, ожидаются понижение температуры к 2030–2040 гг. и увеличение ледовитости. Согласно прогнозу ААНИИ площадь арктических льдов должна возрастать, начиная уже с 2010 г.

Приведённый пример разных оценок ожидаемых изменений климата подчёркивает неопределённость прогностических оценок, которая вызвана объективными причинами и в первую очередь сложностью природных процессов, а также необходимость их критического анализа.

После публикации оценочного доклада Росгидромета [5–7] в соответствии с поручением Президента РФ от 9.04.2008 г. и поручением Правительства РФ от 18.04.2008 г. была разработана и 17 декабря 2009 г. подписана Президентом РФ Климатическая доктрина Российской Федерации – основополагающий документ для

принятия внутри- и внешнеполитических, экономических решений и планирования устойчивого развития России. В статье 15 Климатической доктрины подчёркивается, что население, природные объекты, объекты экономики, военные объекты и объекты государственной инфраструктуры различаются по характеру и степени их уязвимости к неблагоприятным последствиям изменений климата. При этом не все виды возможного ущерба могут быть оценены в денежном выражении, а сами оценки возможных потерь могут быть неопределёнными. Это не должно становиться препятствием для обеспечения приемлемого уровня защищённости как меры разумной предосторожности для наиболее уязвимых территорий, объектов и социальных групп, а должно стать предметом особого внимания при оценке их уязвимости, разработке и реализации заблаговременных мер по предотвращению и нейтрализации неблагоприятных последствий изменения климата, либо их сведению к минимально возможному уровню.

Распоряжением Правительства Российской Федерации от 25 апреля 2011 г. № 730-р был утверждён Комплексный план реализации Климатической доктрины Российской Федерации на период до 2020 г. Этот план включает ряд мероприятий, в том числе выполнение комплексных научных исследований климата и рисков для национальной безопасности, а также разработку мер по минимизации негативных последствий для различных отраслей экономики страны. Ответственным органом за выполнение научных исследований является Росгидромет и заинтересованные органы исполнительной власти.

Ввиду специфики влияния изменений климата на военно-морскую деятельность исследования такого рода должны выполняться и в интересах Военно-Морского Флота России. В военных ведомствах зарубежных стран подобные исследования ведутся уже давно.

***Состояние современных исследований изменения климата,
выполняемых в интересах Минобороны и ВМС США***

В США уделяют серьёзное внимание проблеме изменений климата, оценивая эти изменения как катализатор угроз международной и национальной безопасности. Среди многочисленных событий и публикаций в этой области следует выделить следующие.

2001 год. Под эгидой руководства ВМС США проведён международный (с участием представителей Канады и Великобритании) симпозиум «Военно-морские операции в свободной ото льда Арктике». Целью симпозиума была выработка первоначальных предложений по адаптации ВМС к изменениям климата в Арктике и выработке начальных требований к военно-морской деятельности в Арктике в условиях сокращения ледяного покрова [10].

2003 год. Доклад П. Шварца и Д. Рэндала правительству США «Сценарий резких климатических изменений и его последствия для США» [11].

2007 год. Доклад военного консультативного совета «Национальная безопасность и угрозы от климатических изменений» [12];

2008 год. Угрозы от климатических изменений учтены при подготовке ряда руководящих документов военного ведомства США – Стратегия национальной обороны. [13], совместной военно-морской стратегии на XXI век [14];

2009 год. Доклад Института оборонных исследований «Воздействие изменений климата: вопросы международной и национальной безопасности США» [15].

2009 год. При Начальнике военно-морских операций (Chief of Naval Operations) создана группа по изучению изменений климата – Task Force Climate Change (TFCC) для оценки влияния изменений климата на ВМС и выработки рекомендаций руководству ВМС США. Поскольку климат в наибольшей степени изменяется в Арктике, а США – арктическое государство, группой TFCC разработана и принята Дорожная карта по изменению климата в Арктике [16].

2010 год. Группой TFCC разработана Дорожная карта адаптации ВМС США к климатическим изменениям [17], в которой сформулированы цели и задачи для ВМС по проблеме изменения климата и подробный план действий по решению поставленных пяти групп основных задач.

2011 год. Публикация сборника работ ведущих специалистов Национальной академии наук США «Национальная безопасность. Последствия изменений климата для ВМС США» с детальным изложением возможных последствий изменения климата и влияния среды на военно-морскую деятельность [18].

2011 год. Опубликован доклад научного совета Минобороны США «Тенденции и последствия изменений климата для национальной и международной безопасности» [19].

Исследования в этой области в США продолжаются.

Изменения климата оказывают влияние на военно-морскую деятельность как непосредственно, так и опосредованно – влияя на военно-политическую обстановку, международную и национальную безопасность. Анализируя влияние изменений климата на международную и национальную безопасность, зарубежные специалисты подчёркивают каскадный характер влияния этих изменений. Примерами такого непосредственного влияния изменений климата являются те изменения, которые непосредственно влияют на социальную, экономическую деятельность, объекты инфраструктуры и население. К таким факторам непосредственного влияния относятся:

- изменения ледового покрова в Арктике;
- деградация вечной мерзлоты;
- таяние ледников и изменение речного стока;
- повышение частоты волн тепла, засух, уменьшение осадков, опустынивание в отдельных климатических зонах;
- повышение количества осадков в отдельных климатических зонах;
- повышение частоты и интенсивности тропических циклонов, штормов в отдельных районах;
- повышение уровня моря, затопление коралловых рифов и атоллов, низменных территорий;
- изменение экосистем, уменьшение сельскохозяйственных и морских продовольственных ресурсов, водных ресурсов, изменение ареалов инфекционных заболеваний, эрозия берегов.

Так, например, рост уровня моря, затопление островов, коралловых рифов, атоллов и связанное с этим изменение границ положения исключительных экономических зон непосредственно приведёт к территориальным и пограничным спорам. Подъем уровня в сочетании с усилением штормовой активности ускорит эрозию береговой черты, загрязнение грунтовых и подземных вод, традиционных зон водозабора, отступления берега, что будет особенно ощутимо в низменных районах и долинах крупных рек, где наиболее высока плотность населения. Эти факторы неизбежно приведут к снижению качества жизни, экономическим потерям, разрушению инфра-

структуры. Снижение количества осадков в уже и так засушливых районах Земли, процесс опустынивания земель в Африке и Азии, равно как и повышение количества осадков в районах с избыточным количеством осадков, также приведёт к изменению ареалов инфекционных заболеваний и изменению качества жизни.

В качестве механизмов опосредованного влияния можно привести следующие примеры каскадного влияния изменений среды на международную и национальную безопасность. Снижение количества осадков, деградация ледников в засушливых районах повлекут за собой дефицит пресной воды, что приведёт к дефициту продовольствия, недоеданию, росту заболеваемости и, в свою очередь, вызовет рост миграции. Отток населения из стран и районов, подверженных природным бедствиям может привести к тому, что эти страны лишатся необходимых для развития страны людских, финансовых и интеллектуальных ресурсов.

Умножение бедности, проблемы гуманитарного и социального характера в таких странах приведут к увеличению нестабильности и создадут условия для роста экстремизма и терроризма, расширению никем не контролируемых зон, что будет иметь негативные последствия для безопасности не только в региональном, но и в глобальном масштабе. Вынужденная и не контролируемая миграция в районы с относительно слабой экономикой, наряду с положительными эффектами, может привести к перераспределению ограниченных ресурсов, росту социальной, этнической и религиозной напряжённости и также будет представлять угрозу международной и региональной безопасности. Такого рода примеры опосредованного влияния изменений климата на международную безопасность и, соответственно, на военную деятельность можно продолжать. По существующим прогнозам к 2050 г. ожидается 200 млн. мигрантов в мире [12]. К числу основных путей миграции относят миграцию с Южного Кавказа и из Средней Азии в Россию.

Меры по адаптации к изменениям климата также могут привести к росту региональной напряжённости. Так, в Китае для обеспечения продовольственной безопасности разработан план строительства водозаборных сооружений общим объемом 40 млрд. кубометров воды [19]. Часть этих запасов воды включает сток из верховьев рек, затем попадающих на территорию Индии, что является угрозой для существования миллионов людей, живущих ниже по течению этих рек.

В связи с изменениями климата встают следующие вопросы, непосредственно влияющие на военную и военно-морскую деятельность.

1. Какую роль должны играть военные ведомства в деятельности государства в ответ на изменения климата?
2. Какие силы должны иметь военные ведомства для поддержки государства при реагировании на изменения климата?
3. Какие силы должно зарезервировать военное ведомство для поддержки своих международных партнёров для эффективного реагирования на изменения климата?
4. Где, когда и какие специфические риски принесут изменения климата для объектов и сооружений Минобороны и военной деятельности?
5. Как военное ведомство может снизить риски и зависимость от изменений климата?
6. Какие преимущества или выгоды могут получить военные ведомства от изменений климата?
7. Как изменятся задачи флота в Арктике?

8. Каковы потребности в инвестициях для дополнительных исследований проблемы изменения климата?

В целом в нашей стране и за рубежом сделан вывод, что прогнозируемые изменения климата представляют серьёзную угрозу для международной и национальной безопасности. Эти изменения потенциально способны привести к изменению среды обитания и всех видов человеческой деятельности, усилению борьбы за водные и иные природные ресурсы, росту миграционных потоков, а, соответственно, к социально-экономическим последствиям, естественным и гуманитарным катастрофам, политической нестабильности в ряде стран, даже в стабильных регионах мира, и в целом – к изменению геополитической и военно-политической обстановки, появлению проблем глобального характера. В целом изменения климата рассматриваются в качестве мультипликатора (катализатора) имеющихся угроз национальной и международной безопасности и самостоятельного фактора роста рисков безопасности.

Помимо опосредованного влияния на военную и военно-морскую деятельность, изменения климата, в частности, рост уровня океана, сокращение ледяного покрова, рост штормовой активности в условиях деградации ледяного покрова оказывают непосредственное прямое воздействие на инфраструктуру ВМФ, военно-морскую деятельность и комплексы вооружения. Ожидаемый рост среднего уровня моря не является фактором первостепенной важности для военно-морской деятельности. Большую угрозу представляют штормовые нагоны, величина которых нелинейно связана с ростом уровня и усилением штормовой активности.

Изменения климата неизбежно повлияют на военную деятельность. Так, изменение климата, например, в Арктике по некоторым оценкам приведёт к освобождению Арктики ото льда в летний период уже к 2060 г., а по некоторым – к 2040 г. Двумя важнейшими последствиями станут доступ к огромным энергетическим и минеральным ресурсам Северного Ледовитого океана и резкому сокращению протяжённости маршрутов морских перевозок за счёт широкого использования Северного морского пути и Северо-западного прохода. Эти же последствия приведут к усилению территориальных споров, изменению военно-политической роли Арктики и необходимости создания адекватной инфраструктуры для решения не только экономических, но и военных задач. При этом возникнут серьёзные трудности, вызванные невозможностью использования традиционных решений, пригодных для умеренного климата и зон с развитой инфраструктурой. В Арктике ещё долго сохранятся очень низкие температуры, при этом обычные средства связи и навигации, включая спутниковые, останутся неэффективными, а коммуникации – неразвитыми. Существующие надводные силы, в том числе авианесущие корабли, ряд видов технических средств и оружия не приспособлены для эффективного применения в высоких широтах, в условиях жёстких природно-климатических условий – низких температур, обледенения, высокой повторяемости туманов, ограниченной видимости, наличия айсбергов и дрейфующего льда. Качество гидрометеорологического обеспечения в условиях недостаточно развитой системы освещения гидрометеорологической обстановки в Арктике также может существенно осложнить военную деятельность в этом регионе. Распреснение поверхностного слоя и высокая изменчивость гидрологических условий будет влиять на условия распространения звука в воде и потребует разработки надёжных моделей прогноза акустических условий. Исчезновение многолетних льдов в Арктическом бассейне снизит скрытность применения подводных сил стратегического назначения, хотя облегчит их всплытие.

Не все механизмы влияния изменений климата на военно-морскую деятельность элементарны и известны. Возьмём в качестве примера кислотность (водородный показатель – pH). Ожидается, что кислотность океана к концу столетия возрастет в 2,5 раза. Казалось бы, как это повлияет на военно-морскую деятельность. Увеличение кислотности морской воды непосредственно отразится на гидролого-акустических условиях распространения звука. Поглощение звука в воде существенно зависит от концентрации растворённых химических веществ, в частности, от концентрации борной кислоты, которая определяет поглощение звука в воде на частотах ниже 10 кГц. Ожидаемое изменение кислотности к концу XXI века приведёт к уменьшению поглощения звука в морской воде на 70%, что, в свою очередь, изменит эффективность применения гидроакустических средств поиска и слежения и, возможно, тактику противолодочной борьбы. Такого рода примеры опосредованного влияния изменений климата на военно-морскую деятельность можно продолжать [18].

В ВМС США оценки влияния изменений климата на военно-морскую деятельность и предложения по адаптации к этим изменениям разрабатываются на основе прогнозов изменений климата международных и гражданских научных организаций и учреждений. Для уточнения этих прогнозов ВМС США даже раскрывают результаты секретных исследований. В качестве примера можно привести исследования нижней поверхности ледяного покрова в Арктике с борта подводных лодок в рамках проекта Scientific Ice Expeditions (SCICEX) Program [20].

Выводы

1. В последние годы во всём мире осознана значимости происходящих климатических изменений.

2. Долговременное стратегическое планирование военной, хозяйственной и иных видов деятельности и развития страны должно осуществляться с учётом ожидаемых изменений климата. При этом необходимо осознавать сложность прогнозирования изменений климата, принимать меры по снижению неопределённости прогностических оценок, знать механизмы влияния изменений среды и уметь оценивать риски для международной и национальной безопасности, военной и военно-морской деятельности.

3. Пространственная неоднородность происходящих и ожидаемых климатических изменений, специфика каждого из видов человеческой деятельности, многогранность и сложность причинно-следственных связей в области влияния среды на взаимосвязанные виды человеческой деятельности требуют выполнения специальных исследований влияния изменений климата на ВМФ России. В США такого рода исследования ведутся уже более 10 лет.

4. НИОЦ ОАО «ГНИНГИ», располагая актуализированными информационными ресурсами исторических данных гидрометеорологических наблюдений глобального охвата, готов принять участие в научных исследованиях по оценке изменений климата и их влияния на морскую и военно-морскую деятельность России.

ЛИТЕРАТУРА

1. IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013. – 27 p.

2. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013. – 2216 p.
3. IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [S. Solomon., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007. – 845 pp.
4. Мастрюков С. И., Ульянец Е. К., Червякова Н. В. Оценка современных тенденций изменения климата в северной Европе, северной Атлантике и прилегающих морях // Записки по гидрографии/ УНиО МО. – СПб.: 2009. – № 276. – С. 15–24.
5. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Техническое резюме. – Росгидромет 2008, – 89 с. URL: <http://climate2008.igce.ru/>
6. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том 1. Изменения климата. – Росгидромет 2008. – 227 с. URL: <http://climate2008.igce.ru/>
7. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том 2. Последствия изменений климата. – Росгидромет, 2008. – 288с. URL: <http://climate2008.igce.ru/>.
8. Фролов И. Е., Гудкович З. М., Карклин В. П., Ковалев Е. Г., Смоляницкий В. М. Научные исследования в Арктике. – Т. 2. Климатические изменения ледяного покрова морей Евразийского шельфа. – СПб: Наука, 2007. – 136 с.
9. Фролов И. Е., Гудкович З. М., Карклин В. П., Смоляницкий В. М., Изменения климата Арктики и Антарктики – результат действия естественных причин, // Проблемы Арктики и Антарктики/ – 2010. – № 2 (85). С. 52–61.
10. Naval operations in an ice-free Arctic. Symposium 17–18 April 2001. Final Report. Office of Naval Research. Whitney, Bradley & Brown, Inc., 2001. – 70 p.
11. Schwartz P., Randal D. An Abrupt Climate Change Scenario and Its Implications for United States National Security. – 2003. – 22 p. URL: http://www.climate.org/PDF/clim_change_scenario.pdf.
12. National security and the threat of climate change. CNA Corporation. – 2007. – 70 p., URL: <http://www.cna.org/sites/default/files/news/FlipBooks/Climate%20Change%20web/flipviewerxpress.html>.
13. National Defense Strategy. – 2008. – 23 p. URL: <http://www.defense.gov/news/2008%20national%20defense%20strategy.pdf>.
14. A cooperative Strategy for 21st century seapower. US Navy, US Marine Corps, US Coast Guard. – 2007. – 20 p. URL: <http://www.navy.mil/maritime/Maritimestrategy.pdf>.
15. Youngblut C. Climate change effects: Issues for international and US Security. Institute for Defense analysis, Alexandria, Virginia. – 2009. – 65 p. URL: http://www.environmentandsecurity.org/files/196201_196300/196235/christine-youngblut-1.pdf
16. US Navy Arctic roadmap: TFCC / Oceanographer of the Navy. – 2009. – 35 p. URL: http://www.navy.mil/navydata/documents/USN_artic_roadmap.pdf.
17. US Navy climate change roadmap: TFCC / Oceanographer of the Navy. – 2009. – 26 p. URL: <http://www.navy.mil/navydata/documents/CCR.pdf>.
18. National Security Implications of Climate Change for U.S. Naval Forces. The National academies press, Washington, DC, 2011. – 165 p. URL: <http://image.guardian.co.uk/sys-files/Environment/documents/2011/03/10/PrepubAllClimateChange110218.pdf>.
19. Trends and Implications of Climate Change for National and International Security. Defense Science Board, Washington, DC. – 2011. – 175 p. URL: <http://www.fas.org/irp/agency/dod/dsb/climate.pdf>.
20. Портал национального центра снега и льда США. SCICEX. Submarine arctic science program. URL: <http://nsidc.org/scicex/>.

BRIEF REVIEW OF EXPLORATIONS IN THE SPHERE OF CLIMATE CHANGE AND EVALUATION OF ITS INFLUENCE ON THE NAVAL ACTIVITIES

S. I. Mastryukov, N. V. Chervyakova («GNINGI» OJSC)

The main results of the present-day international and national explorations in the sphere of climate change are summarized. The activities and results of the explorations that are carried out in the USA in order to evaluate the influence of the expected climate change on the military and naval activities are analyzed. The aim of the review is to substantiate the necessity to carry out the special explorations of the climate change in the interests of the Russian Navy.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

АЛЕКСЕЕВ Александр Григорьевич,

начальник отдела в ОАО «ГНИНГИ». Окончил Военно-морской институт. Специальность: инженер-гидрограф. Сфера научных интересов: дистанционное зондирование земли, электронная картография. Автор одной публикации.

E-mail: aaleks-eev83@yandex.ru

БЛЕДНОВ Вадим Алексеевич,

окончил Санкт-Петербургский электротехнический институт по специализации радиотехника, гироскопические приборы и устройства. Кандидат технических наук, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник в Санкт-Петербургском Филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова. Автор 195 научных трудов и изобретений.

E-mail: Blednov2@mail.ru

БУХОВ Денис Михайлович,

исполнительный директор ОАО «780 РЗ ТСК», капитан 2 ранга в запасе. Окончил ВВМУ им. М. В. Фрунзе. Специальность – инженер-гидрограф. Автор трех печатных работ.

Тел.: +7(812)415-99-17

ГОЛЯКОВ Алексей Дмитриевич,

профессор Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, доктор технических наук, профессор. Окончил Военно-космическую академию им. А. Ф. Можайского. Специализация – навигация и безопасность. Автор более 120 печатных работ.

E-mail: algol49@narod.ru

ЖУКОВ Юрий Николаевич,

ведущий научный сотрудник ОАО «ГНИНГИ», доктор технических наук. Окончил Ленинградский гидрометеорологический институт. Специализация – гидрометеорология. Автор более 70 печатных трудов.

Тел.: +7(812)322-63-39

Aleksandr G. ALEKSEYEV,

Chief of division, «GNINGI» OJSC. Graduated from the Naval Institute. Speciality: engineer-hydrographer. Sphere of scientific interests: remote sensing of the Earth, electronic cartography. Author of one publication.

E-mail: aaleks-eev83@yandex.ru

Vadim A. BLEDNOV,

Senior researcher at St. Petersburg Branch of the N. V. Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radiowave Propagation (ISMIRAN), CandSc, DSc (physics and mathematics). Graduated from St. Petersburg Electrotechnical Institute, majoring in radiotechnology, gyroscopic devices. Author of 195 scientific works and inventions.

E-mail: Blednov2@mail.ru

Denis M. BUKHOV,

Executive Director, «780 RS TSK» JSC, Captain II Rank (Ret.). Graduated from Frunze Naval College. Speciality: engineer-hydrographer. Author of 3 publications.

Tel.: +7(812)415-99-17

Aleksey D. GOLYAKOV,

Professor at the Mozhaisky Military-Space Academy, professor, DSc. Graduated from the Mozhaisky Military-Space Academy. Speciality – navigation and safety. Author of more than 120 publications.

E-mail: algol49@narod.ru

Yuri N. ZHUKOV,

Leading researcher, «GNINGI» OJSC, DSc. Graduated from Leningrad Hydrometeorological Institute. Speciality: hydrometeorology. Author of more than 70 publications.

Tel.: +7(812)322-63-39

ЗАВГОРОДНИЙ Владимир Николаевич,

начальник отдела Военного института дополнительного профессионального образования ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», докторант Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ), старший научный сотрудник, кандидат технических наук, капитан 1 ранга запаса. Окончил Высшее военно-морское училище радиоэлектроники имени А. С. Попова, Военно-морскую академию. Специализация: системный анализ, исследование операций, теория принятия решений, методы оптимизации. Автор 20 печатных работ.

E-mail: zavgor@list.ru

ЗУБЧЕНКО Эдуард Семенович,

профессор Военно-морской академии им. Н. Г. Кузнецова, капитан 1 ранга в отставке, доктор технических наук, профессор. Окончил Высшее военно-морское училище им. М. В. Фрунзе, Военно-морскую академию им. Н. Г. Кузнецова. Специализация – навигационно-гидрографическое обеспечение, аэрокосмические методы сбора гидрографической информации, геоинформационные технологии. Автор 53 печатных трудов, в том числе монографии по морским геоинформационным системам.

E-mail: ezyb@mail.ru

МАЛЕЕВ Павел Иванович,

ведущий научный сотрудник ОАО «ГНИНГИ», капитан 1 ранга в отставке, доктор технических наук. Окончил Казахский государственный университет, Специальные курсы при Военно-морской академии им. А. Н. Крылова. Специализация – технические средства навигации. Автор около 290 печатных трудов.

E-mail: info@gningi.ru

МАСТРЮКОВ Сергей Иванович,

ведущий научный сотрудник ОАО «ГНИНГИ», полковник в запасе, доктор технических наук. Окончил Ленинградский гидрометеорологический институт. Специализация – океанология. Автор более 100 печатных работ.

Тел.: +7(812)322-63-22

ФОМИНОВ Иван Владимирович,

докторант Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, кандидат технических наук. Окончил Военно-космическую академию им. А. Ф. Можайского. Специализация – адаптивные информационно-измерительные системы. Автор 15 печатных работ.

E-mail: vka@mil.ru

Vladimir N. ZAVGORODNIY,

Chief of division, The Military Institute of Supplementary Professional Education (The Military Educational-and-Research Centre Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N. G. Kuznetsov), doctoral student of St. Petersburg State Electrotechnical University, CandSc, senior researcher, Captain 1 Rank (Ret.). Graduated from Popov Naval College of Radioelectronics, the Naval Academy. Sphere of scientific interests: system analysis, operations research, tasks of optimization in organizational-technical systems. Author of more than 20 scientific publications.

E-mail: zavgor@list.ru

Edward S. ZUBCHENKO,

Professor of the N. G. Kuznetsov Naval Academy, DSc, the professor, Captain I Rank (Ret.). Graduated from Frunze Naval College, the Naval Academy. Specialization – navigation and hydrographic support, remote sensing methods of collecting the hydrographic information, geoinformation technologies. Author of 53 publications, including monographs on sea geoinformation systems.

E-mail: ezyb@mail.ru

Pavel I. MALEYEV,

Leading researcher, «GNINGI» OJSC. Captain I Rank (Ret.), DSc. Graduated from Kazakh State University, Specialized Course at Krylov Naval Academy. Speciality: technical means of navigation. Author of about 290 publications.

E-mail: info@gningi.ru

Sergei I. MASTRYUKOV,

Leading researcher, «GNINGI» OJSC, Colonel (Ret.), DSc. Graduated from St. Petersburg Hydrometeorological Institute. Speciality: oceanology. Author of more than 100 publications.

Phone: +7(812)322-63-22

Ivan V. FOMINOV,

Doing research for the doctor's degree at the Mozhaisky Military-Space Academy, CandSc. Graduated from the A.F. Mozhaisky Military-Space Academy. Specialization: adaptive information-measuring systems. Author of 15 scientific publications.

E-mail: vka@mil.ru

ЧЕРВЯКОВА Нина Владимировна,

начальник лаборатории ОАО «ГНИНГИ». Окончила Российский Государственный гидрометеорологический университет, магистр, специальность – климатология, гидрометеорология. Автор четырех публикаций.

Тел.: +7(812)322-35-18

ШАРКОВ Андрей Михайлович,

начальник научно-исследовательского управления гидрографии, геофизики и гидрометеорологии ОАО «ГНИНГИ», капитан 1 ранга в запасе, кандидат технических наук. Окончил Высшее военно-морское училище им. М. В. Фрунзе и Военно-морскую академию им. Н. Г. Кузнецова. Специализация – гидрография. Автор 25 печатных трудов.

E-mail: sharkov-am@mail.ru

Nina V. CHERVYAKOVA,

Chief of laboratory «GNINGI» OJSC. M.Sc. Graduated from the Russian State Hydrometeorological University. Speciality: climatology, hydrometeorology. Author of 4 publications.

Phone: +7(812)322-35-18

Andrey M. SHARKOV,

Chief of research department of hydrography, geophysics and hydrometeorology «GNINGI» OJSC. Captain 1-st rank (Ret.). CandSc. Graduated from Frunze Naval College and N. G. Kuznetsov Naval Academy. Speciality: hydrography. Author of 25 publications.

E-mail: sharkov-am@mail.ru

РЕФЕРАТЫ

УДК 629.12.004.67

К 45-летию ОАО «780 Ремонтный завод технических средств кораблевождения». Бухов Д. М. – Навигация и гидрография. – 2014. – № 37. – С. 7–10.

Приведены сведения об истории создания и современной деятельности ОАО «780 Ремонтный завод технических средств кораблевождения».

Ключевые слова: Технические средства кораблевождения, средства навигационного оборудования

УДК 681.518

Обоснование перечня функциональных характеристик адаптивных информационно-измерительных навигационных систем. А. Д. Голяков, И. В. Фоминов – Навигация и гидрография. – 2014. – № 37. – С. 11–17.

В статье на основании проведенных исследований обоснован перечень функциональных характеристик адаптивных информационно-измерительных навигационных систем. Приведены аналитические выражения для их количественного оценивания.

Ключевые слова: Адаптивные информационно-измерительные системы, функциональные характеристики, точность, оперативность, готовность, надежность, стойкость.

УДК 681.2.082.16

Гироскопические чувствительные элементы: классификация и уровень развития. П. И. Малеев – Навигация и гидрография. – 2014. – № 37. – С. 18–28.

Приведена разработанная классификационная таблица гироскопических чувствительных элементов, рассмотрены их особенности, результаты оценки возможной точности и достигнутый уровень развития.

Ключевые слова: Гироскопы, поплавковые, шаровые, электростатические, магниторезонансные, кольцевые, ядерные, вибрационные.

УДК 629.7

Методы адаптивной обработки навигационных измерений бортовыми средствами искусственных спутников Земли. А. Д. Голяков, И. В. Фоминов – Навигация и гидрография. – 2014. – № 37. – С. 28–35.

В статье рассмотрены методы адаптивной обработки навигационных измерений, проводимых бортовыми средствами искусственных спутников Земли. Проведен сравнительный анализ статических и динамических методов, показаны их достоинства и недостатки. Предложены пути дальнейшего развития теоретических основ аналитического оценивания точности навигации ИСЗ.

Ключевые слова: Навигационные измерения, автономная навигация, методы обработки навигационных измерений, адаптивные фильтры, воздействующие факторы.

УДК 621.396 933

Новые способы создания электромагнитных абсолютных лагов. П. И. Малеев – Навигация и гидрография. – 2014. – № 37. – С. 35–43.

Рассмотрены четыре новых способа создания абсолютных лагов, работающих по электромагнитному полю. Три из них основаны на использовании эффекта Доплера, а четвертый – на регистрации «профиля» электромагнитного поля разнесенными приемниками. Показано, что в отличие от известных способов (запросный и беззапросный) предлагаемые способы обладают рядом преимуществ.

Ключевые слова: электромагнитное поле, абсолютная скорость, радионавигационные системы, приемоиндикаторы.

УДК 528.92

«Универсалия» рельефа Земли. Ю. Н. Жуков – Навигация и гидрография. – 2014. – № 37. – С. 43–47.

В статье вводится и обосновывается понятие единого описания формы рельефа Земли. Дается описание способа построения единого картографического образа рельефа.

Ключевые слова: Поверхность рельефа, сходство локальных форм рельефа, дерево Кронрода-Риба.

УДК 528.92

Автоматизация проверки корректности картографического образа подводного рельефа. Ю. Н. Жуков – Навигация и гидрография. – 2014. – № 37. – С. 47–51.

Приводится список количественно оцениваемых характеристик, которые определяют корректность картографического представления рельефа. Формулируются требования к функциональности программной системы для автоматизированной оценки корректности картографического представления рельефа.

Ключевые слова: Поверхность рельефа, топология, дерево Кронрода-Риба, ячейки Морса-Смейла.

УДК. 52.337 + 629.051

Сравнение результатов магнитной съемки акватории, выполненной бортовым и буксируемым магнитометрами. В. А. Бледнов – Навигация и гидрография. – 2014. – № 37. – С. 51–58.

Приведено сравнение результатов определения угловых компонент магнитного поля Земли, выполненных на борту движущегося ферромагнитного объекта (судна), с данными измерений магнитного поля, полученных буксируемым магнитометром. По результатам съемки построены карты распределения магнитного поля Земли на одном и том же полигоне. Показано, что измерение угловых компонент магнитного поля Земли с сопоставимой чувствительностью легче, чем его силовые компоненты.

Ключевые слова: Магнитное поле Земли (МПЗ), метод определения угловых компонент (МОУК), ферромагнитный объект (судно), измерения на борту движущегося ферромагнитного объекта, измерения буксируемым магнитометром.

УДК 623:658.562

Перспективы использования автономных подводных необитаемых аппаратов для обеспечения ВМФ гидрографической и океанологической информацией. Э. С. Зубченко, А. М. Шарков – Навигация и гидрография. – 2014. – № 37. – С. 58–64.

В статье рассмотрены перспективы использования необитаемых подводных аппаратов в интересах решения задач НГО и ГМО ВМФ. Приведены примеры их использования в зарубежных странах.

Ключевые слова: Навигационно-гидрографическое обеспечение, океанологическое обеспечение, робототехническое подводное средство, автономный подводный аппарат, глайдер.

УДК 519.83

Теоретико-игровая модель поддержки принятия решений в интересах навигационно-гидрографического обеспечения сил флота. В. Н. Завгородний – Навигация и гидрография. – 2014. – № 37. – С. 64–72.

В статье излагается метод решения составных игр в теоретико-игровом подходе. Рассмотрена модель составной игры, образованной играми различных классов, в целях приложения к задачам навигационно-гидрографического обеспечения деятельности ВМФ. Предложены теоретические положения решения составных игр.

Ключевые слова: Навигационно-гидрографическое обеспечение, моделирование боевых действий, системы поддержки принятия решений, теоретико-игровые модели, математическая теория игр, теория статических решений.

УДК 623.46

Современная технология спутниковой батиметрии. А. Г. Алексеев, Э. С. Зубченко – Навигация и гидрография. – 2014. – № 37. – С. 72–80.

В обзорно-аналитической статье рассматривается технология определения глубин по многозональным изображениям морских акваторий, полученным современными спутниковыми оптикоэлектронными сканирующими системами.

Ключевые слова: Дистанционное зондирование, многозональная съемка оптикоэлектронными сканирующими системами, рельеф дна, метод обработки многозональных изображений, множественная регрессия, метод главных компонент, точность метода, диапазон определяемых глубин.

УДК 551.583

Краткий обзор исследований в области изменений климата и оценки их влияния на военно-морскую деятельность. С. И. Мاستрюков, Н. В. Червякова – Навигация и гидрография. – 2014. – № 37. – С. 81–92.

В обзоре обобщены основные результаты современных международных и отечественных исследований в области изменения климата, проанализирована деятельность и результаты выполняемых в США исследований по оценке влияния ожидаемых изменений климата на военную и военно-морскую деятельность. Цель обзора – обоснование необходимости выполнения специальных исследований изменений климата в интересах ВМФ России.

Ключевые слова: Изменения климата, МГЭИК, российские исследования климата, ВМФ.

ABSTRACTS

On the Occasion of the 45-th Anniversary of the 780 Repair Plant of the Navigational Technical Equipment. D. M. Bukhov – Navigation and Hydrography. – 2014. – No. 37. – P. 7–10.

The information about the history of establishment and present-day activities of “The 780 Repair Plant of the Navigational Technical Equipment” JSC is presented

Key words: navigational aids, aids to navigation.

Substantiation for the List of Functional Characteristics of Adaptive Information-Measuring Navigation Systems. A. D. Golyakov, I. V. Fominov – Navigation and Hydrography. – 2014. – No. 37. – P. 11–17.

Based on the research, the list of the functional characteristics of adaptive information-measuring navigation systems is substantiated. Examples of indicators of the functional characteristics and expressions for their quantitative estimation are given.

Key words: adaptive information-measuring navigation systems, functional characteristics, accuracy, timeliness, readiness, reliability, resistance.

Gyroscopic Sensing Elements, Their Classification and Development Level. P. I. Maleyev – Navigation and Hydrography. – 2014. – No. 37. – P. 18–28.

The classification table of gyroscopic sensing elements developed by the author is presented. Their specific features, results of evaluation of the possible accuracy and the current development level are considered.

Key words: gyroscopes, floating-type, electrostatic, magnetic-resonance, ring, nuclear, vibration gyroscopes.

Methods of Adaptive Processing of Navigation Measurements Obtained by Satellites. A. D. Golyakov, I. V. Fominov – Navigation and Hydrography. – 2014. – No. 37. – P. 28–35.

Methods of adaptive processing of the results of onboard navigation measurements of artificial Earth satellites are considered. Based on the comparative analysis of static and dynamic methods, the ways for further development of theoretical principles of analytical evaluation of satellite navigation accuracy are suggested.

Key words: navigation measurements, autonomous navigation, processing methods of navigation measurements, adaptive filters, influencing factors.

New Techniques of Creating the Electromagnetic Absolute Logs. P. I. Maleyev – Navigation and Hydrography. – 2014. – No. 37. – P. 35–43.

Four new techniques of creating the absolute (bottom-speed) logs operating on the electromagnetic field are considered. Three of them are based on using the Doppler effect and the fourth – on registration of the electromagnetic field “profile” by the spaced receivers. It is shown that, unlike the well-known techniques (interrogation and noninterrogation ones) the suggested techniques have a number of advantages.

Key words: electromagnetic field, absolute speed, radionavigation systems, technique, receiver-indicators.

“Universalialia” of the Earth’s Relief. Y. N. Zhukov – Navigation and Hydrography. – 2014. – No. 37. – P. 43–47.

The notion of the single description of the Earth’s relief form is introduced and substantiated. The technique for constructing the single cartographic image of the relief is described.

Key words: the relief surface, similarity of the local relief forms, Kronrod-Reeb tree.

Automation of Checking the Correctness of the Cartographic Image of the Submarine Relief. Y. N. Zhukov – Navigation and Hydrography. – 2014. – No. 37. – P. 47–51.

The list of quantitatively evaluated characteristics that determine the correctness of the cartographic representation of the relief is given. The requirements to the functionality of the program system for the automated evaluation of the correctness of the cartographic representation of relief are formulated.

Key words: relief surface, topology, Kronrod-Reeb tree, Morse-Smale cells.

Comparison of Results of the Water Area Survey Carried out by the Shipborne and Towed Magnetometers. V. A. Blednov – Navigation and Hydrography. – 2014. – No. 37. – P. 51–58.

The results of determining the angular components of the Earth's magnetic field carried out on board the moving ferromagnetic object (vessel) are compared with magnetic field measurement data obtained by towed magnetometer. Based on the survey results, the maps of the Earth's magnetic field distribution at the same proving range are drawn. It is shown that the angular components measurement enables the accuracy and sensitivity of the magnetometric measurements techniques to be increased.

Key words: the Earth's [the terrestrial] magnetic field, the technique of determining the angular components, ferromagnetic object (vessel), measurements on board the moving ferromagnetic object, measurements (carried out) by the towed magnetometer.

Prospects of Using the Autonomous Underwater Unmanned Vehicles to Provide the Oceanographic and Oceanology Information for the Navy. E. S. Zubchenko, A. M. Sharkov – Navigation and Hydrography. – 2014. – No. 37. – P. 58–64.

The prospects of using the unmanned underwater vehicles to solve the tasks of navigation-hydrographic and hydrometeorological support for the Navy are considered. Examples of their employment in the foreign countries are given.

Key words: navigation and hydrographic support, oceanology support, robot technical means, autonomous underwater vehicle (AUV), glider.

The Game-Theoretic Model of Decision-Making in the Interests of the Navigation and Hydrographic Support for the Navy. V. N. Zavgorodny – Navigation and Hydrography. – 2014. – No. 37. – P. 64–72.

The method of solution for the composite games in the game theoretic approach is set forth. The model of a composite game formed by games of different classes and intended to provide the navigation and hydrographic support for the naval activities is considered. The theoretical principles for solution of the composite games are suggested.

Key words: navigation and hydrographic support, modeling the fighting, decision support system, game theoretic models, mathematical game theory, statistical decision theory.

The Present-Day Technique of Satellite Bathymetry. A. G. Alekseyev, E. S. Zubchenko – Navigation and Hydrography. – 2014. – No. 37. – P. 72–80.

The technique used to find the depth by multizonal images of the sea areas obtained by the present-day satellite optronic scanning systems, is considered and analyzed.

Key words: remote sensing, multizonal optronic scanning systems, bottom relief, technique of processing the multizonal images, multiple regression, technique of the main components, accuracy of method, depth range.

Brief Review of Explorations in the Sphere of Climate Change and Evaluation of its Influence on the Naval Activities. S. I. Mastryukov, N. V. Chervyakova – Navigation and Hydrography. – 2014. – No. 37. – P. 81–92.

The main results of the present-day international and national explorations in the sphere of climate change are summarized. The activities and results of the explorations that are carried out in the USA in order to evaluate the influence of the expected climate change on the military and naval activities are analyzed. The aim of the review is to substantiate the necessity to carry out the special explorations of the climate change in the interests of the Russian Navy.

Key words: climate change, Intergovernmental Panel on Climate Change, the Russian explorations of the climate, the Navy.

ИНФОРМАЦИЯ

Глубокоуважаемые коллеги!

Приглашаем Вас к сотрудничеству в журнале «Навигация и гидрография», издаваемом с 1995 г. Государственным научно-исследовательским навигационно-гидрографическим институтом.

В журнале публикуются результаты исследований в области навигации, гидрографии, океанографии, гидрометеорологии, морской картографии, морской геофизики и экологии. Издание освещает концептуальные научные положения и осуществляет оперативную публикацию новейших теоретических исследований, знакомит с передовыми техническими достижениями, с материалами симпозиумов, конференций и хроникой важнейших событий научной жизни. Статьи журнала рецензируются.

Журнал «Навигация и гидрография» включен в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук».

Журнал распространяется по подписке. Кроме того, он рассылается в крупнейшие библиотеки России, центры научно-технической информации, органы военного управления различного уровня, научно-технические библиотеки высших военно-морских учебных заведений и научно-исследовательских организаций.

Информация для авторов

Журнал выходит два раза в год. Статьи, предназначенные для первого номера, принимаются до конца марта, а для второго – до конца сентября текущего года.

Требования к оформлению материалов

Статьи принимаются в формате MS Word с приложением текста на бумаге (шрифт – Times New Roman размером 14, межстрочный интервал 1,5). Все материалы должны быть подписаны автором (авторами).

Объем статьи не должен превышать 0,5 авторского листа (20 000 печатных знаков), включая рисунки, таблицы и список литературы.

Название статьи должно в наиболее краткой форме отражать ее содержание.

В статье указывается *индекс УДК*. К работе прилагаются *аннотация, ключевые слова и сведения об авторах*.

В аннотации приводятся сведения, которые дополняют название и характеризуют тему статьи, рассмотренную проблему, цель и полученные результаты.

В качестве ключевых приводятся слова или словосочетания из текста статьи, несущие существенную смысловую нагрузку с точки зрения информационного поиска. Выбор ключевых слов должен осуществляться по всему тексту статьи с охватом основных смысловых аспектов её содержания.

В сведениях об авторах указываются: фамилия, имя, отчество; полное наименование учреждения, где работает автор; должность; ученая степень, звание; воинское звание (для военнослужащих); полное наименование высшего учебного заведения, которое закончил автор; специализация; количество опубликованных научных

трудов. Кроме того, авторам необходимо указать контактную информацию: почтовый или электронный адрес, номера телефонов.

К рукописи прилагается *сопроводительное письмо* организации, в которой работает автор, и один экземпляр *экспертного заключения* о возможности открытого опубликования представленных материалов.

Для написания формул и символов, входящих в формулы, следует использовать редактор формул MS Equation.

Используемые в статье *величины и единицы измерения* должны соответствовать стандартным обозначениям согласно Международной системе единиц СИ.

Рисунки должны быть вставлены в текст, как *графический* файл, иметь порядковые номера и подписи.

Таблицы должны иметь порядковые номера и названия. Допускается только вертикальная ориентация таблиц, ширина не должна превышать 140 мм.

Список использованной литературы составляется на языке оригинала (исключение – языки с иероглифическим написанием слов) в порядке ссылок на источники по тексту. Ссылки в тексте даются в квадратных скобках, где указывается номер работы по списку. В списке литературы указываются: фамилии и инициалы авторов, полное название книги или статьи, название сборника, город, издательство, год, том, номер, страницы.

Подписка на журнал «Навигация и гидрография»

Журнал «Навигация и гидрография» включён в каталог «Издания органов научно-технической информации» агентства «Роспечать». Подписной индекс 60941.

Периодичность выхода – два номера в год.

Стоимость одного номера 200 руб., включая НДС 18%.

Для заказа издания непосредственно в редакции необходимо направить в адрес редакции заявку в произвольной форме с указанием номера(ов) журнала, контактных данных и реквизитов заказчика.

Архив журнала в формате PDF доступен на сайте ОАО «ГНИНГИ» www.gningi.ru.

Адрес редакции: ОАО «ГНИНГИ»,
199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Кожевенная линия, 41,
Телефон/факс: (812) 327-99-80
E-mail: mail@gningi.ru; info@gningi.ru



ДЛЯ ЗАМЕТОК

НАВИГАЦИЯ И ГИДРОГРАФИЯ, 2014, №37

Научный редактор П. И. Малеев
Редактор И. Ю. Бугрова
Технический редактор В. Ю. Бахмутов
Редактор-переводчик Г. В. Трибуц

Подписано в печать 16.06.2014 г.
Тираж 300 экз.
Заказ № 7/32 от 18.06.2014 г.

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-43932.

Подписной индекс в каталоге «Издания органов НТИ» Агентства «Роспечать» 60941

Журнал «Навигация и гидрография» включен в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук»

Электронная версия журнала размещена на сайте www.gningi.ru

**© ОАО «Государственный научно-исследовательский
навигационно-гидрографический институт»**