

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

НАВИГАЦИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

ИЗДАЕТСЯ С 1995 ГОДА

**24
2007**

МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Санкт-Петербург

Главный редактор
д. т. н., проф. С. П. Алексеев

Редакционная коллегия:

д. т. н., проф. А. Н. Добротворский (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);
В. Ю. Бахмутов (ответственный за выпуск); д. т. н., проф. Б. Н. Беляев;
к. т. н. М. Л. Богданович; к. в.-м. н., проф. А. А. Дадашев;
д. т. н., проф. Б. Е. Иванов; д. в. н., проф. А. И. Исмаилов;
д. в. н. В. А. Катенин; к. т. н. Н. И. Леденев; д. т. н., проф. Б. И. Лобойко;
к. т. н. С. И. Мастрюков; д. в.-м. н., проф. А. П. Михайловский;
д. т. н., проф. Н. Н. Неронов; д. т. н. А. Б. Опарин;
д. т. н., проф. В. И. Пересыпкин; акад. РАН В. Г. Пешехонов;
к. в. н. Ю. В. Румянцев; чл.-кор. РАН А. Е. Сазонов;
чл.-кор. РАН А. И. Сорокин; к. т. н. С. В. Яценко

© Государственный научно-исследовательский
навигационно-гидрографический институт
Министерства обороны Российской Федерации

2007

**THE STATE RESEARCH NAVIGATION-HYDROGRAPHIC
INSTITUTE**

NAVIGATION AND HYDROGRAPHY

PUBLISHED SINCE 1995

**24
2007**

RUSSIAN FEDERATION MINISTRY OF DEFENCE

Saint-Petersburg

Editor-in-chief

S. P. Alekseyev, DSc, professor

Editorial board

A. Dobrotvorsky (first vice-editor-in-chief), DSc, professor;
P. Brodsky (vice-editor-in-chief), DSc, professor;
P. Maleyev, DSc (science editor); I. Bugrova (editor), CandSc;
V. Bakhmutov (the issue manager); B. Belyaev, DSc, professor;
M. Bogdanovich, CandSc; A. Dadashev, CandSc, professor;
B. Ivanov, DSc, professor; A. Ismailov, DSc, professor; V. Katenin, DSc;
N. Ledenev, CandSc; B. Loboiko, DSc, professor; S. Mastryukov, CandSc;
A. Mikhaylovsky, DSc, professor; N. Neronov, DSc, professor; A. Oparin, DSc;
V. Peresypkin, DSc, professor; V. Peshekhonov, DSc, Acad. RAS;
Yu. Rummyantsev, CandSc; A. Sazonov, CM RAS; A. Sorokin, DSc, CM RAS;
S. Yatsenko, CandSc

**© The State Research Navigation-Hydrographic Institute
Russian Federation Ministry of Defence**

2007

СОДЕРЖАНИЕ

С. П. Алексеев. Навигационно-гидрографическое обеспечение морской деятельности на современном этапе ее развития	9
--	---

НАВИГАЦИЯ

В. С. Макода, П. Г. Бродский. Метод обоснования требований к тактико-техническим характеристикам навигационных комплексов	16
--	----

Б. И. Лобойко, В. С. Трегубов. Требования морских потребителей к радионавигационному обеспечению	25
---	----

В. Н. Быстров, Г. К. Данилова, В. И. Лапшина, В. А. Пыленков, Ю. В. Токарев. К вопросу оценки эффективности применения спутниковых навигационных систем с учетом возможного затенения спутников	34
--	----

В. Н. Бондаренко, В. И. Кокорин, Е. В. Кузьмин. Алгоритм автоподстройки по частоте для корабельной станции широкополосной радионавигационной системы	44
---	----

К. П. Львов. Погрешности оценивания частоты в доплеровском лаге корреляционным алгоритмом	53
--	----

П. И. Малеев. Основные направления развития зарубежных средств навигации атомных подводных лодок с баллистическими ракетами	60
--	----

Ю. А. Глухов, Л. А. Заяц. Определение коэффициентов ветрового дрейфа корабля по обсервованным координатам	73
--	----

Б. Е. Иванов. О достоверности оценки вероятности навигационной безопасности плавания с учетом погрешности положения кромки фарватера	83
---	----

Б. Е. Иванов. Анализ подходов к точности определения места при использовании навигационного створа	89
---	----

В. А. Михальский. К вопросу об объединении законов распределения погрешностей измерения навигационных параметров	94
---	----

Г. Г. Лукьянов, Д. В. Козлов, А. Ю. Обухов. Светодиодные зрительные средства большой мощности для навигационного оборудования	103
--	-----

ГИДРОГРАФИЯ И МОРСКАЯ КАРТОГРАФИЯ

А. В. Каврайский. Универсальный алгоритм равноугольного изображения эллипсоида на шаре по Гауссу	115
---	-----

Ю. Г. Фирсов. Геодезические аспекты гидрографического использования приемной спутниковой аппаратуры С-NAV123

Э. С. Зубченко, П. И. Малеев. Способ повышения точности координатной привязки данных зондирования местности с воздушных носителей136

Э. С. Зубченко. Методы радиолокационного и электромагнитного зондирования морских акваторий для картографирования рельефа дна.....152

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ОКЕАНОГРАФИЯ

С. И. Мастрюков. Оценка повторяемости тропических циклонов над Охотским морем163

СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

К. Я. Богомазов, С. Ю. Хлыпало. Штурман первой советской подводной лодки на Тихом океане167

А. И. Сорокин. Участие гидрографов государственного научно-исследовательского навигационно-гидрографического института МО в проведении теоретических и экспериментальных исследований, направленных на создание методов картографирования Арктического бассейна172

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ177

C O N T E N T S

S. P. Alekseyev. Navigation-hydrographic Support for Maritime Activities at the Present-Day Stage.....	9
---	---

NAVIGATION

V. S. Makoda, P. G. Brodsky. Method of Substantiation of Requirements to Specifications for Navigation Complexes	16
---	----

B. I. Loboiko, V. S. Tregubov. Requirements of Maritime Users to Radionavigation Support	25
---	----

V. N. Bystrov, G. K. Danilova, V. I. Lapshina, V. A. Pylenkov, Y. V. Tokarev. On the Estimate of the Effectiveness of Using the Satellite Navigation Systems Taking the Possible Shadowing of Satellites into Account.....	34
---	----

V. N. Bondarenko, V. I. Kokorin, E. V. Kuzmin. Auto-Frequency Trim Algorithm for the Shipborne Spread-Spectrum Radio Navigation System Receiver	44
--	----

K. P. L'vov Precision of Estimates of Spectral Moments of Echo-Signal of Doppler Log.....	53
--	----

P. I. Maleyev. The Main Development Trends for Foreign Navigational Aids of Nuclear Ballistic Missile Submarines	60
---	----

Y. A. Glukhov, L. A. Zayats. Determination of Wind Drift Coefficients of a Ship by Observed Co-ordinates	73
---	----

B. E. Ivanov. On the Validity of Evaluation of Navigation Safety Probability Taking into Account the Position Error for the Fairway Border.....	83
--	----

V. A. Mikhalsky. On Combination of Errors Distribution Laws in Navigation Parameters Measurement	94
---	----

G. G. Lukyanov, D. V. Kozlov, A. Y. Obukhov. High-Power Led Visual Aids to Navigation.....	103
---	-----

HYDROGRAPHY AND MARINE CARTOGRAPHY

A. V. Kavraisky. Versatile Algorithm for Equal-Angle Representation of Ellipsoid on a Sphere According to Gauss	115
--	-----

Y. G. Firsov. Geodetic Aspects for Hydrographic Employment of Satellite Equipment of C-Nav High-Precision Global Navigation Service	123
--	-----

E. S. Zubchenko, P. I. Maleev. The Method of Increasing the Accuracy of Co-ordinate Reference for the Airborne Terrain Sensing Data	136
--	-----

E. S. Zubchenko. Methods of Radiolocation and Electromagnetic Probing for Charting the Sea Water Areas152

HYDROMETEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY

S. I. Mastryukov. Estimate of Tropical Cyclones Repeatability over the Sea of Ohotsk163

PAGES OF HISTORY

K. Y. Bogomazov, S. Y. Khlypalo. The Navigator of the First Soviet Submarine in the Pacific.....167

A. I. Sorokin Participation of Hydrographers of GNINGI, RF MOD, in Theoretical and Experimental Research Intended to Create the Methods of Charting the Arctic Basin172

INFORMATION ABOUT AUTHORS177

ГРНТИ 78.25.31

**НАВИГАЦИОННО-ГИДРОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОРСКОЙ
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ ЕЕ РАЗВИТИЯ**

С. П. АЛЕКСЕЕВ
(ГНИНГИ МО РФ)

На основе анализа проблем, связанных с НГО морской деятельности в России доказывается необходимость применения для их решения комплексного подхода. Дается оценка современного состояния развития НГО. Обосновывается необходимость создания единой государственной гидрографической службы России.

С принятием документов, определяющих национальную морскую политику РФ и механизм ее реализации [1–3], в России заложены основы для возрождения ее морского могущества, обеспечения устойчивого развития государства, защиты и обеспечения его национальных интересов и безопасности в Мировом океане.

Ход реализации основных направлений национальной морской политики, изложенных в Морской доктрине Российской Федерации на период до 2020 года, рассмотрен на заседании Научно-экспертного совета (НЭС) Морской коллегии при Правительстве РФ 27.11.2006 г., где дана оценка работы по выполнению конкретных задач в сфере морской деятельности за истекший период и выработаны соответствующие рекомендации.

Как следует из материалов указанного заседания, одним из проблемных вопросов является реализация одной из важных составляющих морской деятельности – навигационно-гидрографического обеспечения (НГО).

По своему содержанию НГО морской деятельности – деятельность по обеспечению процесса изучения, освоения и использования Мирового океана на основе согласованных и взаимосвязанных по целям, задачам, месту и времени мероприятий и работ, проводимых в океанских районах и морских зонах в интересах создания благоприятной навигационно-гидрографической обстановки для действий субъектов национальной морской политики, доведения навигационно-гидрографической информации для ее учета при принятии решений, планирования и ведения морской деятельности.

Роль и значение НГО морской деятельности велико, поскольку оно определяет [4]:

- возможность регионального сдерживания и защиты национальных интересов России в Мировом океане силами флота, а также глобального сдерживания в единой системе планирования, подготовки и применения ВС РФ;
- безопасность плавания судов на подходах и акваториях российских морских портов в условиях возрастающих потребностей отечественной

экономики и внешней торговли в перевалке экспортно-импортных транзитных и каботажных грузов;

– возможность соблюдения интересов РФ при разграничении морских пространств и дна морей Северного Ледовитого океана с приарктическими государствами на основе выполнения работ по подготовке пакетов геолого-геофизических и океанографических материалов, обосновывающих континентальную природу земной коры поднятия Менделеева в Северном Ледовитом океане и установление внешней границы континентального шельфа в Охотском море;

– решение проблем системного характера при реализации проектов в области изучения и освоения минеральных и энергетических ресурсов Мирового океана.

Исходя из изложенного можно утверждать, что настало время определения системы основополагающих взглядов на НГО морской деятельности РФ, практических путей ее совершенствования в ближайшей, среднесрочной и долгосрочной перспективе с учетом оптимального распределения соответствующих функций национальных субъектов НГО.

В связи с этим представляется необходимым оценить состояние НГО морской деятельности, определить стоящие проблемы и противоречия.

Состояние НГО морской деятельности РФ в основном определяется:

– качественными характеристиками функционирования национальных субъектов НГО и эффективностью их взаимодействия;

– количественными и качественными характеристиками функциональных объектов НГО;

– развитостью и степенью совершенства нормативной правовой базы НГО морской деятельности РФ;

– уровнем развития научно-методической базы, методов, средств и технологий НГО морской деятельности;

– уровнем подготовки кадров, осуществляющих деятельность по НГО мореплавания и национальной безопасности РФ;

– уровнем взаимодействия национальных и международных субъектов НГО.

Обобщение оценок по каждой составляющей показывает, что современное состояние НГО морской деятельности РФ в целом не отвечает положениям морской доктрины.

В частности, существующие качественные характеристики функционирования субъектов НГО и их взаимодействие характеризуются недостаточным качеством оказываемых государственных навигационно-гидрографических услуг, а также в целом неудовлетворительным современным состоянием НГО морской деятельности РФ.

При этом

– оборудование в навигационно-гидрографическом отношении морских портов РФ, морских путей, океанских стратегических районов и морских зон,

создание и поддержание надлежащего функционирования объектов НГО характеризуется как в целом недостаточное, несогласованное по целевым направлениям НГО мореплавания и национальной безопасности РФ, определяемое не приоритетами задач НГО, а источниками и возможностями ресурсного обеспечения субъектов НГО различной ведомственной принадлежности и форм собственности;

- критически сокращены объемы гидрографических и геофизических исследований морских и океанских зон, прекращены работы по изучению рельефа дна Мирового океана, что ставит под угрозу возможность создания, ведения и поддержания в конкурентоспособном состоянии национальной коллекции карт Мирового океана, снабжения национальных субъектов НГО информацией, морскими картами, руководствами и пособиями, в том числе для выполнения задач по обеспечению национальной безопасности РФ;

- затруднено полноценное обновление национальной коллекции морских навигационных карт на прибрежные воды РФ в соответствии с новыми требованиями Международной гидрографической организации;

- развитие и ведение государственных картографо-геодезических информационных фондов ограничено ненадлежащим исполнением Министерствами и ведомствами российскими и иностранными исполнителями гидрографических работ требований об обязательной передаче в них результатов гидрографических, геофизических и океанографических работ;

- функционирование системы сбора, обработки и доведения до мореплавателей информации об изменениях навигационной обстановки отстает в развитии от мирового уровня;

- национальные субъекты НГО практически не координируют свою деятельность в плане изучения океанов и морей в целях создания морских карт, пособий и руководств для плавания, поддержания их на уровне современности, оборудования побережья средствами СНО, развития судового состава, а также техническую политику и выполнение других необходимых мероприятий;

- снижено качество выполнения международных обязательств РФ и требований национальных нормативных правовых актов в области НГО морской деятельности РФ;

- несогласованное выполнение субъектами НГО функций по принятию нормативных правовых актов приводит к накоплению противоречий и пробелов в нормативно-правовом регулировании НГО морской деятельности РФ.

Существующие количественные и качественные характеристики функциональных объектов НГО в целом являются недостаточными и не позволяют национальным субъектам НГО качественно осуществлять свойственные им функции по выполнению задач НГО мореплавания РФ и НГО национальной безопасности РФ.

Так:

- общее количество функциональных объектов НГО сокращается и не соответствует росту интенсивности мореплавания в территориальном море, экономической зоне и на континентальном шельфе РФ;
- значительное количество функциональных объектов НГО требует ремонта, модернизации и реконструкции, а часть из них находится в аварийном состоянии;
- большинство функциональных объектов НГО РФ по своим качественным характеристикам уступают зарубежным аналогам, а, - в отдельных случаях, - не позволяют в полной мере выполнять международные обязательства РФ в области обеспечения мореплавания;
- ряд функциональных объектов НГО, используемых для решения задач национальной безопасности РФ, по качественным характеристикам и количественному составу не соответствуют предъявляемым требованиям и ограничивают эффективность применения сил, оружия и технических средств ВМФ;
- естественные объекты НГО в целом не достаточно оборудованы необходимыми функциональными объектами НГО, а в отдельных районах, в частности на Северном морском пути, количество работоспособных функциональных объектов НГО сократилось до критического минимума, обеспечивающего возможность безопасного мореплавания.

Существующее состояние нормативной правовой базы НГО морской деятельности РФ в целом отражает низкий уровень развития морского законодательства в Российской Федерации и характеризуется недостаточной развитостью и совершенством, выражающихся в наличии существенных пробелов и противоречивости отдельных правовых норм, а также дублировании ряда функций федеральных органов исполнительной власти в области НГО морской деятельности РФ.

В целом основной проблемой является то, что состав и распределение функций федеральных органов исполнительной власти в сфере навигационно-гидрографического обеспечения морской деятельности не позволяют осуществлять эффективное совершенствование системы НГО вследствие того, что:

- федеральное министерство, осуществляющее функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в сфере навигационно-гидрографического обеспечения мореплавания и национальной безопасности РФ, не определено;
- Федеральная служба по надзору в сфере транспорта, подведомственная Министерству транспорта РФ, не осуществляет контрольно-надзорные функции в области НГО морских путей, так как в ее структуре не созданы соответствующие территориальные органы. Функции по обеспечению безопасности мореплавания и порядка в морских портах, в том числе

контроль за деятельностью лоцманской службы и системой управления движением судов, осуществляют капитаны портов, находящиеся в подчинении Федерального агентства морского и речного флота Министерства транспорта РФ;

– функции по оказанию государственных услуг, управлению государственным имуществом и правоприменительные функции в сфере навигационно-гидрографического обеспечения выполняют Министерство обороны (Управление навигации и океанографии) и Федеральное агентство морского и речного флота Министерства транспорта (ФГУП «Росморпорт» и ФГУП «Гидрографическое предприятие») в зонах своей ответственности. При этом Управление навигации и океанографии Минобороны РФ (Гидрографическая служба ВМФ) не имеет необходимого юридического статуса для осуществления функций контроля и надзора, а также оказания государственных навигационно-гидрографических услуг, а ФГУП «Росморпорт» – законодательной основы для осуществляемой им деятельности в сфере НГО морских портов;

– Федеральное агентство геодезии и картографии Министерства транспорта РФ не проводит геодезические и картографические работы в океанах и морях в целях обеспечения мореплавания и не осуществляет НГО проверки прохождения линии государственной границы, а также делимитации морских пространств.

Кроме того, в действующей нормативной правовой базе РФ имеются противоречивые положения. Так, Федеральным законом «Кодекс торгового мореплавания» ответственность за НГО мореплавания разделена между федеральными органами исполнительной власти следующим образом:

– НГО морских путей, за исключением трасс Северного морского пути, осуществляется Министерством обороны России;

– на трассах Северного морского пути НГО осуществляется Министерством транспорта России.

Закон «О геодезии и картографии» ответственность и функции ведомств в решении задач из области НГО трактует противоположным образом, хотя формально этот закон не регулирует отношения в области НГО.

Следствием несовершенства нормативной правовой базы НГО морской деятельности РФ является:

– дублирование функций министерств, что влечет за собой накопление противоречий в ведомственных нормативных документах;

– недопустимое затягивание практической реализации важного положения Морской доктрины РФ на период до 2020 г. о создании единой государственной гидрографической службы;

– неэффективное использование ресурсов, привлекаемых по ведомственным планам и программам к решению задач НГО морской деятельности в Российской Федерации (Приложение 4);

– отсутствие единого порядка финансового обеспечения работ по развитию системы НГО как за счет федерального бюджета (отсутствие отдельной строки финансирования), так и за счет внебюджетных средств. Например, нормативно не определена правовая природа портовых сборов.

В условиях современной геополитической ситуации, появления новых морских границ и обострения конкуренции между странами за право использования океанических ресурсов и пространств, а также масштабность, сложность и важность для России проблем, связанных с НГО морской деятельности, требуют комплексного подхода для их решения.

На современном этапе развития НГО морской деятельности в соответствии с Морской доктриной должен быть реализован один из принципов национальной морской политики – «концентрация усилий по строительству и развитию инфраструктуры Российского флота на территориях субъектов РФ, традиционно связанных с мореплаванием, унификация этой инфраструктуры для военных и хозяйственных нужд». Это предполагает разработку соответствующей по своим масштабам технической политики в области НГО морской деятельности государства и может быть реализовано только в рамках создания единой государственной гидрографической службы России.

К сожалению, указанные положения Морской доктрины пока еще не реализованы на практике, что и отмечено Научно-экспертным советом Морской коллегии от 27.11.2006 г.

Как следует из указанных материалов, в современных условиях совершенствования высокоточного оружия, увеличения тоннажа и объема морских перевозок, строительства морских портов и освоения нефтегазовых ресурсов континентального шельфа отмечается как рост числа потребителей навигационной и гидрографической информации, так и возрастание требований к ней. Это вызывает необходимость развития новых и совершенствование существующих технологий и средств навигации, гидрографии, морской картографии и океанографического обеспечения, а также проведения ряда организационных мероприятий. Однако решение указанных вопросов в значительной мере сдерживается из-за отсутствия должного уровня интеграции и рационального использования систем, комплексов и средств различного ведомственного подчинения ввиду неурегулированности создания в Российской Федерации единой государственной гидрографической службы (ЕГГС) на основе объединения гидрографических служб Минтранса России и ВМФ Минобороны России.

Представляется, что решение указанных проблемных вопросов позволит осуществить обоснованный выбор эффективных направлений развития системы НГО морской деятельности в Российской Федерации и тем самым способствовать укреплению национальной безопасности и обеспечению устойчивого экономического развития страны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы политики Российской Федерации в области военно-морской деятельности на период до 2010 г. Утверждены указом Президента Российской Федерации 4 марта 2004 г.
2. Морская доктрина Российской Федерации на период до 2020 г. // Красная звезда. – 23.08.2001.
3. Положение о Морской коллегии при Правительстве Российской Федерации. Утверждено Постановлением Правительства Российской Федерации от 1 сентября 2001 г, №662.
4. Алексеев С. П., Добротворский А. Н., Бродский П. Г. Военно-морской флот и освоение энергетических ресурсов Мирового океана: на пути реализации положений Морской доктрины России// Навигация и гидрография. – 2003. – № 17. – С. 9–14.

NAVIGATION-HYDROGRAPHIC SUPPORT FOR MARITIME ACTIVITIES AT THE PRESENT-DAY STAGE

S. P. Alekseyev
(GNINGI, RF MoD)

Based on analysis of the problems connected with navigation-hydrographic support for maritime activities in Russia, the necessity to use the complex approach for their solution is proved. The present-day state of navigation-hydrographic support development is estimated. The necessity to create the unified state hydrographic service of Russia is substantiated.

НАВИГАЦИЯ

ГРНТИ 78.25.31

МЕТОД ОБОСНОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ НАВИГАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ

В. С. МАКОДА
(ЦНИИ «Электроприбор»),
П. Г. БРОДСКИЙ
(ГНИНГИ МО РФ)

В статье рассмотрен подход к обоснованию требований к тактико-техническим характеристикам навигационных комплексов, основанный на применении метода композиции соответствий теории множеств.

Обоснование требований к тактико-техническим характеристикам навигационных комплексов (НК) кораблей может быть осуществлено рядом научных методов – аналитическим, статистическим и методами качественного анализа.

Указанные методы, однако, не обладают универсальностью, а в конкретном случае не дают возможности определения требований к составу навигационных параметров (НП) для множества комбинаций типа «тактическая задача» – «навигационная задача». Они не решают задачу выбора, которую с математической точки зрения можно интерпретировать как построение для каждого множества тактических задач определенного вектора навигационных параметров, характеризующих оценку эффективности решения навигационных задач и, собственно, требований к навигационным параметрам и структуре навигационного комплекса.

В соответствии с практикой проектирования НК на этапе формирования технического задания производится синтез задач навигации, решаемых НК. После определения круга задач выделяется множество навигационных параметров, необходимых для их решения. По множеству навигационных параметров и задач функционирования НК устанавливается обобщенная информационная структура комплекса.

В настоящее время в основе синтеза задач навигации лежит подход, заключающийся в анализе соответствия навигационных задач тактическим. Причем синтез производится на неограниченных по времени множествах, т. е. возникновение новых тактических задач, выполняемых кораблем, влияет на размерность множества навигационных задач. Такой метод не обеспечивает идентификации для каждого элемента множества тактических задач определенного вектора навигационных параметров, а, следовательно, оценки

предварительной структуры НК корабля и объема вырабатываемой им навигационной информации.

Решение данной научной задачи, по нашему мнению, может быть обеспечено применением метода композиции соответствий теории множеств [1–3].

Если принять за X множество тактических задач, решаемых кораблем, за Z – множество функциональных задач навигации, а за Y – множество, обеспечивающее связь X с Z , то композиция соответствий $q(p)$ над множествами X, Y, Z будет иметь вид:

$$\begin{aligned} q &= (X, Y, Q), & Q &\leq X \cdot Y; \\ p &= (Y, Z, P), & P &\leq Y \cdot Z; \\ q(p) &= (X, Z, Q \circ P), & Q \circ P &\leq X \cdot Y. \end{aligned} \quad (1)$$

Для обеспечения возможности практического использования рассматриваемого метода при обосновании требований к НК корабля будем описывать действия корабля с позиций теории управления. Для этого определим тактические задачи, выступающие в роли объектов управления, в виде совокупности алгоритмов действий данного корабля, совершающего перемещение в пространстве фазовых координат.

Тогда тактическая модель использования корабля будет включать такие параметры, как фазовые координаты и множество перемещений корабля в пространстве фазовых координат. Учитывая, что измерение фазовых координат является одной из основных задач навигационного обеспечения корабля, можно принять множество перемещений корабля в пространстве фазовых координат за основной элемент, определяющий связь X с Z . Совокупность элементарных перемещений, которые будем называть элементарными траекториями, представляют собой траекторию движения корабля в целом. Поэтому в качестве множества Y можно использовать множество элементарных траекторий движения корабля.

Если за реальный корабль принять подводную лодку (пл), то с учетом особенностей ее плавания при решении боевых задач траекторию движения следует раскладывать на составляющие в вертикальной и горизонтальной плоскостях, разбив множество Y на два подмножества Y^B и Y^T , т. е.:

$$\{ Y_i \}' = \{ Y^B \} \cup \{ Y^T \}, \quad (2)$$

где Y^B – множество элементарных траекторий пл в вертикальной плоскости движения;

Y^T – множество элементарных траекторий пл в горизонтальной плоскости движения.

С помощью элементарных траекторных элементов можно описать любую траекторию перемещения в реальном масштабе времени при решении пл тактических задач. В свою очередь, построение векторов траекторных перемещений для множества тактических задач будет представлять собой идентификацию соответствия (1).

За множество функциональных задач навигации примем совокупность навигационной информации, вырабатываемой НК. При этом будем учитывать навигационные элементы, составляющие навигационную информацию, которые необходимы для обеспечения тактических задач и управления перемещением и ориентацией пл в пространстве фазовых координат, представленных в табл. 1.

Таблица 1

Перечень навигационных элементов

Элемент	Вид навигационной информации	Обозначение
Z_1	Глубина погружения	h
Z_2	Глубина под килем	H
$Z_3 \div Z_5$	Составляющие относительной скорости по осям координат	$V_{Ox, Oy, Oz}$
$Z_6 \div Z_8$	Составляющие абсолютной скорости по осям координат	$V'_{Ox, Oy, Oz}$
Z_9, Z_{10}	Составляющие угловой скорости на циркуляции в вертикальной и горизонтальной плоскостях	ω_B, ω_T
$Z_{11} \div Z_{13}$	Линейные перемещения в трех плоскостях	g_N, g_E, g_H
$Z_{14} \div Z_{16}$	Составляющие относительных координат	X, Y, Z
Z_{17}	Широта места	φ
Z_{18}	Долгота места	λ
Z_{19}	Курс	K
Z_{20}	Время	t
Z_{21}	Угол дифферента	θ
Z_{22}	Угол крена	ψ

С помощью указанных навигационных элементов можно определить соответствие $P(Y,Z,P)$, т. е. сформулировать векторы навигационных параметров, необходимые для перемещения пл в пространстве.

Оценка состава НП, а, следовательно, и информационной структуры НК, решающего конкретные тактические задачи, достигается построением матрицы $A[q(p)]$ композиции соответствия трех множеств X, Y, Z , которая будет иметь вид:

$$A[q(p)] = \begin{vmatrix} q(p)_{11}, q(p)_{12}, \dots, q(p)_{1m} \\ q(p)_{21}, q(p)_{22}, \dots, q(p)_{2m} \\ \dots \\ q(p)_{n1}, q(p)_{n2}, \dots, q(p)_{nm} \end{vmatrix}, \quad (3)$$

$$\text{где } q(p)_{ij} = \begin{cases} 1, X_i \in Z_j \\ 0, X_i \cap Z_j \end{cases}.$$

Совокупность единичных элементов матрицы A и определяет состав НП, необходимых для решения конкретной тактической задачи.

Таким образом, применение метода композиции соответствий теории множеств обеспечивает идентификацию для каждого элемента множества тактических задач определенный вектор навигационных параметров (тем самым обеспечивается оценка предварительного объема навигационной информации и структура НК). Идентификация множества тактических задач определенному вектору навигационных параметров обеспечивается также применением метода композиции соответствий теории множеств путем интерпретации процесса навигационно-гидрографического обеспечения, решаемого ПЛ задач, композицией соответствий над множествами X, Y, Z на которых определены соответствия q и p :

$$\begin{aligned} q &= (X, Y, Q), \\ p &= (Y, Z, P), \\ q(p) &= (X, Z, Q \circ P). \end{aligned} \quad (4)$$

Закон соответствия $p=(Y, Z, P)$ задается в форме таблицы, определяемой с помощью элементарных траекторий. Наличие 0 или 1 определяется по правилу (принадлежности НП траектории):

$$A(P_{ij}) = \begin{cases} 1, \forall Y_i \in Z_j \in P \\ 0, \forall Y_i \cap Z_j \cap P \neq 0 \end{cases}. \quad (5)$$

Алгоритм установления соответствия выглядит следующим образом:

1. Для каждой тактической задачи X_i определяется множество элементарных траекторий Y_i . Результат представляется табл. 2.

$$X_i \rightarrow Y_i.$$

Таблица 2

Перечень элементарных траекторий (для тактической задачи X_i)

Обозначение Y_i	Описание элементарной траектории
Y_1	Горизонтальное движение с постоянной скоростью на заданной глубине погружения.
Y_2	Движение с постоянной скоростью на заданном отстоянии от грунта.
Y_3	Наклонное прямолинейное движение с постоянным дифферентом и скоростью погружения (всплытия).
Y_4	Движение с заданной точностью выработки координат места и курса
.....
Y_9	Зависание с ориентацией диаметральной плоскости по заданному направлению

2. Для каждой элементарной траектории Y_i определяется подмножество навигационных параметров Z .

3. Для каждой тактической задачи X_i ставится соответствующий ряд НП из Z (путем образования Z_m по всем Y_i , соответствующим задаче X_i).

Результат представлен в табл. 3. На пересечении столбца Z_j со строкой Y_i при наличии необходимых данных ставится 1, при отсутствии – 0, получается фактически матрица A , совокупность единичных элементов которой определяет объем навигационной информации.

Таблица 3

Таблица соответствия

	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	.....	Z_{20}
	h	H	V_{NO}	V_{EO}	V_{NI}	.....	ψ
Y_1	1	0	1	1	1	.....	0
Y_2	0	1	1	0	1	.....	0
Y_3	1	1	1	1	1		1
.....
Y_9	0	0	1	1	0	.....	1

Применение предложенного математического аппарата позволяет определить перечень основных характеристик НК. При этом следует отметить, что набор навигационных параметров, необходимых для решения специальных задач, перекрывает необходимый перечень параметров для решения вопросов управления движением корабля. После чего необходимо

оценить качество НК. Для оценки качества НК необходим соответствующий критерий эффективности, т. е. характеристика, которая показывает качественно или количественно степень способности НК решить поставленную задачу. Наиболее возможным из рассматриваемых вопросов является вероятность решения задачи навигационного обеспечения с заданной точностью. Наряду с этой характеристикой, на качество НК значительное влияние оказывают также надежность и скрытность выработки навигационных параметров. Задача оценки скрытности решения кораблем поставленных задач при использовании навигационных средств решена в ЦНИИ «Электроприбор» и внедрена в состав задач, решаемых навигационно-тактическим фильтром. Тогда основную целевую функцию оптимизации структурного построения (облика) НК можно представить как произведение трех критериев:

$$P_{\text{РНЗ}} = P_{\text{T}} \cdot P_{\text{H}} \cdot P_{\text{СК}} , \quad (6)$$

где P_{T} – вероятность функционирования с заданными характеристиками по точности боевой готовности и боевой устойчивости;

P_{H} – вероятность непрерывной безотказной работы;

$P_{\text{СК}}$ – вероятность скрытной выработки навигационной информации.

Однако $P_{\text{РНЗ}}$ не может быть принят за обобщенный критерий эффективности НК, так как он не учитывает таких элементов как масса, габариты, степень автоматизации, мощность потребляемой энергии и другие, часть из которых, а именно массогабаритные характеристики, уровень автоматизации и потребляемая мощность являются определяющими наравне с точностью и надежностью работы.

Ввиду того, что можно предложить много показателей, которые характеризуют качество НК в целом, и которые необходимо учитывать при проектировании, целесообразно ограничиться основными, определяющими: точностью, надежностью, массой, уровнем автоматизации, скрытностью.

Целесообразность этого подтверждается и тем, что различные по характеру показатели невозможно связать между собой аналитическими зависимостями, поэтому необходимо решить вопрос о возможности математической оценки НК каким-либо одним показателем качества, который учитывал бы все критерии.

Исходя из изложенного в общем виде математическая модель обоснования требований к НК может быть представлена в следующем виде:

$$G = (M, W, f, X, P), \quad (7)$$

где M – множество вариантов состава НК, включающие подмножества информационной и технической структуры НК;

W – множество показателей качества НК с учетом военно-экономических факторов;

f – отображение множества вариантов в множестве векторных оценок с учетом военно-экономических факторов и уровня противодействия;

X – множество тактических задач;

P – множество возможных правил выбора решения.

Использование данной модели в качестве математической основы метода обоснования требований позволяют определить векторную оценку эффективности состава НК, учитывающую всю совокупность рассмотренных выше факторов (военно-технические факторы, влияющие на тактико-технические характеристики НК – боеспособность, боевая готовность, скрытность и боевая устойчивость, выраженные через точность, время подготовки к использованию, время автономной работы, надежность с учетом условий использования, воздействия внешней среды и противодействия противника) в виде выражения:

$$W = \{ W_1, W_2, W_3, W_4, W_5, W_6, \}, \quad (8)$$

где W_1 – элемент вектора, представляющий показатель, оценивающий степень влияния навигационно-гидрографического обеспечения на уровень решения тактической задачи;

W_2 – элемент вектора, характеризующий надежность выработки комплексом навигационных параметров;

W_3 – элемент вектора, обусловленный содержанием метода композиции соответствий, определяющий информационную структуру НК в виде множества НП;

W_4 – элемент вектора, отражающий соответствие условий применения корабля заданным в оперативно-тактической модели, условиям нормального функционирования комплекса;

W_5 – элемент вектора, определяющий применимость комплекса по конструктивным характеристикам;

W_6 – элемент вектора, характеризующий соответствие времени выполнения тактической задач времени непрерывной работы.

Вычисление показателей W_1, \dots, W_6 осуществляется по формулам:

$$W_1 = \frac{t_u}{t_p}, \quad (9)$$

где t_p – время, необходимое кораблю для выполнения тактической задачи с учетом навигационных погрешностей;

t_u – оптимальное заданное время выполнения тактической задачи.

$$W_2 = \prod_{i=1}^n P_i \quad (10)$$

где P_i – вероятность безотказной работы средства, вырабатывающего i -й НП;

$$W_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i, \quad Q_i = \begin{cases} 1, m_i \in Q \\ 0, m_i \cap Q = \emptyset \end{cases} \quad (11)$$

где Q_i – признак соответствия по i -ому НП;
 m_i – погрешность выработки i -го НП;
 Q – множество признаков соответствий;
 n – количество НП, участвующих в оценке.

$$W_4 = \frac{1}{S} \sum_{k=1}^S Q_k, \quad Q_k = \begin{cases} 1, \eta_k \in Q \\ 0, \eta_k \cap Q = \emptyset \end{cases} \quad (12)$$

где Q_k – признак соответствия по k -му условию применения;
 η_k – катовое условие применения;
 Q – множество признаков соответствий;
 S – количество анализируемых условий применения.

Показатели W_5 и W_6 по структуре аналогичны W_3 и W_4 .

При многокритериальности данной задачи (векторной оценки эффективности состава НК) возможным путем ее решения тем или иным способом может быть сведение ее к одному критерию. Один из способов подобного сведения заключается во взвешивании показателей. Если $W_1 \div W_6$ – показатели, выражающие значения используемых критериев, то для каждого из них, в зависимости от важности, выбирается положительный весовой коэффициент λ_i . Операция «взвешивания» показателей W_i состоит в замене их единственным в соответствии с формулой:

$$W = \lambda_1 W_1 + \lambda_2 W_2 + \dots + \lambda_6 W_6. \quad (13)$$

При анализе показателей выявлена важность каждого из них и в общем случае – равнозначность (практическая) влияния на решение задачи в целом. Поэтому операция «взвешивания» с весовыми коэффициентами, равными единице, в данном случае допустима. Поскольку структура показателей устанавливает диапазон их изменения от 0 до 1, то целесообразно использовать обобщенный показатель в виде их произведения:

$$W = W_1 \cdot W_2 \cdot W_3 \cdot W_4 \cdot W_5 \cdot W_6. \quad (14)$$

Выбор весовых коэффициентов при кажущейся сложности используемого аппарата на самом деле по подавляющему большинству рассматриваемых характеристик обладает лишь альтернативными вариантами: 0 или 1.

Таким образом, производится векторная оценка эффективности состава НК и выбор наилучшего варианта из них путем сравнения по обобщенному показателю.

В последующем данный подход используется в методике оценки эффективности состава НК путем составления таблиц соответствий вариантов навигационно-гидрографического обеспечения действия корабля, получения (расчета) векторных оценок эффективности и на этой основе выбор наилучшего варианта.

Итак, метод обоснования требований тактико-технического задания к основным тактико-техническим характеристикам НК корабля, состоит в следующем:

1. На основе обобщения требований к системе навигационно-гидрографического обеспечения с учетом боевых критериев и показателей производится:

- определение объема навигационной информации путем установления соответствия навигационных задач тактическим;
- определение точности выработки основных навигационных параметров путем расчета допустимых значений координат места и курса, в заданных условиях не снижающих эффективности решаемых кораблем задач.

2. Осуществляется выбор информационной и технической структур НК (на основе объема НП) и составление на их основе перечня основных НП.

3. Проводится проверка степени соответствия основных характеристик НК уровню и тенденции развития науки и техники на основе анализа закономерностей развития характеристик морских средств навигации, принятых на временном интервале соответствующих поколений кораблей, а также оценки уровня финансирования.

4. Оценивается соответствие отдельных тактико-технических характеристик НК друг другу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Венцель Е. С. Теория вероятности. – М.: Наука, 1969. – 572 с.
2. Волгин Н. С., Махров Н. В., Юровский В. Л. Исследование операций. – Л.: ВМА, 1981. – 605 с.
3. Дегтярев В. Г., Лапин И. А., Симун И. И. Математические методы оптимизации. – Л.: ВМА, 1977. – 502 с.

**METHOD OF SUBSTANTIATION OF REQUIREMENTS TO SPECIFICATIONS
FOR NAVIGATION COMPLEXES**

V. S. Makoda
(CRI «Electropribor»),
P. G. Brodsky
(GNINGI, RF MoD)

The approach to substantiation of requirements to specifications for navigation complexes, based on the employment of correspondence composition method of set theory is considered.

ГРНТИ 47.49.31

**ТРЕБОВАНИЯ МОРСКИХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ К РАДИОНАВИГАЦИОННОМУ
ОБЕСПЕЧЕНИЮ**

Б. И. ЛОБОЙКО,
В. С. ТРЕГУБОВ
(ГНИНГИ МО РФ)

Рассмотрены требования морских потребителей к радионавигационному обеспечению в различных районах плавания кораблей (судов).

Появление в конце XX века принципиально новых технических средств в области радионавигации, связи и телекоммуникаций, развитие информационных технологий, а также создание глобальных навигационных спутниковых систем ознаменовали появление новых технических средств навигации. Существенный рост требований к точности и оперативности получения навигационной информации привел к необходимости создания качественно новой единой системы координатно-временного и навигационного (КВ и НО) обеспечения Российской Федерации.

Доступность и простота определения координат и времени практически в любой точке Земли и околоземного пространства обусловили не только существенное увеличение числа потребителей КВ и НО, но и открыли новые возможности для решения задач экономики, обороны и безопасности, создания глобальных систем мониторинга, диспетчеризации и управления практически неограниченным количеством объектов, получения высоких точностей определения координат, геодезического обеспечения, контроля подвижек искусственных сооружений и природных объектов, а также повышения эффективности и недоступной ранее реализации решений многих других научных и прикладных задач.

Современные методы КВ и НО являются важными факторами, определяющими эффективность и независимость экономики Российской Федерации и других прибрежных государств.

К началу эры освоения космоса человечество подошло с глобальным размахом производственной, военной и научной деятельности. Весь земной шар покрылся сетью морских и воздушных путей сообщения, по которым шли интенсивные перевозки грузов и пассажиров. Промысел морепродуктов развернулся по всему Мировому океану. В поисках угля, нефти, газа и других полезных ископаемых морские экспедиции вели широким фронтом исследования на материковом шельфе, в мелководных морях и островных районах океанов. Произошел переход к глобальной стратегии использования военно-морских флотов.

Все эти виды деятельности человеческого общества оказали непосредственное влияние на характер требований, предъявляемых к ее навигационному обеспечению. Всеобщими стали требования глобальности и универсальности навигационных систем – возникла необходимость в создании благоприятных условий для решения навигационных задач на любом управляемом подвижном объекте в пределах нашей планеты и околоземного космического пространства [1].

Ниже на рисунке приведены в обобщенном виде основные задачи, требующие высокоточного навигационного обеспечения.

Сравнительный анализ показывает, что преимущество спутниковых методов КВ и НО по точности, глобальности, оперативности столь велико по сравнению с традиционными методами, что в настоящее время для решения многих военных и прикладных задач им нет альтернативы.

В настоящее время (1.09. 2006 г.) в орбитальной группировке системы ГЛОНАСС находится 16 аппаратов, 13 из них используются по целевому назначению.

Вместе с тем работа по воссозданию навигационного обеспечения Российской Федерации находится на начальном этапе и сопряжена с определенными трудностями:

- отсутствует правовая база применения навигационной аппаратуры глобальных спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/ GPS;
- нет единой системы обеспечения навигационной информацией потребителей Российской Федерации, в том числе, не полностью решены вопросы по ответственному органу, осуществляющему на ведомственном и федеральном уровнях координацию этих работ.

Правовая неопределенность в вопросах легитимности использования высокоточной навигационной аппаратуры в РФ сдерживает потенциальных инвесторов от вложения финансовых средств в производство этих изделий в нашей стране. Наблюдается хроническое отставание нормативно-технической и правовой базы, регламентирующей создание и использование радионавигационной техники от процесса ее проектирования, производства и внедрения, то есть в части КВ и НО Федеральный закон «О техническом регулировании» не выполняется. Все это негативно сказывается на социально-

экономических, юридических и правовых аспектах деятельности производственных организаций [2].



Основные задачи, требующие высокоточного навигационного обеспечения

Качество и своевременность получения информации о пространственно-временных параметрах и их влияние на экономические и другие аспекты наглядно просматриваются в транспортной системе, особенно в Морском флоте.

За последние десятилетия водоизмещение мирового транспортного флота возросло более чем в два раза. Появились новые типы судов, специализированные наливные и сухогрузные, а также комбинированные: газовозы для перевозки сжиженных газов, контейнеровозы, суда для транспортировки укрупненных грузов – лихтеровозы. Значительно возросли размеры и вместимость судов, особенно танкеров.

Изменилось также распределение судов по районам плавания. Если раньше наиболее интенсивное судоходство отмечалось в Атлантике и Тихом океане, то в настоящее время возросла роль Индийского океана.

Особое внимание уделяется развитию морского транспорта в Арктике, где в целях повышения экономической эффективности перевозок нефти, газа, железной руды, леса и т. п. сроки навигации увеличились до 8–10 месяцев, а в некоторых районах навигация осуществляется круглогодично.

Поскольку большинство судов должно следовать оптимальными маршрутами, это вызовет перегрузку трасс движения и потребует значительных усилий по обеспечению навигационной безопасности и урегулированию правовых аспектов судовождения, т. е., управление большими судами при возросших скоростях в сложной обстановке на море невозможно без высокоэффективного КВ и НО и без правовой базы его функционирования.

Отсутствие урегулированности данных вопросов приводит к происшествиям с частичными потерями и даже полной гибелью судов, и к человеческим жертвам. Примерно одна пятая часть потерь связана с посадкой судов на мель, что в большинстве случаев вызвано неточным знанием координат места [3].

Помимо экономических потерь, морские происшествия приносят еще и экологический вред, засоряя океаны обломками, топливом, химикатами, а иногда и отравляющими веществами.

Для уменьшения опасности плавания необходимо повысить требования к точности КВ и НО в различных условиях, что приведет к уменьшению ошибок обслуживающего персонала и сокращению потерь.

Требования к точности, надежности, целостности и доступности НО морских судов в зависимости от районов плавания определяются национальными и международными документами.

При рассмотрении требований морских потребителей следует учитывать, что национальные требования к навигационному обеспечению различных потребителей определяются соответствующими органами государственной власти. В виду многообразия систем НО различных потребителей администрации ряда государств, включая правительства РФ, США, Германии и некоторых других стран утвердили (одобрили) «Радионавигационные планы», в которых отражается государственная политика в области НО.

Международные обязательства государств требуют учета в своих национальных законодательных актах регламентов и норм, вытекающих из правил и рекомендаций международных организаций ИМО (Международная морская организация), МАМС (Международная ассоциация маячных служб), МСЭ (Международный союз электросвязи) и т. п. В частности, ИМО устанавливает международные требования морских потребителей к точности определения места судна, доступности и целостности радионавигационных систем. В настоящее время упразднены Резолюции ИМО А. 815 (19) «Всемирная Спутниковая Радионавигационная Система» и А. 529 (13) «Стандарты точности судовождения». Утверждена Резолюция А. 953 (23) от

5 декабря 2003 г. «Всемирная Радионавигационная Система», в которой указываются современные требования морских потребителей.

С 1 июля 2002 г. вступила в силу новая редакция главы 5 Конвенции СОЛАС-74 (Конвенции по охране человеческой жизни на море), включающая в себя требования об обязательном оснащении всех судов, независимо от их размерений приемниками глобальной спутниковой навигационной системы, или РНС наземного базирования, действующей в районе их плавания.

Причем суда вместимостью до 150 регистровых тонн должны обязательно оснащаться приемной аппаратурой глобальной навигационной спутниковой системы, что позволит автоматически определять текущее местоположение судна. Сопряжении ее с судовыми навигационными комплексами, которые должны применяться на судах в соответствии с положениями Главы 5 Конвенции СОЛАС, позволит существенно повысить точность и надежность судовождения и обеспечить более высокий уровень безопасности мореплавания. В совокупности они должны будут полностью удовлетворять требованиям к НО судоходства, разработанным ИМО.

В ноябре 2001 г. 22 Ассамблея ИМО утвердила изменения к Резолюции А. 860 (20), изменения были сформулированы в Резолюции А. 915 (22) «Пересмотренные положения морской политики и требования к перспективным Всемирным Навигационным Системам («Revised maritime policy and requirements for a future Global Satellite Systems (GBSS)»). Это новое издание заменяет упомянутую Резолюцию А. 860 (20). В Приложениях к ней указываются перспективные на период после 2010 г. требования к точности и показателям надежности получения навигационной информации при обеспечении общего мореплавания, а также других видов деятельности на море (см. табл. 1–3).

Интегральные требования морских потребителей к навигационному обеспечению в зависимости от зоны обслуживания могут характеризоваться следующими значениями:

1. Погрешность определения координат места (2 СКП)
 - до 1 метра на дальности до 50 км;
 - до 10 метров на дальности до 300 км;
 - до 10 метров в пределах Мирового океана.
2. Целостность навигационных определений – 99,9%

Необходимо отметить, что приведенные требования находятся в состоянии перманентных корректировок и уточнений, в основном – в сторону их ужесточения. Это объясняется постоянно возрастающей ценой навигационных ошибок, особенно в условиях роста тоннажа судов, так как столкновений с препятствиями и посадок на мель возникает опасность экологических катастроф, возрастает стоимость устранения их последствий.

Таблица 1

Минимальные требования морских потребителей для общей навигации

Район плавания	Целостность			Уровень параметров обеспечения			Зона действия	Интервал между обсервациями, с
	Прогнозируемая точность по горизонтали, м	Предел подачи сигнала предупреждения, м	Время до подачи сигнала предупреждения ² , с	Риск целостности за час	Доступность за 30 суток, %	Непрерывность за 3 часа, %		
Океан	10	25	10	10 ⁻⁷	99,8	НП ¹	Глобальная	1
Прибрежное плавание	10	25	10	10 ⁻⁷	99,8	НП ¹	Глобальная	1
Подход к порту и узкости	10	25	10	10 ⁻⁷	99,8	99,97	Региональная	1
Порт	1	2,5	10	10 ⁻⁷	99,8	99,97	Локальная	1
Внутренние водные пути	10	25	10	10 ⁻⁷	99,8	99,97	Региональная	1

Примечания.

1) НП не применяется, так как непрерывность обсерваций не относится к этапам океанского и прибрежного плавания.

2) Для судов, движущихся со скоростью более 30 узлов, могут предъявляться более жесткие требования.

Таблица 2

Минимальные требования морских потребителей для координирования

Потребители	Целостность			Уровень параметров обеспечения			Зона действия
	Точность определения места, м	Предел подачи сигнала предупреждения, м	Время до подачи сигнала предупреждения ² , с	Риск целостности за час	Доступность за 30 суток, %	Непрерывность за 3 часа, %	
	Относительная						
Буксиры и толкачи	1	2,5	10	10 ⁻⁷	99,8	99,97	Локальная
Ледоколы	1	2,5	10	10 ⁻⁷	99,8	99,97	Локальная
Автоматическое предупреждение столкновений	10	25	10	10 ⁻⁷	99,8	99,97	Глобальная
	Абсолютная						
Контроль пути	10	25	10	10 ⁻⁷	99,8	99,97	Глобальная
Автоматическая швартовка	0,1	0,25	10	10 ⁻⁷	99,8	99,97	НП
Управление движением							
Координация судно-судно	10	25	10	10 ⁻⁷	99,8	99,97	Глобальная

Таблица 3

Требования морских потребителей при маневрировании и управлении движением

Морская деятельность	Точность		Целостность		Уровень параметров обеспечения		
	Погрешность, м	По горизонтали, м	Предел подачи сигнала предупреждения, м	Время до подачи сигнала предупреждения, с	Риск целостности за час	Доступность за 30 суток, %	Зона действия
Поиск и спасение	10	НП	25	10	10^{-7}	99,8	Локальная
Гидрография	1–2	0,1	2,5–5	10	10^{-7}	99,8	Локальная
Океанография	10	10	25	10	10^{-7}	99,8	Глобальная
Дноуглубительные работы	0,1	0,1	0,25	10	10^{-7}	99,8	
Прокладка кабелей и трубопроводов	1	НП	2,5	10	10^{-7}	99,8	
Строительные работы	10		25	10	10^{-7}	99,8	
Управление СНО	10		25	10	10^{-7}	99,8	

Требования к эксплуатационным характеристикам спутниковых навигационных систем (СНС) при плавании в прибрежных водах разделяются на относительно менее жесткие в акваториях с невысокой интенсивностью движения и умеренной стесненности условий судоходства и более строгие в тех водах, где обе или хотя бы одна из упомянутых характеристик могут быть отнесены к следующей категории сложности.

Требования к характеристикам точности в обоих случаях для прибрежной зоны одинаковы – величина допустимой погрешности места должна быть не более 10 м с вероятностью 0,95.

В «дальней прибрежной зоне» расстояние до ближайшей опасности лежит в пределах 3–50 миль, при невысокой интенсивности движения частота определения места должна быть не менее одного раза в 2 с. Показатель «доступности сигнала» должен быть не менее 99,5% за двухлетний период.

При выполнении условий доступности сигнала, непрерывность функционирования системы должна быть не менее 99,85% в течение 3 часов.

Показатель «целостности системы» (промежуток времени, в течении которого потребителям должно поступить предупреждение о том, что характеристики сигнала искажены, и данные этого сигнала нельзя использовать для обеспечения навигационной безопасности плавания) должен быть не более 10 с.

Плавание в этой зоне обычно осуществляется по системам установленных судовых путей. Как правило, ширина полос движения в этом

случае имеет порядок единиц миль или же сотен метров. Очевидно, что заданная точность определения места вполне достаточна для обеспечения удержания судна в пределах разрешенной полосы движения.

В «ближней прибрежной зоне» требования к показателям «доступности» и «непрерывности» несколько увеличиваются.

В тех случаях, когда результаты определения места используются в системах автоматического опознавания или для автоматического удержания судна на линии заданного пути, темп обновления данных о месте должен быть не реже одного раза каждые 2 секунды.

Показатель «доступности» сигнала должен быть не менее 99,8%, отнесенный к 30-дневному периоду (т. е. в течение 720 часов общая продолжительность перерывов поступления сигналов должна быть не более 1,5 часов).

Очевидно, что столь высокие требования к характеристикам навигационной информации могут быть практически реализованы только в тех случаях, когда на судне установлено автоматическое средство, позволяющее удерживать его на заданной траектории с целью соблюдения заранее выбранного курса по какому-либо критерию оптимального маршрута плавания.

Что же касается темпа обновления данных о координатах, то, чтобы отобразить на карте каждое определение места, необходимо иметь электронную картографическую систему, поскольку «вручную» такую задачу решить практически невозможно. Кроме того, столь частые обсервации не будут иметь смысла, так как не будут наблюдаемы на мелкомасштабных картах.

Таким образом, приведенные выше требования к точности и скорости обновления данных могут иметь практическое значение только при использовании данных автоматической информационной (идентификационной) системой (АИС) для решения задач расхождения со встречными судами, или же при участии в операциях при поиске и спасении при бедствии на море.

Исходя из требований к навигационному обеспечению, представленных в табл. 1–3, и оснащенности района средствами навигационного оборудования можно заключить:

- рассматриваемый район обеспечен или же не обеспечен общедоступными и высокоточными радионавигационными системами наземного базирования, системные характеристики которых могли бы реализовать требования морских потребителей;
- спутниковые навигационные системы удовлетворяют требованиям обеспечения безопасности мореплавания в открытом море, но не удовлетворяют требованиям при подходах к портам, при плавании в узкостях, в районах с ограниченной свободой маневрирования и при выполнении специальных задач.

Совершенствование КВ и НО транспортных коммуникаций, учитывающих современные требования, включено в Федеральную целевую

программу (ФЦП) «Глобальная навигационная система» и «Возрождение торгового флота России» и направлено на:

- создание и использование дифференциальных станций Морской дифференциальной подсистемы СНС ГЛОНАСС/GPS;
- создание и внедрение единой системы контроля и управления судоходством на базе средств автоматической информационной системы.

В основе дифференциального метода использования СНС лежит относительное постоянство значительной части погрешностей СНС во времени и пространстве. Сущность дифференциального метода использования СНС заключается в определении разницы между измеренными (Ru_1, Ru_2, \dots, Ru_j) и рассчитанными (Rp_1, Rp_2, \dots, Rp_j) в эталонной точке на поверхности Земли значениями псевдодальностей до спутников, которые в виде поправок передаются по линиям связи в аппаратуру потребителей. Аппаратура потребителей, автоматически исправляя поправками свои измерения, исключает систематические погрешности и тем самым повышает точность определения места.

Погрешность (с вероятностью 0,95) определения координат потребителем при использовании дифференциального режима СНС не превышает 10 метров в объявленной зоне действия дифференциальной подсистемы. Надежность обслуживания и доступность составляют соответственно 0,999 и 0,998 при времени предупреждения об отказе СНС не более 10 секунд.

Можно заключить, что перспективы развития КВ и НО в целях безопасности мореплавания связываются с совершенствованием тактико-технических характеристик (ТТХ) аппаратуры потребителей, расширением ее функциональных возможностей, специализацией аппаратуры и развитием функциональных дополнений СНС ГЛОНАСС.

Современные подходы к реализации корабельных (судовых) систем управления в перспективе до 2015 г. будут ориентированы на интеграцию все большего количества разнородных систем, обеспечивающих судоводителя необходимой информацией для принятия решения управления кораблем в различных условиях, широкозонных, региональных и локальных областях деятельности. Интеграция морских средств навигации с системами управления движением кораблем, связи и наблюдения именуемая как «интегрированная мостиковая система» или «интегрированный мостик» и т.п. будет широко распространена на кораблях и судах. Она позволит значительно автоматизировать и обезопасить процесс кораблевождения и, в частности, реализовать перспективную концепцию «одного человека на мостике», вопросам стандартизации, которой ИМО в последнее время придает большое значение.

Сознавая важность спутниковой навигации, Европейский Союз принял программу, целью которой является создание европейской СНС-ГАЛИЛЕО. Заявленные высокие тактико-технические характеристики и коммерческая направленность выдвинули ее в число основных поставщиков навигационных

услуг на мировом рынке. В данном случае полная интеграция СНС ГЛОНАСС, GPS, ГАЛИЛЕО и наземных РНС ЧАЙКА, ЛОРАН-С позволит значительно повысить доступность, достоверность и целостность радионавигационной информации в глобальном масштабе и реализацию концепции единого координатно-временного и навигационного обеспечения на основе шкалы единого времени системы и системы координат.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чуров Е. П., Суворов Е. Ф. Космические средства судовождения. – М.: Транспорт, 1978. – 287 с.
2. Комарицын А. А., Алексеев С. П. Некоторые подходы к формированию единой системы навигационно-временного обеспечения Российской Федерации // Материалы Всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное обеспечение» (КВО-2005). – СПб, ИПА РАН, 2005. – 272 с.
3. Волосов П. С., Дубинко Ю. С., Мордвинов Б. Г., Шинков В. Д. Судовые комплексы спутниковой навигации. – Л.: Судостроение, 1976. – 248 с.

REQUIREMENTS OF MARITIME USERS TO RADIONAVIGATION SUPPORT

**V. I. Loboiko,
V. S. Tregubov**
(GNINGI, RF MoD)

Some approaches to implementing the maritime users requirements to radionavigation support in various areas of ship navigation are considered.

ГРНТИ 89.29

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНОГО ЗАТЕНЕНИЯ СПУТНИКОВ

**В. Н. БЫСТРОВ, Г. К. ДАНИЛОВА, В. И. ЛАПШИНА,
В. А. ПЫЛЕНКОВ, Ю. В. ТОКАРЕВ**
(ГНИНГИ МО РФ)

Рассмотрен метод оценки эффективности применения спутниковых навигационных систем, учитывающий возможное затенение спутников и позволяющий представить на топографической карте вероятность навигационных определений в виде зон различного цвета.

Физико-географическая среда оказывает непосредственное влияние на качество навигационных определений по спутниковым навигационным системам (СНС). Можно указать три основных фактора этого влияния:

1. Возмущение орбит спутников за счет неточного представления гравитационного потенциала Земли, что проявляется в погрешностях моделей прогнозирования движения спутников, используемых наземными командно-измерительными комплексами СНС для расчета эфемерид спутников, а также в приемной аппаратуре (ПА) при решении навигационной задачи.

2. Возмущение условий распространения навигационных сигналов спутника, что вызывает погрешности моделей измерений навигационных параметров, используемых в навигационных алгоритмах ПА.

3. Ограничение видимости спутников элементами рельефа местности, а также искусственными сооружениями.

Специфическими являются два последних фактора, так как они непосредственно определяют измерительные свойства сигнала СНС и его доступность.

Влияние второго фактора проявляется прежде всего в многолучевости сигнала за счет отражения его от естественных и искусственных сооружений. Этот эффект достаточно полно исследован, например, в работе [1].

Основными элементами района, которыми определяется качество использования в нем СНС, являются:

- местоположение, протяженность и высота рельефа и искусственных сооружений;
- координаты точек района, в которых проводятся навигационные определения (обсервации) по СНС.

Можно предложить три подхода к получению исходных данных для выполнения оценки радиовидимости спутников и формирования рабочего созвездия:

1) Использование цифровой карты (плана) местности. Эта карта загружается в память ЭВМ и служит основой для выполнения всех вычислений;

2) Построение таблиц секторов затенения для каждой реперной (маршрутной) точки (для расчетов параметров сектора используется обычный план местности). Образец таблицы с параметрами секторов затенения представлен ниже.

Таблица секторов затенения, точки №...(φ , λ , H)

Номер сектора	Параметры сектора затенения		
	A_0 начальный азимут сектора затенения	ΔA раствор затенения по азимуту сектора	h_0 угловая высота сектора затенения
.....
I	A_{0i}	ΔA_i	h_{0i}
.....

Примечание: φ , λ , H – географические координаты точки обсервации;

3) Формирование массивов данных путем считывания с карты сетки высот рельефа местности над уровнем моря и высот искусственных сооружений (зданий, мостов и т. п.), как показано на рис. 1. Подробность заполнения массивов определяется степенью расчлененности рельефа и плотностью застройки соответствующей территории. Вместо долготы

используем отшествоие для согласования линейных масштабов по обеим координатам.

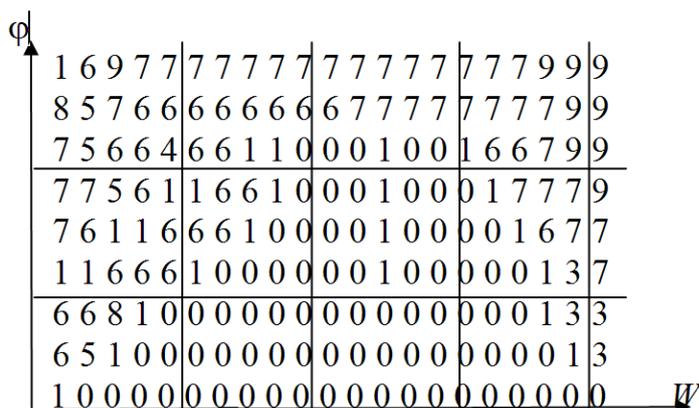


Рис. 1. Массив высот рельефа местности и искусственных сооружений.
 $W = \varphi \cos\lambda$ - отшествоие

Второй подход целесообразно использовать для отдельных точек, например, маршрутных. Третий подход – при отсутствии цифрового плана местности, когда планирование и управление операцией производится с использованием обычных планов (карт) местности. Эти подходы в отличие от первого требуют подготовки и ввода в память ЭВМ большого объема цифровой информации.

Моделирование радиовидимости спутников целесообразно проводить в системе координат, принятой в СНС ГЛОНАСС. В настоящее время используется система ПЗ–90, в которой координаты точки задаются геодезической широтой B , геодезической долготой L и геодезической высотой H относительно поверхности земного эллипсоида. В современной навигации применяются подобные координаты:

- географическая широта $\varphi = B$;
- географическая долгота $\lambda = L$;
- высота H .

Поэтому данные о рельефе представляются для моделирования в указанной системе координат, при этом в высоту включаются поправки за превышение геоида над сфероидом.

Для получения навигационных определений по СНС в любой точке (φ , λ , H) в зоне радиовидимости этой точки должно быть необходимое и достаточное количество спутников. При этом спутник находится в этой зоне, если он наблюдается под некоторым углом места h_0 к местному горизонту. Величина h_0 определяется двумя факторами:

- необходимостью исключения больших возмущений в радиолинии на малых углах наблюдения спутников ($5\text{--}10^\circ$);

– возможностью наблюдения спутников в условиях ограничений, накладываемых рельефом местности и различными сооружениями в окрестности точки. Поэтому условием наблюдаемости спутника для использования его в навигации является неравенство

$$h_0 \leq h \leq \frac{\pi}{2}, \quad (1)$$

где: h – угол места спутника относительно горизонта точки (φ, λ, H).

Необходимым для навигационных определений является наличие в зоне радиовидимости трех-четырех спутников (в зависимости от размерности вектора определяемых географических координат: φ, λ – двухкоординатная задача; φ, λ, H – трехкоординатная задача).

Это условие не является достаточным. Полную радионаблюдаемость показывает уровень геометрического критерия точности

$$G = [Sp(A^T A)^{-1}]^{1/2}, \quad (2)$$

где G – соответствующий критерий точности (для двухкоординатной задачи с учетом временной поправки $G = PDOP$, для трехкоординатной – $G = GDOP$);

Sp – обозначение следа матрицы;

A – матрица направляющих косинусов единичных векторов от точки на спутники созвездия, при этом каждый единичный вектор удовлетворяет условию (1).

При ограниченной наблюдаемости целесообразно включать в рабочее созвездие для навигационных определений все спутники, удовлетворяющие условию (1).

Рассмотрим принципы формирования рабочего созвездия. Начальной операцией формирования рабочего созвездия на определенный момент времени t является поиск на заданный момент времени спутников, которые находятся над радиогоризонтом точки (без учета возможного затенения). Задача решается методом долгосрочного прогнозирования функционирующих спутников системы на момент t с проверкой условия наблюдаемости (1), где h_0 составляет 5–10°, т. е. ограничивает только малые углы видимости. Начальные условия для прогноза выбираются из альманаха системы. Далее для каждого из указанных спутников на момент t определяются угловые координаты относительно точки (φ, λ, H):

- азимут направления на спутник – A ;
- угол места спутника – h .

При использовании таблицы секторов затенения значения угловых координат спутника (A, h) сравниваются с параметрами секторов затенения точки ($A_{0i}, \Delta A_i, h_{0i}$). Если при этом направление на спутник попадает в какой-

либо сектор, то он исключается из общего созвездия. Оставшиеся спутники будут составлять рабочее созвездие для навигационных определений.

В первом и третьем подходах моделирования рельефа для каждого объекта местности, находящегося по направлению азимута спутника, вычисляется вертикальный угол наблюдения этого объекта h_{0i} над горизонтом точки. Из полученного набора выбирается максимальное значение h_0 , т. е.

$$h_0 = \max (h_{0i}; i = 1, 2, \dots, n),$$

где n – общее число объектов по направлению A .

Далее проверяется условие наблюдаемости (1). Если оно выполняется, то спутник включается в состав рабочего созвездия.

Окончательно радионаблюдаемость сформированного рабочего созвездия для навигационных определений находится по формуле (2) с помощью критерия G .

Основными показателями координатно–временного обеспечения СНС являются: точность, доступность и целостность.

Тройственный показатель качества является неудобным в практическом применении. Для потребителя принципиальным является получение надежного навигационного определения с удовлетворительной точностью в любой момент времени. Поэтому разумно выделить в качестве критерия эффективности одну из основных характеристик системы, область существования которой определить ограничениями с использованием других характеристик.

В рассматриваемом методе используется такой критерий, как «вероятность навигационных определений на интервале времени заданной длительности и с точностью, не ниже требуемой».

Назовем этот критерий для краткости «эффективностью навигационных определений». При этом под интервалом времени заданной длительности понимается длина интервала времени, в течение которого возможно хотя бы одно навигационное определение. Эта длина задается потребителем и может быть равна одной секунде или большему количеству временных единиц.

По содержанию указанный критерий эффективности соответствует расширенному понятию показателя доступности, в котором в качестве ограничений используется точность и целостность в виде длительности временного интервала.

Значения критерия эффективности определяются в частотной трактовке методом математического моделирования в виде:

$$P_{эфф} = \frac{k}{n}, \quad (3)$$

где $P_{эфф}$ – показатель эффективности;

k – количество навигационных определений на полном интервале времени моделирования, которые удовлетворяют указанным выше ограничениям;

n – общее количество испытаний.

Задача оценки решается дискретно, поэтому целесообразно выразить эту формулу через временные интервалы следующим образом:

$$P_{эфф} = \frac{k \cdot h_t}{n \cdot h_t} = \frac{\sum_{i=1}^{n_T} T_i}{\sum_{i=1}^{n_T} T_i + \sum_{j=1}^{n_\Theta} \Theta_j}, \quad (4)$$

где h_t – временной шаг моделирования;

T_i – интервал времени, на котором существуют навигационные определения, удовлетворяющие требованиям;

Θ_j – интервал времени, на котором отсутствуют указанные навигационные определения;

i и j – номера соответствующих интервалов;

n_T и n_Θ – соответствующие количества интервалов в полном интервале времени моделирования.

Практическая непрерывность навигационных определений по СНС с заданной точностью может нарушаться за счет:

1. Сокращения количества спутников в орбитальной сети СНС;
2. Наличия зон затенения спутника в определенной местности;
3. Увеличение погрешности навигационных определений из-за многолучевого распространения сигналов СНС.

Все эти моменты должны быть учтены при моделировании показателя эффективности.

Ограничения по точности в критерии эффективности можно определить по формуле

$$M = G \cdot m, \quad (5)$$

где M – показатель точности, который может быть равен радиальной СКП навигационных определений;

G – геометрический показатель точности (2);

m – эквивалентная погрешность навигационного параметра по всей совокупности навигационных погрешностей СНС, соответствующая M , т. е. она может быть равной СКП.

В зависимости от наличия и сочетания эффектов «затенения» и «отражения» сигнала спутника, находящегося над радиогоризонтом, значения G и m могут варьировать следующим образом:

а) в случае отсутствия затенения и отражения m соответствует формуляру (паспортным данным) ПА, в которых указывается показатель точности M при соответствующем геометрическом показателе G ; спутник в расчетах G принимается как «наблюдаемый»;

б) при наличии затенения и отражения сигнала значение m рассчитывается и может быть оценено методом математического моделирования, при этом спутник в расчетах G принимается как «наблюдаемый»;

в) при наличии только затенения (отражений нет) m соответствует формуляру (паспортным данным) ПА, при этом спутник в расчетах G принимается как «ненаблюдаемый»;

г) при приеме прямого и отраженного сигнала (затенения нет) m увеличивается и может быть оценена методом математического моделирования, при этом спутник в расчетах G принимается как «наблюдаемый».

Длина интервала, на котором должно быть реализовано хотя бы одно навигационное определение, задается потребителем. Эта величина, по существу, является допустимой дискретностью навигационных определений.

Процесс подготовки исходных данных для моделирования и образец отображения ожидаемых результатов представлен на рис. 2–4.

1. Для подготовки исходных данных требуются топографическая карта местности масштаба 1:10000 с нанесенной высотной основой и сведения о размерах и этажности отображенных на ней зданий, сооружений и т. п. (рис. 2.).

2. По имеющимся данным выполняется высотная оцифровка карты (в числителе высота точки рельефа над уровнем моря, в знаменателе – высота здания, сооружения от его основания). Формируется первичный массив данных с учетом географической сетки карты (рис. 3).

Выполняется преобразование прямоугольных координат в геоцентрические ПЗ-90.

3. Производятся вычисления вероятности навигационных определений на интервале времени заданной длительности и с точностью, не ниже требуемой для каждой точки обсервации. Указанные расчеты выполняются на весь период выполнения боевой задачи, т. е. 24 часа.

4. Из наихудших оценок вероятности формируется финальный массив результатов. Результаты обобщаются, систематизируются и при необходимости округляются.

5. На подложку топографической карты наносится слой, отражающий с помощью цветовой палитры распределение вероятности навигационных определений по СНС для конкретных условий местности (рис. 4.).

Итоговые результаты моделирования и оценки эффективности применения СНС для рассмотренного района представляются на топографической карте (рис. 4), где показаны вероятности навигационных определений в виде зон различного цвета.



Рис. 2. Топографическая карта района, выбранного для моделирования



Рис. 3. Оцифровка естественных и искусственных элементов рельефа местности выбранного района

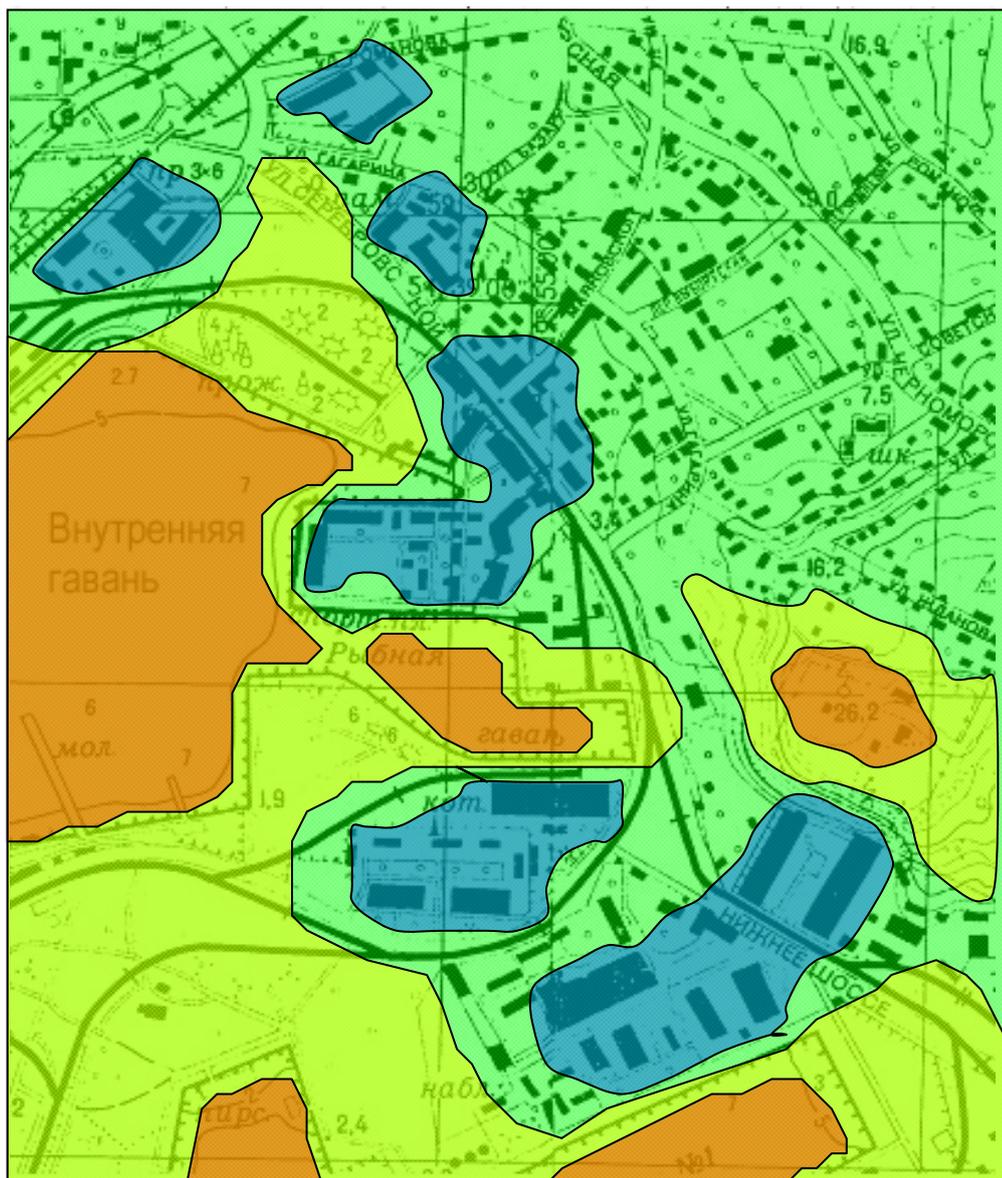


Рис. 4. Результаты оценки эффективности применения СНС для района выбранного в качестве примера

-  – вероятность обсервации 0,95–1,0;
-  – вероятность обсервации 0,90–0,94;
-  – вероятность обсервации 0,85–0,89;
-  – вероятность обсервации 0,80–0,84

ЛИТЕРАТУРА

1. Крат О. И., Смоленцев С. Г. К вопросу о многолучевом приеме сигналов глобальных навигационных систем // Радионавигация и время. –1994. – №1. – С. 17–22.

ON THE ESTIMATE OF THE EFFECTIVENESS OF USING THE SATELLITE NAVIGATION SYSTEMS TAKING THE POSSIBLE SHADOWING OF SATELLITES INTO ACCOUNT

**V. N. Bystrov, G. K. Danilova,
V. I. Lapshina, V. A. Pylenkov,
Y. V. Tokarev**
(GNINGI, RF MoD)

The method of estimate of the effectiveness of using the satellite navigation systems taking the possible shadowing of satellites into account and enabling to represent the navigation fixes probability in the form of different-colour zones on topographic map is considered.

ГРНТИ 78.21.36.15.15

АЛГОРИТМ АВТОПОДСТРОЙКИ ПО ЧАСТОТЕ ДЛЯ КОРАБЕЛЬНОЙ СТАНЦИИ ШИРОКОПОЛОСНОЙ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

**В. Н. БОНДАРЕНКО,
В. И. КОКОРИН,
Е. В. КУЗЬМИН**
(Красноярский государственный
технический университет)

Дано описание алгоритма автоподстройки по частоте для корабельной станции радионавигационной системы с шумоподобными частотно-манипулированными сигналами. Приведены результаты анализа помехоустойчивости и точности рассмотренного алгоритма.

В перспективных широкополосных радионавигационных системах (РНС) с ограниченным частотным ресурсом всё большее применение находят шумоподобные сигналы (ШПС) с минимальной частотной манипуляцией, которые превосходят традиционные ШПС с фазовой манипуляцией по спектральной эффективности и другим показателям [1].

Одним из основных факторов, определяющих точность измерения координат места и параметров движения корабельной станции (КС), является точность слежения за несущей частотой принимаемых сигналов опорных станций. Требование высокой точности слежения обуславливает очень малые значения шумовой полосы следящей системы (0,1 Гц и менее), что усложняет захват сигнала по частоте и увеличивает время синхронизации. Для

обеспечения быстрого захвата сигнала по частоте в рассматриваемой системе на начальном этапе работы реализуется алгоритм частотной автоподстройки (ЧАП), а на заключительном этапе – алгоритм фазовой автоподстройки (ФАП) несущей.

Принимаемый шумоподобный сигнал с минимальной частотной манипуляцией может быть представлен в виде

$$s(t) = D_k \cos[2\pi(f_0 \pm F_d)t + \theta(t) - \varphi], \quad t \in [kT_n, (k+1)T_n], \quad k = 0, 1, \dots, \quad (1)$$

где f_0 – несущая частота;

F_d – доплеровский сдвиг частоты;

φ – начальная фаза (задержка сигнала полагается известной, а амплитуда равной единице);

$$\theta(t) = \frac{\pi}{2T} \int_0^t d(t') dt' - \text{функция, определяющая закон угловой модуляции};$$

T – длительность элемента ШПС;

$$d(t) = \sum_{j=0}^{N-1} d_j \text{rect}(t - jT), \quad \{d_j\} - \text{псевдослучайная последовательность}$$

(ПСП) символов ± 1 ; $\text{rect}(t)$ – прямоугольный импульс единичной амплитуды и длительности T ;

D_k – информационный символ, принимающий значения ± 1 (длительность информационного символа $T_H = T_n = NT$, T_n – период повторения ШПС, N – длина ПСП).

Структурная схема системы автоподстройки по частоте представлена на рис. 1. На вход квадратурного преобразователя (КП) поступают отсчёты $s(t_i)$ сигнала с выхода линейного тракта приёмника. Частота дискретизации f_d непрерывного сигнала в аналого-цифровом преобразователе (АЦП) кратна тактовой частоте $f_T = 1/T$. Отсчёты опорных кодовых последовательностей $\sin \theta_i$ и $\cos \theta_i$, синхронных с квадратурными компонентами комплексной огибающей принимаемого сигнала, формируются системой кодовой синхронизации (СКС). Квадратурные составляющие сжатого по спектру сигнала (после снятия широкополосной частотной манипуляции) образуются путём объединения результатов перемножения самого сигнала и его преобразования $s_{\perp}(t_i)$ по Гильберту (ПГ) с опорными кодовыми последовательностями. Выходные сигналы квадратурного преобразователя $S_1(t_i)$ и $S_Q(t_i)$ поступают на сигнальные входы частотно-фазового дискриминатора (ЧФД), на опорные входы которого подаются отсчёты

сигнала несущей частоты $\cos\left(2\pi(f_0 \pm \hat{F}_d)t_i\right)$, сформированные цифровым синтезатором (ЦС) на основе оценки \hat{F}_d доплеровского сдвига несущей частоты. Сигнал ошибки, пропорциональный частотному или фазовому рассогласованию (в зависимости от типа используемого дискриминатора), поступает на цифровой фильтр (ЦФ), выходной сигнал которого используется для управления частотой опорного сигнала несущей частоты.

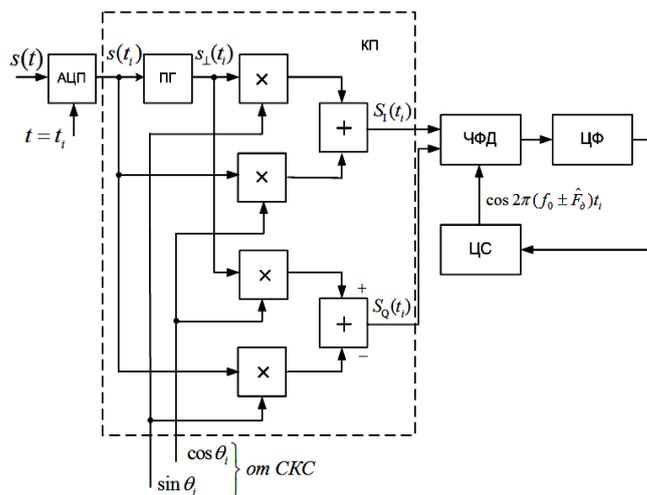


Рис. 1. Структурная схема автоподстройки по частоте

Структура частотно-фазового дискриминатора приведена на рис. 2.

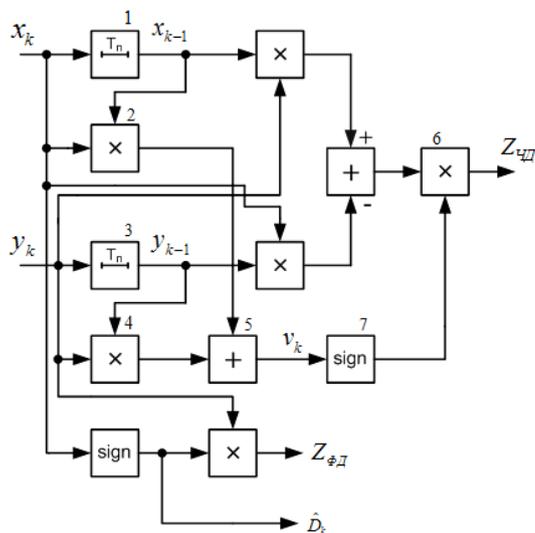


Рис. 2. Структурная схема частотно-фазового дискриминатора

Квадратурные компоненты сигнала несущей частоты образуются как

$$\left. \begin{aligned} S_1(t_i) &= s(t_i)\cos\theta(t_i) + s_{\perp}(t_i)\sin\theta(t_i) = D_k \cos[2\pi(f_0 \pm F_d)t_i - \varphi], \\ S_2(t_i) &= s_{\perp}(t_i)\cos\theta(t_i) - s(t_i)\sin\theta(t_i) = D_k \sin[2\pi(f_0 \pm F_d)t_i - \varphi], \end{aligned} \right\} t_i \in [kT_n, (k+1)T_n], \quad (2)$$

где $s(t_i)$ и $s_{\perp}(t_i)$ – соответственно отсчёты сигнала (1) и преобразования Гильберта от $s(t_i)$: $s_{\perp}(t_i) = D_k \sin[2\pi(f_0 \pm F_d)t_i + \theta(t_i) - \varphi]$.

Результаты перемножения квадратурных компонентов (2) с опорным сигналом $\cos 2\pi(f_0 \pm \hat{F}_{\text{д}})t_i$ поступают на цифровые интеграторы \sum с временем интегрирования T_n (сброс интеграторов производится в моменты $t_k = kT_n$, $k = 1, 2, \dots$). Полагая, что составляющие удвоенной частоты $2f_0$ полностью подавляются при интегрировании, для квадратурных компонентов на выходах цифровых интеграторов можно записать

$$\left. \begin{aligned} x_k &= \frac{1}{2} nND_k \operatorname{sinc}(\Delta_k) \cos(\varphi_k + \Delta_k), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \\ y_k &= \frac{1}{2} nND_k \operatorname{sinc}(\Delta_k) \sin(\varphi_k + \Delta_k), \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где $n = f_0/f_T$ – целое, $\operatorname{sinc}(\Delta_k) = \sin(\Delta_k)/\Delta_k$, $\Delta_k = \pi F_k T_n$, $F_k = F_d - \hat{F}_{\text{д}}$ – частотная расстройка по несущей на k -м шаге слежения, $\varphi_k = \varphi + \sum_{j=0}^{k-1} \Delta_j$.

Структура алгоритма частотного дискриминирования поясняется схемой, изображенной на рис. 2. Для снятия фазовой манипуляции, обусловленной передачей цифровой информации, используется схема, состоящая из умножителей 2, 4, 6, сумматора 5, двух элементов 1 и 3 задержки на T_n и преобразователя 7 с характеристикой $\operatorname{sign}(x)$. Опорный сигнал для снятия фазовой манипуляции формируется на основе сравнения знаков квадратурных компонентов (3) на двух смежных периодах повторения ШПС:

$$v_k = x_k x_{k-1} + y_k y_{k-1} = \left(\frac{nN}{2}\right)^2 \operatorname{sinc}^2(\Delta) D_{k-1} D_k \cos(2\Delta), \quad k = 1, 2, \dots \quad (4)$$

Сигнал ошибки, пропорциональный частотному рассогласованию, формируется в соответствии с алгоритмом

$$Z_{\times\bar{A}}(k) = (x_{k-1}y_k - x_k y_{k-1}) \text{sign}(v_k), \quad (5)$$

где $\text{sign}(x)$ – знаковая функция.

Используя (3) – (5), для сигнала ошибки можно записать

$$Z(F) = \left(\frac{nN}{2}\right)^2 \text{sinc}^2(\Delta) \sin(2\Delta) \cdot \text{sign}(\cos(2\Delta)), \Delta = \pi FT_n. \quad (6)$$

Сигнал ошибки, пропорциональный фазовому рассогласованию, формируется в соответствии с алгоритмом

$$Z_{\hat{O}\bar{A}}(k) = \text{sign}(x_k)y_k = \hat{D}_k y_k, \quad (7)$$

где $\hat{D}_k = \text{sign}(x_k)$ – оценка информационного символа D_k .

Дискриминационная характеристика, соответствующая выражению (7), с учётом (3) имеет вид

$$Z(\varphi) = \frac{1}{2} nN \text{sign}(\cos \varphi) \sin \varphi. \quad (8)$$

Используя квазинепрерывный метод анализа цифровых следящих систем [2], для дисперсий σ_F^2 и σ_φ^2 установившейся частотной и фазовой ошибок слежения можно записать:

$$\sigma_F^2 = N_F F_{\varnothing F}, \sigma_\varphi^2 = N_\varphi F_{\varnothing \varphi}, \quad (9)$$

где $N_F = \frac{N_{\times\bar{A}}(0)}{k_{\times\bar{A}}^2}$ и $N_\varphi = \frac{N_{\hat{O}\bar{A}}(0)}{k_{\hat{O}\bar{A}}^2}$ – спектральная плотность мощности

эквивалентных частотных и фазовых флуктуаций соответственно;

$k_{\times\bar{A}}$ и $k_{\hat{O}\bar{A}}$ – крутизна дискриминационной характеристики соответственно частотного и фазового дискриминаторов;

$F_{\varnothing F}$ и $F_{\varnothing \varphi}$ – шумовая полоса систем ЧАП и ФАП соответственно.

Можно показать, что спектральная плотность эквивалентных частотных и фазовых флуктуаций для рассмотренного алгоритма ЧФД определяются как

$$N_F = \frac{1}{2T_n(\pi q)^2}, N_\varphi = \frac{2T_n}{[2\Phi(q)-1]^2 q^2}, \quad (10)$$

где $q^2 = 2Nq_0^2$ – отношение сигнал /шум на выходе синфазного канала ЧФД.

На рис. 3 представлены характеристики частотного (рис. 3а) и фазового (рис. 3б) дискриминаторов: нормированные дискриминационные характеристики (6) и (8) (кривые 1), а так же дискриминационные характеристики $\overline{Z(F)}$, $\overline{Z(\varphi)}$ (кривые 2) и флуктуационные характеристики $N_{\hat{\Delta}}(F) = 2T_n \hat{\sigma}_{\times \hat{\Delta}}^2(F)$, $N_{\hat{\Delta}}(\varphi) = 2T_n \hat{\sigma}_{\hat{\Delta}}^2(\varphi)$ (кривые 3), полученные методом статистического моделирования (усреднением по 10^4 реализациям при отношении сигнал/шум в полосе ШПС $q_0 = -40$ дБ, длине ПСП $N = 2^{14} - 1 = 16383$, периоде повторения $T_i = 40 \text{ } \mu\text{s}$; $\overline{Z(F)}$, $\overline{Z(\varphi)}$ и $\hat{\sigma}_{\times \hat{\Delta}}^2(F)$, $\hat{\sigma}_{\hat{\Delta}}^2(\varphi)$ – соответственно оценки математического ожидания и дисперсии выходных величин $Z_{\times \hat{\Delta}}$ и $Z_{\hat{\Delta}}$ дискриминаторов).

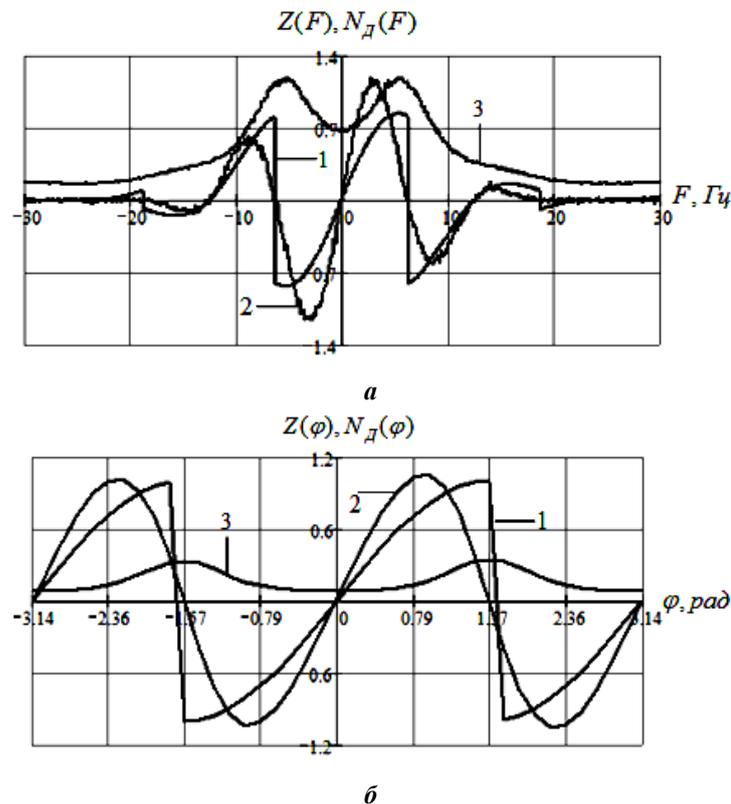


Рис. 3. Характеристики частотного (а) и фазового (б) дискриминаторов (объяснения в тексте)

На рис. 4 показаны результаты статистического моделирования системы ЧАП с астатизмом первого порядка (петлевой фильтр содержит цифровой интегратор и пропорционально-интегрирующий фильтр) для значения шумовой полосы следящей системы $F_{\sigma} = 0,1$ Гц и постоянной скорости КС, равной 60, 120 и 300 км/час (кривые 1, 2 и 3 соответственно): зависимости динамической ошибки слежения \bar{F} от дискретного времени $t = kT_n$, $k = 0, 1, \dots$, (начальные значения ошибки равны 0, 1; 0, 2; 0, 5 Гц при $f_0 = 1,9$ МГц) – рис. 4а; зависимости среднеквадратической ошибки σ_F слежения от времени – рис. 4б.

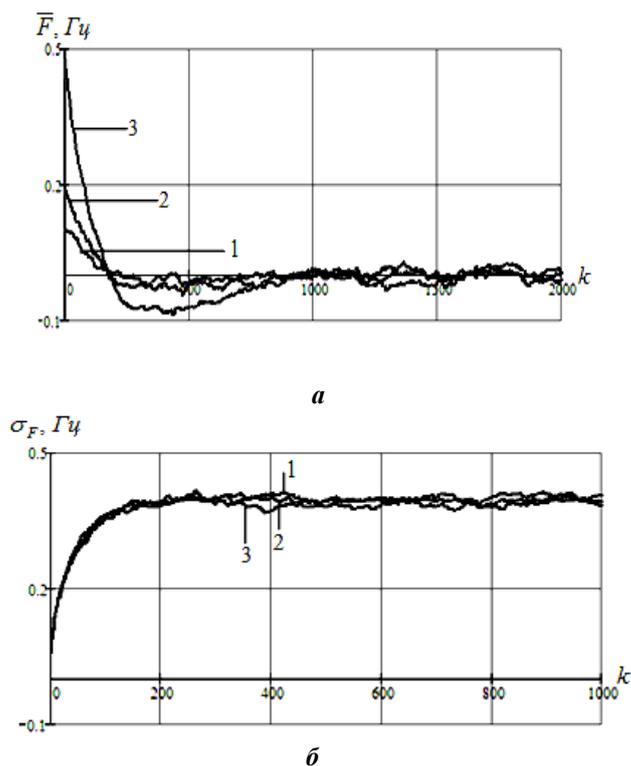


Рис. 4. Результаты статистического моделирования системы ЧАП (объяснения в тексте)

На рис. 5 и рис. 6 представлены результаты статистического моделирования системы ФАП с астатизмом второго порядка (астатический петлевой фильтр) для шумовой полосы $F_{\text{ш}} = 0,1$ Гц и трёх значений частотной расстройки 0, 01; 0, 02; 0, 1 дБ (кривые 1, 2 и 3 соответственно): зависимости средних значений фазовой $\bar{\varphi}$ и частотной \bar{F} ошибок слежения от времени (рис. 5а, б и рис. 5в, г соответственно); зависимости среднеквадратических значений фазовой σ_{φ} и частотной σ_F ошибок от времени (рис. 6а, б и рис. 6в, г).

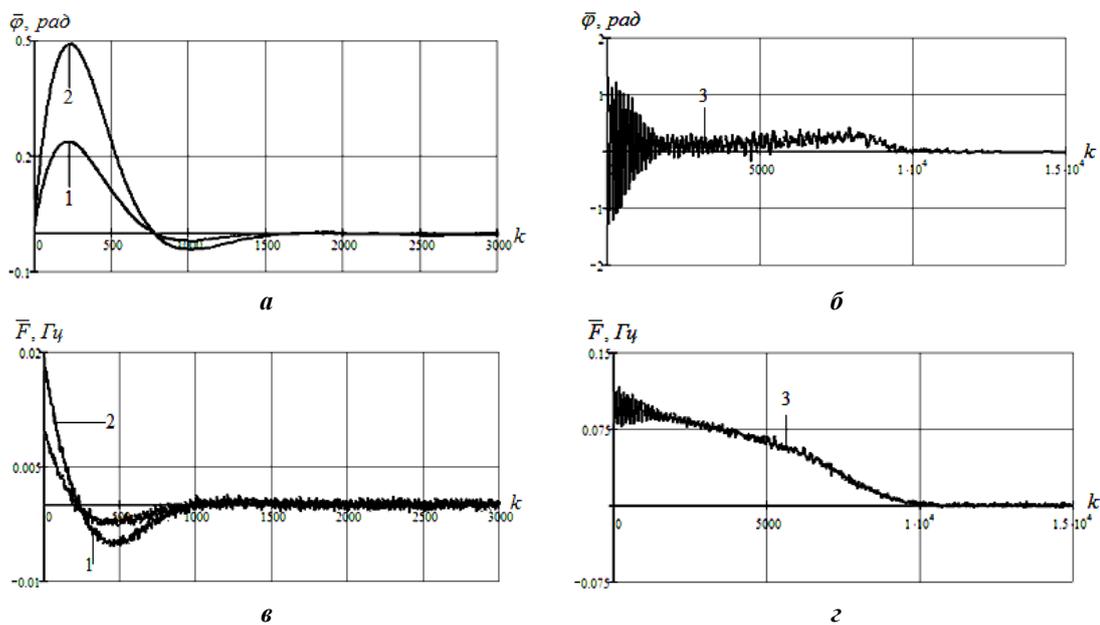


Рис. 5. Результаты статистического моделирования системы ФАП (объяснения в тексте)

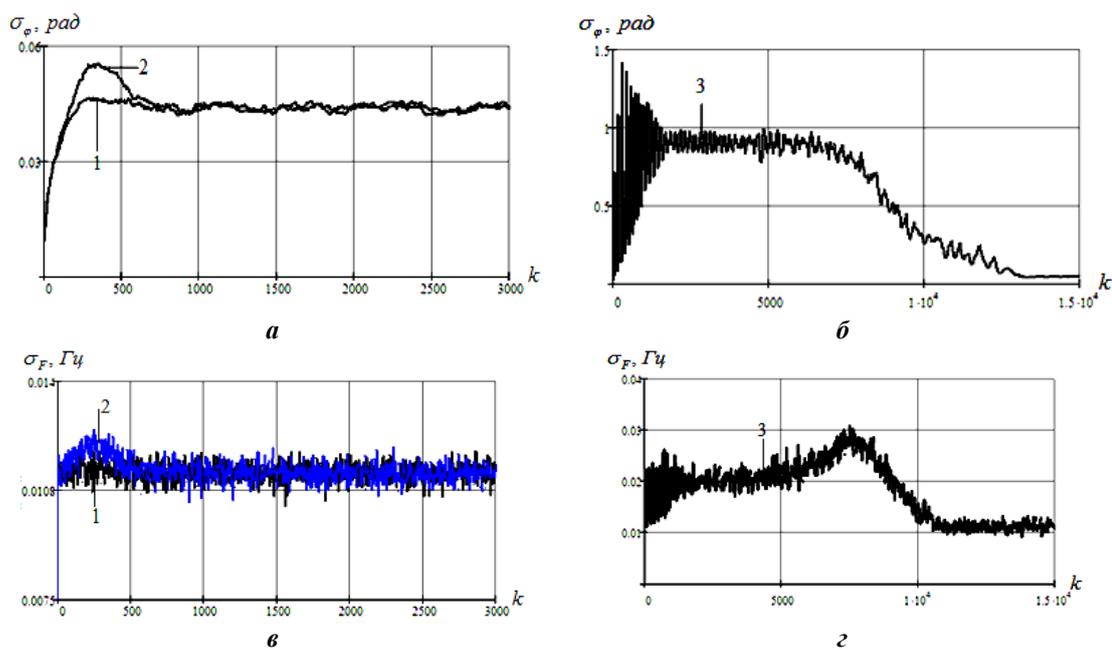


Рис. 6. Зависимости среднеквадратических значений фазовой σ_φ и частотной σ_F от времени (объяснения в тексте)

Приведенные на рис. 4–6 характеристики получены усреднением по 10^3 реализациям при параметрах сигнала, указанных выше.

Анализ представленных характеристик свидетельствует о том, что при заданной динамике КС ($V \leq 300$) км/час и отношении сигнал/шум в полосе ШПС $q_0 \geq -40$ дБ рассмотренные алгоритмы автоподстройки частоты обеспечивают устойчивое слежение за несущей частотой при шумовой полосе $F_{ш} \geq 0,1$ Гц. При скорости $V = 300$ км/час алгоритм ЧАП обеспечивает меньшее время установления синхронизации (приблизительно на порядок) по сравнению с алгоритмом ФАП, что предопределяет целесообразность его использования на начальном этапе синхронизации.

Сравнение теоретических результатов, полученных с использованием формул (9), (10), с результатами моделирования свидетельствует о достаточно точном их совпадении (расхождение результатов составляет менее 10% при отношении сигнал/шум в полосе информационного символа $q = 5$ дБ и более, что соответствует пороговому значению $q_0 = -40$ дБ при $N = 2^{14} - 1$).

Выводы

Предложенные алгоритмы автоподстройки частоты применены в приемниках корабельных станций разрабатываемой широкополосной радионавигационной системы «Спрут», использующей ШПС с минимальной частотной манипуляцией. Обеспечивая практически потенциальную помехоустойчивость и возможность беспойсковой синхронизации по несущей частоте, они могут быть реализованы с приемлемыми аппаратными и вычислительными затратами на основе современной цифровой элементной базы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алешечкин А. М., Бондаренко В. Н., Кокорин В. И. Обеспечение координатно-временной информацией в многофункциональной радионавигационной системе. – Труды ИПА РАН. – 2005. – Вып. 13. – С. 301–309.
2. Жодзишский М. И., Сила-Новицкий С. Ю., Прасолов В. А. и др. Цифровые системы фазовой синхронизации / Под ред. М. И. Жодзишского. – М.: Сов. радио, 1980. – 208 с.

AUTO-FREQUENCY TRIM ALGORITHM FOR THE SHIPBORNE SPREAD-SPECTRUM RADIO NAVIGATION SYSTEM RECEIVER

V. N. Bondarenko,
V. I. Kokorin, E. V. Kuzmin
(Krasnoyarsk Technical University)

Auto-frequency trim algorithm for the shipborne spread-spectrum radio navigation system receiver of noise-like signal with minimum shift keying structure is described. The results of noise-immunity analysis precision of suggested algorithm are given.

ГРНТИ 34.53.21

**ПОГРЕШНОСТИ ОЦЕНИВАНИЯ ЧАСТОТЫ В ДОПЛЕРОВСКОМ ЛАГЕ
КОРРЕЛЯЦИОННЫМ АЛГОРИТМОМ**

К. П. ЛЬВОВ

(ОАО «Концерн «Океанприбор»)

Приводятся результаты статистического моделирования оценивания спектрального момента с использованием одного значения комплексной корреляционной функции эхосигналов доплеровского лага. Моделирование эхосигналов, оценивание спектрального момента, определение статистик оценивания – значений среднего и среднеквадратичного отклонения проведено при различных входных отношениях «сигнал–шум» (с/ш) и длительностях реализации единичного оценивания частоты. Статистики приведены для представления эхосигналов в формате плавающей запятой и при числе разрядов квантования 1, 4 и 8.

В состав навигационных систем различного назначения может входить доплеровский лаг. Одним из требований, предъявляемых к доплеровскому лагу, является вес и энергопотребление, что означает упрощение электронного модуля. Существенное влияние на сложность электронного модуля оказывает реализация алгоритма оценивания доплеровского смещения частоты эхосигналов. Достаточно простым в реализации на сигнальном процессоре (однокристалльном микропроцессоре) является алгоритм оценивания спектрального момента с использованием одного значения оценки комплексной корреляционной функции эхосигнала. В связи с этим представляет практический интерес знание погрешности оценивания доплеровского смещения частоты эхосигналов [1–3].

Математический аппарат алгоритма оценивания спектрального момента с использованием одного значения комплексной корреляционной функции $R(\tau)$ изложен в работе [4], где сделаны следующие основные предположения :

- полезный сигнал и шум являются независимыми с нулевыми средними значениями стационарными комплексными гауссовыми процессами;
- средняя частота оценивается первым спектральным моментом

$$\bar{f} = \int_0^{\infty} \omega S(\omega) d\omega / \sigma^2, \quad (1)$$

где $S(\omega)$ – спектральная плотность мощности (СПМ),

σ – дисперсия.

Для симметричных узкополосных СПМ первый спектральный момент и частота, соответствующая максимуму СПМ, практически совпадают [3].

Опуская выкладки, получим следующие конечные соотношения для дискретного представления полезного сигнала и шума. Если значение оценки комплексной корреляционной функции для малого значения $\tau_s \neq 0$,

$$\hat{R}(\tau_s) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-2} Z_i Z_{i+1}^*, \quad (2)$$

где Z_i и Z_{i+1} – отсчеты комплексной огибающей эхосигнала, тогда оценка спектрального момента

$$\hat{f} = \frac{1}{2\pi\tau_s} \arctg(\text{Im}\{R(\tau_s)\} / \text{Re}\{R(\tau_s)\}). \quad (3)$$

Алгоритм требует примерно N операций комплексного умножения и сложения, где N – число отсчетов комплексной огибающей на длительность реализации T_e единичного оценивания \hat{f} . Величина T_e в импульсном режиме излучения определяется длительностью импульса излучения, а в непрерывном режиме излучения может составлять несколько секунд [3].

В работе [5] приведены статистики для случая дискретного представления эхосигналов – все вычислительные операции выполнялись в формате плавающей запятой, включающей знаковый разряд, 11 разрядов порядка и 52 разряда мантиссы, и на качественном уровне сделаны выводы о сходимости (устойчивости) результатов статистического моделирования. При проектировании цифровых систем обработки существенным вопросом является выбор числа уровней квантования при аналого-цифровом преобразовании эхосигнала. В статье [6] представлены статистики для различного числа уровней квантования эхосигнала.

Статистическое моделирование проведено на примере доплеровского лага с частотой излучения $f_u = 300$ кГц и предназначенного для подводных аппаратов (ПА) с максимальной скоростью перемещения 5 уз. Предполагается, что на глубинах под килем не более 50 м используется непрерывный режим излучения, а при больших глубинах – импульсный режим излучения со скважностью 3. Характеристики одного луча акустических антенн – ширина раствора $\Delta\alpha = 3^\circ$ и угол наклона к горизонтали $\alpha = 60^\circ$. Ширина спектра мощности эхосигналов во всем рабочем диапазоне скорости перемещения в непрерывном режиме излучения примерно постоянна и определяется из известного соотношения

$\Delta f_a = \frac{2V}{c} f_e \cos\alpha \Delta\alpha t g\alpha$. Подставляя указанные выше значения, получим $\Delta f_a = 93$ Гц. В импульсном режиме излучения Δf_a не более чем

$\sqrt{93^2 + (1/0,03)^2} = 99$ Гц, где учтена минимальная длительность излучения в 30 мс для глубины 50 м. Статистическое моделирование проведено для постоянного значения доплеровского смещения $f_a = 250$ Гц. Предполагается также, что приемный тракт выделяет низкочастотные квадратурные составляющие эхосигнала. При максимальной скорости перемещения 5 уз полоса пропускания фильтров нижних частот (ФНЧ) составит 650 Гц. С учетом спектральных характеристик сигналов на выходах ФНЧ, частота дискретизации выбрана 1300 Гц [3].

Методология моделирования низкочастотных квадратурных составляющих, амплитудно-частотные характеристики дискретного формирующего фильтра и оценки спектральной плотности мощности комплексного сигнала приведены в работе [7].

Входные отношения (с/ш) задавались как отношения среднего квадратичного отклонения (СКО) «чистого» эхосигнала к СКО дискретного белого шума.

На рис. 1–3 приведены некоторые результаты статистического моделирования в ситуациях непрерывного и импульсного режимов излучения в зависимости от входного отношения (с/ш) при фиксированном значении T_e . Входные отношения (с/ш) задавались как отношения среднего квадратичного отклонения (СКО) «чистого» эхосигнала к СКО дискретного белого шума.

Результаты приведены для равномерного квантования при числе разрядов 1, 4 и 8 (рис. 3а–з). Моделирование квантования Z_i и Z_{i+1} в выражении (2) производилось функциями `uencode` и `uddecode` системы вычислений Matlab. Для сопоставления приведены статистики в случае дискретного представления эхосигналов, т.е. без использования указанных функций. В случае дискретного представления эхосигналов (рис. 3а–г) для сопоставления приведены статистики оценок частоты с использованием алгоритма БПФ. Размер массива для обработки по алгоритму БПФ указан на рис. 3а–г, недостающие отсчеты задавались нулевыми значениями.

Статистики \hat{f} представлены средними и СКО. Величина τ_s равна 1/1300 с. Истинное значение частоты равно 250 Гц. Максимальная величина $T_e = 2$ с в непрерывном режиме излучения, а минимальная $T_e = 0,03$ с в импульсном режиме. Число независимых испытаний определяется общей длительностью смоделированной реализации эхосигнала в 200 с и равно $200/T_e$.

При моделировании числа разрядов, равного 1 (знаковое представление), использовались следующие зависимости

$$\hat{R}_{\text{sgn}}(\tau_s) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-2} \text{sgn}(Z_i) \text{sgn}(Z_{i+1}^*), \quad (4)$$

$$\hat{f} = \frac{1}{2\pi\tau_s} \arctg(\sin(\pi \operatorname{Im}\{\hat{R}_{\operatorname{sgn}}(\tau_s)\}/2) / \sin(\pi \operatorname{Re}\{\hat{R}_{\operatorname{sgn}}(\tau_s)\}/2)). \quad (5)$$

В процессе исследования эмпирически возник следующий упрощенный знаковый алгоритм

$$\hat{R}_{\operatorname{sgn}}(\tau_s) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-2} \operatorname{cplx}(\operatorname{sgn}(\operatorname{Re}(Z_i)), \operatorname{sgn}(\operatorname{Im}(Z_i))) \operatorname{cplx}(\operatorname{sgn}(\operatorname{Re}(Z_{i+1}^*)), \operatorname{sgn}(\operatorname{Im}(Z_{i+1}^*))), \quad (6)$$

где оператор cplx образует комплексное значение из указанных аргументов, и далее – выражение (3). Данный алгоритм существенно проще в реализации, так как не требуется выполнение оператора sgn для комплексной функции, т. е. $Z/\operatorname{abs}(Z)$ в формуле (4) и $\sin(X)$ в выражении (5), и возможно использование логических команд сигнального процессора при программировании выражения (6). Статистики данного алгоритма – СКО примерно на 50% больше при малых (с/ш) и на 25% больше при рабочих (с/ш), а характер смещения иной – знак величины смещения противоположный, абсолютное значение примерно в два раза больше по сравнению со строгим алгоритмом (4) и (5). Более подробное рассмотрение алгоритма выходит за рамки настоящей работы.

В качестве иллюстрации на рис. 1, 2 приведены сигнал на выходе формирующего фильтра и оценка спектральной плотности мощности (СПМ) низкочастотных квадратурных составляющих (комплексной огибающей) эхосигнала.

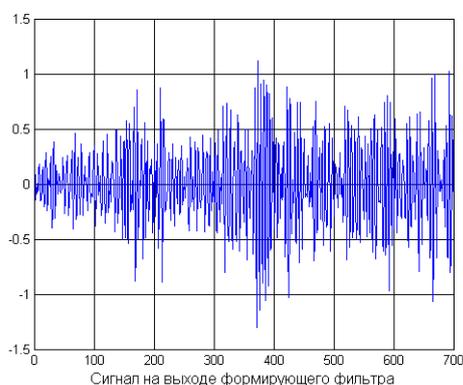


Рис. 1. Сигнал на выходе формирующего фильтра (объяснения в тексте)

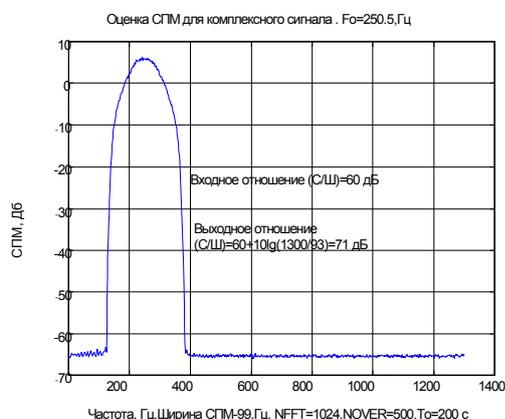


Рис. 2. Спектральная плотность мощности (объяснения в тексте)

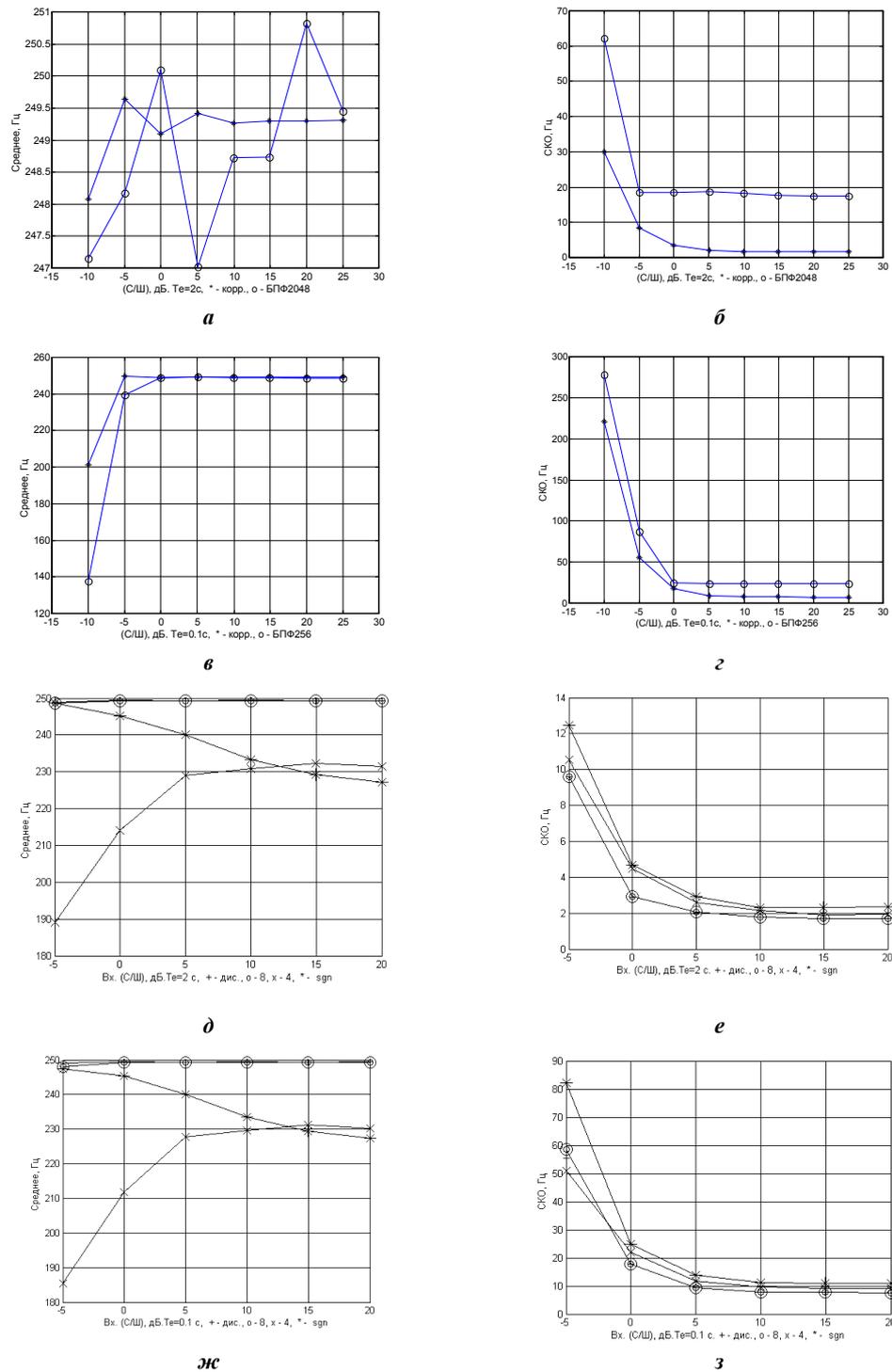


Рис. 3 а-з. Среднее значение оценки частоты и СКО оценки частоты при различных T_e и разных уровнях квантования (объяснения в тексте)

Из рассмотрения рис. 3д–з можно видеть, что равномерное квантование на 2^7 и более уровней дает практически одни и те же значения СКО и смещения для всех значений T_e и входных отношений (с/ш). Знаковый алгоритм (4) и (5) уступает по величинам СКО и смещения для всех значений T_e и отношений (с/ш). При равномерном квантовании с числом разрядов 4 значения СКО и смещения занимают промежуточное положение.

Величины смещения знакового алгоритма (4) и(5) и при равномерном квантовании с числом разрядов 4 зависят от входного отношения (с/ш), а при равномерном квантовании с числом разрядов 8 и более величина смещения постоянна при фиксированном T_e . В связи с данным обстоятельством необходимо отметить, что практически во время проведения калибровки лага на мерной линии важна независимость или слабая зависимость величины смещения от входного отношения (с/ш) [3].

На рис. 3 также можно видеть, что имеются две области входных отношений (с/ш):

1. Область резкого увеличения смещения и СКО;
2. Область плавного уменьшения (рабочая область) смещения и СКО.

Границы областей зависят от T_e и числа уровней квантования, например, если $T_e = 2$ с, граница областей имеет место при (с/ш) ≈ -5 дБ для дискретного представления и при (с/ш) ≈ 5 дБ для равномерного квантования с числом разрядов 4. Если $T_e = 0,01$ с граница областей при (с/ш) ≈ 5 дБ для дискретного представления и при (с/ш) ≈ 10 дБ для равномерного квантования с числом разрядов 4. Более детальный анализ результатов позволяет утверждать, что точные границы областей разнятся для смещения и СКО.

Полученные результаты находятся в согласии с известным положением из теории локации о наиболее точном оценивании частоты при использовании непрерывного режима излучения. В импульсном режиме излучения при удалении ПА от дна на единицы метров длительность импульсов излучения даже при уменьшении скважности до 2 составит единицы мс. В этом случае величина СКО равна примерно 50 Гц.

В доплеровских лагах время осреднения результатов единичного оценивания \bar{f} может составлять $T = (1,5-300)$ с. Тогда СКО осредненных результатов будет меньше СКО результатов единичного оценивания \bar{f} в $\sqrt{T/T_e}$ раз.

Сравнение корреляционного алгоритма и БПФ (рис. 3а–з) дает:

1. СКО оценок, полученных алгоритмом БПФ, в рабочей области (с/ш) в 10 раз больше при $T_e = 2$ с и в 2 раза больше при $T_e = 0,03$ с.
2. Более значительны абсолютные значения смещений оценок алгоритма БПФ.

Сравнение корреляционного алгоритма и широко известных алгоритмов [8] показывает сопоставимость полученных результатов с квадратурно-фазовым измерителем (рабочая область при (с/ш) > -3 дБ).

Полученные результаты подтверждают необходимость проведения при всех штатных режимах движения и работы носителя калибровки высокоточного лага [3].

В заключение можно отметить, что полученные результаты могут быть использованы при проектировании цифровой аппаратуры доплеровских лагов и профилометров различного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Обитаемые подводные аппараты. Под ред. Глумова И.Ф. СПб.: Гидрометеиздат, 2002. – 272 с.
2. Автономные необитаемые подводные аппараты. Под ред. Агеева М. Д. Владивосток: Дальнаука, 2000. – 272 с.
3. Виноградов К. А., Кошкарев В. Н. и др. Абсолютные и относительные лаги. Л.: Судостроение, 1990. – 254 с.
4. Kenneth S. Miller, Marvin M. Rochwarger. A covariance Approach to Spectral Moment Estimation. IEEE Trans. Inform. Theory. Vol. IT-18, No. 5, 1972. – PP. 588–596.
5. Львов К. П. Статистики оценок спектральных моментов эхосигналов доплеровских лагов. Тр. VIII Международной конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: «Наука». – 2006. С. 450–453.
6. Львов К. П. Статистики оценок спектральных моментов квантованных по уровню эхосигналов доплеровских лагов. Научно-технический сборник «Гидроакустика». Вып. 7. СПб.: Концерн «Океанприбор». – 2007 (в печати).
7. Львов К. П. Программный имитатор эхосигналов доплеровских лагов. Научно-технический сборник «Гидроакустика». – Вып. 4, СПб.: ЦНИИ «Морфизприбор». – 2003. – С. 72–76.
8. Колчинский В. Е., Мантеровский И. А. и др. Доплеровские устройства и системы навигации. М.: Сов. Радио, 1975. – 430 с.

PRECISION OF ESTIMATES OF SPECTRAL MOMENTS OF ECHO-SIGNAL OF DOPPLER LOG

K. P. L'vov
(JSC «Concern “Oceanpribor”»)

Results of statistical modeling of the spectral moment estimation using a single value of complex correlation function of Doppler log echo-signals are presented. Numbers of bits of the quantizer are 1, 4 and 8. Modeling of echo-signals, estimation of the spectral moment, definition of estimation statistics, for instance, mean and root-mean deviation have been conducted at various input S/N ratios and duration of realization of single estimation of the frequency.

**ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЗАРУБЕЖНЫХ СРЕДСТВ НАВИГАЦИИ
АТОМНЫХ ПОДВОДНЫХ ЛОДОК С БАЛЛИСТИЧЕСКИМИ РАКЕТАМИ**

П. И. МАЛЕЕВ
(ГНИНГИ МО РФ)

Как и ракетное оружие, навигационное вооружение атомных подводных лодок с баллистическими ракетами, прошло в зарубежных странах несколько этапов развития. Поскольку основной навигационной системой этих лодок является инерциальная навигационная система, ее развитию на каждом этапе уделялось наибольшее внимание. Оно шло в двух направлениях: совершенствования существующих и создания новых, более высокоточных, основных чувствительных элементов (гироскопов и акселерометров) на новых физических принципах и явлениях. Одновременно значительное внимание на каждом этапе развития ракетного оружия уделялось и созданию более точных, не демаскирующих пл, средств коррекции. Данная статья посвящена рассмотрению этапов развития в основном инерциальных навигационных систем и средств их коррекции. Остальные средства навигации идентичны тем, что используются и на других классах пл.

Введение

Анализ доступных нам источников информации показывает, что в ведущих зарубежных странах ударная мощь вооруженных сил в последние десятилетия переносится на ВМС, а в ВМС – на баллистические ракеты, размещаемые на подводных лодках (пл). Так, в США доля баллистических ракет (БР) пл в 1986 г. составляла 31,6%, а в 1997 г. уже 41,3%. Число ядерных боеприпасов этих ракет превышает количество ядерных боеприпасов наземного базирования почти в 1,5 раза. Англия ограничивается только морской группировкой стратегических ядерных сил. Во Франции в 1986 г. также отказались от ядерных сил наземного базирования как менее эффективных. При этом в этих странах проводятся мероприятия по перевооружению имеющихся атомных подводных лодок с баллистическими ракетами (ПЛАРБ) и созданию новых, более совершенных. Лидирующее положение по этим пл занимает США. Англия использует ракетное и навигационное вооружение, разрабатываемое в США. Франция в данном направлении использует свои разработки. Из зарубежных стран пл с баллистическими ракетами в настоящее время имеют США, Англия, Франция и Китай.

Главной целью научно-технической программы ВМС ведущих зарубежных государств (в первую очередь США) является обеспечение технологического превосходства над ВМС других стран и создание научно-технического задела для повышения боевых возможностей вооруженных сил в целом. Эти задачи решаются в результате проведения значительного количества НИР и ОКР. Особенность этих работ состоит в гибкости

разработок, позволяющей внедрять новые образцы по мере их готовности, и в модульно-блочном принципе их создания, обеспечивающем возможность быстрой модернизации оборудования в процессе эксплуатации.

1. Задачи, решаемые средствами навигации ПЛАРБ, этапы их развития и достигнутый уровень

Основными задачами, решение которых возлагается на навигационное вооружение ПЛАРБ, являются:

- обеспечение кораблевождения и навигационной безопасности плавания ПЛАРБ в открытом море (океане), в прибрежной зоне, узкостях, на акваториях гаваней и рейдов, а также подо льдами;
- обеспечение заданной готовности ПЛАРБ к выходу в море;
- обеспечение заданной готовности к использованию оружия.

Для решения этих задач средства навигации ПЛАРБ должны выдавать более 40 навигационных и динамических параметров (координаты места, курс, абсолютную и относительную скорости, углы качек, ускорение по осям координат пл и др.) Требования к точности выработки этих параметров чрезвычайно высоки. Они определяются прежде всего тактико-техническими требованиями, предъявляемыми ракетным оружием. Удовлетворение ряда из этих требований средствами навигации, разработанными для пл других классов, не представляется возможным, что ведет к необходимости создания ряда уникальных систем.

Структурно навигационное вооружение ПЛАРБ представляет собой одну из подсистем общей интегрированной компьютеризированной системы пл, называемой боевой информационно-управляющей системой (БИУС). В ней средства навигации, гидроакустики и управления оружием объединены общей информационной шиной с высокой пропускной способностью.

Развитие навигационного вооружения для ПЛАРБ как в США, так и во Франции осуществлялось одновременно с развитием оружия. В США это развитие прошло шесть этапов (см. табл. 1)

Таблица 1

Этапы развития ракетного и навигационного вооружения для ПЛАРБ США

Поколения ракет	I		II		III	
	1	2	3	4	5	6
Этапы развития						
Типы ракет	«Полярис А-1»	«Полярис А-2»	«Полярис А-3»	«Посейдон»	«Трайидент-2»	«Трайидент-2»
Годы разработки	1956–1960	1956–1962	1961–1964	1965–1971	1971–1979	1981–1990

На каждом из этих этапов разрабатывалось последовательно более совершенное навигационное вооружение. Средняя квадратическая

погрешность стрельбы была для ПЛАРБ с ракетами «Посейдон» – 470 м, а с ракетами «Трайдент-1» – 300 м.

О современном состоянии развития средств навигации ПЛАРБ зарубежных стран можно судить по ПЛАРБ США с ракетами «Трайдент-2».

Погрешности выработки основных навигационных и специальных параметров этими средствами по нашим оценкам составляют:

- по координатам места 0,1–0,2 км;
- по скорости относительно грунта 0,02 м/с;
- по курсу 0,2–0,3 угл. мин.;
- по углам качки 0,08–0,16 угл. мин.;
- по ускорению силы тяжести – около 1 мГал.

Допустимый интервал времени между наблюдениями по внешним ориентирам 5–7 суток.

Основными проблемами, которые решались и решаются разработчиками навигационного вооружения ПЛАРБ, являются:

- дальнейшее повышение точности выработки основных навигационных параметров;
- повышение скрытности работы средств навигации;
- повышение надежности;
- уменьшение массогабаритных характеристик.

2. Состав средств навигации ПЛАРБ

Навигационное вооружение ПЛАРБ различных стран близко по составу входящих в них средств навигации. Оно включает основные средства и средства коррекции. К основным относятся:

- инерциальные навигационные системы (ИНС);
- гироскопы;
- измерители скорости относительно воды и грунта (лаги);
- измерители глубины под килем (эхолоты).

К средствам коррекции относятся:

- приемо-передающая аппаратура для определения местоположения пл по маякам-ответчикам;
- приемники наземных и спутниковых радионавигационных систем;
- средства астронавигации;
- навигационный перископ;
- гравиметрическая аппаратура и другие средства.

Сушественно важно отметить, что измерители скорости относительно грунта и эхолоты входят в гидроакустическую подсистему, основой которой является гидроакустический комплекс (ГАК) [1].

Большинство из этих средств составляют те же, что используются на других подводных лодках, за исключением ИНС и средств коррекции ИНС. Ниже рассмотрены основные направления их развития.

Помимо перечисленных выше средств коррекции, работающих по источникам информации, расположенным вне объекта, в ряде ИНС ПЛАРБ используется и «внутренняя» коррекция, которая осуществляется с помощью дополнительного гироскопа повышенной точности.

Все навигационное оборудование ПЛАРБ, в частности типа «Огайо» США, входит в систему командования и управления кораблем и подразделяется на две подсистемы [2]:

- подсистему тактической навигации;
- навигационную подсистему стратегического оружия.

Подсистема тактической навигации предназначена для обеспечения навигационной безопасности плавания пл, выработки навигационных данных и выдачи их потребителям, автоматической прокладки пути пл на путевых картах, распределения ряда навигационных данных, вырабатываемых другими подсистемами. Хотя в этой подсистеме вырабатываются почти все навигационные параметры, точность их для решения задач системами оружия недостаточна. Существенно более точные данные вырабатываются в навигационной подсистеме стратегического оружия. Они передаются в подсистему тактической навигации, где усиливаются и выдаются потребителям. Аналогичные данные, вырабатываемые в подсистеме тактической навигации, используются как резервные. Выдача навигационных данных потребителям осуществляется через коммутатор синхроаналоговых сигналов подсистемы внутренней связи.

Следует отметить, что автономность (срок работы средств навигации без ввода коррекции от внешних, демаскирующих пл источников информации) во многом определяется качеством ИНС и ее математическим обеспечением. Исходя из этого развитию ИНС уделяется особое внимание.

3. Инерциальные навигационные системы ПЛАРБ

Инерциальные навигационные системы способны автономно вырабатывать практически все основные навигационные и динамические параметры, необходимые как для кораблевождения, так и для применения оружия. Они являются основой навигационного вооружения ПЛАРБ, поэтому совершенствованию ИНС за рубежом уделялось и уделяется особое внимание.

Анализ информационных материалов позволяет выделить следующие четыре направления, по которым шло и идет развитие ИНС для зарубежных, в частности США, ПЛАРБ:

1. Выбор и обоснование схемы построения ИНС и ее конструкторско-технологическая отработка;
2. Совершенствование основных чувствительных элементов ИНС (гироскопов и акселерометров) и отработка методов компенсации их погрешностей;
3. Создание автономных высокоточных «внутренних» и «внешних» средств коррекции для сброса накапливающихся в ИНС погрешностей;

4. Поиск путей создания новых, более совершенных гироскопов и акселерометров.

Это подтверждается, в частности, эволюцией развития инерциальных навигационных систем США. Рис. 1 отражает качественное изменение погрешности используемых ИНС марки МК различных модификаций по годам [3].

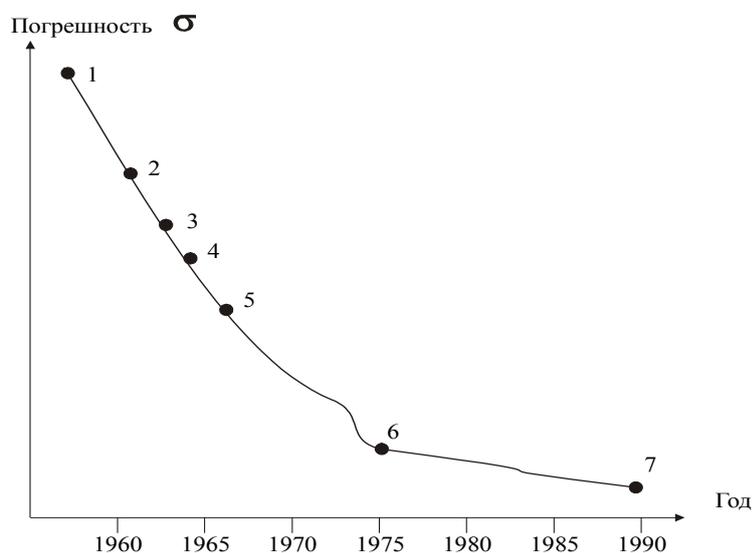


Рис. 1. Эволюция развития ИНС для ПЛАРБ США (объяснения в тексте)

На этом рисунке

1 – Mk 2 Mod 0 на поплавковых гироскопах G7A с корпусом из алюминия, была установлена на 6 ПЛАРБ с ракетой «Полярис-1»;

2 – Mk 2 Mod 2 на поплавковых гироскопах G7B с корпусом из бериллия, была установлена на 10 ПЛАРБ;

3 – Mk 2 Mod 4 на тех же гироскопах, но с улучшенной стабилизацией по температуре, была установлена на ПЛАРБ с ракетой «Полярис-A3»;

4 – Mk 2 Mod 3 с добавлением корректирующего гироскопа того же типа, была установлена на 27 ПЛАРБ;

5 – Mk 2 Mod 6 с использованием корректирующего гироскопа того же типа, но улучшенной конструкции, была установлена на 31 ПЛАРБ;

6 – Mk 2 Mod 7 с использованием в качестве корректирующего гироскопа ESGM с электростатическим подвесом ротора, вращающегося в вакууме, установлена на ПЛАРБ с ракетами «Трайдент-1»;

7 – Mk 1 Mod 0 с использованием электростатических гироскопов в качестве основных и единственных. В навигационное вооружение входят две такие ИНС (ESGN) с гироскопами G11A, имеющими дрейф порядка 10^{-5} °/час. Эти ИНС устанавливаются в ПЛАРБ с ракетами «Трайдент-2».

Связи корректора ESGM с ИНС МК 2 Mod 7 на поплавковых гироскопах приведены на схеме рис. 2.

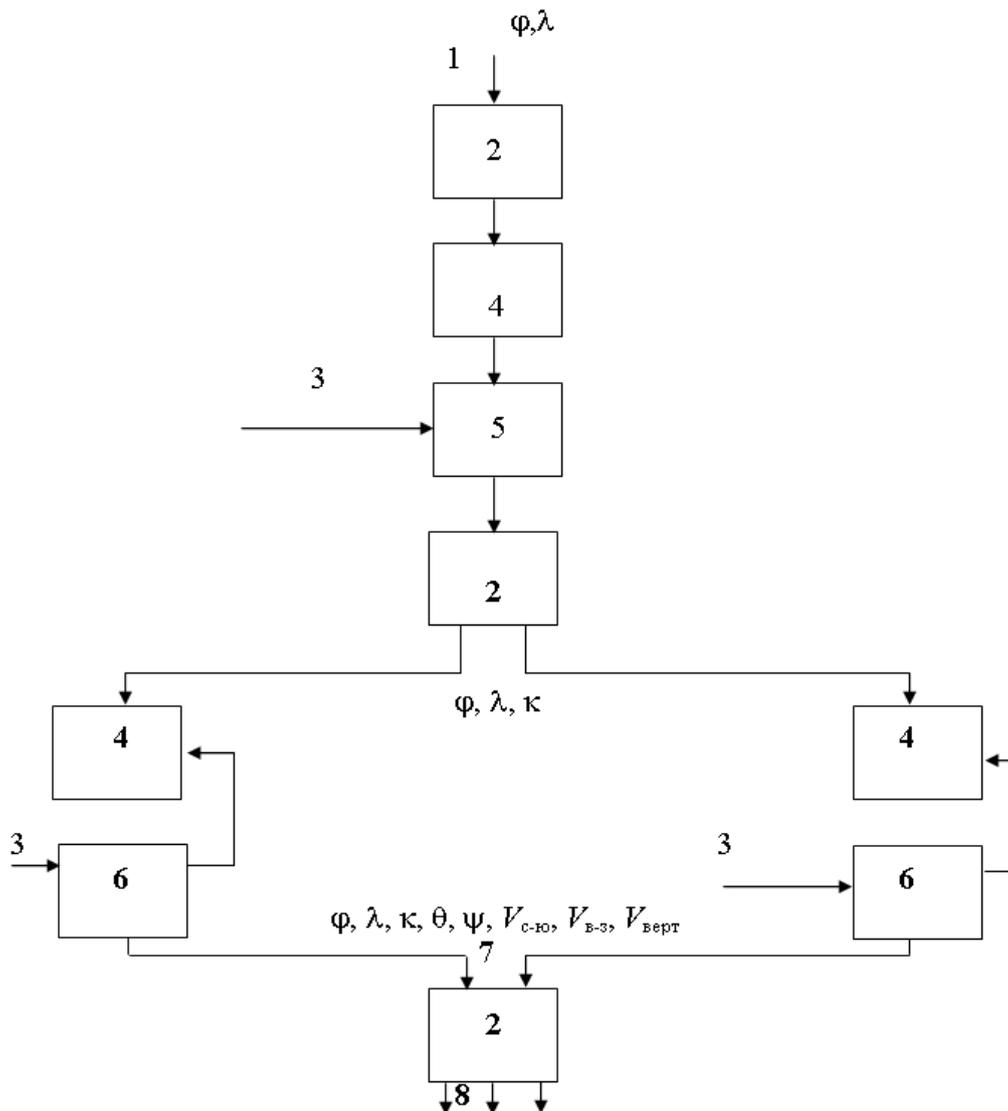


Рис. 2. Связи корректора ESGM с ИНС МК 2 Mod 7

- 1 – информация от внешних средств коррекции; 2 – центральная навигационная ЭВМ;
- 3 – информация от лага; 4 – фильтр Калмана; 5 – корректор ESGM; 6 – ИНС МК 2 Mod 7;
- 7 – выработанная ИНС МК 2 Mod 7 плюс корректор ESGM навигационная информация о координатах (φ, λ), курсе (K), элементах качки (θ, ψ), и составляющих скорости ($V_{c-ю}, V_{в-з}, V_{верт}$); 8 – выход информации на навигационный пульт, автопрокладчик и блок регистрации данных.

Характер накопления погрешности ИНС с корректором ESGM в НК ПЛАРБ с баллистической ракетой «Трайидент-1» и периодическое снижение этой погрешности за счет использования корректора ESGM отражены на рис. 3.

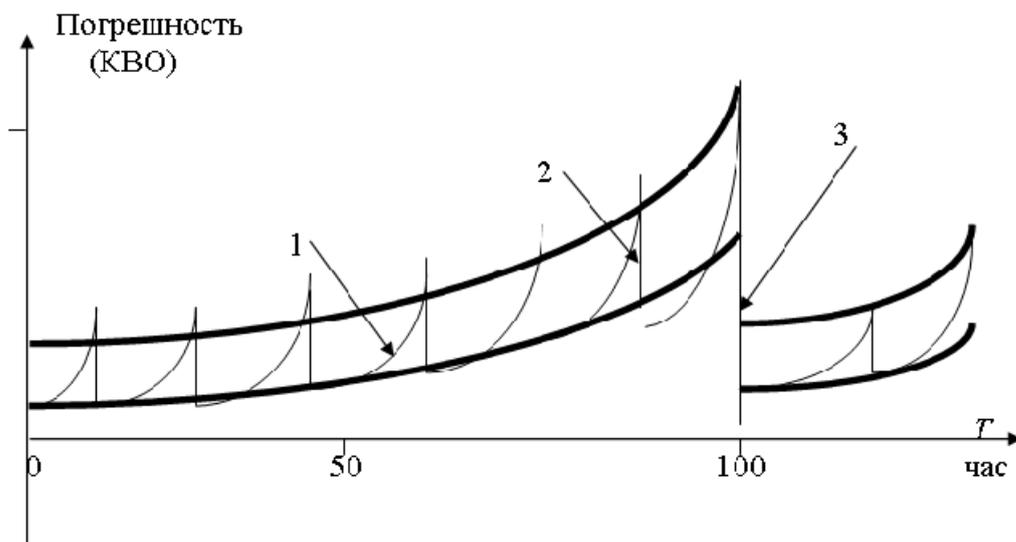


Рис. 3. Характер накопления погрешности ИНС НК ПЛАРБ с БР «Трайидент-1»

1 – накапливающаяся со временем T погрешность ИНС; 2 – внутренняя коррекция от корректора ESGM; 3 – коррекция от внешних средств

Связи ИНС МК1 Мод 0 с остальным навигационным вооружением показаны на рис 4.

На примере эволюции ИНС видно, что их развитие шло как по пути улучшения основных чувствительных элементов (в первую очередь поплавковых гироскопов), так и по пути создания гироскопов нового типа – электростатических, обладающих в принципе более высокими параметрами точности. Причем на первом этапе эти гироскопы использовались в качестве корректирующих и лишь с достижением удовлетворительной надежности – в качестве основных и единственных. Эта тенденция, по-видимому, сохранится и в дальнейшем. Более совершенные навигационные системы могут появиться как в результате конструкторско-технологических усовершенствований, так и за счет создания принципиально новых навигационных средств. Первый путь – эволюционный, он может привести к определенному улучшению лишь отдельных навигационных систем. Существенного прогресса следует ожидать от использования в интересах навигационного вооружения новых физических явлений и принципов. На предыдущих этапах развития ИНС это были электростатические гироскопы. Дальнейшее повышение точности ИНС ряд исследователей связывает с использованием сверхпроводимости и других низкотемпературных явлений.

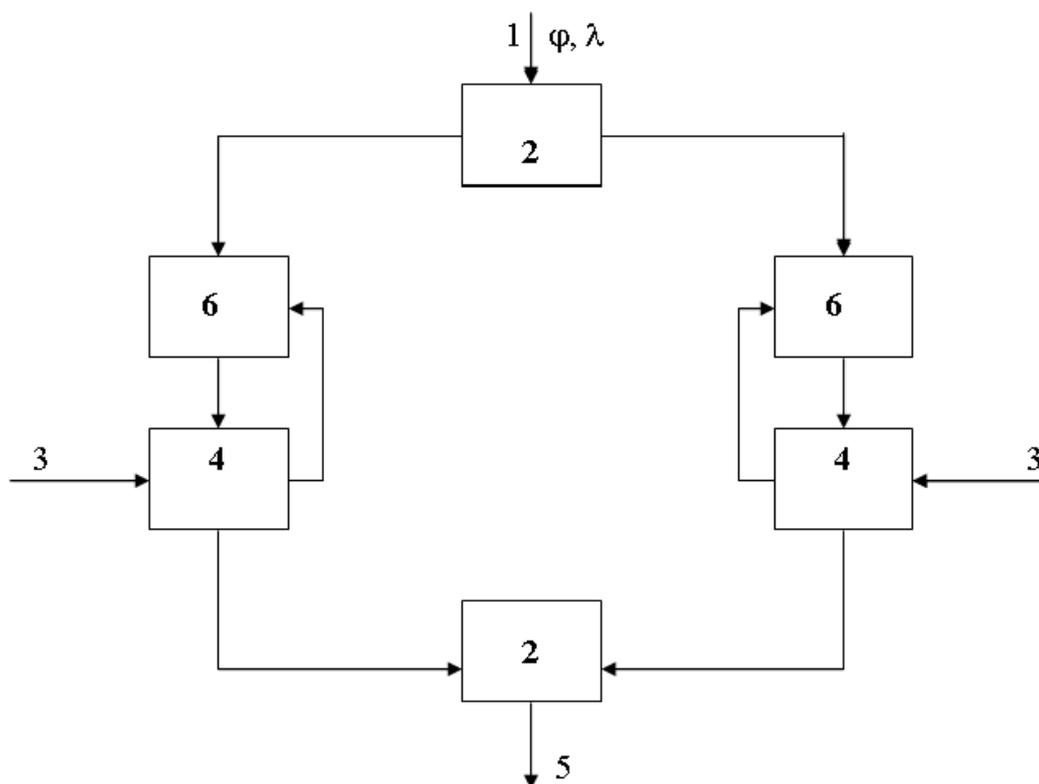


Рис. 4. Связи ИНС МК1 Мод 0 с другими системами навигации ПЛАРБ с БР «Трайдегт-2»

1 – информация от внешних средств коррекции; 2 – блоки центральной навигационной ЭВМ;
3 – информация от лага; 4 – ИНС ESGM МК 1 Мод 0; 5 – выход навигационной информации;
6 – фильтр Калмана.

В Стенфордском университете (США) уже создан гироскоп на основе сверхпроводимости, он обладает дрейфом 10^{-11} °/ч, что в миллион раз меньше достигнутого уровня дрейфа используемых в ИНС ПЛАРБ электростатических гироскопах. В настоящее время этот гироскоп помещен на спутнике и используется в интересах подтверждения основных положений теории относительности. Его ротор диаметром 1,5 дюйма, изготовленный из чистейшего кварца, покрыт ниобием толщиной 1мк. Несферичность ротора – меньше сотой доли микрона, а скорость его вращения – 10^4 оборотов в минуту.

4. Основные направления развития «внешних» средств коррекции ИНС ПЛАРБ

Наряду с созданием более совершенной ИНС, которая и в перспективе остается основной навигационной системой ПЛАРБ, большое внимание уделяется также развитию автономных высокоточных не демаскирующих пл

средств коррекции, расположенным вне пл и способных работать в любых климатических условиях, на любых широтах и любой глубине плавания. Эти средства разрабатываются в модульном исполнении. В основе их работы лежат физические поля Земли (рельеф дна, гравитационное и магнитное поля). Подтверждением такого заключения является разработка в последние десятилетия гравиметрического модуля коррекции. В состав модуля входят гравиметры и гравитационные градиентометры. Гравиметры обеспечивают измерение гравитационных аномалий, а гравитационные градиентометры – измерение силы тяжести в трех плоскостях.

Гравиметры и градиентометры используются для определения местоположения пл в предварительно отснятых гравиметрических полигонах путем сравнения их показаний с картой аномалий. Градиентометры в этих условиях обладают значительно более высокой точностью. Кроме того, данные градиентометров используются для:

- определения текущих значений уклонений отвесной линии (УОЛ), которые непосредственно сказываются на погрешностях ИНС;
- измерения вертикальных составляющих кориолисова ускорения;
- коррекции шулеровских составляющих погрешностей скорости, вырабатываемой ИНС;
- обнаружения локальных аномалий рельефа дна, что позволит при соответствующей обработке иметь картину трехмерного отображения местного рельефа в реальном времени и при наличии карты рельефа участка дна это позволит получить информацию о местоположении пл.

Учет влияния УОЛ на работу ИНС в США начат с МК 2 Mod 6. Хотя еще в конце 1960-х годов было подсчитано, что без учета УОЛ даже при идеальных гироскопах и акселерометрах погрешность определения «инерциальной» скорости не может быть меньше 0,1 узла [4].

Один из вариантов рассматриваемого гравиметрического модуля после продолжительных разработок и испытаний на судне командования военных перевозок ВМС США «Вангард» с середины 1980-х годов стал устанавливаться на ПЛАРБ [5]. Модуль содержит гравиметр и три гравитационных градиентометра, смонтированных на изолированной от вибрации гиростабилизированной платформе. Гравиметр построен на одном высокоточном акселерометре, а каждый градиентометр – на трех акселерометрах, смонтированных на вращающейся площадке (столе). Информация от трех ортогонально установленных градиентометров позволяет определять шесть составляющих градиентов поля тяжести. Ведущее положение в разработке данного способа коррекции занимает фирма «Lockheed Martin». Работы в области разработки модуля определения места и коррекции погрешностей ИНС по гравиметрическому полю Земли велись в США в рамках программного элемента 0603562N «Тактические боевые системы для пл» по проекту V1739 «Поддержка специальных операций пл». На разработку модуля в 1996 г. было выделено 3,5 млн. долларов США. В

рамках этого программного элемента в 1996 г. были успешно проведены испытания модуля и продемонстрированы возможности получения трехмерного изображения подводной обстановки вблизи подводной лодки в реальном масштабе времени.

Эта возможность обеспечивается путем обработки выходных данных гравитационных градиентометров с помощью сложных алгоритмов. Технологии, которые представляют собой уникальный набор алгоритмов для решения сложной обратной задачи определения местности по изменению напряженности характерного для нее гравитационного поля, представляются на пульте оператора. Разработчиком этой технологии и алгоритмов является фирма «Lockheed Martin». Демонстрация работы модуля по оценке подводной обстановки проводилась во время входа ПЛАРБ в подводном положении в канал порта Канаверал (Флорида) и во время прохода пролива между Багамскими островами.

Модуль по оценке подводной обстановки позволяет пл автономно, скрытно и безопасно проводить операции в мелководных районах боевых действий и вблизи дна. Такие маневры, как вход и выход из гаваней и бухт, могут быть также выполнены скрытно и безопасно. Использование модуля позволяет уменьшить время реакции, увеличить живучесть и эффективность пл, а также увеличить количество задач, решаемых пл, где может потребоваться быстрая ответная реакция на действия противника, или в районах, где оперативная обстановка недостаточно известна.

Анализ результатов испытаний гравиметрического модуля показал, что он в полигоне может вырабатывать навигационные данные с требуемой для ПЛАРБ точностью без информации от гидроакустического лага (ГАЛ), и периодической коррекции местоположения пл помощью СНС «Навстар», использование которых может демаскировать пл. В тоже время точность выработки с таким корректором скорости ПЛАРБ относительно грунта оказалась несколько ниже, чем у системы ИНС+ГАЛ [5].

Несмотря на положительные результаты отмеченных выше испытаний, рассматриваемый модуль, судя по имеющейся информации, не в полной мере удовлетворяет предъявляемым к нему требованиям. Поэтому продолжают интенсивные работы по его улучшению. В основе этих улучшений лежит также использование сверхпроводимости и других низкотемпературных явлений и эффектов и переход в связи с этим от трех к одному высокоточному тензорному гравиметрическому градиентометру [6–8].

Наряду с использованием гравитационного поля Земли, в интересах коррекции ИНС ПЛАРБ значительное внимание уделяется также использованию и магнитного поля Земли. Известно, что в соответствии с 10-летним планом океанографических исследований (TENOK) в США в 1963–1972 гг. проводились широкомасштабные исследования МПЗ с нанесением его параметров на карты для последующего использования. Фирмой E-Systems еще в 1970-х годах была разработана для этой цели

система MAGCOM (Magnetic Field Contours) [9]. В 1981 г. в районе Стокгольма на надводном судне проводились широкие экспериментальные исследования по определению скорости и местоположения судна по МПЗ [10]. Магнитная система состояла из двух морских протонных магнитометров, буксируемых за судном на расстоянии 30 м друг от друга. На состоявшейся 25–27 апреля 2006 г. в г. Сан-Диего конференции PLANS-2006 (Position Location And Navigation Symposium) сотрудником фирмы Goodrich Corporation сделан доклад «Геомагнитная навигация, расширяющая возможности магнитного компаса». Он был посвящен перспективам практической реализации интегрированных инерциально-магнитометрических систем, корректируемых по данным карты геомагнитного поля, как альтернативы инерциально-спутниковым системам для применений, в которых требования автономности и скрытности являются критическими. Этот доклад на конференции был признан лучшим, что указывает на его актуальность и значительный интерес к этому новому для средств коррекции подходу.

Магнитометрические датчики, разнесенные по корпусу пл, позволяют осуществлять также постоянный контроль за намагниченностью пл и поддерживать ее на заданном уровне.

Дальнейшее развитие средств навигации для ПЛАРБ, естественно, зависит от развития самих ПЛАРБ.

5. Перспективы развития ПЛАРБ зарубежных стран

В 1988 г. в США было 37 ПЛАРБ [3]. В 2000 г. – 18 ПЛАРБ типа «Огайо», которые введены в строй в период с 1981 по 1997 годы [11]. 10 из них вооружены баллистическими ракетами «Трайидент-2», а 8 – «Трайидент-1». Четыре из них переоборудуются на «Трайидент-2». Оставшиеся четыре планируется вывести из стратегических ядерных сил США [12]. Состояние выполнения этого плана отражено ниже. Недавно ВМС США продлили эксплуатационные сроки ПЛАРБ с 30 до 42 лет [13]. При этом первая из этих ПЛАРБ должна быть выведена из боевого состава в 2029 г.

В январе 2002 г. ВМС США выдали заказ с контрактом стоимостью 248 млн. долл. на модификацию «Трайидент-2» [14].

Военные специалисты США считают, что ПЛАРБ типа «Огайо» с баллистическими ракетами «Трайидент-2» удовлетворяют требованиям XXI столетия. На борту каждой из них по 24 ракеты с 9–14 боеголовками, заряд которых эквивалентен 475 кт тринитротолуола. Эти ракеты имеют дальность полета 11 тыс. км. и точность стрельбы до 100 м. Скорость ПЛАРБ – до 25 узлов, предельная глубина погружения – 300 м. Они патрулируют на глубине 30–40 метров со скоростью в несколько узлов в течение 50–70 суток.

Дальнейшее развитие ПЛАРБ в США планируется проводить тремя путями [15]:

- 1) по направлению совершенствования пл с системами «Трайидент»;
- 2) на базе перспективных многоцелевых атомных пл типа «Вирджиния»;

3) на основе принципиально нового проекта.

В августе 2003 г. ВМС США подписали контракт на строительство до 2008 г. 6 ПЛАРБ класса «Вирджиния», по одной лодке в год [16]. Сумма контракта – 8,4 миллиардов долл. Согласно долгосрочному плану к 2035 г. на вооружении США должно быть 37–40 ПЛАРБ класса «Вирджиния» [16].

В октябре 1999 г. Пентагон ввел в действие план СИОП-00 (План ведения ядерной войны) [17]. Если в 1986 г. подобный план предусматривал возможность поражения до 16000 целей, прежде всего на территории СССР, то, по сообщениям печати, в списке целей 2000 г. на территории России таких объектов оказалось 2260.

Указанные выше четыре ПЛАРБ типа «Огайо» с ракетами «Трайидент–1» военное руководство США переоборудует в многоцелевые пл – носители крылатых ракет «Томахок» (SSGN) [18]. 22 из 24 пусковых шахт предполагается переоборудовать для размещения 132 крылатых ракет или (по другой версии) морских тактических баллистических ракет малой (до 300 миль) дальности. Оставшиеся две пусковые шахты преобразовываются в шлюзовые камеры для сил специального назначения (спецназа), что дает возможность размещаемым здесь 66 смешанным десантно-диверсионными группам иметь доступ к двум системам доставки пловцов, присоединенных к легкому корпусу [16].

Первая ПЛАРБ «Огайо» уже переоборудована и вернулась в строй ВМС США [16]. Вместо 24 баллистических ракет «Трайидент» в пусковых шахтах размещены крылатые ракеты «Тамагавк» или специальные контейнеры для спецназа, всего их 66. В двух шахтах оборудованы шлюзовые камеры для выхода и входа спецназа под водой. Две другие ПЛАРБ должны вернуться в строй в 2006 г, последняя – в сентябре 2007 г. Стоимость переоборудования всех четырех лодок оценивается в 1,5 миллиарда долларов США. Выполнение этого плана сохраняет все имеющееся на ПЛАРБ оборудование тактического наблюдения и сбора разведывательных данных, предоставляя им возможность проводить разведку как до, так и во время военных действий. Одновременно сохраняются возможности этих пл в части боевых действий против пл и надводных кораблей, включающие полный ассортимент датчиков и торпед, необходимых для обнаружения и уничтожения кораблей противника.

В состав ВМС Англии входят четыре ПЛАРБ типа «Вэнгард», вооруженных 16 баллистическими ракетами «Трайидент-2», навигационное вооружение этих ПЛАРБ, по-видимому, аналогично американскому.

За основу нового проекта ПЛАРБ в Англии, как и США, также взят вариант перспективной многоцелевой атомной пл.

Во Франции первая ПЛАРБ «Редутабль» вступила в строй в 1971 г. В настоящее время Франция имеет четыре ПЛАРБ. С целью замены устаревших ПЛАРБ ведется строительство нового поколения ПЛАРБ типа «Триумфан» с 16 баллистическими ракетами типа М 45 (шесть боеголовок мощностью по 0,15 Мт., дальностью стрельбы до 6000 км). Первая введена в строй в конце

1996 г.; вторая – в 1999 г.; третью планировалось ввести в 2002 г., а четвертую – в 2005–2007 гг. [19]. К 2008 г. в боевом составе ВМС Франции планируется иметь четыре лодки этого типа. С 2010 г. запланировано их перевооружение.

В Китае первая ПЛАРБ типа «Ся» создана в 2005 г. Успешно ведется разработка нового проекта атомной пл с баллистической ракетой типа 094. На лодке предполагается установить 16 ракет с максимальной дальностью 8000 км. Всего должно быть построено четыре ПЛАРБ [15].

Выводы

1. Навигационное вооружение зарубежных ПЛАРБ развивается одновременно с развитием оружия.

2. Навигационное вооружение ПЛАРБ различных стран близко по составу входящих в него средств. Большинство из этих средств такое же, как и для пл других классов, за исключением ИНС и средств коррекции.

3. Основу навигационного вооружения ПЛАРБ составляют ИНС, развитие которых велось как по линии совершенствования их основных чувствительных элементов (гироскопов и акселерометров), так и по линии создания принципиально новых. Новые, более совершенные чувствительные элементы вначале использовались в качестве корректирующих, а с повышением их надежности – в качестве основных.

4. Помимо совершенствования ИНС, развитие навигационного вооружения ПЛАРБ происходит и по линии создания других, более совершенных средств навигации. Особое внимание при этом уделяется созданию высокоточных, не демаскирующих пл, автономных средств коррекции, работающих, в частности, по физическим полям Земли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Electronic News. –1998. – 34. – 2/5. – No 1704. – P. 13
2. Janes Weapon Systems 1986-87, 241, 471, 635, 813, 1119; 1987- 88, 29, 30.
3. Зарубежное военное обозрение. – 2000. – № 3. – С. 40.
4. Astron and Aeron. 1969. –Vol. 7. – No. 4. – P. 70.
5. John Moryl Advanced Submarine Navigation Svstems // Sea Technolodgy. – 1996. – P. 33–38.
6. Ghan H. A. et al. Superconducting Techniques for Graviti Survey and Inertial Navigation // IEEE Transactions on Magnetics 1986. –V. VAG 21. – No. 2. – P. 411–414.
7. Moody M. V. et al. Superconducting gravity gradiometer for space and terristial applications // J. Appl. Phys. –1986. – Vol. 60. – No. 12. – 15 dec. – P. 4308–4315.
8. Marson I., Faller J. E. G-the aculetion of gravity its measurement and its importance. J Phys. E Ski Instrum. 1986. – Vol. 19. – P. 23–32.
9. Klass P. J. Av. Week and Technologv. – 1974. – Vol. 100. – No. 8.
10. The Journal of Navigation. – 1982. – Vol. 35. – No. 2. – P. 242–254.
11. Зарубежное военное обозрение. – 2000. – № 3. – С. 41.
12. Морской сборник. – 1998. – Вып. 8. – С. 77.
13. Missile and Rocket. – 2000. – Vol. 1. – No 9. – P. 4.
14. Janes International Defense Review. March 2002. – P. 35–43.
15. Половинкин В. Н. История и современность учит тех, кто хочет учиться // Оборонный заказ. – 2006. – №8. – С. 43–47.
16. Военно-техническое сотрудничество // – 2006. – № 5. – С. 44. [АРМС-ТАСС.02.02.06]

17. Зарубежное военное обозрение. – 2001. – № 8. – С. 2–3.
18. William J. Perry secretary of Annual Report to the President and Congress Washington: Department of Defense, February 1995. – P. 83–92.
19. Зарубежное военное обозрение. – 2000. – № 1. – С. 27.

THE MAIN DEVELOPMENT TRENDS FOR FOREIGN NAVIGATIONAL AIDS OF NUCLEAR BALLISTIC MISSILE SUBMARINES

P. I. Maleyev
(GNINGI, RF MoD)

Like the missile armament, the navigation equipment of the nuclear ballistic missile submarines had several development stages in foreign countries. As the inertial navigation system (INS) is the main navigation system of these submarines, at each stage the greatest attention was paid to its development. The development was carried out in two directions: improvement of the existing and creation of the new, more precise main sensors (gyroscopes and accelerometers) based on new physical principles and phenomena. At the same time, considerable attention was paid, at each stage of the missile weapons development, to creation of more precise correction means that would not result in detection of submarines. In this article the stages of development of inertial navigation systems and their means of correction are mainly considered. The rest of navigational aids are similar to those used in the other classes of submarines

ГРНТИ 78.25.31

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЕТРОВОГО ДРЕЙФА КОРАБЛЯ ПО ОБСЕРВОВАННЫМ КООРДИНАТАМ

**Ю. А. ГЛУХОВ,
Л. А. ЗАЯЦ
(ГНИНГИ МО РФ)**

В статье предлагается вариант автоматизации задачи определения коэффициентов дрейфа корабля на различных скоростях хода.

Качественное определение маневренных элементов корабля и их учет являются залогом безаварийного в навигационном отношении плавания.

Один из составляющих маневренных элементов корабля, определяемых при проведении ходовых испытаний головного корабля, – это коэффициент его дрейфа. В дальнейшем он заносится в формуляры всех кораблей данной серии (проекта).

Для корректного решения задачи случайная погрешность определения места корабля должна быть не более 5–10 м ($P = 0,95$), т. е. должен использоваться приемник спутниковых навигационных систем с дифференциальными поправками.

В ПОМЭК-85 [1] приведена зависимость:

$$V_{OY} = K_{др}K_{п}U_{тр}, \quad (1)$$

где V_{OY} – поперечная относительная скорость корабля (от ветра), уз;
 $K_{др}$ – коэффициент дрейфа, уз/м/с;
 $K_{п}$ – коэффициент парусности корабля, б/р;
 $U_{тр}$ – траверзная (поперечная) составляющая скорости истинного ветра, м/с.
 В свою очередь

$$K_{п} = \sqrt{S/S_0}, \quad (2)$$

где S, S_0 – площади проекций соответственно надводной и подводной частей корпуса корабля на его диаметральную плоскость, определяемые как функции осадки корабля h по чертежу «Продольный разрез корабля».

После соответствующих обмеров чертежа и вычислений по формуле (2), $K_{п}$ как функции h вводят в память ЭВМ в табличном виде до начала испытаний (см. пример в табл. 1).

Таблица 1

Зависимость коэффициентов парусности корабля от его осадки

h (м)	$K_{п}$
4,4	1,013
4,2	1,063
-	-
2,4	1,682

В дальнейшем фактическое значение $K_{п}$ находят методом линейной интерполяции после ввода с пульта осадки корабля h .

Вычисляют также $U_{тр}$

$$U_{тр} = U \sin(K - K_U), \quad (3)$$

где U – скорость истинного ветра;
 K_U – направление истинного ветра, поступающие автоматически с метеостанции или вводимые с пульта вручную;
 K – курс корабля (от гирокурсоуказателя).
 Из формулы (1) имеем

$$K_{др} = \frac{V_{oy}}{K_{п}U_{тр}}. \quad (4)$$

Так как K_{Π} и $U_{\text{Тр}}$ известны, то для определения $K_{\text{др}}$ необходимо знать $V_{\text{ОУ}}$. По точным наблюдениям можно найти суммарный снос от ветра и течения. При этом если корабль следует строго на ветер или под ветер, то вектор суммарного сноса равен вектору течения. Найдя на этих курсах вектор течения, и следуя затем лагом к ветру, когда дрейф максимален, можно найти вектор ветрового дрейфа путем вычитания вектора течения из вектора суммарного сноса.

Для уменьшения влияния изменчивости течения на точность результата измерений, необходимо при постоянной скорости хода выполнять маневр «коробочка», когда последовательные курсы корабля образуют квадрат, две стороны которого параллельны направлению ветра, а две другие – перпендикулярны ему. Первый курс (измерительный галс) должен располагаться на ветер или под ветер, второй – перпендикулярно ему (любым бортом к ветру). Остальные два курса определяются предложенной схемой маневрирования. Время лежания на каждом галсе $t_{\text{г}}$ должно быть примерно одинаковым (5–6 мин.). Тогда общее время выполнения «коробочки» с учетом циркуляций составит примерно 30–35 мин.

Обозначим приращение вектора течения за время одного галса как $\Delta \bar{V}_T$. Если течение изменяется с постоянной скоростью (равномерно), то

$$\begin{aligned}\bar{V}_{T2} &= \bar{V}_{T1} + \Delta \bar{V}_T; \\ \bar{V}_{T3} &= \bar{V}_{T1} + 2\Delta \bar{V}_T; \\ \bar{V}_{T4} &= \bar{V}_{T1} + 3\Delta \bar{V}_T,\end{aligned}\tag{5}$$

где \bar{V}_{T1} , \bar{V}_{T2} , \bar{V}_{T3} , \bar{V}_{T4} – векторы течения на соответствующих галсах. Так как течение измеряется только на первом и третьем галсах, то

$$\Delta \bar{V}_T = \frac{\bar{V}_{T3} - \bar{V}_{T1}}{2}.\tag{6}$$

Подставив выражение (6) в формулу (5), получим

$$\begin{aligned}\bar{V}_{T2} &= \frac{\bar{V}_{T1} + \bar{V}_{T3}}{2}; \\ \bar{V}_{T4} &= \frac{3\bar{V}_{T3} - \bar{V}_{T1}}{2}.\end{aligned}\tag{7}$$

Если течение изменяется неравномерно, то остаются погрешности знания V_T на втором и четвертом галсах, которые невелики, так как в этих

случаях само течение практически постоянно (для преобладающих приливо-отливных течений).

Известно [1], что $K_{др}$ зависит от продольной относительной скорости хода $V_{ох}$: чем больше скорость, тем меньше $K_{др}$. Эта зависимость приближенно описывается формулой

$$K_{др} = ab^{-V_{ох}}, \quad (8)$$

где a, b – константы, определяемые по результатам испытаний.

Поэтому необходимо определять $K_{др}$ на различных режимах хода. Поскольку согласно формуле (8) $K_{др}$ меняется наиболее быстро при малых ходах, то предлагается использовать следующие режимы хода:

- на стопе (в дрейфе);
- самый малый ход (СМХ);
- средний ход (СХ);
- самый полный ход (СПХ).

Промежуточные значения $K_{др}$ находят методом интерполяции с использованием формулы (8).

Испытания и набор информации производят следующим образом. Включают задачу «Определения коэффициента дрейфа», проверяют наличие в памяти табл. 1 $K_{П}$, а также поступление данных от корабельной метеостанции, если она есть (исправна), и связь с ней предусмотрена. В противном случае выбирают вариант «Ручной ввод ветра». Вводят с пульта осадку h , время лежания на галсе $t_{Г}$, а также режим хода (на стопе, МХ, СХ или СПХ).

Испытания начинают с режима «На стопе». В этом случае маневр «коробочка» не выполняется: второй и четвертый галсы заменяются лежанием корабля в дрейфе. После поворота на заданный курс (первый галс) дают самый малый ход, и как только установится постоянная скорость (что контролируют по лагу), нажимают клавишу «Начало галса». Запоминают $N_{Гj}$ -порядковый номер галса на введенном ранее k -ом режиме хода и на моменты прихода из ПИ СНС (РНС) обсервованных координат начинают фиксировать:

- T_{ji} – судовое время, ч.;
- K_{ji} – текущий курс, рад.;
- $V_{охji}$ – текущую продольную относительную скорость по лагу, уз.;
- $\varphi_{ji}, \lambda_{ji}$ – обсервованные координаты, рад.

Как только выполнится условие

$$(T_{ji} - T_{j1}) > t_{Г}, \quad (9)$$

запоминают $i=n$, прекращают набор информации и вырабатывают сигнал «Конец первого галса», сопровождаемый зуммером, после чего приступают к вычислениям.

Находят:

1) T'_{ji} – приведенные моменты времени

$$\left. \begin{aligned} T'_{ji} &= T_{ji}, \text{ если } T_{ji} - T_{j1} > 0; \\ T'_{ji} &= T_{ji} + 24\text{ч}, \text{ если } T_{ji} - T_{j1} < 0; \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

2) средние значения $T'_j, K_j, V_{OXj}, \varphi_j, \lambda_j$

$$\left. \begin{aligned} T'_{j_{\text{нб}}} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T'_{ji}; K_{j_{\text{нб}}} = [K_{j1} + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (K_{ji} - K_{j1})^3]^{1/4}; \\ V_{OX_{j_{\text{нб}}}} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{OX_{ji}}; \varphi_{j_{\text{нб}}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_{ji}; \lambda_{j_{\text{нб}}} = [\lambda_{j1} + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\lambda_{ji} - \lambda_{j1})^1]^{1/1}; \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

3) $V_{OX_{Nj}}, V_{OX_{Ej}}$ – северную и восточную составляющие продольной относительной скорости на галсе

$$\left. \begin{aligned} V_{OX_{Nj}} &= V_{OX_{j_{\text{нб}}}} \cos K_{j_{\text{нб}}}; \\ V_{OX_{Ej}} &= V_{OX_{j_{\text{нб}}}} \sin K_{j_{\text{нб}}}; \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

4) V_{Nj}, V_{Ej} – составляющие абсолютной скорости на галсе:

$$\left. \begin{aligned} V_{Nj} &= \frac{\sum_{i=1}^n (\varphi_{ji} - \varphi_{j_{\text{нб}}})(T'_{ji} - T'_{j_{\text{нб}}})}{\sum_{i=1}^n (T'_{ji} - T'_{j_{\text{нб}}})^2}; \\ V_{Ej} &= \frac{\cos \varphi_{j_{\text{нб}}} \sum_{i=1}^n (\lambda_{ji} - \lambda_{j_{\text{нб}}})^1 (T'_{ji} - T'_{j_{\text{нб}}})}{\sum_{i=1}^n (T'_{ji} - T'_{j_{\text{нб}}})^2}; \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

5) V_{TNj}, V_{TEj} – составляющие скорости течения

$$\left. \begin{aligned} V_{TNj} &= V_{Nj} - V_{OX_{Nj}}; \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$V_{TEj} = V_{Ej} - V_{OX_{Ej}} ;$$

б) (для контроля) скорость и направление течения, которые высвечивают на дисплее

$$\left. \begin{aligned} V_{Tj} &= \sqrt{V_{TNj}^2 + V_{TEj}^2} && \text{(уз.);} \\ K_{Tj} &= \arctg^2 \frac{V_{TEj}}{V_{TNj}} && \text{(град.).} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

После появления сигнала «Конец первого галса» поворачивают на курс, перпендикулярный направлению ветра, дают задний ход, гасят инерцию и ложатся в дрейф.

По установлении процесса дрейфа (курс корабля практически не меняется) нажимают клавишу «Начало галса», запоминают порядковый номер галса ($N_{\Gamma_j}=2$) и на моменты получения от ПИ СНС (PHC) обсервованных координат начинают фиксировать:

$$T_{ji}, K_{ji}, \varphi_{ji}, \lambda_{ji}, U_{ji}, K_{Uji}.$$

Как только выполнится условие (9), прекращают набор информации, и вырабатывают сигнал «Конец j -го галса».

Примечание: если нет метеостанции, U, K_U вводят с пульта непрерывно по мере их измерения с помощью анемометра и круга Севастопольской морской обсерватории (СМО).

Находят:

- 1) $V_{Nj}, V_{Ej}, K_{j_{\text{но}}}$ по формулам (10), (11), (13);
- 2) V_{yj} – поперечную составляющую абсолютной скорости на галсе

$$V_{yj} = V_{Ej} \cos K_{j_{\text{но}}} - V_{Nj} \sin K_{j_{\text{но}}} ; \quad (16)$$

- 3) средние значения $U_{j_{\text{но}}}, K_{U_{j_{\text{но}}}}$

$$U_{j_{\text{но}}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{ji} ; \quad K_{U_{j_{\text{но}}}} = [K_{U_{j_1}} + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (K_{U_{ji}} - K_{U_{j_1}})^3]^{(4)} ; \quad (17)$$

4) U_{TPj} – траверзную составляющую истинного ветра на галсе

$$U_{TPj} = U_{j_{\text{нб}}} \sin(K_{j_{\text{нб}}} - K_{U_{j_{\text{нб}}}}). \quad (18)$$

После появления сигнала «Конец второго галса» дают самый малый ход, поворачивают на третий галс и т. д.

Измерения и вычисления на третьем и четвертом галсах делают аналогично первому и второму галсам соответственно. Как только выполнится условие (9) при $j=4$, вырабатывают сигнал «Конец измерений на стопе». Определяют $K_{\text{ДР}}$ следующим образом:

Находят:

1) северную и восточную составляющие вектора течения на втором и четвертом галсах

$$\left. \begin{aligned} V_{TN2} &= \frac{V_{TN1} + V_{TN3}}{2}; & V_{TE2} &= \frac{V_{TE1} + V_{TE3}}{2}; \\ V_{TN4} &= \frac{3V_{TN3} - V_{TN1}}{2}; & V_{TE4} &= \frac{3V_{TE3} - V_{TE1}}{2}; \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

где V_{TN2}, V_{TN4} – северные составляющие скорости течения;

V_{TE2}, V_{TE4} – восточные составляющие скорости течения;

2) находят V_{TY2}, V_{TY4} – поперечные составляющие скорости течения на втором и четвертом галсах

$$\left. \begin{aligned} V_{TY2} &= V_{TE2} \cos K_{CP2} - V_{TN2} \sin K_{CP2}; \\ V_{TY4} &= V_{TE4} \cos K_{CP4} - V_{TN4} \sin K_{CP4}; \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

3) находят V_{OY2}, V_{OY4} поперечные составляющие относительной скорости корабля на втором и четвертом галсах

$$\left. \begin{aligned} V_{OY2} &= V_{Y2} - V_{TY2}; \\ V_{OY4} &= V_{Y4} - V_{TY4}; \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

4) находят коэффициенты дрейфа на втором и четвертом галсах

$$\left. \begin{aligned} K_{ДР2} &= \left| \frac{V_{OY2}}{U_{\text{ОД2}} K_I} \right|; \\ K_{ДР4} &= \left| \frac{V_{OY4}}{U_{\text{ОД4}} K_I} \right|, \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

где K_{Π} находят из табл. 1 по введенной ранее осадке корабля h ;

5) осредненный коэффициент дрейфа на κ -ом режиме хода

$$K_{ДР\kappa} = \frac{K_{\text{АД2}} + K_{\text{АД4}}}{2};$$

запоминают $K_{ДР\kappa}$ и соответствующую ему $V_{OX\kappa}$ – продольную относительную скорость

$$V_{OX\kappa} = \frac{V_{OX_{\text{н2}}} + V_{OX_{\text{н4}}}}{2}.$$

Если режим «на стопе», то $V_{OX\kappa} = 0$ (не измеряется).

После выработки сигнала «Конец измерений на стопе» выполняют маневры «коробочка» последовательно на самом малом, среднем и самом полном ходу. Все измерения, вычисления и сигналы аналогичны режиму «На стопе». Кроме того, на втором и четвертом галсах дополнительно находят $V_{OX_{\text{н2}}}$, $V_{OX_{\text{н4}}}$ аналогично первому и третьему галсам.

Если в процессе измерений меняли курс или скорость для расхождения с целями и т. п., то нажимают клавишу «Стирание», при этом вся информация, набранная как на текущем, так и на предыдущих галсах данного режима хода, обнуляется.

После набора данных на всех режимах хода ($\kappa = 4$) вырабатывают сигнал «Конец испытаний». Составляют итоговую таблицу (см. пример – табл. 2.).

Если на испытаниях режимы хода не соответствовали последовательности, указанной в табл. 1, то производят соответствующую сортировку в порядке возрастания скорости.

Таблица 2

Зависимость $K_{дрs}$ от продольной относительной скорости корабля

№ п/п (k)	Режим хода	V_{OX} , уз	$K_{др}$, уз/м/с
1	На стопе	0	0,0924
2	СМХ	5,73	0,0315
3	СХ	12,05	0,0212
4	СПХ	17,16	0,0156

Составляют таблицу зависимости $K_{дрs}$ для V_{OXs} от 0 до СПХ через 2 узла ($s=1, \dots, n$) (табл. 3), для чего :

- находят n – число строк

$$n = \text{int}\{V_{OX\max}/2\} + 2,$$

где $V_{OX\max}$ [уз] – из табл. 2;

- последовательно для каждого $V_{OXs} < V_{OXn}$ находят разности $V_{OXs} - V_{OXk}$ и отбирают те из них, которые больше 0;

- находят минимальную разность $(V_{OXs} - V_{OXk})_{\min} > 0 = \min_k \{(V_{OXs} - V_{OXk}) > 0\}$, $k=1, 2, 3, 4$ и запоминают $k=m$;

- используя данные табл. 2, делают интерполяцию для V_{OXs} с учетом зависимости $K_{др} = ab^{-V_{OX}}$:

$$n K_{дрm} = \ln a - V_{OXm} \ln b;$$

$$\ln K_{дрm+1} = \ln a - V_{OXm+1} \ln b;$$

$$\ln b = \frac{\ln K_{дрm} - \ln K_{дрm+1}}{V_{OXm+1} - V_{OXm}};$$

$$\ln a = \ln K_{дрm} + V_{OXm} \ln b;$$

$$b = e^{\ln b}; a = e^{\ln a};$$

$$K_{дрs} = ab^{-V_{OXs}};$$

- для $V_{OXs} = V_{OXn}$

$$K_{дрn} = ab^{-V_{OXn}},$$

где a, b – последние найденные константы (для $V_{OXn-1}, K_{дрn-1}$).

Зависимость $K_{др}$ от продольной относительной скорости корабля

№ п/п	$V_{ОХ}$, уз	$K_{др}$, уз/м/с
1	0	0,0924
2	2	0,0635
3	4	0,436
4	6	0,0310
5	8	0,0273
6	10	0,0241
7	12	0,0213
8	14	0,0189
9	16	0,0167
10	18	0,0148

Табл. 3 хранят в постоянной памяти.

В дальнейшем, для учета $K_{др}$ в задаче счисления его фактическое значение находят методом линейной интерполяции данных табл. 3 при поступлении от лага текущей относительной скорости $V_{ОХ}$, а поперечную относительную скорость непрерывно вычисляют по формуле

$$V_{ОУ} = K_{др} K_{П} U \sin(K - K_U).$$

Данный подход к автоматизации решения задачи определения коэффициента дрейфа может быть реализован во вновь разрабатываемых электронных навигационных измерительных системах или в виде доработки существующих систем под конкретные требования заказчика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила определения маневренных элементов на кораблях ВМФ (ПОМЭК-85). СПб.: Изд-во ГУНиО МО. – 1987. – 199 с.

DETERMINATION OF WIND DRIFT COEFFICIENTS OF A SHIP BY OBSERVED CO-ORDINATES

Y. A. Glukhov,
L. A. Zayats
 (GNINGI, RF MoD)

The variant that can be used to automate the problem of determining a ship's drift coefficient for various speeds obtained during the trials of a type ship is proposed.

О ДОСТОВЕРНОСТИ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ НАВИГАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПЛАВАНИЯ С УЧЕТОМ ПОГРЕШНОСТИ ПОЛОЖЕНИЯ КРОМКИ ФАРВАТЕРА**Б. Е. ИВАНОВ**
(ГНИНГИ МО РФ)

Получена точная формула для оценки вероятности навигационной безопасности плавания с учетом погрешности положения правой кромки фарватера. На основе сравнения значений вероятности, вычисленных по точной формуле и по ранее рекомендованной (приближенной) формуле, доказана достоверность оценки вероятности при использовании рекомендованной формулы.

В работе [1] получена формула, которая рекомендована для вычисления вероятности навигационной безопасности плавания (ВНБП) с учетом погрешностей положения кромок фарватера. При этом сделаны допущения, которые в соответствии с работой [2] в большинстве случаев вносят относительную погрешность не более 1%. Достоверность оценки ВНБП по полученной формуле проверена в работе [3] методом статистического моделирования. К недостаткам такой проверки следует отнести то, что модели погрешностей, используемые при получении расчетного и эталонного значений ВНБП, не являются абсолютно идентичными. В связи с этим целесообразно проверить достоверность оценки ВНБП по рекомендованной (приближенной) формуле на основе сравнения ВНБП по точной формуле при абсолютно идентичных моделях погрешностей. Такая задача решается в данной статье.

При неопределенности положения двух кромок фарватера точная формула для оценки ВНБП представляет собой тройной интеграл [2], что снижает точность оценки и существенно усложняет процедуру вычисления. В связи с этим рассмотрим влияние на ВНБП погрешности положения только одной кромки фарватера. Пусть на фарватере шириной L с кромками A и B проложена линия пути корабля на расстоянии r от правой кромки фарватера (рис. 1). Вследствие погрешности u определения места корабля в направлении, перпендикулярном кромкам фарватера, определяемое место корабля K смещается в истинное место K^* . В то же время вследствие погрешности v обозначенная на карте правая кромка фарватера B смещается и занимает истинное положение B^* , а принятая ширина фарватера L становится равной L^* . Погрешности u и v характеризуются плотностями распределения $f(u)$ и $\varphi(v)$ соответственно.

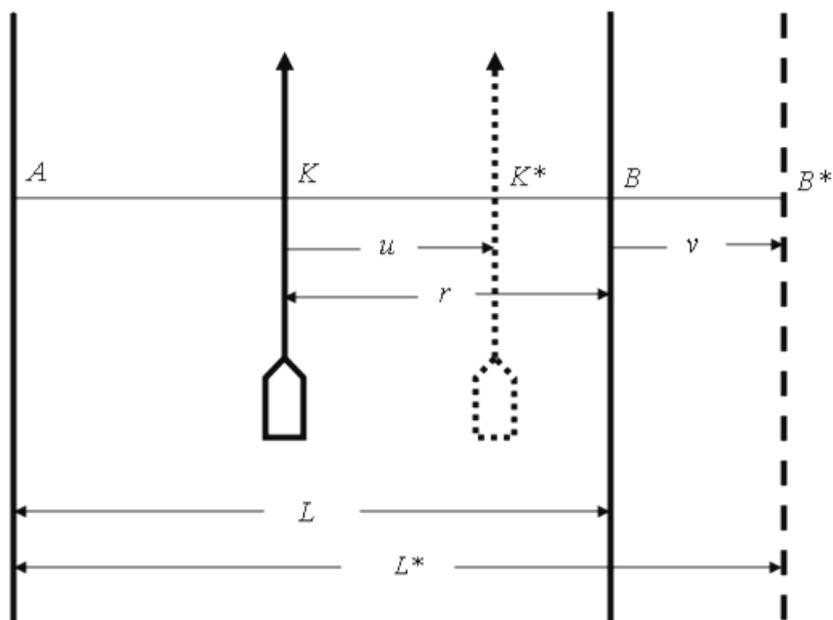


Рис. 1. Взаимное расположение истинного и определяемого мест корабля в пределах фарватера с ошибочным положением правой кромки

Безопасность плавания будет обеспечиваться в том случае, когда L^* будет больше ширины корабля b с учетом зоны безопасности, а истинное место корабля будет находиться в пределах фарватера. Тогда на основании формулы полной вероятности из работы [4] ВНБП будет равна

$$P = \int_{-L+b}^{\infty} \varphi(v) \int_{-L+r+b/2}^{r+v-b/2} f(u) du dv. \quad (1)$$

В случае, когда погрешности подчиняются нормальному распределению, в соответствии с работой [4] плотности распределения будут выражаться зависимостями

$$\left. \begin{aligned} f(u) &= \frac{1}{m\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u^2}{2m^2}}; \\ \varphi(v) &= \frac{1}{m_{\kappa}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{v^2}{2m_{\kappa}^2}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где m и m_k – средние квадратические погрешности (СКП) определения места корабля по направлению, перпендикулярному кромкам фарватера, и положения правой кромки фарватера соответственно.

Подставив выражения (2) в равенство (1), получим точную формулу

$$P = \frac{1}{m_k \sqrt{2\pi}} \int_{-L+b}^{\infty} e^{-\frac{v^2}{2m_k^2}} \left[\Phi_0\left(\frac{r+v-b/2}{m}\right) + \Phi_0\left(\frac{L-r-b/2}{m}\right) \right] dv, \quad (3)$$

где $\Phi_0(x)$ – значение интеграла вероятностей при аргументе x , указанном в круглых скобках формулы (3). Формула для вычисления этого интеграла и таблица его значений приведены в справочнике [5].

В соответствии с работой [1] получим рекомендованную (приближенную) формулу

$$P^* = \Phi_0\left(\frac{L-r-b/2}{m}\right) + \Phi_0\left(\frac{r-b/2}{\sqrt{m^2 + m_k^2}}\right). \quad (4)$$

В случае, когда погрешности подчиняются распределению Лапласа, в соответствии со справочником [6] плотности распределения выражаются зависимостями

$$\left. \begin{aligned} f(u) &= \frac{1}{2} \alpha e^{-\alpha|u|}, \\ \varphi(v) &= \frac{1}{2} \beta e^{-\beta|v|}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где α и β – параметры распределения Лапласа, которые равны

$$\alpha = \frac{\sqrt{2}}{m} \text{ и } \beta = \frac{\sqrt{2}}{m_k}.$$

Подставив выражения (5) в равенство (1), после преобразований получим точную формулу

$$\begin{aligned}
 P = & 1 - \frac{1}{2} e^{-\beta(r-b/2)} - \frac{1}{2} e^{-\alpha(L-r-b/2)} + \frac{1}{4} e^{-\alpha(L-r-b/2)-\beta(L-b)} - \\
 & - \frac{1}{4} \frac{\beta}{\alpha+\beta} \left[e^{-\alpha(r-b/2)} + e^{-\alpha(L-r-b/2)-\beta(L-b)} - e^{-\beta(r-b/2)} \right] + \\
 & + \frac{1}{4} \frac{\beta}{\alpha-\beta} \left[e^{-\alpha(r-b/2)} - e^{-\beta(r-b/2)} \right].
 \end{aligned} \tag{6}$$

При $m=m_k$ последнее слагаемое в формуле (6) будет равно

$$-\frac{1}{4} \alpha(r-b/2) e^{-\alpha(r-b/2)}.$$

Получим рекомендованную (приближенную) формулу при заданных условиях. Для этого необходимо учесть, что если каждая из двух погрешностей подчиняется распределению Лапласа, то сумма этих погрешностей не будет подчиняться распределению Лапласа [7]. Тогда в соответствии с работами [1, 7] получим рекомендованную (приближенную) формулу

$$P^* = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} e^{-\alpha(L-r-b/2)} + \frac{1}{2} \frac{1}{\alpha^2 - \beta^2} \left[\alpha^2 (1 - e^{-\beta(r-b/2)}) - \beta^2 (1 - e^{-\alpha(r-b/2)}) \right]. \tag{7}$$

При $m=m_k$ последнее слагаемое в формуле (7) будет равно

$$\frac{1}{2} - \frac{1}{2} e^{-\alpha(r-b/2)} - \frac{1}{4} \alpha(r-b/2) e^{-\alpha(r-b/2)}.$$

По формулам (6) и (7) вычислены значения P и P^* при различных значениях L , r , m и m_k и определена их разность $\Delta P = P - P^*$. Оказалось, что при увеличении r разность ΔP сначала принимает нулевое значение, затем незначительно увеличивается и достигает наибольшего значения при $r=L-b/2$. Во всех случаях $\Delta P \geq 0$, то есть ВНБП, вычисленная по рекомендованной (приближенной) формуле, никогда не превышает ВНБП, вычисленную по точной формуле. Изменение наибольшей разности ΔP и наибольшей относительной разности $\Delta P/P$ в зависимости от СКП m и m_k , нормированных шириной фарватера L , показано на рис. 2 и рис. 3 соответственно.

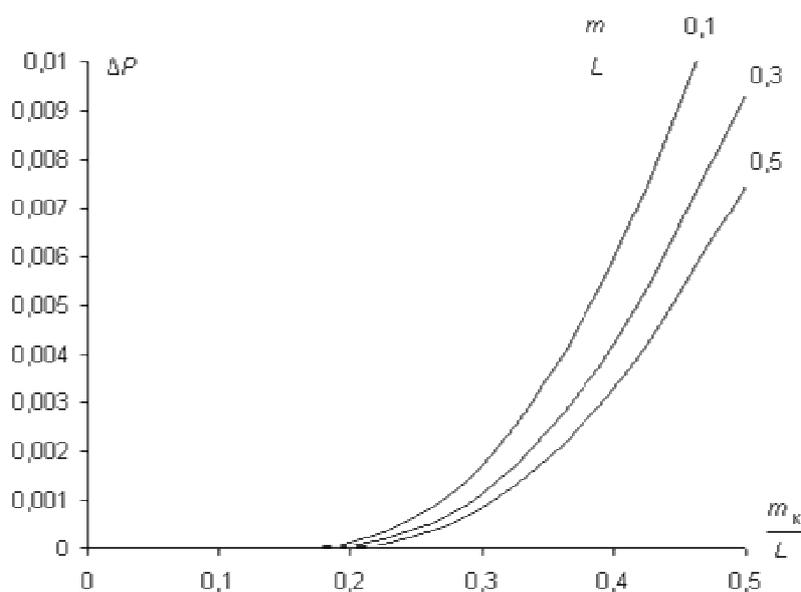


Рис. 2. Изменение наибольшей разности ΔP ВНБП в зависимости от СКП положения правой кромки фарватера m_k и СКП определения места корабля m , нормированных шириной фарватера L

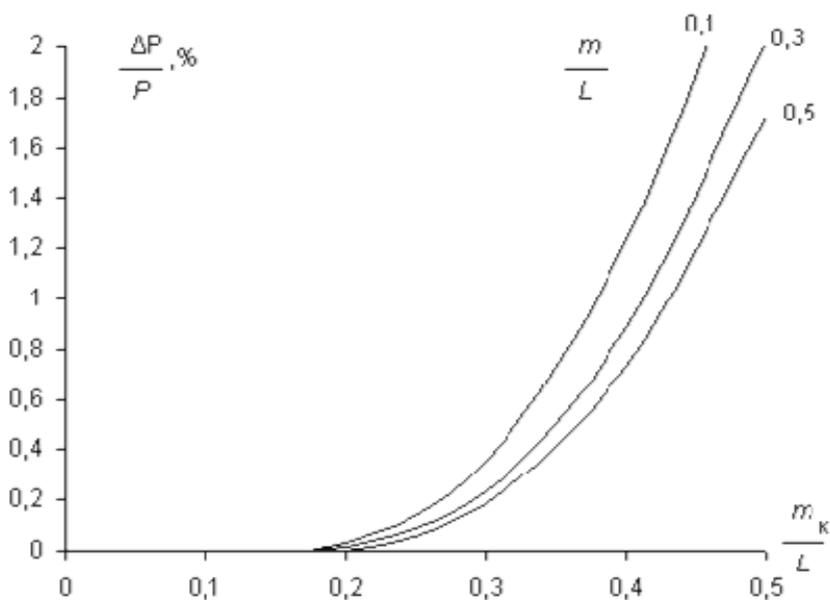


Рис. 3. Изменение наибольшей относительной разности $\Delta P/P$ ВНБП в зависимости от СКП положения правой кромки фарватера m_k и СКП определения места корабля m , нормированных шириной фарватера L

Из этих рисунков видно, что наибольшая разность значений ВНБП существенно возрастает при увеличении СКП положения кромки фарватера и незначительно уменьшается при увеличении СКП определения места корабля. Маловероятно, что СКП положения кромки фарватера превысит $0,3L$. Тогда наибольшая разность между ВНБП, вычисленными по точной и рекомендованной (приближенной) формулами, не будет превышать 0,001 или 0,2%. Такие величины никак не скажутся на обеспечении навигационной безопасности плавания при использовании рекомендованной (приближенной) формулы. Тем более, что ВНБП, вычисленное по ней, не превысит ВНБП, вычисленное по точной формуле.

Кроме того, были вычислены значения ВНБП по формулам (3) и (4) и определена их разность. При этом вычисления по формуле (3) выполнялись методом численного интегрирования. Оказалось, что характер измерения полученной разности ΔP примерно соответствует характеру изменения разности ΔP , вычисленной при использовании формул (6) и (7).

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что достоверность оценки ВНБП по рекомендованной (приближенной) формуле доказана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов Б. Е., Михальский В. А., Батуев А. Н. Об оценке вероятности навигационной безопасности плавания с учетом неопределенности положения кромок фарватера // Навигация и гидрография. – 2004. – № 18. – С. 17–19.
2. Иванов Б. Е. Влияние погрешностей положения кромок фарватера на вероятность навигационной безопасности плавания // Навигация и гидрография. – 2001. – № 13. – С. 31 – 37.
3. Иванов Б. Е., Батуев А. Н. О влиянии неопределенности положения кромок фарватера на вероятность навигационной безопасности плавания // Навигация и гидрография. – 2004. – № 19. – С. 35–40.
4. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. Учебник для высших технических учебных заведений. Изд. 3-е, испр. – М.: Наука, 1964. – 576 с.
5. Справочник по вероятностным расчетам. 2-е изд., доп. и испр./ Г. Г. Абезгауз, А. П. Тронь, Ю. Н. Копенкин, И. А. Коровина. – М.: Воениздат, 1970. – 536 с.
6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения, теоремы, формулы. Пер. с англ. – М.: Наука, 1968. – 720 с.
7. Иванов Б. Е. Об особенностях решения навигационных задач при использовании распределения Лапласа // Навигация и гидрография. – 2001. – № 12. – С. 67 – 69.

ON THE VALIDITY OF EVALUATION OF NAVIGATION SAFETY PROBABILITY TAKING INTO ACCOUNT THE POSITION ERROR FOR THE FAIRWAY BORDER

B. E. Ivanov
(GNINGI, RF MoD)

The exact formula intended to evaluate the navigation safety probability taking into account the position error for the right fairway border has been obtained. Based on the comparison of the probability values calculated by the exact formula and by the previously recommended (approximate) formula, the validity of the probability evaluation using the recommended formula is proved.

АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НАВИГАЦИОННОГО СТВОРА**Б. Е. ИВАНОВ**
(ГНИНГИ МО РФ)

В настоящей статье выполнен анализ современных подходов к оценке точности определения места при использовании навигационного створа. Показана ошибочность предложения о применении визирных окружностей в качестве линии положения. Доказана возможность оценки средней квадратической погрешности линии положения при случайном характере горизонтального угла створа по формуле, полученной на основе детерминированного горизонтального угла створа.

При оценке точности определения места по двум линиям положения необходимо знать среднюю квадратическую погрешность (СКП) каждой линии положения (ЛП) и угол их пересечения. Обычно СКП ЛП определяется как отношение СКП измерения навигационного параметра к модулю его градиента [1]. В то же время при использовании навигационного створа СКП ЛП определяется по-другому. Для этого случая в работах [2–8] предлагаются формулы СКП ЛП, которые отличаются друг от друга. В связи с этим целесообразно проанализировать формулы из указанных работ, что и делается в данной статье.

1. В случае определения места при использовании навигационного створа судоводитель считает себя находящимся на оси створа, которая принимается за ЛП. Учитывая, что фактическое место судна может находиться равновероятно в любой точке створной зоны, в работе [2] приведена формула СКП m линии положения

$$m = \frac{P}{\sqrt{3}}, \quad (1)$$

где P – боковое уклонение от оси створа.

Формула (1) точно отражает процесс навигации и соответствует закону равномерного распределения случайной величины из работы [9]. Впоследствии в инструкции [3] появилась другая формула

$$m = P. \quad (2)$$

Формула (2) не соответствует теории погрешностей измерений. В ее левой части находится СКП, а в правой части – предельная погрешность. Ошибка в инструкции [3] была исправлена в новой инструкции [7], где рекомендована правильная формула (1).

2. Формулы (1) и (2) относятся к случаю, когда горизонтальный угол створа (ГУС) считается детерминированной величиной. Тогда и боковое уклонение P принимается такой же величиной. Однако в работе [4] предложено считать ГУС и боковое уклонение случайными величинами и для использования рекомендована следующая формула СКП ЛП:

$$m = \sqrt{P^2 + M_p^2}, \quad (3)$$

где M_p – СКП определения бокового уклонения.

Формула (3) не соответствует теории погрешностей, поскольку в ней квадратически суммируются предельная погрешность и ее СКП. Несостоятельность предложенного подхода иллюстрируется рис. 1, на котором представлена схема поперечного профиля фарватера с вертикальной картинной плоскостью.

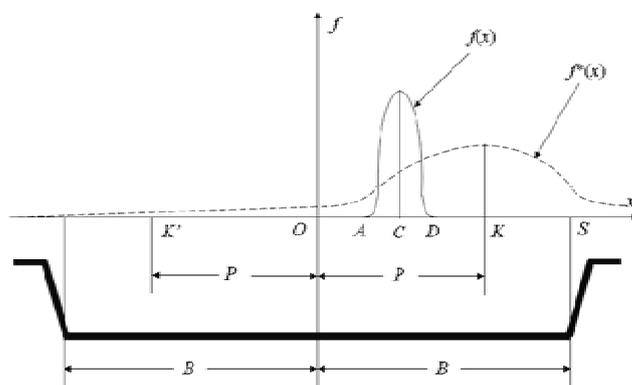


Рис. 1. Поперечный профиль фарватера шириной $2B$ с расчетным боковым уклонением P от оси створа O , случайным боковым уклонением x и его действительной $f(x)$ и ошибочной $f^*(x)$ плотностью распределения

Пусть на фарватере шириной $2B$ оборудован навигационный створ. Исходя из заданного значения ГУС в соответствии с инструкцией [7] рассчитано боковое уклонение P , равное полуширине створной зоны, которая ограничена визирными окружностями, проходящими через точки K и K' .

В работе [4] на основе эксперимента утверждается, что случайный ГУС подчиняется нормальному распределению. Это распределение часто используется в навигации. Однако в рассматриваемом случае применение закона нормального распределения представляется неприемлемым. Поскольку ГУС и боковое уклонение связаны линейной зависимостью, то при нормальном распределении ГУС случайное боковое уклонение x также должно подчиняться нормальному распределению с плотностью распределения $f^*(x)$, отображенной на рис. 1 штриховой линией. Это приводит к неправдоподобной ситуации, когда ГУС может получить отрицательное

значение, левая и правая визирные окружности могут поменяться местами, а судоводитель может увидеть створные знаки на одной вертикали, находясь не только вне створной зоны (правее точки K), но и вне фарватера (правее точки S). Таким образом, здесь целесообразно было бы говорить об усеченном нормальном распределении.

В развитие описанного подхода в работах [4, 8, 10] математическое ожидание случайного бокового уклонения было принято равным расчетному боковому уклонению P , а не математическому ожиданию этой величины, полученному в эксперименте. В результате центр распределения K располагается на расчетной визирной окружности. Это приводит к тому, что наиболее вероятное значение ГУС относится к этой окружности, а вероятность наблюдения створных знаков на одной вертикали будет одинакова для точек, находящихся на одном расстоянии, но по разные стороны от точки K на расчетной визирной окружности (в створной зоне и вне ее).

На самом деле плотность распределения $f(x)$ должна отображаться на рис. 1 сплошной линией, ограниченной точками A и D и имеющей центр распределения в точке C . Это определяется тем, что при проектировании створа заданное значение ГУС, по которому рассчитывается P , принимается таким, чтобы фактическое ГУС всегда было меньше заданного значения ГУС. В этом случае судоводитель будет видеть створные знаки на одной вертикали, находясь *только* в створной зоне.

Сказанное подтверждается экспериментом по определению бокового уклонения Ломоносовского створа, представленного в монографии [8]. При математическом ожидании ГУС, равном $0,27'$, математическое ожидание бокового уклонения составило $4,544$ м, а его размах – $0,065$ м. То есть абсцисса точки D , соответствующая наибольшему значению фактического ГУС, не превысила 5 м. Если заданное значение ГУС принять равным $1'$ (что предложено в монографии [8]), то в соответствии с формулой из инструкции [7] расчетное значение P составит $16,8$ м. То есть заданное значение ГУС превысит наибольшее фактическое значение ГУС почти в 4 раза.

Таким образом, положения, на которых основывается формула (3), являются ошибочным, как и сама формула (3). К тому же одному из аргументов этой формулы неправомерно присвоен термин «СКП».

3. Представляется, что решение задачи с учетом случайного ГУС состоит в совместном использовании плотности распределения $f(x)$ ГУС и условного равномерного распределения места судна в пределах от 0 до x . Тогда в соответствии с работами [5, 6] СКП ЛП будет равна

$$m = \sqrt{\int_{x_A}^{x_D} \left[\frac{x^3}{3x} f(x) + \int_x^{x_D} \frac{x^2}{x^*} f(x^*) dx^* \right] dx}, \quad (4)$$

где x_A и x_D – значения координаты x точек A и D соответственно (рис. 1).

Сравним значения СКП ЛП, определенные по формулам (1) и (4). Для этого используем параболическое распределение x в интервале от x_A до $x_D=x_K$, где x_K – координата x точки K . Тогда в соответствии с работой [5] можно написать

$$m = \sqrt{\frac{1}{\Delta^3} \left[\frac{1}{10}(x_D^5 - x_A^5) - \frac{1}{6}x_D x_A (x_D^3 - x_A^3) \right]}, \quad (5)$$

где $\Delta = x_D - x_A$ – интервал аргумента x плотности параболического распределения.

Вычислим отношение k СКП ЛП, полученной по формуле (1), к СКП ЛП, полученной по формуле (5). Результаты вычислений в зависимости от интервала Δ показаны на рис. 2 для значения $x_K = 2$.

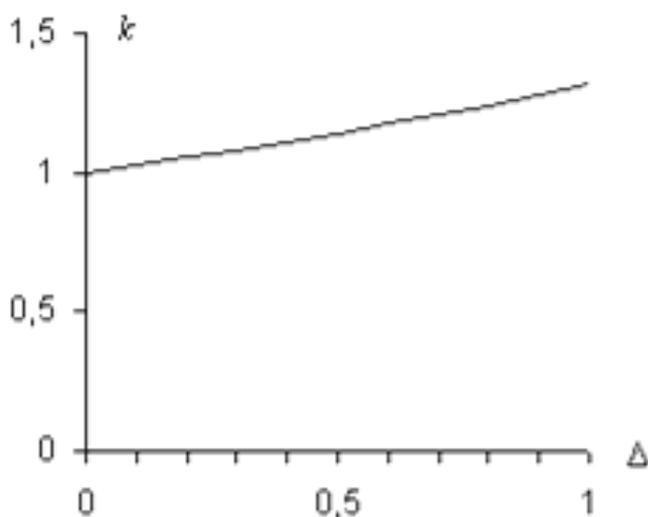


Рис. 2. Изменение отношения k СКП ЛП, вычисленной по формуле (1), к СКП ЛП, вычисленной по формуле (5), в зависимости от интервала Δ аргумента плотности распределения

Из рис. 2 видно, что СКП ЛП, вычисленная по формуле (1), незначительно превышает СКП ЛП, вычисленную по формуле (5). Следовательно, для принятого допущения о случайном характере ГУС вычисленная по формуле (1) СКП ЛП будет примерно соответствовать вычисленной по формуле (5) СКП ЛП для этого случая и, по крайней мере, не будет меньше ее.

4. В монографии [8] по-новому рассматривается точность определения места с использованием навигационного створа и предлагаются два варианта решения.

В первом варианте СКП ЛП предлагается принять равной нулю, а в качестве ЛП использовать ось створа. Формулу (1) предлагается считать некорректной, поскольку погрешность одной ЛП подчиняется нормальному распределению, а погрешность другой ЛП – равномерному распределению. Кроме того, в монографии [8] к недостаткам формулы (1) относится то, что при ее использовании в качестве ЛП должна быть указана не ось створа, а *визирная окружность*.

Следует подчеркнуть, что в монографии [8] за ЛП предлагается принять *расчетную* визирную окружность, проходящую через точки K или K'' . В связи с тем, что заданное значение ГУС не совпадает с фактическим значением, фактическая визирная окружность не совпадет с расчетной, а положение ее неизвестно. В отличие от визирной окружности положение оси створа стабильно и известно с высокой точностью. Кроме того, у судоводителя нет никакой информации о положении даже расчетной визирной окружности ни на картах, ни в пособиях.

Корректная оценка точности определения места, когда погрешность одной ЛП подчиняется нормальному распределению, а погрешность другой ЛП – равномерному распределению, обоснована в работах [5, 6].

Во втором варианте в монографии [8] предлагается за ЛП принять визирную окружность и СКП ЛП считать равной СКП определения бокового уклонения:

$$m = M_p. \quad (6)$$

Предложение не учитывать боковое уклонение и трансформация формулы (1) в формулу (6) могут быть объяснены тем, что в монографии [8] рассматривается только плотность распределения ГУС, но не учитывается распределение места судна. Если ГУС принимается в качестве детерминированной величины, то плотность распределения ГУС не учитывается. В связи с этим формула (1) справедливо основывается на равномерном распределении места судна с центром распределения на оси створа. Поэтому ЛП должна совпадать с осью створа, но никак не с визирной окружностью. Кроме того, на практике необходимо оценивать точность определения места, когда судно находится в створной зоне, и в качестве ЛП применять ось створа.

На основании выше изложенного можно сделать следующие выводы:

1. В настоящее время при оценке точности определения места целесообразно использовать формулу (1) как для случая представления ГУС в виде детерминированной величины, так и для случая представления ГУС в виде случайной величины. Во всех случаях линией положения является ось створа.

2. Предложение использовать визирную окружность в качестве ЛП является некорректным. Формулы (2), (3) и (6) не соответствуют положениям теории вероятностей, теории и практике навигации.

3. В случае если будут надежно определены статистические характеристики ГУС, можно будет использовать формулу (4).

ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов А. Д. Оценка точности определения места корабля. – Л.: ГУ ВМС, 1954. – 190 с.
2. Практическое кораблевождение для командиров кораблей, штурманов и вахтенных офицеров. Книга первая. № 9035.1 / Отв. ред. А. П. Михайловский. - Л.: ГУНиО МО СССР, 1988. – 896 с.
3. Инструкция по навигационному оборудованию (ИНО-89). – Л.: ГУНиО МО, 1990. – 303 с.
4. Родичкин Н. И. Теория и методика проектирования линейных навигационных створов с заданной вероятностью безопасности плавания и ее приложения. Часть 2. – СПб.: ВВМУ, 1997. – 77 с.
5. Иванов Б. Е. Особенности оценки точности определения места при использовании навигационного створа // Навигация и гидрография. – 1999. – № 9. – С. 37–43.
6. Иванов Б. Е. Об оценке точности определения места при использовании навигационного створа // Записки по гидрографии. – 2000. – № 251. – С. 27–33.
7. Инструкция по навигационному оборудованию (ИНО – 2000). – СПб.: ГУНиО МО РФ, 2001. – 327 с.
8. Родичкин Н. И. Закон линейного навигационного створа и его применение. – СПб.: Морской корпус Петра Великого – СПб ВМИ, 2005. – 129 с.
9. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. 3-е изд., испр. – М.: Наука, 1964. – 576 с.
10. Родичкин Н. И. Закон линейного навигационного створа // Записки по гидрографии. – 2002. – № 254. – С. 82–86.

ANALYSIS OF APPROACHES TO THE POSITION FIXING ACCURACY WHEN USING THE NAVIGATIONAL RANGE

B. E. Ivanov
(GNINGI, RF MoD)

The present-day approaches to evaluation of the position fixing accuracy when using the navigational range are analysed. The erroneousness of the proposed use of the sight circles as position lines is shown. The possibility to evaluate the rms of the position line for the random character of the range horizontal angle by the formula obtained using the determinate range horizontal angle, is proved.

ГРНТИ 90.03.25, 78.21.41

К ВОПРОСУ ОБ ОБЪЕДИНЕНИИ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ

В. А. МИХАЛЬСКИЙ
(ГНИНГИ МО РФ)

Исследованы законы распределения погрешностей 42 видов навигационной информации. Разработан способ расчета предельной погрешности для произвольного закона распределения. Рассчитана таблица коэффициентов предельного перехода для шкалы эксцессов необходимой ширины.

Решение навигационно-тактических задач, а также задач определения показателей навигационной безопасности плавания (НБП) корабля,

разработки методики испытаний морских средств навигации и др. основано на использовании предельных погрешностей навигационных параметров (НП). Традиционно предельную погрешность НП рассчитывают [1–3] по формуле

$$\hat{x} = K_{P1}m,$$

где m – средняя квадратическая погрешность (СКП) НП; K_{P1} – коэффициент перехода от СКП m к предельной погрешности \hat{m} , который является квантилем t заданной большой вероятности P закона распределения (ЗР) Гаусса (о чем говорит нижний индекс «1»). Например, для $P=0,997$ коэффициент $K_{P1}=2,997$.

Вопрос о законе распределения погрешностей НП (и места корабля) имеет большое теоретическое и практическое значение. Например, для закона Лапласа в варианте Кондрашихина квантиль вероятности $P=0,997$ равен $t=4,65$, т. е. данный закон увеличивает предельную погрешность в 1,5 раза по сравнению с ЗР Гаусса. Пренебрежение этим фактом может привести к грубым просчетам при обеспечении боевых действий ВМФ. В отечественном кораблевождении образовалось противоречие в применении этих ЗР: в документе [4] задача НП решается на основе ЗР Лапласа в варианте Кондрашихина, в то время как в мореходных таблицах МТ-2000 и в учебнике [3] – на базе ЗР Гаусса. Это ставит задачу подробного рассмотрения фактических законов распределения погрешностей НП и анализа всей их совокупности с целью выбора теоретических ЗР, дающих наилучший результат при решении различных задач навигации.

Рассматривая случайную погрешность НП как случайную величину X , будем обозначать конкретные значения погрешности буквой x , а предельную погрешность \hat{x} .

Использование закона Гаусса в кораблевождении объясняют [3] наличием условий, описываемых центральной предельной теоремой (ЦПТ) теории вероятностей [5], согласно которой ЗР погрешности, образующейся под действием нескольких примерно равнозначных, независимых факторов и состоящей поэтому из нескольких равновеликих независимых составляющих, близок к закону Гаусса. Предположение о ЦПТ не соответствует структуре погрешностей большинства НП, которые чаще всего определяются одним-двумя решающими факторами. Так, погрешности высокоточных радионавигационных систем определяются в основном фазовой радиодевиацией [4]; погрешности системы «Navstar», при C/A-коде – генератором искусственного шума, накладываемого на сигналы спутников, при P-коде – остаточными ионосферными искажениями; погрешности широты, вырабатываемой инерциальными навигационными системами (ИНС), – квазипериодической суточной составляющей, погрешности долготы – этой же составляющей и уходом долготы с постоянной скоростью;

погрешности счисления – сносом корабля течением. Во всех этих и других случаях ЗР измеряемого параметра определяется в основном ЗР той составляющей, которая обусловлена решающим фактором. Если этот фактор не один, то ЗР погрешности НП является композицией ЗР этих составляющих.

Можно априорно считать, что основные составляющие погрешностей НП характеризуются следующими законами распределения [4–10]: квазипериодическая – ЗР гармонической функции (ГФ); погрешность ухода НП с постоянной скоростью – ЗР равномерного распределения (Р); погрешность, отвечающая условиям ЦПТ – ЗР Гаусса (Г); погрешность с изменяющейся или находящейся в широком диапазоне и точно неизвестной СКП – ЗР Лапласа (Л) или Лапласа в варианте В. Т. Кондрашихина (Л - К) [6, 7]; погрешность, сочетающая в себе свойства (Г) и (Л) – ЗР М-распределения [8]; постоянно действующий случайный процесс погрешности с небольшой дисперсией, на который иногда накладывается действующий короткое время случайный процесс с большой дисперсией – экспоненциальный ЗР (Э).

В условиях теоретического разнообразия возможных ЗР и их композиций ответ на вопрос о ЗР погрешностей навигационной информации в целом может дать только экспериментальное исследование. Из опубликованных учебников и монографий только в работе [9] приведены результаты идентификации вида ЗР погрешностей радиопеленгования и фазовой РНС. Показано, что эти погрешности подчиняются закону Гаусса. Однако к качеству этих исследований есть существенные претензии: а) в обоих случаях наблюдения выполнялись в лабораториях учебных заведений днем, т. е. в условиях стационарности погрешностей и постоянства их СКП; б) согласие ЗР Гаусса с опытными данными проверялось по критерию Пирсона, результат применения которого, как известно [5], сильно зависит от выбираемого исследователем уровня значимости, что позволяет достигнуть согласия со многими ЗР; в) другие ЗР не рассматривались, и ЗР, наилучшим образом согласующийся с опытными данными, не выбирался; г) не рассматривалось наиболее интересное для кораблевождения распределение погрешностей в области больших вероятностей. Следовательно, литературные источники не дают ответа на вопрос об общем ЗР погрешностей навигационной информации.

Для экспериментальной идентификации вида ЗР случайной величины X производят измерения НП и рассчитывают погрешности измерений, получая выборку погрешностей $[x]$ в определенных условиях измерений

$$[x]=x_1, \dots, x_i, \dots, x_n; i=1, \dots, n. \quad (1)$$

Вид ЗР погрешностей симметричной случайной величины X с точностью до момента четвертого порядка определяет характеристика, называемая эксцессом (E) и вычисляемая по формуле

$$E = \sum_1^n x_i^4 / nm^4 - 3, \quad (2)$$

где m – СКП случайной величины X , рассчитываемая по выборке (1) по известной формуле Гаусса. ЗР погрешностей НП являются симметричными.

Экспериментальные данные, которые были использованы для определения вида ЗР погрешностей навигационной информации, включают выборки погрешностей 42 навигационных параметров в разных условиях измерений (диапазон средств от устаревающих РНС типа РСДН-3 и относительного счисления до системы «Navstar» и высокоточных навигационных комплексов). Из этих выборок 23 являются актуальными как в настоящее время, так и в перспективе. Общее количество независимых измерений в 42 выборках превышает 20000. Для каждой j -й выборки по формуле (2) рассчитана оценка эксцесса E_j . Далее совокупности оценок E_j и E_{Aj} рассматривались как случайные величины Y и Y_A (A – символ актуальной совокупности), для которых были получены оценки показателей распределения обычными методами математической статистики [5, 8].

В табл. 1 приведены элементы статистических рядов случайных величин Y и Y_A и накопленные частоты $F_{\sim i}$. Величина F_{\sim} представляет собой экспериментальную функцию распределения всей совокупности эксцессов Y или Y_A , то есть характеризует обобщенное распределение эксцессов (и, следовательно, законов распределения) погрешностей рассматриваемых НП.

Таблица 1

Статистические ряды случайных величин Y и Y_A

Границы разрядов	Случайная величина Y			Случайная величина Y_A		
	Количество попаданий k_i	Частость $P_i = k_i/N$	Накопл. частость $F_i = \sum_1^i P_i$	Количество попаданий k_i	Частость $P_i = k_i/N$	Накопл. частость $F_i = \sum_1^i P_i$
-1,25; -0,74	3	0,071	0,071	1	0,043	0,043
-0,75; -0,24	3	0,071	0,142	2	0,087	0,130
-0,25; 0,24	2	0,048	0,190	2	0,087	0,217
0,25; 0,74	7	0,167	0,357	4	0,174	0,391
0,75; 1,24	7	0,167	0,524	6	0,261	0,652
1,25; 1,74	8	0,190	0,714	2	0,087	0,739
1,75; 2,24	2	0,048	0,762	1	0,043	0,782
2,25; 2,74	1	0,024	0,786	1	0,043	0,825
2,75; 3,24	1	0,024	0,810	0	0	0,825
3,25; 3,74	3	0,071	0,881	2	0,87	0,912
3,75; 4,24	0	0	0,881	0	0	0,912
4,25; 4,74	2	0,048	0,929	1	0,043	0,955
4,75; 5,24	1	0,024	0,953	0	0	0,955
5,25; 5,74	1	0,024	0,977	1	0,43	0,998
6; 14	1	0,023	1,000			

Математические ожидания (M) и средние квадратические отклонения (σ) соответственно равны: $M_Y=1,61$; $\sigma_Y=2,62$; $M_{Y_a}=1,32$; $\sigma_{Y_a}=2,06$.

Экспериментальные оценки эксцесса погрешностей НП находятся в широком диапазоне от -0,9 (а у отдельных ИНС, не рассмотренных в табл. 1, от -1,24) до 11. Упомянутые выше ЗР характеризуются следующей теоретической величиной эксцесса: $E_{ГФ}=-1,5$, $E_P=-1,2$, $E_T=0$, $E_M=1,6$, $E_L=3$, $E_{Л-К}=3,5$, $E_{Э}>4$. Можно считать, что все они и их композиции присутствуют в погрешностях навигационной информации различного вида. В таком случае возникает практическая необходимость в создании общей шкалы эксцессов и соответствующих им ЗР, которая содержала бы квантили больших вероятностей для обеспечения расчета предельных погрешностей. Эту задачу позволяет решить положение о том, что все перечисленные выше ЗР, за исключением закона гармонической функции, относятся к единому классу экспоненциальных распределений [10] с общей аналитической моделью для плотности распределения:

$$f(x)=A\exp[-|(x - X_{Ц})/\lambda m|^s], \quad (3)$$

где $A=s/2\lambda m\Gamma(1/s)$; $\lambda=[\Gamma(1/s)/\Gamma(3/s)]^{0,5}$; m – СКП; $\Gamma(z)$ – гамма-функция; $X_{Ц}$ – координата центра рассеивания; s – некоторая характерная для данного распределения постоянная – его показатель степени. Рассчитанные по формуле (3) для нормированного аргумента $x_H=x/m$ и $X_{Ц}=0$ значения плотности распределения $f(x_H)$ при положительных x_H приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения плотности распределения погрешностей НП

x_H	Параметры распределения						
	α	4,0	3	2	1,4	1	0,8
	E	-0,8	-0,5	0	1,6	3	5,4
0		0,321	0,342	0,399	0,499	0,707	1,003
0,2		0,321	0,341	0,391	0,455	0,533	0,745
0,4		0,320	0,337	0,368	0,390	0,402	0,397
0,6		0,316	0,326	0,333	0,323	0,303	0,270
0,8		0,301	0,304	0,290	0,260	0,228	0,200
1,0		0,286	0,272	0,242	0,205	0,172	0,146
1,2		0,253	0,228	0,196	0,158	0,130	0,108
1,4		0,207	0,183	0,150	0,120	0,098	0,80
1,6		0,152	0,137	0,111	0,090	0,074	0,060
1,8		0,097	0,091	0,079	0,066	0,055	0,046
2,0		0,052	0,055	0,054	0,048	0,042	0,036
2,2		0,022	0,030	0,035	0,034	0,031	0,027

Продолжение таблицы 2

x_H	Параметры распределения						
	2,4		0,007	0,015	0,022	0,024	0,025	0,021
2,6		0,002	0,006	0,014	0,017	0,018	0,014
2,8		0,000	0,002	0,008	0,012	0,013	0,012
3,0			0,001	0,004	0,008	0,010	0,010
3,2			0,000	0,002	0,005	0,008	0,008
3,4				0,001	0,004	0,006	0,006
3,6				0,001	0,003	0,004	0,005
3,8				0,000	0,002	0,003	0,004
4,0					0,002	0,003	0,003
4,2					0,001	0,002	0,002
4,4					0,001	0,002	0,002
4,6					0,000	0,001	0,001
4,8						0,001	0,001
5,0						0,001	0,001
5,2						0,000	0,001
5,4							0,000

Приведенные в табл. 2 значения позволяют, в частности, произвести моделирование погрешностей с заданным законом распределения.

Значения квантилей t_q (коэффициентов предельного перехода $K_{P1q}=t_q$ от СКП m к предельной погрешности \hat{x}) рассчитанные методом аналитического и численного интегрирования функции (3), и шкала эксцессов приведены в табл. 3. Здесь q — символ закона распределения.

Таблица 3

Значения коэффициента предельного перехода K_{P1q} для заданной вероятности при различных эксцессах E

Вероятность, P'	Эксцесс погрешности, E										
	-1,2	-0,6	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	5,4
0,999	1,73	2,80	3,30	3,45	3,65	3,90	4,20	4,53	4,89	5,51	5,75
0,997	1,73	2,53	2,97	3,05	3,17	3,36	3,56	3,80	4,11	4,64	5,13
0,99	1,71	2,28	2,58	2,64	2,71	2,80	2,91	3,03	3,26	3,67	3,40
0,95	1,67	1,85	1,96	1,97	1,98	2,00	2,03	2,06	2,12	2,39	2,75
0,9	1,63	1,63	1,64	1,64	1,64	1,64	1,65	1,65	1,65	1,66	1,66

С помощью табл. 3 можно рассчитать предельную погрешность НП по формуле

$$\hat{x} = K_{P1q}m \quad (4)$$

для заданной вероятности P и конкретного фактического q -го закона распределения данного НП. Способ расчета предельной погрешности по формуле (4) может использоваться при автоматическом решении задач и наличии необходимой информации. Однако для сохранения единства расчетов предельных погрешностей, в том числе параметров НБП, штурманской службой (предварительных, обобщенных и ручных расчетов на кораблях и в штабах) целесообразно выбрать какие-либо конкретные ЗР.

Рассматривая табл. 1, можно заметить, что при решении в настоящее время задачи НБП на основе ЗР Гаусса ($E=0$), заданная вероятность обеспечивается только в $n_0=100F_{\sim 0}=19$ случаях из 100. В остальных 81 случаях линия пути корабля окажется ошибочно проложенной ближе к навигационной опасности, чем требуется, и заданная вероятность НБП обеспечена не будет. Как отмечено в монографии [7], закон Лапласа «обеспечивает более осторожные оценки». Количественно эта осторожность при использовании ЗР Лапласа-Кондрашихина ($E_{Л-К}=3,5$) выражается числом $n_{3,5}=100F_{\sim Л-К}=88$, что в 4 раза превышает величину n_0 , обеспечиваемую законом Гаусса. Для M -распределения ($E_M=1,6$) число $n_{1,6}=72$.

Пусть, например, кораблю поставлена задача обойти выставленное противником минное заграждение при минимальном отклонении от маршрута движения. Задавшись вероятностью НБП $P_{зд}=0,999$ (допуская $N_{дп}=1$ шанс из 1000 того, что корабль вследствие погрешностей в координатах сблизится с опасностью и коснется её границы), штурман выберет из табл. 3 значение $K_{P1Г}=3,3$ и проложит линию пути на расстоянии $\hat{x}_Г=3,3m$ от границы опасности. Здесь m – СКП места корабля по направлению на опасность. Если в действительности погрешности подчиняются закону Лапласа в варианте В. Т. Кондрашихина, то величина $K_{P1Л-К}=5,51$ и для обеспечения заданной вероятности линия пути должна была быть проложена в расстоянии $\hat{x}_{Л-К}=5,51m$ от границы опасности. Так как $\hat{x}_{Л-К}/\hat{x}_Г=1,67$, то корабль пройдет в 1,67 раза ближе к минному заграждению, чем требуется, и фактическое число шансов пересечь границу опасности $N_{Ф}=16$ и возрастает в 16 раз по сравнению с допустимой величиной. Этот пример показывает, что использование закона Гаусса для обеспечения единства решения различных навигационно-тактических, стрельбовых и оперативных задач с расчетами предельных погрешностей может привести к грубым ошибкам, сильно понижая действительную эффективность боевых действий ВМФ.

При использовании закона Лапласа в варианте В. Т. Кондрашихина для расчета предельных погрешностей навигационной информации в 88 случаях из 100 величина \hat{x} определяется с некоторым избытком и только в 12 – с недостатком, причем этот недостаток не превышает $5,75/5,51=1,04$ раза (см.

табл. 3). Учитывая простоту и точность расчета таблиц функции распределения данного закона (параметр $s=1$ и функция (3) является интегрируемой), его целесообразно принять в качестве ЗР погрешностей навигационной информации для обеспечения единства расчетов предельных погрешностей при решении задач с повышенной ответственностью. Таблица функции распределения закона Лапласа в варианте В. Т. Кондрашихина имеется в работе [4, с 112]. Для задач, допускающих решение «в среднем» приемлемым может быть закон M -распределения.

Одно из возражений против использования данных ЗР и в пользу ЗР Гаусса [3] состоит в том, что применительно к ЗР Гаусса разработан метод наименьших квадратов (МНК), широко используемый в кораблевождении при решении оптимизационных задач [1–4]. По этому поводу следует сказать, что несоответствие ЗР большинства НП закону Гаусса есть объективная реальность, которую нужно учитывать и нельзя игнорировать ни под какими предложениями. Кроме того, отмена или замена МНК каким-либо другим методом не предполагается, т. к. сделанные предложения касаются расчетов предельных погрешностей. Наконец, при обработке по МНК навигационных параметров, ЗР которых отличаются от ЗР Гаусса, эффективность обработки понижается. Это можно учесть с помощью специального коэффициента K_q , на который умножается результат оценки точности НП после применения МНК; величина коэффициента K_q получена методом моделирования и оказалась равной при малом (до четырех) количестве обрабатываемых по МНК измерений $K_p=1,06$; $K_l=1$; $K_{л-к}=1,04$; для других ЗР величина K_q получается интерполяцией между этими значениями. В случае большого количества измерений эффективность МНК не страдает.

Оценка математического ожидания эксцесса всей совокупности НП и актуальных НП совпадает или приближается к эксцессу M -распределения ($s=1,4$; $E=1,6$). Это значит, что закон M -распределения является усредняющим ЗР для всех НП, характеризует распределение погрешностей всей навигационной информации и может использоваться, когда требуется универсальный средний ЗР, например, при анализе разностей НП на отсутствие грубых погрешностей или при моделировании погрешностей навигационной информации в тренажерах.

Выводы

1. Широко применяющийся в навигационно-тактических и навигационно-оперативных расчетах ЗР Гаусса по отношению к определению предельных погрешностей НП и места корабля представляется не адекватным реальным свойствам погрешностей навигационных измерений. Поэтому использование ЗР Гаусса может привести к грубым ошибкам в расчетах: до 1,7 раза при определении длин, до 2,9 раза при вычислении площадей, до 16 раз в числе нарушений заданного условия (значение 2,9 в статье не обосновано из-за ее ограниченного объема статьи).

2. Требования к точности морских средств навигации (МСН) в тактико-технических заданиях на разработку и изготовление МСН, основанные на ЗР Гаусса, могут привести в конечном итоге к таким же последствиям, как в п. 1.

3. В гораздо большей степени адекватен реальным свойствам погрешностей навигационной информации закон Лапласа в варианте В. Т. Кондрашихина.

4. В случае расчетов показателей НБП с использованием таблиц МТ-2000 [11] полученную величину безопасного расстояния целесообразно умножить на коэффициент $K=1,666$ при заданной вероятности $P=0,999$; $K=1,562$ при $P=0,997$; $K=1,422$ при $P=0,99$; $K=1,219$ при $P=0,95$.

5. При выполнении расчетов оптимизации по МНК для повышения строгости результатов полученную оценку точности следует умножить на коэффициент, учитывающий отличие рассмотренного закона от закона Гаусса.

6. Программы государственных испытаний морских средств навигации и/или их опытной эксплуатации должны предусматривать идентификацию вида законов распределения погрешностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попеко Г. П., Соломатин Е. П. Навигация. (Курс кораблевождения, том 1). – Л.: УГС ВМФ, 1961. – 579 с.
2. Кораблевождение / Под ред. А. П. Ковалева.–Л.: ВСОК ВМФ, 1971. –316 с.
3. Груздев Н. М. Навигационная безопасность плавания. – СПб, Изд-во Военно-морского института, 2002. – 21 с.
4. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
5. Методики вероятностных расчетов при решении навигационных задач на кораблях и судах ВМФ (МВР-96)./ Михальский В. А., Рябоконт В. А. и др. – СПб.: ГУНиО МО, 1999. – 218 с.
6. Мудров В. И., Кушко В. А. Методы обработки измерений. – М., Сов. радио, 1976. –184 с.
7. Кондрашихин В. Т. Определение места судна. - М.: Транспорт, 1989. – 230 с.
8. Михальский В. А. Промежуточный закон M -распределения погрешностей навигационных измерений./ В сб. научных трудов СПГУВК Информационные технологии на транспорте. – СПб.: Политехника, 2003. – С. 101–104.
9. Кондрашихин В. Т. Теория ошибок и ее применение к задачам судовождения. – М.: Транспорт, 1969. – 256 с.
10. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 247 с.
11. Мореходные таблицы (МТ-2000). – СПб.: ГУНиО МО РФ, 2002. – 571 с.

ON COMBINATION OF ERRORS DISTRIBUTION LAWS IN NAVIGATION PARAMETERS MEASUREMENT

V. A. Mikhalsky
(GNINGI, RF MoD)

The errors distribution laws for 42 kinds of navigation information have been studied. The method of the limiting error calculation for random distribution law has been developed. The table of coefficients of limiting transition for the excess scale having the necessary width has been calculated.

**СВЕТОДИОДНЫЕ ЗРИТЕЛЬНЫЕ СРЕДСТВА БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ
НАВИГАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

**Г. Г. ЛУКЬЯНОВ,
Д. В. КОЗЛОВ**
(ОАО «НТП «НАВИ-ДАЛС»),
А. Ю. ОБУХОВ
(46-ой ЦНИИ МО РФ)

Описаны принципы построения светодиодных светооптических аппаратов большой мощности, приведены технические характеристики опытных образцов.

Введение

Одним из основных направлений в разработке как зарубежных, так и отечественных источников света в зрительных средствах навигационного оборудования, является замена традиционных ламп накаливания на полупроводниковые (светодиодные) излучатели. К достоинствам последних относятся: высокая надежность (50–100 тысяч часов), безынерционная работа, низковольтное питание и малый потребляемый ток. Благодаря этим качествам становится возможным создание светооптических аппаратов, длительно работающих в автоматическом режиме без технического обслуживания. Это особенно актуально для знаков (световых маяков), расположенных в отдаленных или труднодоступных районах.

В настоящее время выпускаются и достаточно широко используются светотехнические аппараты на светодиодных источниках света с дальностью действия 3–5 миль. Имеются отдельные сведения об аппаратах с дальностью действия до 13 миль, в основном это аппараты с направленным излучением (створные знаки). Сведения о светодиодных навигационных аппаратах с дальностью действия более 15 миль практически отсутствуют. Ниже приводятся расчеты, положенные в основу построения опытных образцов светооптических устройств (СОУ), разработанных ОАО «НТП «НАВИ-ДАЛС», с дальностью действия до 15 миль без применения вторичной оптики, и до 20 миль с ее применением.

Критерии выбора светодиодных источников света

Основными критериями при выборе светодиодов для построения светооптических устройств является их эффективность, позволяющая получить максимальную осевую силу света при минимальном энергопотреблении и минимальном количестве источников света.

При построении светооптических устройств на светодиодах без применения дополнительных оптических систем (линз, параболических отражателей и т. д.), круговая диаграмма всего аппарата определяется суммой диаграмм направленности всех отдельных источников (светодиодов), а средняя осевая сила света может быть рассчитана [1] по формуле:

$$I = (I_{VD} \times 2\Theta_{0,5} \times N \times k) / 360, \quad (1)$$

где I – средняя осевая сила света, кд;
 I_{VD} – осевая сила света одного светодиода, кд;
 $2\Theta_{0,5}$ – угол излучения светодиода по уровню 0,5 (град.);
 N – количество светодиодов;
 $k = 1 \dots 1,5$ – коэффициент формы.

Энергетическую эффективность источников света при построении СОУ кругового действия без дополнительных оптических систем можно оценить [1] по формуле:

$$\eta_{VD} = (I_{VD} \times 2\Theta_{0,5} \times k) / (360 \times P_{VD}), \quad (2)$$

где I_{VD} – осевая сила света одного светодиода, кд;
 η_{VD} – энергетическая эффективность светодиода, кд/Вт;
 P_{VD} – потребляемая мощность одного светодиода, Вт.

При построении СОУ с применением дополнительных оптических систем основными критериями выбора светодиодов является его световой поток и световая отдача. Световой поток, который может быть эффективно обработан оптической системой, можно оценить по формуле [1]:

$$\Phi_{VD} = I_{VD} \times 2 \times \pi \times (1 - \cos(2\Theta_{0,5}/2)), \quad (3)$$

где Φ_{VD} – световой поток в телесном угле по уровню интенсивности равный 0,5 (лм);
 I_{VD} – осевая сила света одного светодиода, кд;
 $2\Theta_{0,5}$ – угол излучения светодиода по уровню 0,5 (град.).
 Световая отдача рассчитывается по формуле [1]:

$$\eta_I = \Phi_{VD} / P_{VD}, \quad (4)$$

где η_I – световая отдача светодиода, лм/Вт;
 Φ_{VD} – световой поток в телесном угле по уровню интенсивности равный 0,5, лм;
 P_{VD} – потребляемая мощность одного светодиода, Вт.

При выборе типов светодиодов немаловажную роль играют их габариты, возможность замены на аналогичные других производителей, их серийное производство, повторяемость, надежность, соответствие условиям эксплуатации.

Расчет необходимого количества светодиодов для получения заданной дальности видимости СОУ

В настоящее время не существует апробированной и рекомендованной МАМС (Международная ассоциация маячных служб) методики расчета дальности видимости монохромных (светодиодных) источников света. Для оценки необходимой силы света для получения требуемой дальности видимости воспользуемся известной формулой [2]:

$$I = E_{\text{п}} \times D^2 \tau^{-D}, \quad (5)$$

где I – сила света огня, кд;

D – дальность видимости огня, км;

τ – коэффициент прозрачности атмосферы на км;

$E_{\text{п}}$ – пороговая освещенность на зрачке наблюдателя, мклк.

Пороговая освещенность, принятая для ночных наблюдений в морских условиях составляет:

- для белого огня – 0,2 мклк;
- для красного огня – 0,5 мклк;
- для зеленого огня – 1,5 мклк.

Все это справедливо для традиционных источников света с широкополосным спектром. Однако согласно закону Гельмгольца-Кольрауша, насыщенность цвета влияет на его яркость [3]. Чем ближе излучение к монохроматическому свету, тем более ярким оно кажется. В работе [3] для монохромных источников света предлагаются оценки пороговой чувствительности глаза 0,02–0,05 мклк.

Используя значения пороговой освещенности, по формуле (5) можно определить осевую силу света, необходимую для получения дальности видимости 10–20 миль для коэффициента прозрачности атмосферы, – 0,74 на милю.

Расчет необходимого количества светодиодов и потребляемой мощности для получения заданной дальности видимости без применения дополнительных оптических систем проводится по формулам (1) и (2). На рис. 1 приведены результаты расчета необходимого количества светодиодов нескольких типов.

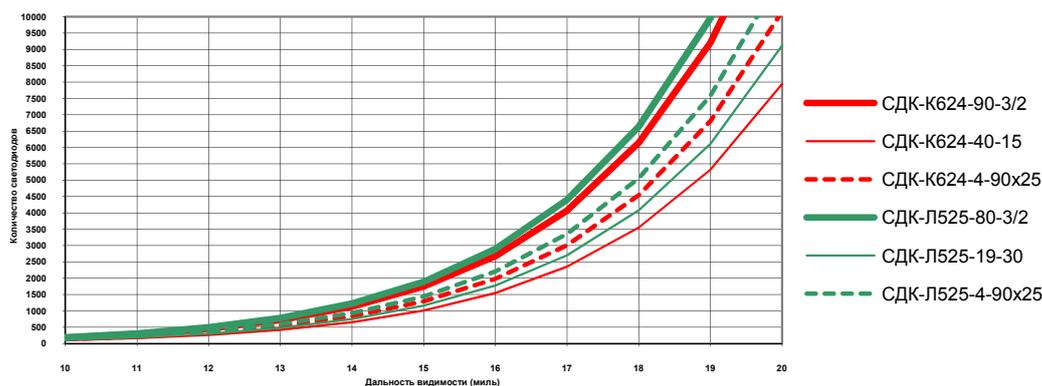


Рис. 1. Необходимое количество светодиодов для получения заданной дальности видимости

Расчет необходимого количества светодиодов и потребляемой мощности для получения заданной дальности видимости с применением дополнительных оптических систем

Необходимое количество светодиодов при построении СОУ кругового действия с применением дополнительных оптических систем можно рассчитать [1] по формуле:

$$N = I \times 4\pi \times \sin(\alpha) \times \eta_0 / \Phi_{VD}, \quad (6)$$

где N – количество светодиодов;
 Φ_{VD} – световой поток одного светодиода, лм;
 α – требуемый вертикальный угол излучения, град;
 I – требуемая осевая сила света СОУ, кд;
 η_0 – КПД оптической системы.

Результаты расчета необходимого количества светодиодов приведены на рис. 2 для светодиодов СДК-К624-16-30 и СДК-Л525-19-30 и вертикальных углов излучения 1,5, 3 и 7 град.

На рис. 3 приведены результаты расчета потребляемой мощности для светодиодов СДК-К624-16-30 и СДК-Л525-19-30 и вертикальных углов излучения 1,5; 3 и 7 град.

Дополнительные расчеты показали, что построение СОУ кругового действия с дальностью видимости 20 миль без применения дополнительных оптических систем нецелесообразно, так как для этого потребуются десятки тысяч светодиодов, а потребляемая мощность составит киловатты.

При построении СОУ кругового действия с дальностью видимости до 20 миль целесообразно использование светодиодов с повышенным световым потоком, а вертикальный угол излучения уменьшать до 1,0–1,5 град. При этом потребуется около 1000 светодиодов, а потребление составит 200–400 Вт.

Построение СОУ кругового действия с дальностью видимости до 15 миль возможно без применения дополнительных оптических систем, при этом потребуется 1200–1400 светодиодов, а потребление составит 200–300 Вт.

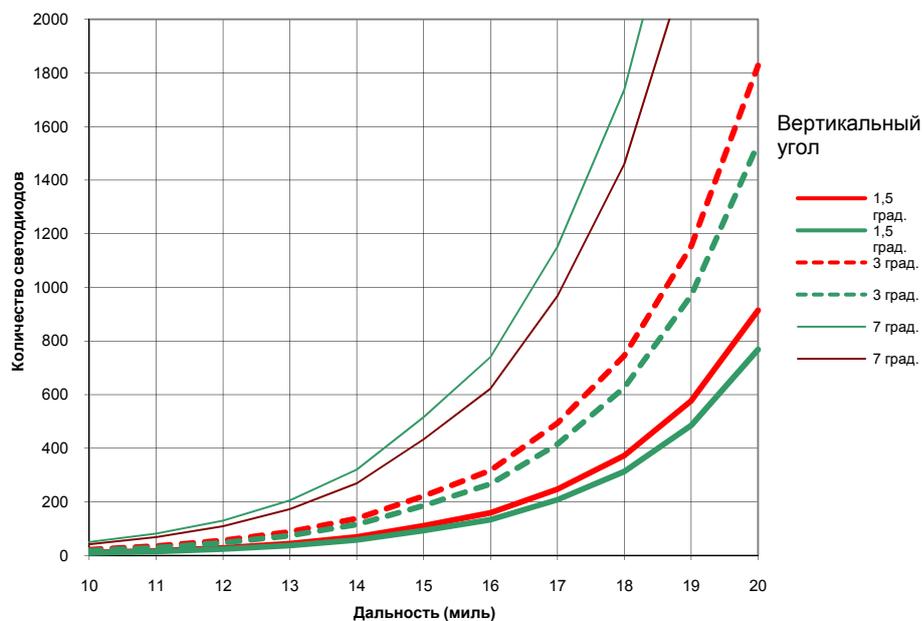


Рис. 2. Необходимое количество светодиодов для получения заданной дальности видимости

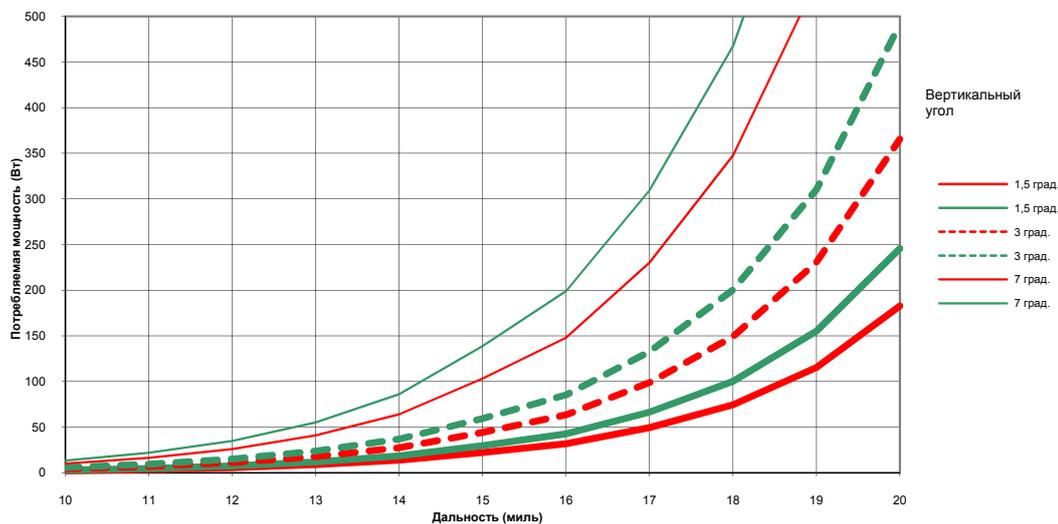


Рис. 3. Потребляемая мощность

Составной частью СОУ с дальностью видимости 20 миль является излучатель, содержащий плоскую цилиндрическую линзу и линейку светодиодов, установленную в фокусе линзы. Светодиоды сориентированы так, чтобы обеспечить горизонтальный угол излучения не менее 60 град. Среднюю осевую силу света на выходе оптической системы излучателя можно приблизительно оценить [1] по формуле:

$$I = (N \times \Phi_{VD} \times \eta_0 \times 360) / (4\pi \times \text{Sin}(\alpha/2) \times \gamma), \quad (9)$$

где I – средняя осевая сила света, кд;
 N – количество светодиодов;
 Φ_{VD} – световой поток одного светодиода, лм;
 α – требуемый вертикальный угол, град.;
 γ – горизонтальный угол излучения, град.;
 η_0 – КПД оптической системы.

Для излучателя с вертикальным углом излучения 1,5 град. и горизонтальным 60 град. для светодиодов СДК-К624-16-30 и СДК-Л525-19-30 эта величина составляет 2000 кд и 2376 кд соответственно. Диаграмма излучения в горизонтальной плоскости одного излучателя приведена на рис. 4.

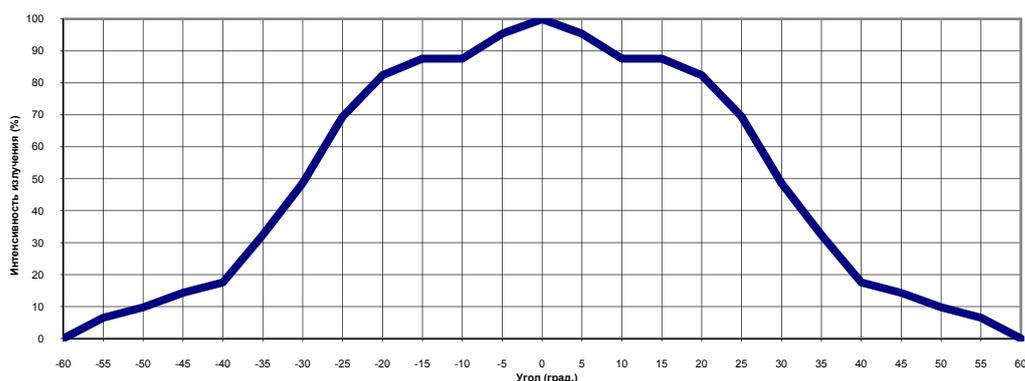


Рис. 4. Диаграмма излучения в горизонтальной плоскости одного излучателя

Излучатели собираются в отдельные светооптические секции по 10 излучателей каждый. Диаграммы направленности светооптической секции повторяют диаграмму отдельного излучателя. Светооптическая секция содержит прозрачный защитный колпак, который вносит дополнительное затухание. Для получения круговой диаграммы направленности СОУ шесть светооптических секций располагают по кругу под углом 60 град друг к другу.

Диаграмма излучения в горизонтальной плоскости всего СОУ кругового действия вычисляется путем сложения диаграмм светооптических секций,

расчетная неравномерность не превышает 10%. Круговая диаграмма излучения приведена на рис. 5.

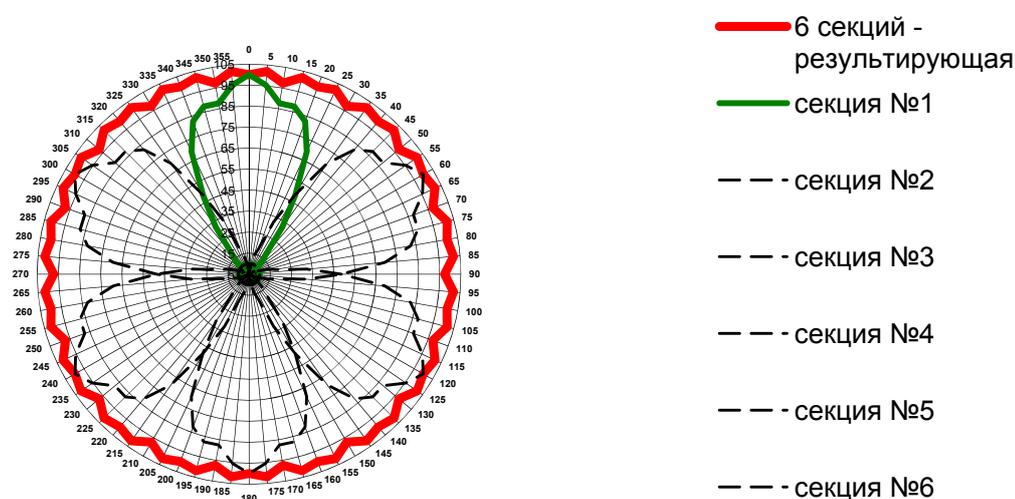


Рис. 5. Диаграмма излучения в горизонтальной плоскости шести секций

Светооптическое устройство светящего навигационного знака

Светооптическое устройство светящего навигационного знака (СОУ-СНЗ) предназначено для использования на береговых необслуживаемых светящих навигационных знаках (круговых и секторных) с дальностью видимости до 15 миль. На рис. 6 приведена фотография СОУ-СНЗ.

Конструктивно СОУ-СНЗ состоит из одного, двух или трех круговых излучателей, защищенных прозрачным герметичным корпусом. Излучатели и корпус крепятся к металлическому основанию, в котором находится блок управления СОУ, а на лицевой панели выведены разъемы для подключения питания и внешних датчиков. Сверху излучатели закрыты поликарбонатным колпаком, внутри которого расположены антенны спутниковой навигационной системы и радиомодема. Использование вторичной оптики не предусмотрено.

В отличие от большинства светооптических устройств на светодиодах, где используются круговые диски с одним рядом светодиодов, в СОУ-СНЗ излучатель выполнен из набора вертикальных линейных излучателей (светодиодных линеек). Такое решение дало ряд следующих положительных качеств.

1. Излучатель получился пустотелым, благодаря этому внутри него удалось разместить монтажные платы преобразователя напряжения и стабилизатора тока, а также разъемы для подключения светодиодных линеек.

Образовался свободный объем для создания естественной циркуляции воздуха и тепловой конвекции.

2. Светодиодные линейки оказались технологичными в изготовлении и унифицированы для установки светодиодов 5 и 12 мм. Цвет излучения определяется только типом светодиодов.

3. В зависимости от привязки на местности излучатели могут комплектоваться неполным набором светодиодных линеек, или часть из них может быть с другим цветом излучения. В последнем случае имеем секторный огонь с одним или несколькими цветами. Для получения резких границ между секторами разного цвета снаружи корпуса аппарата могут устанавливаться ограничительные шторки.



Рис. 6. СОУ-СНЗ

Основные сравнительные характеристики разработанного образца светооптического устройства светящего навигационного знака (СОУ-СНЗ) и существующих зарубежных аналогов [1, 4–6] приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Сравнительные характеристики СОУ-СНЗ и зарубежных аналогов

Характеристика	СОУ СНЗ	NL300		LED350	VLB-48
Фирма - разработчик	ОАО «НТП «Нави-Далс»	Sabik Oy		Sabik Oy	Vega Industries Limited
Страна	Россия	Финляндия		Финляндия	Новая Зеландия
Источник света	Светодиоды	Стекловолоконные лампы	Галогеновые лампы	Светодиоды	Светодиоды
Мощность при включении огня, Вт	300	180	180	60	80
Наличие внешних линз, отражателей	Нет	Ø300 мм акриловая линза Френеля		Ø350 мм поликарбонатная линза	Акриловые цилиндрические
Рабочее напряжение, В	11–30	10,3	12	Нет сведений	10–25
Дальность видимости для белого цвета, миль	15	13,3	12,5	8,7	10,7
Вертикальный угол излучения, $2\theta_{1/2}$	20°	1,2° ... 1,7°		1,6°	5°
Горизонтальный угол излучения, $2\theta_{1/2}$	круговой	круговой		круговой	круговой
Характеристика огня	произвольная	произвольная		произвольная	240 фиксированных
Габаритные размеры, см	100,0 × Ø 43,0	76,4 × Ø 45,0		64,6 × Ø 36,5	39,1 × Ø 235,5
Рабочая температура	от –30°С до +40°С	От –40°С до +60°С		От –20°С до +50°С	От –25°С до +50°С
Система мониторинга	да	нет		да	да
Срок службы, лет	10	до 10 (лампа 1000 ч)		до 10	до 10

Светооптическое устройство маяка

Светооптическое устройство маяка (СОУ-М) предназначено для использования на автоматических световых маяках с дальностью видимости до 20 миль. На рис. 7 приведена фотография СОУ-М.



Рис. 7. Светооптическое устройство маяка СОУ-М

Конструктивно изделие выполнено в виде шести отдельных секций излучателей и одного блока управления. Блок управления формирует заданную характеристику огня, измеряет ток нагрузки каждой секции, осуществляет управление радиомодемом. Каждая секция состоит из влагозащищенного прямоугольного шкафа, с лицевой стороны которого крепятся до десяти светодиодных излучателей. Каждый излучатель состоит из собственного корпуса, в котором установлены монтажные платы преобразователя напряжения, стабилизатор тока, светодиоды и микрометрические винты фокусировки. Передняя панель излучателя закрыта плоской цилиндрической линзой Френеля, перераспределяющей световой поток от светодиодов на выходе излучателя до 60-ти град. по горизонтали и до полутора градусов по вертикали. На объекте секции могут располагаться равномерно по кругу, если требуется круговое излучение, или в ином порядке, обеспечивая наибольшую мощность излучения в наиболее важном направлении. Потребляемая мощность и сила света СОУ-М практически не зависит от цвета излучения, так как в изделии отсутствуют светофильтры. Цвет излучения определяется только типом светодиодов, поэтому наибольшая эффективность использования данного светооптического устройства достигается на объектах с цветными огнями (красными, зелеными). Многократное взаимное резервирование светодиодов и отсутствие движущихся деталей позволяет говорить о высокой надежности изделия, не требующего присутствия постоянного обслуживающего персонала.

Основные сравнительные характеристики разработанного образца светооптического устройства маяка (СОУ-М) и существующих аналогов [1, 4–6] приведены в табл. 2.

Таблица 2.

Сравнительные характеристики СОУ-М и зарубежных аналогов

Характеристика	СОУ-М	СОУ ЭМВ-930М	VRB-25	ZL-RB	TRB-355
Фирма - разработчик	ОАО «НТП «Нави-Далс»	-	Vega Industries Limited	Zeni Lite Bouy Co., Ltd.	Tideland Signal
Страна	Россия	Россия	Новая Зеландия	Япония	США
Источник света	светодиоды	лампа КГММ110-1000	Морская ксеноновая лампа	Галогеновая лампа	Стандартная морская
Мощность при включении огня, Вт	500	2000	170	150	200
Наличие внешних линз	60 плоских линз	4 линзы Л-500 (каждая из 5 диоптрических и 6 катодиоптрических элементов)	6 (8) акриловых линз Френеля	106×305 Линза из 6 акриловых панелей	Вращающийся параболический отражатель
Наличие поворотного механизма	нет	Шаговый двигатель, 1–5 об/мин	0,5–15,9 об/мин, дискрет 1/248 диапазона	да	0,5–10 об/мин
Рабочее напряжение, В	220 номинал, от 90 до 350 переменного или постоянного тока	220	11–20	24	120 (240)
Дальность видимости, миль	20	27,4 – белый, 20 – красный, 17 – зеленый.	22,8 – белый, 20 – красный, 20,2 – зеленый.	20,6 – белый	24,9 – белый
Вертикальный угол излучения, $2\theta_{1/2}$	2,5°	4,5° (уровень 0,1)	1,6°	Нет сведений	Нет сведений
Горизонтальный угол излучения, $2\theta_{1/2}$	360°	5,5° (Уровень 0,1)	0,6°	Нет сведений	1,8° – 6°
Характеристика огня	произвольная	5 фиксированных характеристик огня	Проблесковый, чередующийся, групповой проблесковый	Одиночная вспышка, группа вспышек	Определяется скоростью вращения
Габаритные размеры, см	136,3 см × Ø 96,8	2340×Ø1045	670×Ø480	650×Ø450	1136×Ø470
Рабочая температура	От –30°С до +40°С	От –30°С до +40°С	Нет сведений	От –20°С до +60°С	Нет сведений
Система мониторинга	есть	нет	нет	нет	нет
Срок службы, лет	15	50 (лампа ≈100 часов)	Нет сведений	Нет сведений	Нет сведений

Выводы

1. Для обеспечения большой дальности действия светооптических устройств (20 миль), целесообразно использование дополнительных оптических систем.

2. Дальность действия светооптических устройств до 15 миль, можно обеспечить без использования дополнительных оптических систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ряд мобильных и стационарных оптических систем из полимерных материалов и монохромных (светодиодных) источников света для зрительных средств навигационного оборудования прибрежной зоны О(М)ТВД. ОКР «Резерв» (гл. конструктор ОКР Дубров А. П.). Технический проект. Пояснительная записка, часть 2. (ТМИЛ.466451.001 ПЗ). – СПб: ОАО «НВП «НАВИ-ДАЛС». – 2004. – 140 с.
2. Инструкция по навигационному оборудованию (ИНО-2000). ГУНиО МО РФ. – СПб: ЦКФ ВМФ. – 2001. – 328 с.
3. Разработка светодиодных источников света для зрительных средств навигационного оборудования прибрежной зоны О (М) ТВД. ОКР «Резерв» (гл. конструктор ОКР Дубров А. П.). Эскизный проект. Пояснительная записка. (КРИА.676000.001 ПЗ). – Москва: НЛП «Некстрон». – 2002. – 16 с.
4. Дополнение №1 к Справочнику по средствам навигационного оборудования. ГУНиО МО РФ. – СПб: ЦКФ ВМФ. – 1996. – 280 с.
5. AIDS to NAVIGATION Catalogue Equipment & System (Технические характеристики на СОУ и систему мониторинга и контроля E001). – Estonia, Tallin: ЕКТА. – 2000. – 56 с.
6. SABIK Marine Products (Технические характеристики на СОУ и систему мониторинга и контроля NavSCADA, WebSCADA). – Finland, Porvoo: SABIK Oy. – 2001. – 32 с.

HIGH-POWER LED VISUAL AIDS TO NAVIGATION

G. G. Lukyanov,

D. V. Kozlov

(STE «NAVY-DALS»),

A. Y. Obukhov

(46 Central Research Institute, RF Mod)

The principles of building the high-power LED apparatus are described. Technical characteristics of test models are presented.

ГИДРОГРАФИЯ И МОРСКАЯ КАРТОГРАФИЯ

ГРНТИ 78.21.36

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ РАВНОУГОЛЬНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ЭЛЛИПСОИДА НА ШАРЕ ПО ГАУССУ

А. В. КАВРАЙСКИЙ
(ГНИНГИ МО РФ)

Предложен алгоритм решения задачи равноугольного изображения эллипсоида на шаре с искажениями длин не ниже третьего порядка малости (по Гауссу) с учётом особенностей такого изображения в полярном районе.

В практике навигационно-гидрографического обеспечения морской деятельности при решении задач геодезии и картографии часто используются различные методы изображения эллипсоида на шаре. Их применение позволяет решать задачи, относящиеся к поверхности земного эллипсоида (эллипсоида вращения с малым сжатием), по простым формулам сферической тригонометрии. В частности, методы изображения эллипсоида на шаре применяются для расчётов картографических сеток некоторых проекций морских карт, для упрощённого решения прямых (ПГЗ) и обратных (ОГЗ) геодезических задач. В числе известных методов такого рода наилучшее приближение к строгому решению задач на эллипсоиде даёт равноугольное изображение эллипсоида на шаре с искажениями длин не ниже третьего порядка малости, формулы которого впервые выведены Гауссом, называемое также как «равноугольное изображение эллипсоида на шаре по Гауссу» [1–3].

В морской картографии данный метод принят для вычисления картографических сеток в поперечной проекции Меркатора, в гномонической и стереографической проекциях. Методы решения ПГЗ и ОГЗ весьма актуальны для математического обеспечения расчёта государственных морских границ (границы территориального моря, границы исключительной экономической зоны и др.).

Равноугольное изображение по Гауссу обеспечивает малые искажения длин в пределах определённого широтного пояса, предельная ширина которого на практике допускается до $\pm 20^\circ$ от заданной средней параллели φ_n , на которой искажения длин отсутствуют (масштаб изображения $m = 1$).

Последовательность вычислений для равноугольного изображения эллипсоида на шаре по Гауссу определяется формулами [1–3]:

$$\operatorname{tg} u_n = \sqrt{\frac{N_n}{M_n}} \operatorname{tg} \varphi_n; \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{\sin \varphi_n}{\sin u_n}; \quad (2)$$

$$U(\varphi) = \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \left(\frac{1 - e \sin \varphi}{1 + e \sin \varphi} \right)^{0,5e} \quad (3)$$

$$K = \operatorname{ctg} \left(45^\circ + \frac{u_n}{2} \right) U_n^\alpha; \quad (4)$$

$$\operatorname{ctg} \left(45^\circ + \frac{u}{2} \right) = \frac{K}{U^\alpha}; \quad (5)$$

$$w = \alpha \lambda; \quad (6)$$

$$R = \sqrt{M_n N_n}; \quad (7)$$

$$m = \frac{\alpha R \cos u}{N \cos \varphi}, \quad (8)$$

где φ, λ – географические координаты на эллипсоиде;
 u, w – сферические широта и долгота на шаре;
 M, N – радиусы кривизны меридиана и первого вертикала эллипсоида;
 φ_n – широта средней («нормальной») параллели изображаемой области эллипсоида;
 e – первый эксцентриситет эллипсоида;
 α, K – параметры изображения эллипсоида на шаре;
 R – радиус шара;
 m – масштаб изображения эллипсоида на шаре.

Индекс n в формулах означает, что величина вычисляется для широты φ_n .

Для характеристики величин искажения длин ($v = m - 1$) при данном способе проектирования эллипсоида на шар в табл. 1 приведены результаты расчётов величины $m - 1$ по формулам (1–8) для широтного пояса, вмещающего Охотское море: $\varphi_S = 43^\circ$, $\varphi_N = 63^\circ$, $\varphi_n = 53^\circ$. Постоянные параметры сферического изображения данной области имеют значения: $\alpha = 1,000441866$, $K = 0,996108924$, $R = 6\,384\,118,03$ м.

Таблица 1

Величины искажений длин в широтном поясе 53° – 63°

φ°	$(m-1)10^7$	φ°	$(m-1)10^7$
63	-119	51	1
61	-60	49	7
59	-25	47	24
57	-7	45	57
55	-1	43	111
53	0		

Приведённые в таблице данные означают, что предельная погрешность расчёта расстояний S , выполненных на данном сферическом изображении, принимаемом единым для всей области, составит $\pm 0,0000119S$, т.е., например, 5 м для расстояния 400 км. Отметим, что если для каждого вычисляемого расстояния, не превышающего 400 км, рассчитывать свою среднюю широту φ_n и соответствующие ей параметры сферического изображения, то предельные погрешности будут на два порядка меньше. Однако в случае массовых расчётов, например, для определения морских границ по множеству точек береговых исходных линий, процедура расчёта заметно удлинится, а получаемое повышение точности не имеет практического смысла, так как сами точки исходных линий определяются оцифровкой береговой линии навигационных морских карт масштабов 1: 100 000–1:300 000 и имеют погрешности 100–200 м.

Рассматривая возможные методы практического применения изображения эллипсоида на шаре по Гауссу, особенно при построении соответствующего программного обеспечения, необходимо учесть особенности, возникающие при изображении на шаре полярного сегмента земного эллипсоида.

Из приведённой выше формулы (6), учитывая, что при $\varphi_m \neq 90^\circ$ $\alpha > 1$, следует, что изображение полного (замкнутого) широтного пояса эллипсоида не будет сплошным, так как с меридианом шара $w = \pm 180^\circ$ будут совпадать два меридиана эллипсоида, меньшие по абсолютной величине, чем 180° [3]. Это свойство не играет роли в решении задач в пределах весьма значительных областей поверхности Земли, вписывающихся в рамки сфероидической трапеции, как в приведённом выше примере для Охотского моря. Однако, если данный способ изображения эллипсоида на шаре применить для отображения целиком полярного сегмента эллипсоида, возникающий «сектор разрыва» создаёт определённые неудобства. Предлагаемый путь устранения данного свойства – принять условие, что в случае, если рассматриваемая

географическая область включает точку полюса, параметр изображения эллипсоида на шаре $\alpha = 1$, а параметр R рассчитывается по формуле [3]:

$$R = c\sqrt{M_n N_n}. \quad (9)$$

Введённый дополнительный параметр c подбирается под условием получения оптимального распределения искажений длин: $\max |v| = \min$.

Приведем простой и наглядный способ подбора параметра c .

Допустим, что отображается полярный сегмент, ограниченный с юга широтой 50° , т. е. предельный широтный пояс с широтами $\varphi_S = 50^\circ$ и $\varphi_N = 90^\circ$. Применяя равноугольное изображение эллипсоида на шаре по Гауссу без каких-либо изменений, по формулам (1–8) получим распределение искажений длин (в единицах 7-го знака), показанное во 2-й колонке табл. 2. Приняв условие $\alpha = 1$, получим распределение искажений длин, показанное в 3-й колонке табл. 2: $v_{min} = -563$, $v_{max} = -91$, предельная абсолютная величина искажения – $\max |v| = 563$. Легко убедиться, что для получения оптимального распределения искажений в положительную и отрицательную стороны около 0 следует принять

$$c = 1 - 0,5(v_{min} + v_{max}). \quad (10)$$

Введя это условие (в дополнение к $\alpha = 1$), получим по формулам (1), (3)–(5), (8)–(10) $c = 1,000032664$ и распределение искажений длин, приведенное в колонке 4 табл. 2, где $v_{min} = -236$, $v_{max} = 236$, $\max |v| = 236$.

Таблица 2

Величины искажений длин в широтном поясе $50^\circ - 90^\circ$

φ°	$v \cdot 10^7$		
	$\alpha > 1, R = \sqrt{M_n N_n}$	$\alpha = 1, R = \sqrt{M_n N_n}$	$\alpha = 1, R = c\sqrt{M_n N_n}$
90	-7407	-115	211
86	-417	-134	193
82	-149	-188	139
78	-41	-269	58
74	-5	-366	-39
70	0	-461	-134
66	5	-535	-208
62	39	-563	-236
58	133	-518	-191
54	318	-371	-44
50	626	-91	236

Отметим, что коэффициент c обеспечивает минимальность крайних искажений длин в отображаемой области независимо от ее географического положения и принятого значения параметра α . Поэтому нет смысла ограничивать его применение только случаем изображения замкнутого полярного сегмента.

С учётом сформулированных выше положений построен следующий универсальный алгоритм вычислений для изображения задаваемой области эллипсоида на шаре с искажениями длин третьего порядка малости (по Гауссу).

1. Исходные и задаваемые величины.

φ_S , φ_N – южная и северная широты изображаемой области (если изображается целиком полярный сегмент, то задаётся $\varphi_N = 90^\circ$);

φ_i , λ_i – географические координаты точек на эллипсоиде подлежащие пересчёту в сферические координаты u_i , w_i ;

a , f – большая полуось и сжатие эллипсоида, на котором определены исходные географические координаты.

2. Функция $U(\varphi)$ равноугольного изображения эллипсоида на шаре, используемая в вычислениях:

$$U(\varphi) = \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \left(\frac{1 - e \sin \varphi}{1 + e \sin \varphi} \right)^{0,5e}.$$

3. Пересчет φ_S , φ_N , φ_i , λ_i в радианы.

4. Вычисление промежуточных величин.

Первый эксцентриситет: $e = \sqrt{2f - f^2}$.

Второй эксцентриситет: $\varepsilon = \sqrt{\frac{2f - f^2}{(1 - f)^2}}$.

Нормальная параллель: $\varphi_n = (\varphi_N + \varphi_S)0,5$.

Радиусы кривизны эллипсоида на нормальной параллели:

$$M_n = \frac{a(1 - e^2)}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi_n}}; N_n = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi_n}}.$$

Сферическая широта нормальной параллели:

$$u_n = \arctg \left(\sqrt{\frac{M_n}{N_n}} \operatorname{tg}(\varphi_n) \right).$$

5. Вычисление параметров изображения эллипсоида на шаре.

Параметр изображения α :

$$\alpha' = (1 + \varepsilon^2 \cos^4 \varphi_n)^{0,5}; \text{ если } \varphi_N < \frac{\pi}{2}, \text{ то } \alpha = \alpha'; \text{ если } \varphi_N = \frac{\pi}{2}, \text{ то } \alpha = 1.$$

(величина α' может вычисляться также по равнозначной формуле (2)).

Параметр изображения K :

$$K = \frac{U(\varphi_n)^\alpha}{\operatorname{tg}(\pi/4 + u_n/2)}.$$

Предварительная величина радиуса шара:

$$R' = \sqrt{M_n N_n}.$$

6. Вычисление коэффициента c для получения оптимального распределения масштаба в изображаемой области:

- создается ряд из D значений широт от φ_S до φ_N ($D \geq 10$) по формулам

$$h = (\varphi_N - \varphi_S):D, \quad j = 0 \dots D, \quad \varphi_j = \varphi_N - hj,$$

при этом, если в пункте 1 задано $\varphi_N = 90^\circ$, то для избежания в дальнейшем деления 0/0 при вычислении $U(\varphi)$ следует принять $\varphi_0 = \frac{\pi}{2} - 2 \cdot 10^{-9}$;

- вычисляется ряд значений v_j по формулам

$$u_j = 2 \operatorname{arctg} \left(\frac{U(\varphi_j)^\alpha}{K} \right) - \frac{\pi}{2}, \quad m_j = \frac{\alpha R' \cos u_j}{N(\varphi_j) \cos \varphi_j}, \quad v_j = m_j - 1;$$

- определяются величины v_{min} и v_{max} и вычисляется коэффициент c по формуле

$$c = 1 - 0,5(v_{min} + v_{max}).$$

7. Вычисление радиуса шара, принимаемого для решения задач по сферическим формулам:

$$R = cR'.$$

8. Вычисление сферических координат по геодезическим:

$$u_i = 2 \operatorname{arctg} \left(\frac{U(\varphi_i)^\alpha}{K} \right) - \frac{\pi}{2}; w_i = \alpha \lambda_i.$$

9. Масштаб изображения эллипсоида на шаре с применением универсального алгоритма:

$$m = \frac{\alpha R \cos u}{N(\varphi) \cos \varphi},$$

Где величины α и R вычислены согласно пунктам 5–7.

Практические расчеты показали, что для вычисления коэффициента c , обеспечивающего оптимальное распределение искажений длин, достаточно принять $D = 10$ (п. 6).

Предлагаемый видоизмененный способ равноугольного изображения эллипсоида на шаре позволяет решать геодезические задачи по сферическим формулам с минимальными погрешностями по отношению к строгому решению на эллипсоиде для любых географических районов, в том числе для полярного сегмента, ограниченного с юга параллелью $\varphi_S \geq 50^\circ$.

Пример искажения длин для широтного пояса $\pm 20^\circ$ в средних широтах показан в табл. 1. Вычисления по приведённому выше алгоритму дают результат, приведенный в таблице 3.

Таблица 3

Величины искажений длин в широтном поясе 53° – 63° при использовании видоизмененного способа равноугольного изображения эллипсоида на шаре

φ°	$\nu 10^7$	φ°	$\nu 10^7$
63	-115	51	5
61	-56	49	11
59	-21	47	28
57	-3	45	61
55	3	43	115
53	4		

Из сравнения с табл. 1 видно, что за счет ввода коэффициента c (в данном случае $c = 1,0000004$) крайние искажения длин и для средних широт несколько уменьшаются, хотя и незначительно в практическом смысле.

Приведём аналогичные расчёты для полярного сегмента, ограниченного параллелью $\varphi_S = 70^\circ$. В этих широтах для навигационных целей используются квазигеографические координаты для построения которых применяется изображение эллипсоида на шаре. Задав $\varphi_S = 70^\circ$, $\varphi_N = 90^\circ$, согласно приведённому алгоритму получим: $\alpha=1$, $K=0,993515107$, $c=1,000002265$, $R = 6\,398\,413,07$ м и относительные искажения длин, приведенные в табл. 4.

Таблица 4

Величины искажений длин в широтном поясе $70^\circ-90^\circ$

φ°	$\nu 10^7$	φ°	$\nu 10^7$
90	16	78	-14
88	13	76	-16
86	10	74	-13
84	5	72	-4
82	-2	70	15
80	-8		

По данным таблицы предельная погрешность расчёта на шаре расстояний S до 1000 км (ОГЗ, счисление пути судна и т.п.) составит $S \cdot 0,0000015 = 1,5$ м, что пренебрежимо мало для решения расчётных задач навигации, гидрографии и морской картографии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сорокин А. И. Морская картография. – Л.: ГУНиО МО РФ. – 1985. – 254 с.
2. Таблицы для вычисления сеток изолиний на морских картах приближенного решения геодезических задач на большие расстояния. – Л.: УНГС ВМФ, 1957. – 288 с.
3. Каврайский А. В. Об изображении полярных районов земного сфероида на шаре с малыми искажениями. – М.: МИИГАиК, Изв. вузов, Геодезия и аэрофотосъёмка. – 1981. – № 6. – С. 24–27.

VERSATILE ALGORITHM FOR EQUAL-ANGLE REPRESENTATION OF ELLIPSOID ON A SPHERE ACCORDING TO GAUSS

A. V. Kavraisky
(GNINGI, RF MoD)

The algorithm for solving the problem of equal-angle representation of ellipsoid on a sphere with length distortion not lower than the third order of smallness (according to Gauss), taking the specific features of such representation in the polar region into account, is proposed.

**ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ГИДРОГРАФИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ПРИЕМНОЙ СПУТНИКОВОЙ АППАРАТУРЫ С-NAV****Ю. Г. ФИРСОВ**

(Государственная морская академия им. адмирала С.О. Макарова)

В статье рассматриваются особенности применения спутниковой приемной аппаратуры высокоточного глобального навигационного сервиса С-Nav в гидрографии. Дециметровая точность определения с ее помощью геодезической высоты мгновенной поверхности моря, от которой производится измерение глубин в реальном масштабе времени, открывает новые возможности для гидрографии. Представляется возможным вообще отказаться от использования мгновенного уровня моря в качестве отсчетной поверхности, заменив ее поверхностью геоцентрического эллипсоида, устанавливаемого геодезическими спутниковыми методами. Метод опробован при проведении экспедиционных работ с аппаратурой 2050R С-Nav.

В настоящее время геодезическая наука претерпевает стремительное развитие, связанное главным образом с прогрессом в области спутниковых технологий и микроэлектроники. Очередным нововведением, появившимся несколько лет назад и ставшим доступным для широкого круга пользователей, является внедрение технологии высокоточного глобального сервиса с передачей поправок через геостационарные спутники. Этот сервис доступен только для спутниковой навигационной системы НАВСТР. В настоящее время имеется несколько вариантов такого сервиса [1–4], наиболее перспективным из которых и доступным для российского пользователя является С-Nav [5].

Точности, достигаемые в С-Nav, ставят вопрос о новых методиках применения подобных систем в гидрографии, в первую очередь благодаря возможности оперативного получения геодезической высоты с дециметровым уровнем точности при практически глобальном использовании.

Во времена «до спутниковой эры» геодезисты-гидрографы привыкли к раздельному определению плановых и высотных координат точек. В нашей стране до 2001 г. плановые координаты определялись в единой системе координат 1942 года на эллипсоиде Красовского, а высоты – отдельно: в Балтийской системе высот (БСВ). Эта координатная система известна как «Пулково 42». Началом ее в части определения планового положения является центр большого зала Пулковской обсерватории и исходный азимут на пункт «Бугры». В начальном пункте астрономические координаты равны геодезическим, уклонение отвесной линии – нулевое. Началом системы отсчета высот является нуль Кронштадского футштока. В начальном пункте счета высот превышение геоида над эллипсоидом Красовского равно нулю. В координатной системе «Пулково 42» эллипсоид Красовского и квазигеоид

были подобраны так, чтобы наилучшим образом совпадать на территории СССР. Все референсные системы, в том числе и «Пулково 42», не являются геоцентрическим – центр референц-эллипсоида не совпадает с центром масс Земли.

Топографические карты суши издаются в отдельно определяемых системах координат и высот. Такую систему высот можно условно назвать ортометрической. С высотами на морских картах ситуация более сложная. Безопасность мореплавания диктует необходимость приводить измеренные глубины не к БСВ, нуль которой в морях с приливами неоднозначно связан со средним многолетним уровнем моря (СМУМ) и не отражает возможные понижения уровня. В результате в гидрографии развивается другая система отсчета высот, основанная на изучении и анализе приливных колебаний уровня моря на конкретной акватории, которую можно условно назвать «приливной» системой, основанной на среднем уровне моря (СУМ). Определив высоту СУМ, возможно далее рассчитать так называемый наименьший теоретический нуль глубин (НТУ), которые характеризует максимально низкий уровень моря, возможный по астрономическим причинам (понижение СУМ до НТУ). На основных уровнях постах, где проводятся многолетние систематические наблюдения за уровнем поверхности моря, определяется СМУМ за период 19 лет (точнее 18,6 года), который действует на определенную эпоху. Основных уровнях постов немного. При проведении гидрографических работ в морях с приливами в районе съемки, как правило, выставляется временный уровеньный пост, фиксирующий высотное положение СУМ и НТУ для данной акватории. Особенность НТУ в том, что высоты нулей «приливных» уровней на одной акватории могут различаться, они зависят от характеристик прилива, формы береговой черты, общей циркуляции водных масс и еще от очень многих факторов, трудно поддающихся учету и анализу. Фактически НТУ распространяется на сравнительно небольшую акваторию, обычно – на лист навигационной карты среднего масштаба. Таким образом, для карт, охватывающих большие акватории, поверхность НТУ является прерывистой. На смежных листах навигационных карт глубины чаще всего плохо стыкуются, потому что могут быть приведены к разным НТУ. Особенно остро стоит вопрос определения высоты поверхности НТУ в открытых районах моря, где до недавнего времени единственным способом его определения была установка мареографов. Однако при высотной привязке мареографа к береговому уровенному посту приходится прибегать к допущениям (как правило, к линейной интерполяции), значительно понижающим достоверность высоты НТУ. Независимой проверки таких расчетов до последнего времени не существовало.

С появлением приемных систем типа С-Nav для современной гидрографии открывается возможность с дециметровой точностью определять не только плановое положение, но и геодезическую высоту мгновенной

поверхности моря, от которой производится измерение глубин. При этом представляется возможным вообще отказаться от использования мгновенного уровня моря в качестве отсчетной поверхности, заменив ее поверхностью геоцентрического эллипсоида, устанавливаемого геодезическими спутниковыми методами.

Спутниковые навигационные системы (СНС) внесли огромный вклад в развитие геодезии, впервые позволив широкому кругу пользователей получать геоцентрические – трехмерные координаты на поверхности Земли. В первой СНС на низколетящих спутниках «ТРАНЗИТ» координаты станций слежения задавались в геоцентрической системе координат WGS-72. В СНС второго поколения на среднеорбитальных спутниках, НАВСТАР координаты станций слежения равномерно расположены по всей поверхности Земли и задаются в геоцентрической системе координат WGS-84. Отметим, что процедуры установления референчных координатных систем в корне отличаются от тех, которые используются для спутниковых систем отсчета. Фактически системы отсчета определяются тем, как рассчитываются спутниковые эфемериды – орбитальные параметры навигационных спутников НАВСТАР. Орбитальные параметры основываются на принятых координатах наземных станций слежения, принятой модели поля силы тяжести и таких постоянных Земли, как гравитационная постоянная, скорость вращения Земли, скорость света, а также на поправках времени и скорости дрейфа генераторов на станциях слежения, рассчитывающих эфемериды спутников. Для установления спутниковой геодезической системы отсчета не требуется определение эллипсоида. Станции слежения задаются в пространственной прямоугольной системе координат, связанной с центром масс Земли, а определение геоцентрического эллипсоида нужно потребителям для того, чтобы получать привычные географические координаты и высоту (B, L, h), пересчитывая их из пространственных (X, Y, Z). Параметры эллипсоида в расчете эфемерид не участвуют. Центр эллипсоид WGS-84 совпадает с центром масс Земли и формирует геоцентрическую систему, в которой рассчитываются географические координаты станций слежения, на основе которых и формируются спутниковые эфемериды. Оси этого эллипсоида параллельны осям пространственной геоцентрической системы координат.

Эфемериды содержатся в сообщениях, передаваемых навигационными спутниками НАВСТАР, и позволяют предсказать положение каждого спутника на 14 дней вперед. Эти эфемериды уточняются и загружаются на борт каждого спутника ежедневно. Сразу после загрузки спутник получает наиболее достоверную информацию, на основе которой его положение на орбите определяется с высокой точностью. С течением времени эфемеридная информация устаревает, положение спутника на орбите становится менее определенным, что приводит к ухудшению точности определения положения пользователя.

СНС второго поколения способны работать в двух основных режимах: абсолютном и относительном. Абсолютный режим (*stand alone GPS*), обладающий невысокой точностью: 5–25 м (95%) (в зависимости от исполнения аппаратуры) пригоден только для навигации и съемок невысокой точности. Относительный режим основан на использовании контрольно-корректирующей станции (ККС). При этом геодезическая система отсчета, в которой определены координаты ККС, задает координаты подвижной станций. Относительный или, как его еще называют, «дифференциальный» режим СНС с определением координат в реальном масштабе времени для кодовой аппаратуры известен как DGPS (*differential GPS*), а для фазовой аппаратуры получил наименование RTK (*Real Time Kinematic*).

Режимы работы фазовой приемной аппаратуры, использующие постобработку (статика и ее модификации), применяемые в современной геодезии, оставим за пределами настоящего обсуждения

До недавнего времени все относительные режимы, использующие фазовую аппаратуру, были локальны, т. е. обеспечивали дальности от базовой станции менее 15–20 км. Поэтому высокая точность трехмерного позиционирования (3–10 см, 95%), доступная при использовании современных RTK, достигалась только относительно ККС.

Дифференциальный режим кодовой аппаратуры первоначально развивался на основе передачи дифференциальных поправок (в псевдодальности) с помощью аппаратуры, установленной на морских маяках. Дальность действия у таких систем составляет 200–250 км. Однако уже с начала 90-х годов 20 века для передачи поправок псевдодальностей начинают использовать спутниковые каналы геостационарных спутников (как правило, «Инмарсат»). Зоны такого дифференциального сервиса охватывают обширные регионы. Современные региональные дифференциальные подсистемы: OmniStar, StarFix, SeaStar, SkyFix первоначально использовали кодовую аппаратуру на ККС и подвижных станциях и достигали точности планового положения: 1–3 м (95%). В настоящее время все эти сервисы стремительно эволюционируют в направлении перехода к фазовой двух частотной аппаратуре [2, 3]. При этом изменяется принцип их работы. Достигнутая точность таких новых сервисов, как SkyFix XP и StarFix HP составляет 20–40 см (95%) [4], но пространственный охват остается по большей части региональным (исключая SkyFix XP).

Зональные дифференциальные спутниковые подсистемы WAAS, EGNOS, именуемые в зарубежной литературе «SBAS» (*Satellite Based Augmentation Systems*), доступны в настоящее время как в наиболее массовом одночастотном (L1), так и двухчастотном вариантах (L1, L2), но работают только с кодовой аппаратурой. Достигнутая точность составляет: 3–5 м (95%).

Система передачи поправок глобального действия, получившая наименование C-NAV или StarFire WADGPS (*Wide Area dGPS*), сформировалась в результате объединения региональных сетей формирования

дифференциальных поправок, которые обеспечивали сервис высокой точности в независимых континентальных районах, в единую глобальную сеть, предлагающую беспрецедентный уровень точности определения положения. Эта глобальная сеть обеспечивает в реальном масштабе времени постоянную субдециметровую точность пространственного положения практически на всей поверхности Земли, за исключением приполюсных районов ($75^\circ \text{ N} - 75^\circ \text{ S}$). Служба формирования поправок основана на технологии, называемой Real Time GIPSY (RTG), разработанной в Лаборатории Реактивного движения (*Jet Propulsion Laboratory = JPL*) для NASA (*National Aeronautics and Space Administration*).

Этот глобальный высокоточный сервис представляет огромный интерес для современной гидрографии, но при его использовании возникает ряд геодезических проблем. Дело в том, что спутниковый сервис C-Nav, предоставляемый для морского использования компанией C&C Technology (США), радикально отличается от всех ранее созданных дифференциальных технологий (таких, как WAAS, EGNOS). ККС и подвижные станции используют фазовые двухчастотные приемники. При этом вместо фазовых поправок и поправок в псевдодальности по спутниковому каналу Инмарсат передаются поправки к шкалам времени спутников НАВСТАР, а также поправки эфемерид их орбит. В результате достигается глобальный дециметровый уровень точности определения трехмерных координат подвижных станций, не зависящий от расстояний подвижных станций до ближайшей ККС.

Благодаря использованию одновременно кодовых и фазовых измерений на двух частотах осуществляется практически полное исключение погрешностей за ионосферную рефракцию и влияние тропосферы. В значительной степени снижается влияние погрешностей многолучевости. Многозначность фазовых измерений устраняется специальными методами обработки с использованием фильтра Калмана. Используется усовершенствованная модель тропосферы и оригинальные методы подавления многолучевости. В результате наиболее высокоточный спутниковый сервис RTG обеспечивает точность 95% планового положения – 15–20 см, а высотного положения – 30–40 см. Заметим, что такая точность достигается в абсолютном режиме, без дифференциальной поддержки.

Главной особенностью является то, что станции слежения системы C-Nav, используемые для определения поправок эфемерид и бортовых шкал времени спутников НАВСТАР, расположены на всех континентах. При этом дециметровый уровень точности определения трехмерного положения потребителя уже не может обойтись без перехода к более высокому уровню геодезического обеспечения.

Обработка по методике RTG базируется на подходе, называемом «точное точечное определение» ('precise point positioning'), при котором основное внимание обращается на оценки погрешностей орбит и временных

шкал навигационных спутников. Эти параметры постоянно рассчитываются для всех навигационных спутников «Навстар» на основе данных глобальной сети ККС, являются глобальными и не зависят от положения наблюдателя на земной поверхности. На основе использования методики расчета RTG моделируются и компенсируются все остальные независимо идентифицируемые источники погрешностей. Моделируемые эффекты включают следующие воздействия: геопотенциала; земного прилива (*Solid tide*); дрейфа полюсов; океанского прилива; тропосферы; солнечного ветра; эффекта относительности.

Сеть ККС StarFire WADGPS включает более 50 станций, оснащенных двухчастотной спутниковой аппаратурой и расположенных по всей территории земного шара. Точное положение антенн каждой из ККС определено геодезическими методами с использованием данных глобальной сети станций JPL, некоторые из которых одновременно являются станциями сети ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) [6]. Все ККС точно привязаны к сети ITRF, которая является геодезической основой для системы «Навстар», поскольку WGS-84 – геодезическая система координат для «Навстар» – привязана к сети ITRF. Точность в сети станций в настоящее время достаточно высока, поскольку учитываются не только координаты в системе ITRF, но и скорости смещения каждой станции в системе ITRF в результате дрейфа тектонических плит во времени от их исходного положения (эпохи). На самом деле ITRF просто является реализацией геоцентрической системы WGS-84 на определенную эпоху. Последней ныне действующей (2006 г.) реализацией WGS-84 является «WGS-84 (G1150)». В этой системе отсчета осуществляется прогнозирование орбит спутников НАВСТАР с января 2002 г. по настоящее время (2006 г.) Указанные системы соотносятся между собой в соответствии со следующей формулой:

$$\text{ITRF 2000} = \text{WGS-84 (G730)} \pm \Delta (\text{м}),$$

где Δ – величина смещения, определяемая земным приливом (*Solid tide*).

Таким образом, при использовании высокоточных глобальных сервисов недостаточно просто упомянуть, что координаты получены в системе WGS-84, необходимо четко представлять реализацию WGS-84, т. е. знать, к какой эпохе относятся полученные координаты и, соответственно, приводить полное название координатной системы.

Приведем данные по полному наименованию системы WGS-84 для соответствующих эпох:

- WGS-84 (G1150) – прогнозирование орбит спутников НАВСТАР с января 2002 г. по настоящее время (2006 г.);
- WGS-84 (G873) – прогнозирование орбит спутников НАВСТАР с января 1997 г. по январь 2002 г.;

– WGS-84 (G730) – прогнозирование орбит спутников НАВСТАР с января 1994 г. по январь 1997 г.

Если известны координаты в системе WGS-84 на определенную эпоху, то преобразование в ITRF 2000 (= WGS-84 (G1150)) может быть выполнено с использованием семи параметров преобразования: трех линейных, трех угловых и масштаба. Полезно также привести следующие ассоциации спутниковых геодезических координатных систем:

WGS-84 (G1150) – эквивалентна ITRF2000 (1997.0) с точностью один 0,01 м;

WGS-84 (G873) – эквивалентна ITRF94 (1997.0) с точностью 0,02 м;

WGS-84 (G730) – эквивалентна ITRF92 (1994.0) с точностью 0,02 м;

WGS-84 (исходная) – эквивалентна NAD83 (86) в пределах США.

При использовании кодовой спутниковой аппаратуры все эти нюансы несущественны, т. е. прогнозирование орбит навигационных спутников осуществляется с точностью ~ 3 м (68%), а точность определения места в абсолютном режиме составляет не менее 5 м. (95%).

При использовании дециметровых глобальных сервисов все вышеизложенное становится существенным, особенно при попытке сравнивать между собой координаты, отнесенные к различным реализациям WGS-84 (эпохам прогнозирование орбит спутников НАВСТАР).

Особые сложности возникают при преобразовании высот в гидрографических приложениях. Необходимо, как правило, выполнять взаимные преобразования из систем, связанных с СУМ (приливная система) в ортометрическую систему (высоты на топографических картах) и системы высот, задаваемые в геоцентрической системе (геодезическая высота или высота над геоидом).

При взаимном преобразовании высот в геоцентрических системах необходимо также учитывать, в какой эпохе определена высота (над эллипсоидом или над геоидом). В первую очередь такая задача возникает, когда геодезическая высота уровня моря была определена в прежнюю эпоху, а аппаратура глобального сервиса С-Nav используется для определения текущих поправок уровня моря на основе измерений геодезических высот в системе координат ITRF2000.

Глобальный высокоточный навигационный сервис С-Nav в настоящее время доступен российскому пользователю. Спутниковая приемная аппаратура выпускается в двух вариантах: судовом и носимом (геодезическом). Наиболее популярной моделью спутниковой аппаратуры для судового использования, является SF-2050R, у которой антенны GPS и Inmarsat могут быть установлены отдельно. Для геодезического мобильного применения выпускается модификация, в которой приемник-вычислитель и обе антенны смонтированы в едином модуле, последний может быть установлен на геодезической вехе или штативе.

Общий вид аппаратуры SF-2050R фирмы NavCom Technology Inc., приведен на рис. 1.



а



б



в

Рис. 1. Общий вид аппаратуры SF-2050R: *а* – приемник C-NAV-2050R; *б* – спутниковая антенна GPS; *в* – спутниковая антенна ИНМАРСАТ

Аппаратура SF-2050R, определяющая пространственные координаты в системе ITRF2000, представляет собой «черный ящик» со специальным внутренним программным обеспечением. Перед началом работы внутреннее программное обеспечение должно быть настроено с помощью специальной управляющей программы с внешнего компьютера. Аппаратура SF-2050R имеет два последовательных порта. Порт *A* (COM1) используется для выдачи данных в соответствии с протоколом NMEA 0183, а порт *B* (COM2) – для внешнего управления с помощью программы STARUtil (v.100.3). При использовании геодезической высоты, получаемой от аппаратуры C-Nav, пользователю предоставлен выбор учета или не учета земного прилива (Solid tide). Окно программы STARUtil в режим работы: «RTG Dual +(Earth Tides)» изображено на рис. 2.

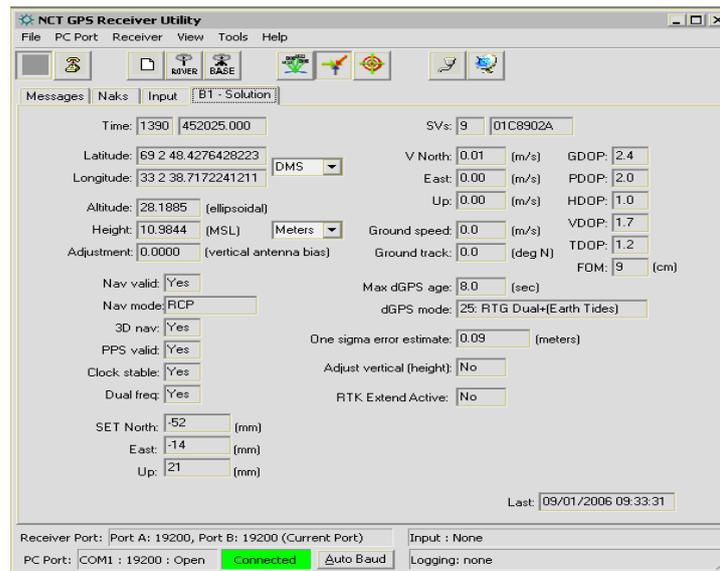


Рис. 2. Окно программы STARUtil в режиме работы «RTG Dual +(Earth Tides)»

Что же представляет собой земной прилив? Вспомним, что начало системы координат ITRF2000 строго совмещено с центром масс Земли. Внутренне программное обеспечение аппаратуры SF 2050R (рекомендуется версия 3.0.12) обеспечивает преобразование геодезической высоты (h), рассчитываемой аппаратурой в результате решения задачи местоопределения в высоту геоида EGM96 (Earth Gravity Model 1996) над эллипсоидом. Центр геоида фиксирован в геодезической системе отсчета ITRF2000. Земной прилив не связан с центром масс Земли и фиксируется только относительно мгновенного положения локальной земной поверхности. Гравитационные силы притяжения Луны и Солнца, приводящие к искажению земной поверхности, вызывают изменение расстояния между центром масс и поверхностью Земли в данной точке, которое носит периодический суточный или полусуточный характер. Таким образом, система координат, связанная с центром масс Земли и система, фиксированная в точке наблюдателя, взаимно перемещаются – это и называется «земным приливом».

Величина такого вертикального смещения для данной точки на поверхности Земли является функцией времени. График изменения смещения очень похож на приливную кривую, но имеет значительно меньшую амплитуду, не превышающую, как правило, 0,1–0,2 м.

При определении высоты точек на поверхности Земли методами классической геодезии этого эффекта нет, т. к. определяются превышения.

До недавнего времени спутниковые методы получения высот исходили из концепции «нулевого земного прилива» («zero-tide», «tide-free»). Однако при использовании высокоточных абсолютных спутниковых методов

определения высот введение поправки на «земной прилив» становится совершенно необходимым.

Геодезическая высота, рассчитанная аппаратурой C-Nav, в режиме RTG может быть исправлена за земной прилив. Такой режим в программном обеспечении аппаратуры SF 2050 носит наименование: «RTG Dual +(Earth Tides)» или полное наименование: «*StarFire RTG, dual frequency, Adjusted for "Tides"*» [7]. Специальные исследования показывают, что такой режим является наиболее точным для определения высот в системе координат ITRF2000 с помощью аппаратуры C-Nav [3]. Без исправления поправкой за земной прилив точность определения геодезической высоты по C-Nav становится недостаточной для гидрографических приложений.

Рассмотрим суть гидрографического использования аппаратуры C-Nav. Первые отечественные публикации, посвященные возможности использования высокоточных измерений геодезической высоты по спутниковой системе [8, 9] касались использования методов кинематики реального времени. Применительно к фазовой аппаратуре с получением поправок по спутниковому каналу, данный вопрос в общей постановке рассмотрен в работе [3]. Дециметровая точность определения геодезической высоты мгновенной поверхности моря, от которой производится измерение глубин, в реальном масштабе времени открывает новые возможности для гидрографии. Можно вообще отказаться от использования мгновенного уровня моря в качестве отсчетной поверхности, заменив ее поверхностью геоцентрического эллипсоида, устанавливаемого геодезическими спутниковыми методами. Для реализации такого метода исправления глубин (приведение к заданному НТУ) требуется знать высоту поверхности НТУ над поверхностью эллипсоида. Сложность состоит в том, что поверхности эллипсоида и НТУ не параллельны, а поверхность НТУ, кроме того, еще и не является непрерывной.

Для реализации метода необходимо на реперах всех постоянных и временных береговых уровенных постов методами спутниковой геодезии определить их геодезическую высоту над эллипсоидом WGS-84 в геодезической системе отсчета ITRF2000.

Введем новый термин: *сфероидическая высота* – геодезическая высота, определяемая фазовой спутниковой аппаратурой в реальном масштабе времени в спутниковой геодезической системе отсчета ITRF2000.

Аппаратура C-Nav позволяет получать сфероидическую высоту мгновенного уровня моря с точностью 0,3 м (95%), что достаточно для выполнения фиксации поверхности НТУ в открытом море вдали от береговых уровенных постов применительно к выполнению гидрографических съемок первой и второй категорий на глубинах более 60–80 м.

Основная концепция использования C-Nav заключается в том, чтобы, имея сфероидическую высоту НТУ на береговом и морских уровенных

поставках, осуществлять более точную интерполяцию НТУ в районе работ. Идея метода иллюстрируется рис. 3.

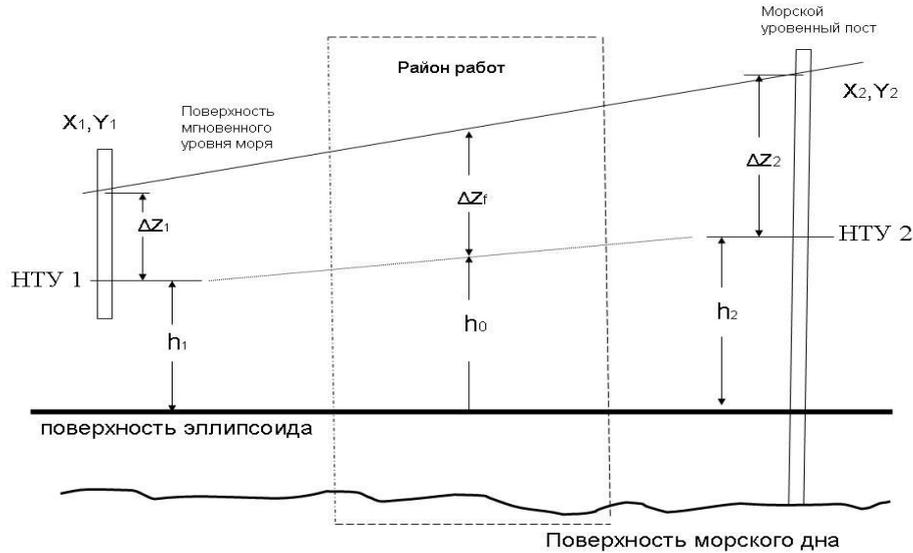


Рис. 3. Интерполяция поправки уровня моря по данным двух уровеньных постов с использованием сфероидических высот НТУ (объяснения в тексте)

На рис. 3 использованы следующие обозначения:

h_1 – сфероидическая высота НТУ1, полученная по спутниковым наблюдениям на береговом уровеньном посту с координатами $X_1 Y_1$;

h_2 – сфероидическая высота НТУ2, полученная по спутниковым наблюдениям на морском уровеньном посту с координатами $X_2 Y_2$ с помощью спутниковой фазовой аппаратуры;

h_0 – сфероидическая высота НТУ, полученная методом линейного интерполирования в центре района работ с координатами $X_0 Y_0$.

Расчет величины h_0 может быть произведен по формулам

$$h_0 = \frac{S_2}{S_1 + S_2} h_1 + \frac{S_1}{S_1 + S_2} h_2, \quad (1)$$

$$S_1 = \{ (X_1 - X_0)^2 + (Y_1 - Y_0)^2 \}^{1/2}; S_2 = \{ (X_2 - X_0)^2 + (Y_2 - Y_0)^2 \}^{1/2},$$

где S_1 и S_2 – расстояния от центра района работ до уровеньных постов 1 и 2 соответственно.

Величина h_0 затем используется при расчетах поправки за уровень моря (ΔZ_f) для приведения глубин к НТУ в районе работ с использованием известных соотношений, которые приводятся в работе [10]. При использовании гидрографической информационной системы поправка за уровень (ΔZ_f) могут быть рассчитаны в реальном масштабе времени и

уточнены на этапе пост-обработки. Геодезическая высота репера берегового уровенного поста, а, следовательно, и величина h_1 средствами спутниковой геодезии может быть определена с точностью: 0,03–0,05 м (95%) [11]. Величина h_2 с помощью С-Nav определяется с точностью 0,2–0,4 м (95%) [4,5], что хорошо согласуется с результатами, выполненными нами контрольных измерений.

Результаты расчета поправки за уровень моря, полученные спутниковым методом (ΔZ_f) следует для контроля сравнивать с аналогичной поправкой, полученной классическим гидрографическим методом при интерполировании по зонам с использованием величин Z_1 , Z_2 независимо рассчитанных на уровнях постах 1 и 2. При этом поправка уровня для приведения к НТУ в районе работ может быть получена известным способом:

$$\Delta Z_f = \frac{S_2}{S_1 + S_2} \Delta Z_1 + \frac{S_1}{S_1 + S_2} \Delta Z_2, \quad (2)$$

где S_1 – расстояние от измеренной глубины до 1-го поста;

S_2 – расстояние от измеренной глубины до 2-го поста;

$\Delta Z_1, \Delta Z_2$ – поправки за уровень на постах 1 и 2.

Для расчета величины НТУ на морском уровенном посту аппаратуру С-Nav можно установить либо на морском бую, выставляемым в районе работ, либо на самом судне при условии, что оно будет находиться в ограниченном полигоне достаточно продолжительное время.

В 2006 г. аппаратура модели SF-2050R применялась для геодезического обеспечения морских инженерно-геологических работ в юго-западной части Баренцева моря. Работы выполнялись длительное время на ограниченном полигоне (5×5 км). Для определения поправок уровня был выставлен морской уровенный пост. В течение всего периода работ сфероидическая высота мгновенного уровня моря регистрировалась с использованием специализированного программного обеспечения с дискретностью 1–2 с. На основе этих измерений по специальной методике были вычислены: сфероидическая высота СУМ в спутниковой геодезической системе отсчета ITRF2000 за период наблюдений; ежечасные высоты уровня над СУМ; гармонические постоянные прилива. Сфероидическая высота НТУ была получена путем расчета понижения СУМ до НТУ методом, принятым в отечественной гидрографии.

Данные мареографа открытого моря обрабатывались известным методом сравнения с данными постоянного уровенного поста Териберка. По этим данным были вычислены высоты СУМ за период наблюдений и методом сравнения уровней СУМ передан в район работ. Высотные различия, полученные двумя независимыми методами, составили 0,21 м.

Использование спутниковых методов получения сфероидической высот НТУ и поправки за приведения измеренных глубин к НТУ в точке их измерения дополняет классические методы гидрографии, основанные на использовании мареографов открытого моря. В районах, где установка мареографа невозможна по техническим или экономическим причинам, этот метод способен его заменить.

В заключение отметим, что по предложенной методике получены только первые предварительные результаты, которые требуют уточнения и доработки по мере накопления опыта ее практического использования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Заколюдажный В. П. Новые технологии использования спутниковых радионавигационных систем в гидрографии // Записки по гидрографии. – 2005. – Вып. 265. – С. 90–94.
2. Заколюдажный В. П. Измерение поправок глубин за уровень моря с использованием спутниковой радионавигационной системы // Записки по гидрографии. – 2006. – Вып. 266. – С. 83–87.
3. Заколюдажный В. П. Широкозонная дифференциальная спутниковая радионавигационная система StarFix HP дальнего действия с дециметровой точностью определения места. Использование эллипсоида в качестве урвненной поверхности // Записки по гидрографии. – 2006. – Вып. 267. – С. 81–85.
4. Bisnath S., Wells D., Dodd D.. Evaluation of commercial carrier phase-based WADGPS services for marine applications. – ION GPS/GNSS, US, Portland, Oregon. – September, 2003. – PP. 137–142.
5. Chance J., Gravley J., Rascoe-Hudson J.. GPS for Global Tide Measurements. // HYDRO International. – October 2003. – No 8. – PP. 6–9.
6. Берг В. И. О современных геоцентрических системах координат // Геодезия и картография. – 2005. – Вып. 2. – С. 4–8.
7. C-Nav 2050 GPS Production Users Guide . C-Nav GPS Division, C&C Technologies Inc. May, 2005. – P. 98.
8. Дадашев А. А. Новые направления использования спутниковой радионавигационной системы GPS в гидрографических исследованиях // Записки по гидрографии». – 2001. – В. 253. – С. 38–42.
9. Дадашев А. А. Об определении поправок к глубинам за колебания уровня моря с использованием спутниковой радионавигационной системы // Записки по гидрографии. – 2003. – Вып. 265. – С. 38–42.
10. Фирсов Ю. Г. Методы использования спутниковой аппаратуры, реализующей режим кинематики реального времени (RTK) для определения поправок за уровень // Тр. Государственной морской академии. – СПб (в печати).
11. Остроумов В. З., Шануров Г. А., Епишин В. И. Высотная основа урвненных постов: геодезический аспект // Геодезия и картография. – 2005. – Вып. 4. – С. 20–26.

GEODETIC ASPECTS FOR HYDROGRAPHIC EMPLOYMENT OF SATELLITE EQUIPMENT OF C-NAV HIGH-PRECISION GLOBAL NAVIGATION SERVICE

Y. G. Firsov

(Makarov State Maritime Academy)

One of the methods of using the satellite equipment of C-Nav high-precision global navigation service in hydrography is considered. The decimeter-level accuracy of determining the geodetic height for the instantaneous sea surface from which the water depth is measured, in real time, opens up new possibilities. It seems possible to stop using the instantaneous water level as a reference surface and to replace it by the geocentric ellipsoid surface determined by geodetic satellite methods.

**СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ КООРДИНАТНОЙ ПРИВЯЗКИ ДАННЫХ
ЗОНДИРОВАНИЯ МЕСТНОСТИ С ВОЗДУШНЫХ НОСИТЕЛЕЙ**

Э. С. ЗУБЧЕНКО

(Военно-морская академия им. Н. Г. Кузнецова),

П. И. МАЛЕЕВ

(ГНИНГИ МО РФ)

В статье обосновывается способ повышения точности измерения параметров угловой ориентации датчика системы съемки местности с воздушного носителя на основе использования в ИНС перемещаемых акселерометров.

Координатная привязка точек изображения местности на аэрофотоснимке (АФС), на сканерном изображении а также точек лазерного зондирования, требует в каждый момент съемки данных об угловой ориентации датчика. Необходимая для картографирования местности в масштабе 1:20000 точность определения угловых элементов ориентирования (УЭО) осей фотокамеры составляет $\pm 2''$ [1]. У авиационных ИНС за 30 минут полета погрешность угловой ориентации достигает $0,05^\circ$ [2].

Для коррекции погрешностей выработки ИНС параметров угловой ориентации при аэрофотографировании (АФГ) прибрежных акваторий в Канаде, в частности, в начале и в конце маршрута выполняется съёмка специально подготовленного полигона с геодезическими опорными точками (ОТ). По полученным АФС после полёта методом обратной фотограмметрической засечки определяются УЭО, которые принимаются за истинные и сравниваются со значениями, полученными от ИНС. Вычисленные невязки используются для расчета поправок в УЭО, выработанных ИНС на каждый момент АФГ [3]. Трудоёмкость такой технологии очевидна.

При использовании ОТ точность определения УЭО зависит от погрешностей геодезических и фотограмметрических координат ОТ, а также от их количества и от их распределения по привязываемому изображению акватории. Вследствие присущего АФС прибрежных акваторий расположения ОТ только на изображении суши, занимающего, как правило, только часть кадра, точность определения истинного положения связки лучей, строящих изображение точек дна акватории, существенно ниже, чем при стандартном расположении ОТ – равномерно по всей площади кадра. Используя методику, изложенную в работе [4], вычислены отношения средней квадратической погрешности (СКП) определения УЭО при расположении ОТ по всему кадру к СКП определения этих же элементов, но при расположении ОТ только на части кадра. Полученные результаты показывают, что точность определения угла продольного наклона снимка при уменьшении площади кадра, на

которой располагаются ОТ, уменьшается в 1,5 раза, а при уменьшении площади в четыре раза, соответственно, – в 1,8 раза. Для угла поворота снимка в обоих случаях точность уменьшается в 2,3 раза.

Можно определять угловую ориентации летательного аппарата (ЛА) путем сравнения времени прихода сигнала от навигационного спутника на две разнесенные по базе и жестко связанные с ЛА антенны [5]. По разности времени прихода сигналов определяется угловая ориентация данной базы, совпадающей с одной из осей системы координат (СК) ЛА, относительно, например, геодезической системы координат (ГСК). Последующее преобразование этих данных об угловой ориентации базы позволяет определить курс или азимут, углы тангажа и крена ЛА. При 15-секундных интервалах измерений на испытаниях приемной аппаратуры получена СКП определения азимута неподвижной базы длиной 100 м, равная 48".

Небольшие размеры ЛА позволяют разместить базу интерферометра для приема сигналов от навигационных спутников длиной около 2 м. Данный способ при такой длине подвижной базы позволит достичь точность определения азимута и тангажа порядка 1 мрад (206") [5]. При высоте полета 10 км эта величина даст смещение точки на местности около 10 м, что на порядок превышает требуемую точность.

На основании изложенного можно сделать вывод, что проблема автономного определения УЭО фотоаппарата или сканера при съемке акваторий с самолета остается пока актуальной задачей. Одним из наиболее эффективных направлений решения этой задачи остается совершенствование ИНС. К настоящему времени известен ряд способов повышения их точности. Оно может быть достигнуто за счет:

1. Использования дополнительного, наиболее точного гироскопа, выполняющего роль корректора ИНС. Этот способ широко применялся в ИНС зарубежных ракетных подводных лодок [6];
2. Использования вращения корпуса гироскопа ИНС относительно оси, совпадающей с осью вращения его ротора [7];
3. Реверсирования ротора или корпуса гироскопа [7];
4. Дополнительного медленного вращения ротора гироскопа вокруг оси, лежащей в плоскости ортогональной к его основному вращению [8];
5. Использования в ИНС так называемого акселерометрического датчика абсолютной угловой скорости [9];
6. Использования в ИНС гироскопа-акселерометра с динамически настраиваемым подвесом [10].

Каждый из перечисленных способов повышения точности ИНС имеет свои преимущества и недостатки. Общим их недостатком для рассматриваемого применения в интересах фотографирования и лазерного зондирования местности с летательных аппаратов является их относительно большие габариты.

Для достижения требуемой точности ИНС может быть применен, по нашему мнению, принципиально новый способ, заключающийся в синхронном измерении составляющих ускорения летательного аппарата с помощью пары акселерометров, перемещаемых по объекту по заданному направлению навстречу друг другу с фиксированной скоростью. Такой способ позволяет исключить ряд ускорений, которые не могут быть точно учтены при обычных измерениях, и тем самым повысить точность ИНС. В частности, исключается влияние ускорение силы тяжести, ускорение, возникающее при качке и рыскании объекта, ускорение вибрации и т. п. Ниже приводится интерпретация физики процесса измерений на данном принципе.

Используя уравнение движения в неинерциальной системе отсчета [11], запишем выражение для ускорения, которое испытывает чувствительный элемент каждого акселерометра (ЧЭА) под воздействием равнодействующих сил:

$$\bar{a} = -\bar{w} - \bar{g} + (\bar{r} \times \dot{\bar{\Omega}}) + 2(\bar{V} \times \bar{\Omega}) + (\bar{\Omega} \times (\bar{r} \times \bar{\Omega})), \quad (1)$$

где \bar{w} – ускорение поступательного перемещения;

\bar{g} – ускорение свободного падения;

\bar{r} – радиус-вектор положения тела в данной СК системы отсчета (СО);

$\dot{\bar{\Omega}}, \bar{\Omega}$ – угловые ускорения и скорость вращения СО;

\bar{V} – скорость ЧЭА в данной СК.

В качестве неинерциальной системы координат примем СК, связанную с ЛА. Поскольку для обоих ЧЭА первые два слагаемых из уравнения (1) равны, то в разности они взаимно уничтожатся. Первое векторное произведение в правой части этого же уравнения представляет центростремительное ускорение вследствие вращения ЛА вокруг мгновенной оси вращения под действием бортовой и килевой качек и рыскания. Поскольку в этом векторном произведении величины \bar{r} и $\dot{\bar{\Omega}}$ для обоих ЧЭА в точке встречи будут одинаковыми, в образуемой разности эти слагаемые ускорения взаимно уничтожаются.

Второе векторное произведение в этом же выражении – ускорение Кариолиса (УК). В СК, связанной с ЛА, это ускорение будет иметь следующие слагаемые: УК, вызываемое вращением СК под действием бортовой и килевой качки, УК, вызываемое вращением СК при перемещении ЛА по пространственной траектории вследствие рыскания и вертикальной качки, УК в результате суточного вращения Земли и, наконец, УК, вызываемое перемещением ЛА по эквипотенциальной поверхности. Поскольку для каждого из ЧЭА векторы \bar{V} будут разными (\bar{V}_1 – для первого и \bar{V}_2 – для второго ЧЭА), следовательно, и величина этих векторных

произведений будет различной, а значит, и разность этих слагаемых не будет равна нулю.

Третье двойное векторное произведение – центростремительное ускорение (ЦУ), имеющее следующие слагаемые: ЦУ, возникающее при вращении ЛА вокруг мгновенной оси под действием бортовой и килевой качки. ЦУ при движении ЛА по пространственной траектории под действием рыскания и вертикальной качки, ЦУ при перемещении ЛА по эквипотенциальной поверхности. Поскольку в данном векторном произведении сомножители для каждого ЧЭ из данной пары акселерометров в точке встречи будут одинаковы, то все перечисленные выше ЦУ для них также будут одинаковы, и, следовательно, в разности отсчетов они взаимно уничтожаются. Таким образом, разность ускорений ЧЭА, равномерно перемещаемых в СК ЛА с различными скоростями V_1 и V_2 , будет иметь только единственное составляющее – УК в результате вращения СК ЛА. Запишем образуемую разность в векторной форме:

$$\Delta \bar{a} = 2[(\bar{V}_1 \times \bar{\Omega}) - (\bar{V}_2 \times \bar{\Omega})]. \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что даже если один из акселерометров будет неподвижен, т. е. V_1 или V_2 будет равно 0, величина разности $\Delta \bar{a}$ будет отличаться от 0.

Представим динамическую измерительную систему – инерциальный измерительный блок (ИИБ), оси чувствительности которого параллельны осям СК ЛА. Пусть в начале СК ИИБ установлен трехкомпонентный акселерометр (ТА), оси чувствительности которого параллельны осям СК ЛА. Пусть в данном ИИБ имеется еще три ТА, которые можно равномерно перемещать по осям чувствительности ИИБ, сохраняя оси чувствительности этих ТА параллельными осям СК ЛА. В момент встречи всех трех ТА с неподвижным ТА берут отсчеты составляющих ускорений на всех четырех ТА.

Найдем составляющие разности $\Delta \bar{a}$ для каждого из слагаемых УК: поворота СК ЛА под действием бортовой и килевой качки, поворота СК при движении ЛА по траектории, поворота СК ЛА вследствие суточного вращения Земли, поворота СК при движении по эквипотенциальной поверхности. С учетом того, что в рассматриваемом ИИБ один из каждой пары ТА неподвижен ($V_2=0$), разность ускорений для подвижного и неподвижного ЧЭА в соответствии с (2) может быть представлена в виде

$$\Delta \bar{a} = 2(\bar{V} \times \bar{\Omega}). \quad (3)$$

Обозначим оси СК ЛА как x, y, z . Примем, что их направление не отличается от общепринятого: оси x и z лежат в диаметральной плоскости, ось x направлена по вектору скорости перемещения ЛА, сообщаемого движителем, ось z – вверх, а ось y дополняет СК до правосторонней. Пусть скорости перемещаемых ТА одинаковы и равны \bar{V}_a . Этот вектор имеет проекции:

– для ТА, перемещаемого по оси x :

$$V_{ax} = V_a; V_{ay} = V_{az} = 0;$$

– для ТА, перемещаемого по оси y :

$$V_{ay} = -V_a; V_{ax} = V_{az} = 0; \quad (4)$$

– - для ТА, перемещаемого по оси z :

$$V_{az} = -V_a; V_{ax} = V_{ay} = 0.$$

Представим векторное произведение (3) в проекциях по осям СК ЛА в виде

$$\Delta \bar{a} = 2 \begin{pmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ V_{ax} & V_{ay} & V_{az} \\ \Omega_x & \Omega_y & \Omega_z \end{pmatrix} = 2 \begin{pmatrix} V_{ay}\Omega_z - V_{az}\Omega_y \\ V_{ax}\Omega_z - V_{az}\Omega_x \\ V_{ax}\Omega_y - V_{ay}\Omega_x \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где $\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$ – орты осей x, y, z , а $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$ – проекции вектора на эти оси.

Используя полученное выражение (5), а также выражение (4) для проекций вектора скорости перемещения акселерометров на каждую из осей, найдем формулы для составляющих разности $\Delta \bar{a}$ по осям СК ЛА для каждого из слагаемых УК:

$\Delta \bar{a}_k$ – под действием бортовой и килевой качки;

$\Delta \bar{a}_T$ – вследствие перемещения объекта по траектории при воздействии вертикальной качки и рыскания;

$\Delta \bar{a}_K$ – вследствие суточного вращения Земли;

$\Delta \bar{a}_s$ – вследствие перемещения объекта по эквипотенциальной поверхности.

Примем, что проекции угловой скорости поворота СК ЛА под действием бортовой и килевой качки равны соответственно $\omega_{kx}, \omega_{ky}, \omega_{kz} = 0$. Принимая в выражении (5) $\Omega_x = \omega_{kx}, \Omega_y = \omega_{ky}, \Omega_z = \omega_{kz} = 0$ и выражая составляющие вектора V_a из формулы (4), запишем составляющие вектора $\Delta \bar{a}$ для каждого из трех перемещаемых акселерометров.

По оси x :

$$\Delta a_{(x)kx} = 0; \Delta a_{(x)ky} = 0; \Delta a_{(x)kz} = -2V_a \omega_{ky}; \quad (6)$$

по оси y :

$$\Delta a_{(y)kx} = 0; \Delta a_{(y)ky} = 0; \Delta a_{(y)kz} = 0; \quad (7)$$

по оси z :

$$\Delta a_{(z)kx} = 2V_a \omega_{kx}; \Delta a_{(z)ky} = -2V_a \omega_{kx}; \Delta a_{(z)kz} = 0. \quad (8)$$

В результате перемещения ЛА по траектории под действием вертикальной качки и рыскания его оси поворачиваются с угловой скоростью $\bar{\omega}_T(\omega_{Tx}, \omega_{Ty}, \omega_{Tz})$, где величины в скобках – составляющие вектора угловой скорости на оси СК ЛА. Составляющие вектора угловой скорости $\bar{\omega}_T$ на оси геодезической прямоугольной системы координат (ГСК) $\omega_{Tx}, \omega_{Ty}, \omega_{Tz}$, найдем из очевидных соотношений:

$$\omega_{Tx} = \frac{V_Z}{R_Y} - \frac{V_Y}{R_Z}; \omega_{Ty} = \frac{V_X}{R_Z} - \frac{V_Z}{R_O}; \omega_{Tz} = \frac{V_Y}{R_X} - \frac{V_X}{R_Y}, \quad (9)$$

где V_X, V_Y, V_Z – составляющие скорости объекта по осям ГСК;
 R_X, R_Y, R_Z – составляющие радиуса кривизны траектории перемещения ЛА по тем же осям.

Для преобразования вектора $\bar{\omega}_T$ в СК ЛА найдем элементы матрицы преобразования координат A' , имеющей вид

$$A' = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

где a_i, b_i, c_i ($i=1, 2, 3$) – направляющие косинусы ортов осей СК ЛА в ГСК, определяемые через углы Эйлера, α – угол тангажа, ω – угол крена, κ – угол рыскания, по формулам [12]:

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \cos\alpha \cos\kappa - \sin\alpha \sin\omega \sin\kappa \\
 a_2 &= -\cos\alpha \sin\kappa - \sin\alpha \sin\omega \cos\kappa; \\
 a_3 &= -\sin\alpha \cos\omega; \\
 b_1 &= \cos\omega \sin\kappa; \quad b_2 = \cos\omega \cos\kappa; \quad b_3 = -\sin\omega; \\
 c_1 &= \sin\alpha \cos\kappa + \cos\alpha \sin\omega \sin\kappa; \\
 c_2 &= -\sin\alpha \sin\kappa + \cos\alpha \sin\omega \cos\kappa; \\
 c_3 &= \cos\alpha \cos\omega.
 \end{aligned} \tag{11}$$

Проекции угловой скорости $\overline{\omega}_T$ на оси СК ЛА получим из выражения

$$(\omega_{Tx}, \omega_{Ty}, \omega_{Tz})^T = A'(\omega_{TX}, \omega_{TY}, \omega_{TZ})^T. \tag{12}$$

Подставив в (12) значения A' и составляющих угловой скорости $\overline{\omega}_T$, получим

$$(\omega_{Tx}, \omega_{Ty}, \omega_{Tz})^T = \begin{pmatrix} a_1\omega_{TX} + b_1\omega_{TY} + c_1\omega_{TZ} \\ a_2\omega_{TX} + b_2\omega_{TY} + c_2\omega_{TZ} \\ a_3\omega_{TX} + b_3\omega_{TY} + c_3\omega_{TZ} \end{pmatrix}. \tag{13}$$

Принимая в выражении (5) $\Omega_X = \omega_{TX}$, $\Omega_Y = \omega_{TY}$, $\Omega_Z = \omega_{TZ}$ и выражая составляющие вектора \overline{V}_a из (4), запишем составляющие вектора $\Delta\overline{a}_T$ для каждого из трех перемещаемых акселерометров.

По оси x :

$$\begin{aligned}
 \Delta a_{(x)Tx} &= 0; \\
 \Delta a_{(x)Ty} &= -2V_a(a_3\omega_{TX} + b_3\omega_{TY} + c_3\omega_{TZ}); \\
 \Delta a_{(x)Tz} &= -2V_a(a_2\omega_{TX} + b_2\omega_{TY} + c_2\omega_{TZ});
 \end{aligned} \tag{14}$$

по оси y :

$$\begin{aligned}
 \Delta a_{(y)Tx} &= -2V_a(a_3\omega_{TX} + b_3\omega_{TY} + c_3\omega_{TZ}); \\
 \Delta a_{(y)Ty} &= 0; \\
 \Delta a_{(y)Tz} &= 2V_a(a_1\omega_{TX} + b_1\omega_{TY} + c_1\omega_{TZ});
 \end{aligned} \tag{15}$$

по оси z:

$$\begin{aligned}\Delta a_{(z)Tx} &= 2V_a(a_2\omega_{TX} + b_2\omega_{TY} + c_2\omega_{TZ}); \\ \Delta a_{(z)Ty} &= 2V_a(a_1\omega_{TX} + b_1\omega_{TY} + c_1\omega_{TZ}); \\ \Delta a_{(z)Tz} &= 0.\end{aligned}\tag{16}$$

В результате суточного вращения Земли оси СК ЛА поворачиваются с угловой скоростью $\overline{\Omega}_3$. Чтобы найти проекции этого вектора оси СК ЛА, так же как и в предыдущем, случае воспользуемся матрицей преобразования A'

$$\Omega_{3x}, \Omega_{3y}, \Omega_{3z})^T = A'(\Omega_{3X}, \Omega_{3Y}, \Omega_{3Z})^T.\tag{17}$$

Раскроем выражение (17) с учетом, что $\Omega_{3X}=\Omega_{3Y}=0$, и, обозначая $\Omega_{3Z}=\Omega_3$, получим

$$\Omega_{3x} = c_1\Omega_3; \Omega_{3y} = c_2\Omega_3; \Omega_{3z} = c_3\Omega_3.\tag{18}$$

Принимая, что в (5) $\Omega_X=\Omega_{3x}$; $\Omega_Y=\Omega_{3y}$; $\Omega_Z=\Omega_{3z}$, и выражая составляющие вектора \overline{V}_a из (4), запишем составляющие вектора $\Delta\overline{a}_K$ для каждой из трех пар перемещаемого и неподвижного акселерометров.

По оси x:

$$\Delta a_{(x)Kx} = 0; \Delta a_{(x)Ky} = -2V_a c_3 \Omega_{33}; \Delta a_{(x)Kz} = -2V_a c_2 \Omega_{33};\tag{19}$$

по оси y:

$$\Delta a_{(y)Ky} = -2V_a c_3 \Omega_{33}; \Delta a_{(y)Kx} = 0; \Delta a_{(y)Kz} = -2V_a c_1 \Omega_{33};\tag{20}$$

по оси z:

$$\Delta a_{(z)Kx} = 2V_a c_2 \Omega_{33}; \Delta a_{(z)Ky} = 2V_a c_1 \Omega_{33}; \Delta a_{(z)Kz} = 0.\tag{21}$$

Рассмотрим теперь последнее слагаемое разности ускорений – $\Delta\overline{a}_3$.

Вследствие перемещения ЛА по эквипотенциальной поверхности его СК вращается с угловой скоростью $\overline{\omega}_3$. Составляющие этого вектора на оси ГСК по аналогии с выражением (9) запишем в виде

$$\omega_{3x} = \frac{V_Z}{R_{3Y}} - \frac{V_Y}{R_{3Z}}; \omega_{3y} = \frac{V_X}{R_{3Z}} - \frac{V_Z}{R_{3X}}; \omega_{3z} = \frac{V_Y}{R_{3X}} - \frac{V_X}{R_{3Y}},\tag{22}$$

где R_{3X} , R_{3Y} , R_{3Z} – составляющие радиуса кривизны эквипотенциальной поверхности по осям ГСК.

Переход к составляющим вектора $\overline{\omega}_3$ на оси СК ЛА осуществим так же, как и для векторов $\overline{\omega}_T, \overline{\Omega}_3$

$$(\omega_{3x}, \omega_{3y}, \omega_{3z})^T = A'(\omega_{3X}, \omega_{3Y}, \omega_{3Z})^T. \quad (23)$$

По аналогии с выражением (13) запишем:

$$(\omega_{3x}, \omega_{3y}, \omega_{3z})^T = \begin{pmatrix} a_1\omega_{3X} + b_1\omega_{3Y} + c_1\omega_{3Z} \\ a_2\omega_{3X} + b_2\omega_{3Y} + c_2\omega_{3Z} \\ a_3\omega_{3X} + b_3\omega_{3Y} + c_3\omega_{3Z} \end{pmatrix}. \quad (24)$$

Принимая в формуле (5) $\Omega_X = \omega_{3X}$, $\Omega_Y = \omega_{3Y}$, $\Omega_Z = \omega_{3Z}$ и выражая составляющие вектора \overline{v}_a из (4), запишем составляющие вектора $\Delta\overline{a}_3$ для каждого из трех пар перемещаемого и неподвижного акселерометров.

По оси x:

$$\begin{aligned} \Delta a_{(x)xx} &= 0; \\ \Delta a_{(x)xy} &= -2V_a(a_3\omega_{3X} + b_3\omega_{3Y} + c_3\omega_{3Z}); \\ \Delta a_{(x)xz} &= -2V_a(a_2\omega_{3X} + b_2\omega_{3Y} + c_2\omega_{3Z}); \end{aligned} \quad (25)$$

по оси y:

$$\begin{aligned} \Delta a_{(y)yx} &= -2V_a(a_3\omega_{3X} + b_3\omega_{3Y} + c_3\omega_{3Z}); \\ \Delta a_{(y)yy} &= 0; \\ \Delta a_{(y)yz} &= 2V_a(a_1\omega_{3X} + b_1\omega_{3Y} + c_1\omega_{3Z}); \end{aligned} \quad (26)$$

по оси z:

$$\begin{aligned} \Delta a_{(z)zx} &= 2V_a(a_2\omega_{3X} + b_2\omega_{3Y} + c_2\omega_{3Z}); \\ \Delta a_{(z)zy} &= 2V_a(a_1\omega_{3X} + b_1\omega_{3Y} + c_1\omega_{3Z}); \\ \Delta a_{(z)zz} &= 0. \end{aligned} \quad (27)$$

Итоговую разность измеренных ускорений каждой пары ГА, один из которых перемещается по соответствующей оси СК ЛА, на момент встречи с неподвижным ГА представим в виде суммы полученных слагаемых:

$$\Delta\overline{a} = \Delta\overline{a}_k + \Delta\overline{a}_T + \Delta\overline{a}_K + \Delta\overline{a}_3. \quad (28)$$

Составляющие $\Delta \bar{a}$ по трем осям чувствительности ТА будут равны сумме соответствующих составляющих по этим осям слагаемых в правой части выражения (28), представленных формулами (5–8, 14–16, 19–21, 25–27). Подставим их последовательно в выражение (28) и получим уравнения для каждой из пар ТА.

С ТА, перемещаемым по оси x :

$$\begin{aligned} \Delta a_{(x)x} &= 0; \\ \Delta a_{(x)y} &= -2V_a \left\{ \begin{aligned} &a_3 \left[V_Z \left(\frac{1}{R_Y} + \frac{1}{R_{3Y}} \right) - V_Y \left(\frac{1}{R_Z} + \frac{1}{R_{3Z}} \right) \right] + \\ &+ b_3 \left[V_X \left(\frac{1}{R_Z} + \frac{1}{R_{3Z}} \right) - V_Z \left(\frac{1}{R_X} + \frac{1}{R_{3X}} \right) \right] + \\ &+ c_3 \left[V_Y \left(\frac{1}{R_X} + \frac{1}{R_{3X}} \right) - V_X \left(\frac{1}{R_Y} + \frac{1}{R_{3Y}} \right) \right] + c_3 \Omega_3 \end{aligned} \right\} \\ \Delta a_{(x)z} &= -2V_a \left\{ \begin{aligned} &\omega_{ky-} + a_2 \left[V_Z \left(\frac{1}{R_Y} + \frac{1}{R_{3Y}} \right) - V_Y \left(\frac{1}{R_Z} + \frac{1}{R_{3Z}} \right) \right] + \\ &+ b_2 \left[V_X \left(\frac{1}{R_Z} + \frac{1}{R_{3Z}} \right) - V_Z \left(\frac{1}{R_X} + \frac{1}{R_{3X}} \right) \right] + \\ &+ c_2 \left[V_Y \left(\frac{1}{R_X} + \frac{1}{R_{3X}} \right) - V_X \left(\frac{1}{R_Y} + \frac{1}{R_{3Y}} \right) \right] + c_3 \Omega_3 \end{aligned} \right\}; \end{aligned} \quad (29)$$

аналогично с ТА, перемещаемым по оси y :

$$\begin{aligned} \Delta a_{(y)x} &= -2V_a \left\{ \begin{aligned} &\omega_{ky} + a_3 \left[V_Z \left(\frac{1}{R_Y} + \frac{1}{R_{3Y}} \right) - V_Y \left(\frac{1}{R_Z} + \frac{1}{R_{3Z}} \right) \right] + \\ &+ b_3 \left[V_X \left(\frac{1}{R_Z} + \frac{1}{R_{3Z}} \right) - V_Z \left(\frac{1}{R_X} + \frac{1}{R_{3X}} \right) \right] + \\ &+ c_3 \left[V_Y \left(\frac{1}{R_X} + \frac{1}{R_{3X}} \right) - V_X \left(\frac{1}{R_Y} + \frac{1}{R_{3Y}} \right) \right] + c_3 \Omega_3 \end{aligned} \right\} \\ \Delta a_{(y)y} &= 0; \\ \Delta a_{(y)z} &= 2V_a \left\{ \begin{aligned} &\omega_{ky} + a_1 \left[V_Z \left(\frac{1}{R_Y} + \frac{1}{R_{3Y}} \right) - V_Y \left(\frac{1}{R_Z} + \frac{1}{R_{3Z}} \right) \right] + \\ &+ b_1 \left[V_X \left(\frac{1}{R_Z} + \frac{1}{R_{3Z}} \right) - V_Z \left(\frac{1}{R_X} + \frac{1}{R_{3X}} \right) \right] + \\ &+ c_1 \left[V_Y \left(\frac{1}{R_X} + \frac{1}{R_{3X}} \right) - V_X \left(\frac{1}{R_Y} + \frac{1}{R_{3Y}} \right) \right] + c_1 \Omega_3 \end{aligned} \right\}; \end{aligned} \quad (30)$$

и с ТА, перемещаемым по оси z .

В результате получено шесть уравнений, связывающих разности измеряемых составляющих ускорений с составляющими скорости ЛА, радиусы траекторий его движения и радиусы кривизны нормального сечения эквипотенциальной поверхности через направляющие косинусы ортов осей x, y, z в ГСК, которые являются функциями искомых углов тангажа, крена и рыскания. В качестве неизвестных в этих уравнениях выступают радиусы кривизны нормального сечения эквипотенциальной поверхности. Анализ этих уравнений показывает, что только три из них являются линейно независимыми. Таким образом, для определения углов α, ω, κ можно использовать только три уравнения, например, второе из (29), третье из (30).

Для решения этих уравнений значения угловых скоростей качки, составляющие скорости и радиусы кривизны необходимо получать из ИНС, а величину составляющих радиусов кривизны нормального сечения эквипотенциальной поверхности можно приближенно вычислить, используя уравнения Эйлера [13]

$$\frac{\sin^2 A}{N} + \frac{\cos^2 A}{M} = \frac{1}{R}, \quad (31)$$

где M – радиус кривизны меридианального сечения эллипсоида;

N – радиус кривизны сечения эллипсоида первым вертикалом;

R – радиус кривизны нормального сечения, проходящего под азимутом A .

Величины M и N вычисляются по известным значениям геодезических координат и параметрам референц-эллипсоида по формулам из выражения [13]. Величина радиуса эквипотенциальной поверхности может быть вычислена по формуле

$$R_3 = R + \Delta N + h, \quad (32)$$

где R – радиус кривизны нормального сечения эллипсоида, проходящего под азимутом A ;

ΔN – превышение геоида над референц-эллипсоидом;

h – высота ЛА над уровнем моря.

Составляющие вектора R_3 найдем по формулам:

$$\begin{aligned} R_3 &= |\bar{R}_3| m_n; \\ R_3 &= |\bar{R}_3| n_n; \\ R_3 &= |\bar{R}_3| p_n, \end{aligned} \quad (33)$$

где $|\bar{R}_3|$ – модуль вектора \bar{R}_3 ;

m_n, n_n, p_n – направляющие косинусы вектора \bar{R}_3 в ГСК.

Таким образом, определение УЭО СК ЛА будет заключаться в решении систем нелинейных уравнений, которое целесообразно выполнять по методу Ньютона или его модификации. Для сходимости вычислительного процесса необходимо задать начальное приближение, заключенное только в определенном интервале значений. При решении рассматриваемой системы уравнений в качестве этих значений целесообразно использовать данные от ИНС или результат решения на предшествующий момент.

Решив выбранные уравнения относительно неизвестных α , ω , κ подставим полученный результат в остальные три уравнения, и решим их относительно $R_{\alpha X}$, $R_{\alpha Y}$, $R_{\alpha Z}$. Это решение подставляется в первые три уравнения, использовавшиеся для определения α , ω , κ . Такие операции должны проводиться несколько раз, пока не будет получен устойчивый результат. Априорная оценка точности определения угловой ориентации ЛА с помощью предлагаемого ИИБ рассматривается ниже.

Таким образом, в отличие от алгоритмов систем ориентации, основанных на интегрировании дифференциальных уравнений Пуассона, особенностью предлагаемой системы является использование алгебраических уравнений, синхронно связывающих текущую выходную информацию инерциального измерительного модуля с мгновенными значениями параметров ориентации ЛА. Возможность такого подхода подтверждается теоретическими разработками в ЦНИИ «Электроприбор» метода ориентации КА [14].

С целью оценки ожидаемой погрешности выработки углов Эйлера моделировалось перемещение ЛА в течение интервала времени от десятка до сотен секунд с различной скоростью по переменным направлениям под воздействием рыскания бортовой, килевой и вертикальной качки с различными амплитудами, периодами и фазами. Для этого решалось первое уравнение из (30) относительно угла ω , которое принималось за истинное значение. Затем в используемые при вычислении параметры вводились возмущения, по величине равные их СКП, и решение уравнения выполнялось снова. Полученный результат сравнивался со значением, принятым за истинное. Полученная разность принималась за оцениваемую погрешность метода.

Составляющие скорости вычислялись по формулам

$$\begin{aligned} V_X &= V_d \cos \Delta i; & V_Y &= V_d \sin \Delta i; & V_Z &= V_{\text{БК}} + V_d \sin \alpha \cos \beta; \\ V_d &= V \sqrt{\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha \sin^2 \beta}; & V_{\text{БК}} &= -A_{\text{БК}} \sin\left(\frac{2\pi t}{T_{\text{БК}}} + \psi_{\text{БК}}\right); \\ \Delta i &= A_p \cos\left(\frac{2\pi t}{T_r} + \psi_r\right); & \alpha &= -A_{\text{БК}} \cos\left(\frac{2\pi t}{T_{\text{БК}}} + \psi_{\text{БК}}\right); & \beta &= -A_{\text{КК}} \sin\left(\frac{2\pi t}{T_{\text{КК}}} + \psi_{\text{КК}}\right), \end{aligned} \quad (34)$$

где V – скорость, сообщаемая ЛА двигателем;
 α , β , ΔI – углы качки и рыскания;

$V_{\text{вк}}$ – мгновенная скорость вертикальной качки;
 A_i, T_i, ψ_i ($i = \text{p, кк, бк, вк}$) – амплитуда, период и фаза рыскания, килевой бортовой и вертикальной качек.
 Составляющие радиуса кривизны траектории вычислялись по формулам [15]

$$R_x = -E(B\dot{z} - C\dot{y}); R_y = E(C\dot{x} - A\dot{z}); R_z = -E(A\dot{y} - B\dot{x}), \quad (35)$$

в которых для краткости записи введены обозначения

$$A = y\ddot{z} - z\ddot{y}; \quad B = z\ddot{x} - x\ddot{z}; \quad C = x\ddot{y} - y\ddot{x};$$

$$\frac{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}{(A^2 + B^2 + C^2)}, \quad (36)$$

где $\dot{x} = V_x; \ddot{x} = \dot{V}_x; \dot{y} = V_y; \ddot{y} = \dot{V}_y; \dot{z} = V_z; \ddot{z} = \dot{V}_z$ (точками обозначены первая и вторая производные от соответствующих координаты и скорости).

Радиус кривизны эквипотенциальной поверхности вычислялся по формулам (32, 33). Величину СКП разности отсчетов акселерометров определим как $m_{\Delta a} = \sqrt{2} m_a$, где за m_a примем остаточное среднее квадратическое смещение нуля акселерометра, которое у современных образцов составляет 0,15 мГал [16]. СКП погрешности перемещения акселерометров можно принять равной 0,005 м/с. СКП выработки составляющих скорости современными ИНС составляет $m_{V_x} \approx 0,025$ м/с [17].

По оценке, сделанной в работе [17], величина относительной СКП выработки инерциальным блоком для радиусов кривизны 1, 10, 50 км составляет $1,5 \times 10^{-5}$, $1,5 \times 10^{-4}$, $7,5 \times 10^{-4}$. Величину $m_{\omega_{ky}}$ определим как остаточную скорость ухода

гироскопа, которая у современных ИНС составляет 0,025°/час или $1,75 \times 10^{-5}$ рад/с [16]. Величину СКП составляющей радиуса кривизны эквипотенциальной поверхности можно оценить, принимая, что она вычисляется по формуле (33). Тогда квадрат СКП R_z определится как сумма квадратов СКП каждой величины, входящей в правую часть этого выражения. Если принять, что ЛА движется по меридиану, формула для нахождения СКП радиуса кривизны эллипсоида имеет вид

$$m_R = \frac{a(1-e^2)e^2 \sin 2\varphi m_\varphi}{2(1-e^2 \sin^2 \varphi)}. \quad (37)$$

При $\varphi = 45$ и $m_\varphi = 0,1'_{m_{R_3}} = 0,6$ м.

Современная изученность геоида в Мировом океане позволяет знать высоту геоида над референц-эллипсоидом в любой точке с погрешностью 1,5–2,5 м [18], т. е. $m_{\Delta N}=2$ м. Пусть высота ЛА над поверхностью моря измеряется с помощью радиовысотомера, имеющего относительную погрешность 0,08%. Следовательно при высоте полета 10 км $m_r=8$ м. Суммируя полученные величины и деля сумму на три, найдем оценку величину СКП составляющей радиуса кривизны эквипотенциальной поверхности $m_{\Sigma X}=4,8$ м.

В таблице приведены значения параметров, использовавшихся при моделировании.

Значения параметров, использовавшихся при моделировании погрешности выработки элементов углового ориентирования инерциальным измерительным блоком с перемещаемыми акселерометрами

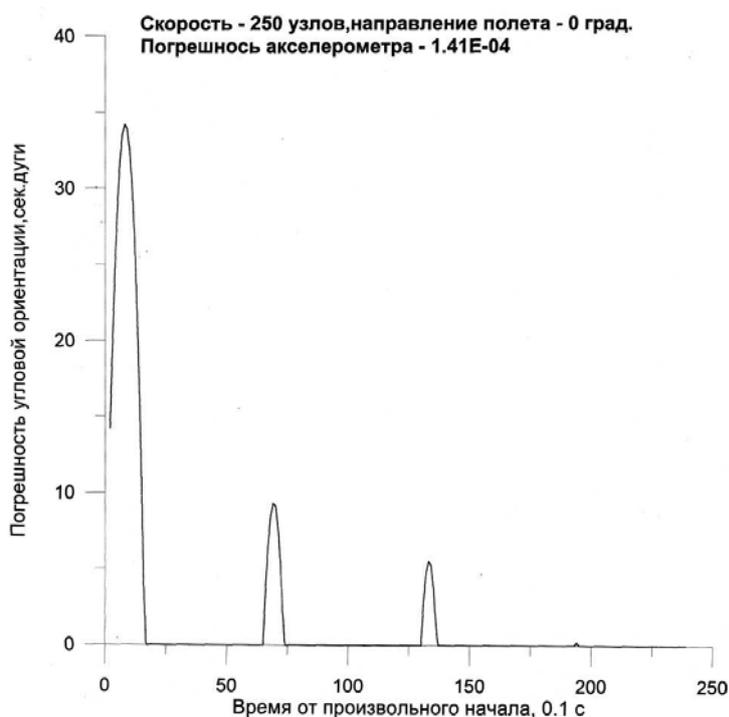
Параметр	Значение
1. Широта, град.	0, 45, 90
2. Азимут направления полета	0, 45, 90
3. Скорость, уз.	250-500
4. Амплитуда рыскания, град.	1; 1,5
5. Период рыскания, с	10, 12
6. Начальная фаза рыскания, град.	45, -45
7. Амплитуда вертикальной качки, м	2, 5, 10
8. Период вертикальной качки, с	6, 12
9. Начальная фаза вертикальной качки, град.	90, -90
10. Амплитуда бортовой качки, град.	1,5; 2
11. Период бортовой качки, с	10, 12
12. Начальная фаза бортовой качки, град.	60
13. Амплитуда килевой качки, град.	1, 5
14. Период килевой качки, с	10, 12
15. Начальная фаза килевой качки, град.	90, -90
16. Скорость перемещения акселерометров, м/с	1, 5, 10
17. СКП азимута направления полета, угл. мин.	0,5; 6
18. СКП амплитуды, периода, начальной фазы рыскания, всех видов качки, %	1, 15
19. СКП выработки ИНС углов бортовой и килевой качки, рад./с	10^{-4}
20. Погрешность высоты геоида, м	1,5

В результате моделирования установлено, что наибольший вклад в погрешность выработки угла ориентирования вносит погрешность измерения составляющей ускорения: при значении последней 10^{-6} м/с² она составила 156,6", а при 10^{-7} м/с², соответственно, – 15,7". Добавление погрешности азимута направления до 0,1° увеличило погрешность определения угла Эйлера до 17,7". Добавление дополнительно погрешностей выработки углов бортовой и килевой качек до 10 угловых минут увеличило погрешность определения угла Эйлера до 18". Последовательное введение в модель погрешностей вертикальной качки, рыскания, скорости перемещения акселерометра, широты, высоты геоида не изменили максимальный уровень погрешности,

который составил 18". При введении в модель одновременно всех погрешностей погрешность определения угла Эйлера увеличилась до 24".

При увеличении скорости с 250 до 500 узлов уровень суммарной погрешности практически остался неизменным на уровне 24". Зависимость уровня помех от направления полёта также практически не выражена: при изменении азимута направления с 0 до 90° суммарная погрешность угла Эйлера оставалась на уровне порядка 24".

На рисунке показана динамика погрешности выработки угла Эйлера инерциальным измерительным блоком с перемещаемыми акселерометрами на промежутке времени 25 с, равном примерно удвоенному периоду возмущающих ускорений. Полученный результат показывает, что в течение этого отрезка времени погрешность импульсно отклоняется от нулевого значения примерно с удвоенной частотой возмущающих ускорений, достигая в начальный момент максимального значения на уровне 35", а затем убывая по экспоненте за этот же период до 0.



Погрешность угла ориентации ЛА относительно геодезической системы координат, вырабатываемого инерциальным измерительным блоком с перемещаемыми акселерометрами. Погрешность измерения разности ускорения – 1,41 мГал

Моделирование погрешности в течение периода, равного примерно десяти периодам воздействия возмущающих ускорений, показало, что через шесть периодов качки уровень максимальной погрешности в течение примерно двух периодов качки снижается до 20", а далее погрешность

колеблется около нулевого значения с частотой, равной удвоенной частоте качки, достигая максимального значения 25".

Таким образом, полученный результат исследований подтверждает, что данный способ выработки параметров угловой ориентации датчика системы съемки местности с воздушного носителя с помощью инерциального блока с перемещаемыми акселерометрами, позволяет решить задачу координатной привязки точек акватории с требуемой точностью при гидрографической съемке дистанционными методами с самолёта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ackermann F. The use of camera orientation data in photogrammetry. A review. // Photogrammetria. – 1987. – No 1/2/ – P. 19–33.
2. Doyle F. J. Surveying and mapping with space date. // ITC Journal. – 1984. – No 4. – P. 314–321.
3. Gibson J. R., Dow A. J. et al. Adjustment of position using inertial navigation system. // Photogrammetric engineering and remote sensing. – 1981. – Vol. 47. – No 2. – P. 185–192.
4. Гончаров А. П. Точность решения обратной фотограмметрической задачи для одиночного снимка // Труды НИИГАиК. – 1974. – Т.38. – С. 27–37.
5. Абросимов В. И. и др. Использование системы НАВСТАР для определения угловой ориентации объектов // Зарубежная радиоэлектроника. – 1989. – № 1. – С. 15–16.
6. Малеев П. И. Основные направления развития средств навигации зарубежных ракетных подводных лодок. Навигация и гидрография. – СПб.: 2007. – Вып. 24. С. 60–73.
7. Зельдович С. М., Малгинский М. И. и др. Автокомпенсация инструментальных погрешностей гироскопов. – Л. Судостроение. – 1970. – 225с.
8. Малеев П. И. Повышения точности гироскопа за счет дополнительного медленного вращения его ротора в ортогональной плоскости. // Навигация и гидрография. – СПб.: 2003. – Вып.16 –С. 39–43.
9. Малеев П. И. Акселерометрическая стабилизированная платформа. // Навигация и гидрография. – СПб.: 2003. – Вып.16. – С. 35–39
10. Малеев П. И. Гироскоп-акселерометр с динамически настраиваемым подвесом // Навигация и гидрография. – СПб.: 2003. – Вып.17. – С. 47–52.
11. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика. – М.: Гос. изд. физ.-мат. литер.– 1958. – 346 с.
12. Лобанов А. Н. Аэрофототопография. – М.: Недра, 1979. – 231 с.
13. Граур А. В. Математическая картография. – Л.: Изд. ЛГУ. – 1956. – 150с.
14. Герцман В. Е., Гусинский В.З. Определение ориентации космического аппарата по информации электростатических гироскопов. //Гироскопия и навигация. – 1994. – №1(4).– С. 44–52.
15. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике. – М.: Гос. изд. физ.-мат. литер. – 1958. – 356 с.
16. Smith F. E. et al. Shuttl orbiter Stellar – Inertial Reference System // Journal of Guidance, Control and Dynamics. – 1983. – Vol. 6, – No 6. – P. 424–431.
17. Дмитриев С. П. Инерциальные методы в инженерной геодезии.– СПб.: ГИЦ РФ. ЦНИИ "Электроприбор". –1997. – 208 с.
18. Chapman M. E. et al. Comparison of Gravimetric Geoids with Geos-3 altimetric Geoid.//Journal of Geophysical research. – 1979. - Vol. 84. – No 84. – P. 3803–3816.

THE METHOD OF INCREASING THE ACCURACY OF CO-ORDINATE REFERENCE FOR THE AIRBORNE TERRAIN SENSING DATA

E. S. Zubchenko

(Kuznetsov Naval Academy),

P. I. Maleev

(GNINGI, RF MoD)

The method of increasing the accuracy of angular orientation parameters measurement for the airbornt terrain survey sensor, based on the employment of moving accelerometers in INS, is substantiated.

**МЕТОДЫ РАДИОЛОКАЦИОННОГО И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
МОРСКИХ АКВАТОРИЙ ДЛЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА ДНА**

Э. С. ЗУБЧЕНКО

(Военно-морская академия им. Н. Г. Кузнецова)

В статье рассмотрены методы радиолокационного и электромагнитного зондирования акваторий для картографирования рельефа дна.

В настоящее время радиолокационные изображения акваторий, получаемые с помощью радиолокаторов с синтезируемой апертурой (РСА), используются для съемки рельефа дна с точностью, сравнимой с точностью промера с помощью эхолотов. Для определения глубин применяют модели радиолокационного изображения, параметрами которых являются опорные глубины, скорости течения и характеристики волнения в момент съемки, а также цифровые инверсные процедуры обработки.

Возможность получения радиолокационного изображения акватории с требуемым для этих целей пространственным разрешением обеспечивается функционирующими космическими системами, оснащенными РСА, имеющими разрешающую способность на уровне трех метров: RADARSAT 2 (2002 г.), SkyMed COSMO (2002 г.), TerraSAR (2004 г.) Имеются также авиационные системы, которые оснащены РСА с мультиполяризованным излучением, такие как, например, E-SAR [1].

Картографирование рельефа дна прибрежных акваторий с использованием радиолокационного зондирования считается одним из важных применений изображения, получаемого с помощью РСА. Однако потенциал данного метода еще не в полной мере оценен гидрографическими службами.

Бельгийская фирма ARGOSS по проекту BABEL разработала новую технологию мониторинга рельефа морского дна – BAS (Bathimetry Assessment System) для картографирования глубин мелководных прибрежных акваторий, базирующуюся на использовании радиолокационных изображений акваторий, получаемых с помощью РСА, установленного на спутнике ERS Европейского космического агентства. Стоимость этого сервиса составляет от 1/3 до 1/10 стоимости получения данных традиционными методами, а результат может быть достигнут в значительно более короткий период времени, что особенно важно для мониторинга акваторий с быстро протекающими геоморфологическими процессами. Разрешающая способность радиолокационного изображения позволяет производить съемку рельефа дна в масштабе 1:50000 и крупнее, что является достаточным для многих приложений [2].

Проект BABEL был осуществлен в бельгийских прибрежных водах в районе песчаных банок Kwintebank и Middbekerke Bank. Размеры района

составляют примерно $20 \times 15 \text{ км}^2$. Целью проекта является демонстрация возможностей радиолокационной съёмки космической системой ERS для картографирования рельефа дна морских акваторий. Наличие протяженных песчаных банок делает эти сложные районы удобными для демонстрации данной технологии. Со стороны пользователя выдвигалось требование получения точной информации об относительных изменениях батиметрии и морфологии дна.

Для выбранного района была использована батиметрическая и геоморфологическая информация за три года.

Песчаные банки могут появиться в результате добычи песка, и как объекты, представляющие потенциальную навигационную опасность, они должны постоянно отслеживаться.

Получение радиолокационного изображения дна возможно при определённом состоянии поверхности моря. Экспериментальные данные, собранные в Северном море, позволили установить, что благоприятными гидрометеорологическими условиями для этих целей являются: скорость течения в пределах $0,4\text{--}0,8 \text{ м/с}$, а диапазон приемлемых значений скорости ветра – от 3 до 10 м/с.

Формирование изображения донной топографии с помощью РСА происходит вследствие трех процессов, протекающих в слое воды от поверхности до дна. Первый – взаимодействие между приливным потоком и донной топографией приводит к модуляции поверхностной скорости потока. Этот процесс можно описать с помощью уравнения неразрывности, уравнения мелкой воды и/или уравнения Навье-Стокса несколькими моделями с возрастающим уровнем сложности. Второй процесс – модуляция скорости потока на поверхности вызывает вариации в спектре энергии поверхностных волн. Это описывается с помощью уравнения баланса действия (возмущения), в котором используется член, описывающий источник релаксации, моделирующий восстанавливающие силы ветра и энергию разрушения волн, и, наконец, третий процесс состоит в том, что вариации волнового спектра вызывают модуляции в уровне рассеяния радиолокационного сигнала назад [3].

Для расчета вариации интенсивности радиолокационного сигнала, рассеянного назад, может быть использована простая модель Брэгга. Но имеется также двумерная модель на основе первого приближения Кирхгоффа.

Базируясь на таком представлении механизма получения радиолокационного изображения донной топографии, ARGOSS разработала пакет компьютерных моделей для получения глубин по данным радиолокационного зондирования акватории. Сейчас используется вычислительная схема BAS на основании одномерной пространственной модели.

Используемые для этого гидрологические и метеорологические данные на момент съёмок из космоса включали высоты уровня моря относительно нуля глубин и данные о скорости ветра и течения.

В качестве опорных глубин использовались данные промера, выполненного однолучевым эхолотом с расстоянием между галсами 800–1600 м.

Координатная привязка радиолокационных изображений осуществлялась по наземным опорным точкам, идентифицированным на навигационной морской карте (НМК) и на радиолокационных изображениях, полученных с помощью РСА со спутника ERS.

Количество наземных опорных геодезических точек, использовавшихся для точной координатной привязки, зависело от качества изображения и наличия опорных точек. В общем использовалось от 3 до 10 точек.

Для определения глубин применяются вариации тона радиолокационного изображения. С помощью BAS соотношение интенсивности изображения и глубины инвертируется в локальные вариации глубины относительно опорных значений. Опорные глубины необходимы, чтобы определить крупномасштабные тренды донной топографии и получить первоначальную глубину, которая используется как начальная точка в итеративной процедуре оценки глубин. Требуются и другие данные, чтобы откалибровать параметры модели. Для расчета уровня прилива и течения необходимы данные о скорости и направлении ветра, а также фазы прилива. Для обработки были выбраны три радиолокационных изображения, полученные в июне 1993 г., январе 1995 г. и апреле 1997 г. На эти же периоды подобраны и данные промеров в данном районе. С использованием перечисленной информации при помощи BAS были вычислены глубины на весь обследуемый район.

В рассматриваемых районах топография дна может быть описана суперпозицией крупноразмерных песчаных банок и мелкоразмерных песчаных волн. Поскольку в BAS используется одномерная модель рельефа, точность определения глубин может снизиться в тех местах, где направления двух геоморфологических структур не совпадают. При определении глубин вдоль линии, перпендикулярной песчаным волнам, получался хороший результат для песчаных волн и близкий к оптимальному – для песчаных банок. Поэтому, при выборе направлений профилирования, более предпочтительных для песчаных банок, будут получены менее приемлемые результаты для песчаных волн. В BAS выбирается направление профилей, по которым погрешности вычисления глубин будут минимальными.

Модель донной топографии, полученная в результате обработки трех радиолокационных изображений, сравнивалась с данными промеров, выполненных в сроки, наиболее близкие к моментам проведения спутниковой радиолокационной съёмки. По данным промеров создавалась цифровая модель рельефа дна на сетке с шагом 25 м. При сравнении моделей рельефа дна оценивались следующие параметры: средняя разность (СР), средняя квадратическая разность (СКР), средняя абсолютная разность (САР), погрешность глубины Δ_{90} с 90% и Δ_{95} с 95%-ным доверительным уровнем

вероятности. Ниже в таблице приведены значения этих параметров для результатов вычисления глубин по трём различным радиолокационным снимкам.

Результаты сравнения моделей рельефа дна, построенных по радиолокационным снимкам акватории и по данным промера

Дата радиолокационной съёмки	Дата выполнения промера	СР, см	СКЗР, см	САР, см	Δ_{90} , см	Δ_{95} , см
23 июня 1993 г.	Июнь 1993 г.	0,4	16,6	10,5	22,8	31,1
4 января 1995 г.	Февраль 1995 г.	0,5	14,2	9,9	20,9	27,6
12 апреля 1997 г.	Апрель 1997 г.	0,3	20,3	12,4	28,4	39,6

Результаты, представленные в таблице, рассматриваются разработчиками методики как нижняя граница достижимой точности при указанных разрешающей способности радиолокационного изображения, размере шага расчетной сетки и природной изменчивости донной топографии в пределах сеточной ячейки.

Полученные результаты показали, что использование радиолокационных съёмок позволяет исключить часть промерных работ с помощью эхолотов, а потому уменьшить стоимость производства карт на 50%. Карты, полученные на основании РСА-изображений, менее детальны, чем карты в классическом варианте. Это является следствием недостаточной разрешающей способности радиолокационного изображения (25 м), получаемого РСА, установленного на спутнике ERS-2. Данное пространственное разрешение позволяет производить карты в масштабе 1:50000 и мельче. Более высокую разрешающую способность обеспечивают появившиеся за рубежом интерферометрические радары с синтезируемой апертурой [1].

Рассмотренная технология нашла приложение для оценки зависимости акваторий и влияния дноуглубительных работ на разрушение береговой линии. До настоящего времени с этой целью проводится промер, в ходе которого измеряются концентрация взвешенных частиц в воде и поле течений на всей акватории, что требует значительных затрат времени и средств. Альтернативным и более выгодным путем получения необходимой информации является использование дистанционных методов. Для этих целей используются временная последовательность как оптических, так и радиолокационных спутниковых данных. Тем более, что дистанционные данные покрывают относительно большую площадь, имеют достаточно низкую стоимость и являются поэтому идеальными для целей прогностической оценки. Чтобы обеспечивать строительство портов необходимой информацией, фирма ARGOSS создала службу, которая составляет карты концентрации взвесей, карты глубин, карты течений и

уровня моря. Служба использует несколько источников данных, в том числе и данные от РСА, установленного на спутнике ERS-2, от датчика морского наблюдения с широким углом поля зрения SeaWiFSs, от модульного оптико-электронного сканера MOS и радиовысотомера, устанавливавшегося на космическом аппарате Торех/Poseidon [4].

В отличие от уже полученных за рубежом практических результатов в России пока производится только теоретическая оценка возможности уточнять батиметрические карты шельфа по радиолокационным и оптическим изображениям морских акваторий.

Методика обработки радиолокационных изображений морской поверхности, полученных с помощью отечественного РСА, устанавливавшегося на КА «Алмаз», включала ряд последовательных операций [5]. Сначала по НМК для участков акватории Карских ворот в масштабе 1:250000 были составлены цифровые модели рельефа дна на сетке с шагом 10 м. На втором этапе проводился анализ радиолокационных изображений, на которых проявились различные гидрофизические явления, такие как внутренние волны, фронтальные зоны, проявляющиеся в виде вихрей или линейных структур, которые отображаются полосами различной тональности, что может быть вызвано чередованием полос с разной насыщенностью шугой и мелкими плавающими льдинами. В целом на изображениях отмечалась весьма сложная пространственная картина расположения зон с разной удельной эффективной поверхностью рассеяния радиоволн. На изображениях были выделены линеаменты, которые переносились на батиметрическую карту. При этом использовался опыт морфоструктурного анализа рельефа суши, применяемый в геоморфологии.

На третьем этапе уточнялось положение изобат с учетом выявленных линеаментов. Местоположение поднятий и углублений дна существенно не меняется, однако ориентация их может претерпеть изменение на 10–20°. Меняются также детали рисовки отдельных изобат или их группы.

С учетом результатов дешифрирования радиолокационных изображений для рассматриваемых районов были получены уточненные батиметрические карты с нанесенными выделенными линеаменентами.

Для координатной привязки радиолокационных акваторий используют технологию автономного получения угловых и линейных элементов ориентирования съёмочной аппаратуры с точностью, обеспечивающей составление детальных карт при недостаточном количестве геодезических опорных пунктов.

Одно из основных направлений решения этой проблемы – интегрирование инерциальных навигационных систем (ИНС) и приёмников спутниковых навигационных систем (СНС).

В интегрированных системах СНС-ИНС для определений координат центра фотографирования как стандартный инструмент применяется относительный кинематический способ позиционирования [6]. Например, для

мониторинга прибрежных акваторий в Нидерландах с помощью авиационного РСА, положение самолета в результате слепополетной обработки данных обсерваций по GPS будет определяться с погрешностью не более 10 см [6]. Для достижения такой точности используется метод относительного позиционирования на основе измерения фазы несущего сигнала в кинематическом режиме. Разрешение фазовой неопределенности осуществляется в полете по так называемой технологии OTF (On the Fly), когда для этой цели используются все полетные данные.

Для оценки надежности разработанного метода, сравнивались результаты, полученные тремя различными пакетами программ обработки данных измерений. Для этого использовались также две контрольно-корректирующие станции (ККС).

Дополнительно данным методом производилось определение координат концов двух базовых линий. Расхождения с истинными значениями координат составили 2 см в плане и 5 см в высоте.

Проект, носивший название «Интерферометрия повторного пути при использовании PHARUS» («Repeat pass interferometry with PHARUS») заключался в разработке метода координирования радиолокационной съемки акватории с помощью РСА PHARUS с фазированной антенной решеткой, который позволяет получать изображения земной поверхности при вертикальном зондировании с высоты 6–10 км с разрешающей способностью, соответствующей фотоснимку. Разработка метода высокоточного субдециметрового уровня позиционирования самолета с использованием обсервации по GPS осуществлена Отделом математической геодезии и позиционирования (MGP) Дельфтского Университета технологий (DUT) (Нидерланды).

Разрешение неоднозначностей фазовых измерений при обсервации по GPS производилось в ходе слепополетной обработки с использованием данных обсерваций по всему маршруту. Скорость самолета определяет высокий темп обсерваций, поэтому был выбран односекундный интервал, который приемлем для большинства геодезических GPS-приемников.

Относительное позиционирование с помощью фазовых измерений накладывает ограничение на расстояние между подвижным объектом и ККС. Для надёжного разрешения фазовой неоднозначности оно не должно превышать 20 км. Съёмку с помощью PHARUS предполагали производить на удалениях от ККС более 30–40 км.

Влияние ионосферной помехи, соответствующее максимуму одиннадцатилетнего цикла солнечной активности в период проведения съёмки, также ограничивало наибольшее удаление мобильного объекта от ККС, на котором фазовая неоднозначность может быть разрешена.

Для разрешения неоднозначности по методу OTF использовались три пакета программ: GPSurvey (Trimble), GeoGemus (Spectra Precision Terrasat) и Flykin Suite (Geosurvey Inc.).

Результаты обработки показали, что при расстояниях до ККС менее чем 35 км горизонтальные координаты согласуются в большинстве случаев в пределах 2 см, а отличия более чем 5 см были исключительными. На больших удалениях от ККС согласованность была менее хорошей, но всегда меньше, чем 20 см.

Оказалось, что формализация определения целых циклов фаз достаточно сложна. Если отличия расстояний, соответствующие измеренной фазе, превышали 5 см, принималось обычно, что в измерении расстояния до одного из навигационного ИСЗ имеется ошибка в целом числе циклов (это соответствует 20 см). Минимальное возвышение используемых спутников составляло 15° . Разности координат точек обсерваций и их высот над эллипсоидом, вычисленных с помощью различных пакетов программ, при удалениях самолёта от ККС на расстояние около 60 км, достигали 10 и 15 см соответственно. Дифференциальные поправки получали на ККС, оборудованных приёмником Trimble 4000 SSI. На самолёте устанавливался приёмник Ashtech Z-12 [6].

Для снижения уровня ошибок и разрешения неопределенности применялся аппарат калмановской фильтрации разнородной навигационной информации. В отдельных районах успешное применение СНС ограничивалось недостаточно точным знанием высоты геоида.

Качество и возможности современных ИНС существенно улучшаются, так что уже в настоящее время они могут быть использованы для определения линейных и угловых элементов ориентирования самолета при выполнении съемки, в том числе и радиолокационной.

Авиационное электромагнитное зондирование применяется для картографирования рельефа дна прибрежных акваторий, отмелей и каналов, представляющих интерес для судоходства, когда из-за низкой прозрачности воды или в зонах приобла лазерные системы не эффективны.

Для этих целей в Австралии разработана авиационная электромагнитная батиметрическая система (АЭМБС). Система является аналогом прибора, который уже в течение нескольких десятилетий используется для разведки минеральных месторождений и включающий антенну, закрепляемую на самолете или буксируемую вертолетом, чтобы излучить магнитное поле в землю. Индуцированные токи в земле генерируют магнитное поле, которое, достигая авиационной приемной антенны, наводит в ней токи индукции и эти сигналы интерпретируются как следствие наличия под земной поверхностью стратифицированных горных пород различной мощности и проводимости.

Этот метод предоставляет возможность измерения толщины водного слоя над дном, а также измерения толщины отложений на морском дне. Организация оборонной науки и технологии предприняла несколько съемок с помощью АЭМБС в береговой зоне, чтобы оценить эффективность этого метода [7].

АЭМБС включает сложное оборудование и поддерживающее программное обеспечение и действуют на принципе обработки сигналов электромагнитного зондирования во временной или частотной области. Временной метод использует периодические волновые формы пульсирующего тока, а приемник выявляет магнитное поле, индуцируемое токами в воде и грунте, пока отсутствуют токи в передающем устройстве. АЭМБС, обрабатывающие сигнал в частотной области, используют для этого непрерывные синусоидальные электрические токи на ряде дискретных частот, которые генерируют магнитные поля, проникающие в морскую воду и морской грунт. В таком режиме работают АЭМБС, устанавливаемые на вертолете, хотя ряд из них работает во временной области.

Аппаратура включает несколько пар передающих и приемных катушек в фиксированном положении в пространстве. Каждая приемная катушка повернута относительно излучающей катушки. Пары катушек, разделенные на 6–8 м, заключены в прочную трубу, подвешенную на 30 м ниже вертолета и около 30–40 м выше поверхности моря. Измерения производятся через каждые 3 м по трассе полета. Используемый частотный диапазон зондирующих сигналов – от 350 Гц до 100 кГц. Снижая действующую частоту до 350 Гц, добиваются лучшего проникновения сигнала в морскую воду. Однако для измерения глубин используются сигналы на нескольких частотах.

АЭМБС, устанавливаемые на самолете, имеют передающий контур, который проложен внутри самолета, повторяя его обводы: охватывает концы крыльев, передний и задний конец самолета. Приемные катушки размещаются в гондоле, буксируемой на 40–60 м ниже и в 90–120 м позади самолета.

Высота съемки составляет около 120 м. Дискретность измерений – примерно через 12 м по трассе полета. Раскачивание самолета приводит к ошибкам интерпретации, вследствие нерегистрируемых вариаций высоты гондолы, ее отстояния и ориентации.

Комбинирование большой площади контура АЭМС, устанавливаемого на самолете, и большого пульсирующего тока делает возможным излучать более сильное магнитное поле, чем у АЭМБС, устанавливаемых на вертолетах.

Длительность цикла передачи катушкой сигнала составляет 40 мс (25 Гц). Излучение магнитное поле происходит в течение 4 мс импульса тока, а в течение последующих 16 мс сигнал не излучается. Этот полуцикл затем повторяется с импульсом тока противоположной полярности.

Одним из примеров вертолетной АЭМБС, работающей во временной области, которая использовалась в экспериментальных съемках, является NoisTEM. Система включает излучающий контур диаметром 24 м с внутренним концентрическим приемным контуром. Эта система действует на базовой частоте 25 Гц подобно авиационной системе, обрабатывающей сигнал во временной области. Использование низкой частоты улучшает проникновение сигнала в воду, но вызывает проблемы, связанные с электронным шумом и стабильностью системы.

Используя цифровое моделирование и оптимизацию по методу наименьших квадратов, получаемые данные инвертируют, чтобы определить параметры модели, которые наилучшим образом им соответствуют. Параметры модели включают толщину и электропроводимость горизонтальных (одномерных) слоев, которые составляют слой воды. Эти данные используют для определения глубины, высоты передатчика над водой, проводимости воды и в некоторых случаях – толщины осадочных пород. Инверсия данных с помощью двух- и трехмерных моделей более трудоемкая, чем при использовании одномерной модели, но может повысить достоверность получаемых данных, например, в случае съемки узких каналов и выступающих скал. В общем одномерная модель приемлема там, где вариации в морской топографии изменяется незначительно в пределах измерительного пятна, размеры которого составляют обычно от 10 м до 150 м и зависят от системы и высоты полета. Система позволяет обнаруживать подводные объекты, если их размер меньше облучаемого на дне пятна и если имеется достаточный контраст проводимости между объектом и дном. С помощью АЭМБС, работающей в частотной области, выполнена съемка в Сиднейской бухте. Съемка проведена по 21 параллельному галсу протяженностью около 5,5 км с междугалсовым расстоянием 50 м.

Значительная часть этой акватории имеет глубину более 18 м. Из-за низкой прозрачности воды использование лазерных систем было невозможным. Глубина определена по положению границы, где проводимость изменяется от высокой (более 3 сименс/м) до низкой (менее 0,1 сименс/м). Достигнутая при этом точность получаемых глубин составила 0,5 м. На больших глубинах точность ухудшается. Батиметрическая съемка, выполненная с помощью АЭМБС в нескольких местах, показала, что метод может обеспечить надежное получение глубин в мелководных районах. Однако необходимо улучшение программного обеспечения для обработки измерений и интерпретации данных. Сейчас АЭМБС еще не оптимизированы для морской съемки. Значительная задержка их развития означает, что полный потенциал АЭМБС еще не реализован.

Снижение диапазона частот зондирующего сигнала, высоты съемки, повышение точности определения положения и ориентации передающей и приемной антенн во время съемки должно привести к существенному повышению точности измерений глубин и повышению вероятности распознавания различных типов донных грунтов [7].

На основании выполненного анализа состояния дистанционных методов и средств сбора гидрографической информации можно сделать выводы о том, что современный этап знаменуется более интенсивной разработкой и использованием активных методов, таких как радиолокационное и электромагнитное зондирование. Причем первый имеет более высокую эффективность благодаря возможности площадной съемки в более широком диапазоне глубин и с более высокой точностью. Их основной недостаток – в

необходимости специфических гидрометеорологических условий, при которых на радиолокационном изображении регистрируется информация о рельефе дна: наличие на акватории в момент радиолокационной съемки приливо-отливных течений во всем слое воды и мелких волн, вызываемых ветром определенной силы.

Одним из условий практического применения метода радиолокационного зондирования является повышение пространственного разрешения РСА. Такими свойствами обладают созданные недавно интерферометрические радиолокаторы с синтезируемой апертурой [1]. Их использование для радиолокационного зондирования акваторий позволит получать более достоверную информацию с более высоким пространственным разрешением, что должно повысить эффективность методов сбора гидрографической информации на основе радиолокационного зондирования акваторий.

С целью повышения точности координатной привязки данных, получаемых различными дистанционными датчиками, на данном этапе разрабатываются и используются интегрированные навигационные системы на базе инерциальных и спутниковых навигационных систем и новых методов относительных измерений. Эти методы нашли новое практическое приложение для мониторинга акваторий, подверженных процессам заносимости. Разработанные для этого технологии позволяют осуществлять построение цифровых моделей рельефа дна с пространственным разрешением и точностью с меньшими затратами. Новым и многообещающим является применение электромагнитного зондирования судоходных акваторий с невысокой прозрачностью воды или акваторий, покрытых льдом. Разработка эффективных методов дистанционного зондирования для решения задач картографирования морских акваторий рассматривается как существенное расширение возможностей с целью получения гидрографической информации для практических, в том числе и военных приложений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Annual Report 2001-Technical Commissions Reports// ISPRS Highlight. –2002. – Vol. 7. – No 1. – P. 8–26.
2. Hesselmanns G. H. F. M., Wensink G. J. et al Bathymetry Assessment demonstration off the Belgian Coast-Babel// The Hydrographic Journal. – 2000. – No 96. – P. 3–8.
3. Alpers W., Hennings I. A theory of the imaging mechanism of underwater bottom topography by real and synthetic aperture radar // Journal of Geophysic Researh. –1984. –No C6. – P. 10529–10546.
4. Hesselmanns G. H. F. M., Wensink G. J. Rapid Mapping of Coastal Areas to Support Port Developments// Hydro International. – 2001. Vol. 5. – No 6. P. 24–27.
5. Бондур В. Г., Гребенюк Ю. В. Аэрокосмические методы определения рельефа дна в прибрежных зонах морей и океанов // Исследование Земли из космоса. – 2000. – No 6. – С. 59–73.
6. Husti G. J, Sluiter R. G. Airborne kinematics GPS with OTF (On the Fly) ambiguity resolution // The Hydrographic Journal. – 1999. – No 94. – P. 17–23.
7. Vrbancich J. AEM Bathymetry Using geophysical exploration techniques to map shallow sea water depth // Hydro International. – 2005. – Vol. 9. – No 3. – P. 27–29.

**METHODS OF RADIOLOCATION AND ELECTROMAGNETIC PROBING FOR
CHARTING THE SEA WATER AREAS**

E. S. Zubchenko
(Kuznetsov Naval Academy)

The methods of radiolocation and electromagnetic probing of the water areas intended for charting the bottom relief are considered.

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ОКЕАНОГРАФИЯ

ГРНТИ 67.21.23, 37.25

ОЦЕНКА ПОВТОРЯЕМОСТИ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ НАД ОХОТСКИМ МОРЕМ

С. И. МАСТРЮКОВ
(ГНИНГИ МО РФ)

В статье по данным Японского метеорологического агентства за 1951–2005 гг. уточнена оценка повторяемости тропических циклонов над Охотским морем.

Интенсивное освоение природных ресурсов дальневосточных морей требует уточнения режима тропических циклонов над этими акваториями, поскольку связанные с ними ветер и волнение могут существенно повлиять на функционирование объектов нефтегазодобычи, морской транспорт и безопасность людей.

В соответствии с Лоцией Охотского моря [1] тропические циклоны (ТЦ) выходящие на акваторию Охотского моря, зарождаются над Южно-Китайским морем или в районе Филиппинских островов.

Из района зарождения они двигаются в северном направлении. Если циклоны выходят на материк, то быстро затухают, а если встречают полярный фронт, то углубляются и меняют траекторию движения. В отличие от циклонов умеренных широт диаметр тропического циклона до момента заполнения обычно измеряется сотнями километров. Атмосферное давление в центре составляет менее 970 мбар. При выходе в Охотское море по мере заполнения диаметр их увеличивается. Средняя скорость перемещения тропических циклонов – 20–40 км/час. Над Охотским морем тропические циклоны отмечаются в период с июня по декабрь. Через Охотское море ТЦ проходят редко и наиболее опасны, когда их центр находится над Курильскими островами. В июне, июле и декабре ТЦ отмечаются неежегодно. В августе, сентябре – по одному ТЦ в год, в октябре – по два-три ТЦ ежегодно [1].

В работе [2] обобщены сведения о наиболее сильных тропических циклонах по району о-ва Сахалин и Японскому морю с 1969 по 1984 гг.. Эти же сведения воспроизведены в Справочнике [3] и в известной степени противоречат данным Лоции [1].

Недостаток и противоречивость отечественных данных по режиму тропических циклонов в Охотском море вынудили в рамках настоящей

работы воспользоваться международными информационными ресурсами для уточнения и проверки опубликованных сведений.

На сервере Японского центра по слежению за тропическими циклонами [4] имеются данные о траекториях тропических циклонов и их интенсивности в западной части Тихого океана и прилегающих морях.

Данные представлены со всеми необходимыми атрибутами, в том числе приведены международный номер шторма и его имя. Собственно данные включают координаты центров барических образований через 3–6 часов, давление в центре, градацию интенсивности тропического циклона (тропическая депрессия – TD, тропический шторм – TS, мощный тропический шторм – STS, тайфун – TY, внетропический циклон – L).

На основе этой информации была сформирована база данных по траекториям тропических циклонов. Поскольку стадии развития тропического циклона изменяются по мере его продвижения, было решено выборку данных производить для барических образований с давлением в центре менее 990 гпа.

Ниже представлены результаты обработки данных Японского метеорологического агентства. Район, по которому выполнялась выборка данных, лежит в полосе 42–60° гр. с. ш., 138–156° гр. в. д.

Среднемесячное и максимальное число тропических циклонов выходящих на эту акваторию, приведено на рис. 1.

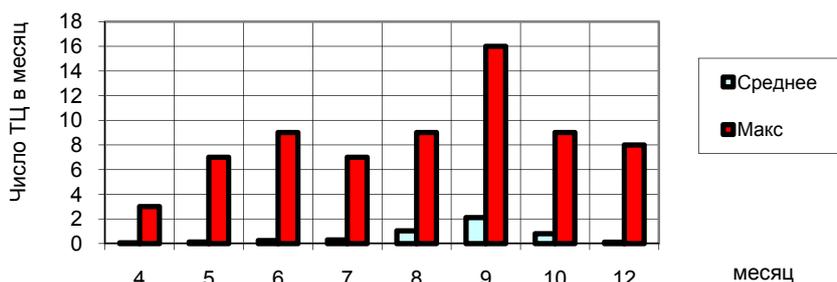


Рис. 1. Среднее и максимальное за 1951–2005 гг. число тропических циклонов над Охотским морем

Как видим, на акваторию моря в августе и октябре выходит в среднем один тропический циклон, в сентябре – чуть более двух циклонов, в остальные месяцы – в среднем на акваторию моря выходит один циклон один раз в три и более лет.

Вместе с тем максимальное число ураганов, выходявших на акваторию моря, существенно выше. Так, в сентябре на акваторию моря (или его часть) может выходить до 16 тропических циклонов (рис. 1).

На рис. 2 приведено распределение суммарного за год числа тропических циклонов, выходявших на акваторию моря. Как видим, изменчивость этой характеристики очень высока. В одни годы на акваторию

моря не выходит ни одного тропического циклона, а в другие их число достигает 28.

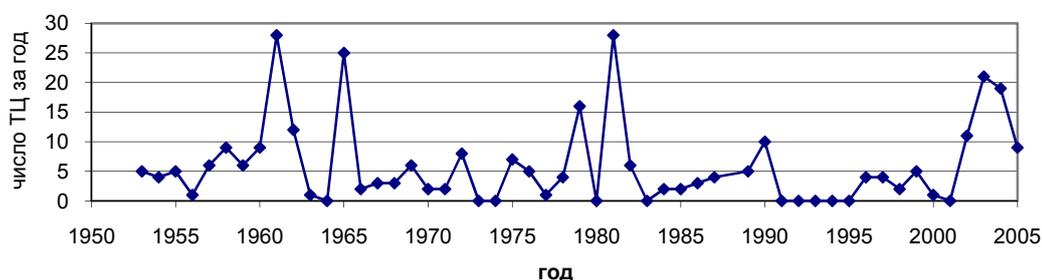


Рис. 2. Ход суммарного за год числа тропических циклонов, прошедших над Охотским морем

Для определения районов моря, наиболее подверженных воздействию тропических циклонов, проведен расчет суммарного числа сроков нахождения центра тропических циклонов в трапециях размером 4×6 градусов. Размер района выбран с учетом скорости движения циклона и дискретности наблюдений с целью не пропустить быстро двигающийся циклон при выборке данных. Результаты приведены на рис. 3.

Один срок нахождения тропического циклона в трапеции заданного размера означает, что в этой трапеции в среднем три часа за месяц может отмечаться воздействие тропического циклона. Вместе с тем, учитывая очень большую изменчивость числа тропических циклонов по годам, полученные данные лучше интерпретировать как характеристику деятельности тропических циклонов и траекторий их движения.

Как видим, в июле основные траектории тропических циклонов, образованных над Южно-Китайским морем, проходят по юго-восточной части Охотского моря в северо-восточном направлении. Эти циклоны выходят к восточному побережью Камчатки, куда приходят также циклоны с юга – из Филиппинского моря.

В августе число циклонов заметно увеличивается, их основное направление распространения – из Южно-Китайского моря на северо-восток вдоль Курильских островов – сохраняется, вместе с тем часть циклонов от о-ва Хоккайдо смещается строго на север Охотского моря, где и заполняется.

В сентябре интенсивность тропических циклонов в районе максимальна. Их большая часть смещается в северном направлении от восточного побережья Хоккайдо и на севере Охотского моря заполняется.

В октябре интенсивность тропических циклонов снижается, а их траектории проходят в основном южнее Курильской гряды. Направлены они в основном на северо-восток и лишь в отдельных случаях перед заполнением циклоны поворачивают на север и даже северо-запад.

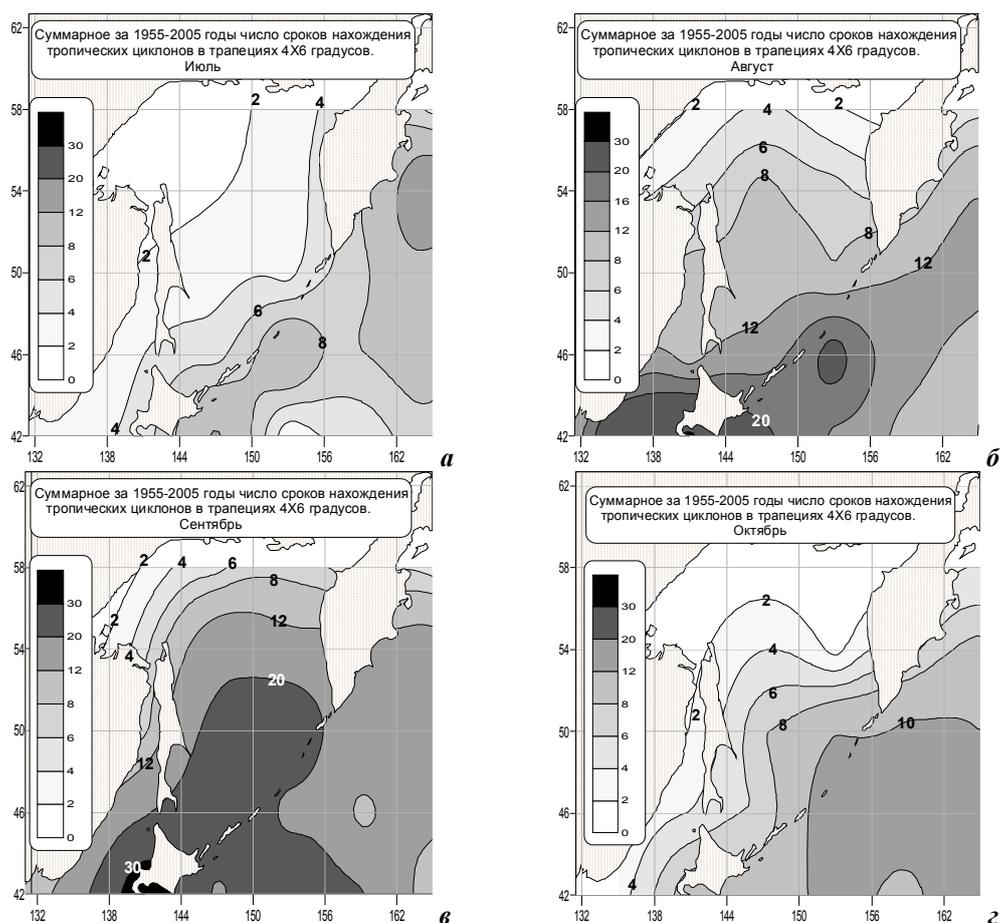


Рис. 3. Суммарное за 1955–2005 гг. число сроков нахождения тропических циклонов над акваторией Охотского моря в июле (а), августе (б), сентябре (в) и октябре (г)

Таким образом, в результате анализа современных данных удалось уточнить режим тропических циклонов над Охотским морем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лоция Охотского моря. Вып.1, Южная часть моря. СПб.: Изд-во ГУНиО МО, 1998. – 390 с.
2. Воронин Л. М. Расчет характеристик ветра и волн в морях с тропическими циклонами. Тр.ГОИИ. – 1989. – Вып. 188. – 112–122.
3. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том 8. Японское море, вып. 1. – СПб.: Гидрометеиздат, 2003. – 400 с.
4. <http://www.jma.go.jp/>

ESTIMATE OF TROPICAL CYCLONES REPEATABILITY OVER THE SEA OF OHOTSK

S. I. Mastryukov
(GNINGI, RF MoD)

The estimate of tropical cyclones repeatability over the sea of Ohotsk, based on the 1951–2005 data of the Japanese Meteorological agency, is updated.

СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

ГРНТИ 78.09.23

К 100-ЛЕТИЮ ПОДВОДНЫХ СИЛ РОССИИ

ШТУРМАН ПЕРВОЙ СОВЕТСКОЙ ПОДВОДНОЙ ЛОДКИ НА ТИХОМ ОКЕАНЕ**К. Я. БОГОМАЗОВ,
С. Ю. ХЛЫПАЛО**
(ГНИНГИ МО РФ)

В статье рассматриваются исторические события и условия, при которых создавались Подводные Силы на Тихоокеанском флоте. Первой советской подводной лодкой на Тихом океане была «Щ-11», командиром которой был Г. Н. Холостяков, а первым штурманом – А. Д. Федоров.

Во время Русско-японской войны 1904–1905 гг. в Цусимском сражении были разгромлены 2-я эскадра и 1-й отряд 3-й Тихоокеанской эскадры. Это вынудило Россию подписать 25 августа (5 сентября) 1905 г. Портсмутский мирный договор, уступив Японии Южный Сахалин, Порт-Артур, Южную ветку Китайской восточной железной дороги (КВЖД). России также отказывалось в праве в течение 30 лет иметь на Тихом океане флот, в том числе и подводные лодки.

Правительство Советского Союза в 1925 г. признало Портсмутский мирный договор и добросовестно его выполняло. Однако в 1931 г. в нарушение вышеуказанного договора Япония оккупировала Маньчжурию, лишив СССР возможности нормально эксплуатировать КВЖД. Провокационные действия империалистической Японии привели к тому, что на Дальнем Востоке сложилась напряженная обстановка. В этих условиях Совет Труда и Оборона 12 июня 1932 г. принял постановление «О постройке 12 подводных лодок для Дальнего Востока». В утвержденном начальником Морских Сил РККА В. М. Орловым документе под названием «Основные соображения по развитию ВМС РККА» было записано, что в основе строительства ВМС во 2-й пятилетке (1933–37 гг.) должно лежать развитие подводного флота, а главным направлением в строительстве подводного флота должны оставаться подводные лодки среднего тоннажа. Всего за годы 2-й пятилетки планировалось построить 369 подводных лодок. Предполагалось, что Советский Союз будет иметь самый мощный подводный флот в мире [1, с. 194]. В числе подводных лодок, которые было запланировано построить, были те, что могли нести позиционную службу на закрытых театрах. К разработке подводных лодок приступили на Балтийском

заводе в Ленинграде под руководством Б. М. Малинина ещё в 1928 г. К январю 1930 г. был разработан и принят проект на строительство подводных лодок типа «Щука». Первые три лодки имели название «Комсомолец», «Ударник» и «Воинственный безбожник». На строительство первой из них Всесоюзный Ленинский Союз Молодежи собрал по всей стране 2,5 миллиона рублей. Подводные лодки предназначались для Балтики и Черного моря. Тихоокеанского флота ещё не было.

Первая подводная лодка для Морских Сил Дальнего Востока (МСДВ) «Щ-11» была заложена на Балтийском заводе в г. Ленинграде 20 марта 1932 г. В июне того года в разобранном виде с соблюдением строгой секретности она была доставлена во Владивосток по железной дороге. На контейнерах была надпись «Сельхозтехника». Достройка лодки быстрыми темпами производилась на «Дальзводе» и 12 декабря 1932 г. «Щ-11» уже была спущена на воду.

Первым командиром подводной лодки был назначен Георгий Никитич Холостяков (впоследствии вице-адмирал Герой Советского Союза, активный участник Великой Отечественной войны, а в послевоенные годы – командующий 7 флотом на Тихом океане, активный участник создания атомного подводного флота в нашей стране, председатель государственной приемки атомной с жидкометаллическим тепло-носителем подводной лодки «К-27»). Георгий Никитич как командир сформировал очень дружный экипаж, в июле 1933 г. провел швартовые испытания, в сентябре под его командованием проведены ходовые и государственные испытания, и 23 сентября 1933 г. на «Щ-11» в торжественной обстановке был поднят Военно-Морской флаг. Командующий Морскими Силами Дальнего Востока флагман флота 1 ранга М. В. Викторов поздравил личный состав и судостроителей с поднятием Военно-Морского флага на первой советской тихоокеанской подводной лодке. После этого события Георгий Никитич вступил в должность командира формируемого дивизиона подводных лодок (в стадии достройки на «Дальзаводе» находились еще три «Щуки»). Всего через год, в сентябре 1934 г., двенадцатая «Щука» вошла в боевой состав МСДВ. Таким образом, Постановление Совета Труда и Оборона от 12 июня 1932 г. выполнено менее чем за два с половиной года.

Вторым командиром подводной лодки «Щ-11» стал Дмитрий Гордеевич Чернов. Впоследствии его экипаж вышел по боевой и политической подготовке на первое место среди подводных лодок всего Советского Военно-Морского Флота. В ознаменовании этого ЦК ВЛКСМ наградил «Щ-11» комсомольским значком. Его увеличенное изображение, отлитое из бронзы, было прикреплено к рубке подводной лодки. Такого отличия ни до, ни после не удостоился ни один корабль.

Подводная лодка «Щ-11» вскоре стала именоваться «Щ-101», а Морские Силы Дальнего Востока с 11 января 1935 года – Тихоокеанским флотом.

Первым штурманом головной подводной лодки «Щ-11» Морских Сил Дальнего Востока стал Александр Дмитриевич Фёдоров. Он родился 23 февраля 1910 г. в деревне Любино-Поле Батецкого района Новгородской области в крестьянской семье. У его родителей Дмитрия Федоровича и Марии Васильевны было три сына и две дочери. В 1927 г. Александр вступил в ряды ВЛКСМ. В начале 1928 г. состоялся Пленум ЦК ВЛКСМ, решением которого для укомплектования военно-морских учебных заведений была объявлена мобилизация лучших комсомольских активистов из числа рабочей молодежи, имевшей соответствующее образование. Семиклассники выпуска 1928 г. откликнулись на призыв Всесоюзного Ленинского комсомола пойти восстанавливать Военно-Морской флот и служить на кораблях Рабоче-Крестьянского Красного Флота. Комсомолец Федоров добровольно поехал в Ленинград поступать в ВМУ им. М. В. Фрунзе. «По разверстке ЦК ВЛКСМ на флот было направлено около 200 комсомольцев, в их числе 150 – на укомплектование ВМУ им. М. В. Фрунзе и 50 – ВМИУ им. Ф. Э. Дзержинского. Набор курсантов в 1928 г. положил начало формированию будущего XI выпуска из ВМУ им. М. В. Фрунзе. По качеству службы выпускников на надводных кораблях и подводных лодках Военно-Морского флота СССР этот набор курсантов явился одним из лучших за всю историю училища» [2].

В октябре 1932 г. Александр Дмитриевич окончил училище по штурманской специальности и получил первое назначение на Краснознаменный Балтийский флот в Бригаду подводных лодок помощником штурмана на лодку типа «Щ». 1 августа 1933 г. по приказу Начальника Морских Сил Союза ССР он был откомандирован во 2-ю морскую бригаду Морских Сил Дальнего Востока на должность штурмана (командира БЧ-1) головной подводной лодки «Щ-11», которая стояла в бухте Золотой Рог у стенке Дальзавода, на ней проводились швартовые испытания механизмов и всех устройств. Подводная лодка была закрыта со всех сторон деревянными щитами и брезентом.

В сентябре молодой штурман под руководством флагманского штурмана МСДВ Я. Я. Лапушкина (впоследствии контр-адмирал, начальник ГС ВМФ СССР) успешно сдал экзамен на знание Тихоокеанского театра и был допущен к самостоятельному обеспечению ходовых и государственных испытаний в Уссурийском заливе. После подъема военно-морского флага на «Щ-11» в 1933 г. начались интенсивные выходы в море на отработку задач боевой подготовки и несения дозорной службы в Японском море. «Молодому штурману приходилось трудно не только физически. Морской театр был совсем новый для нас и еще недостаточно нами изучен, было недостаточно средств навигационного оборудования. Даже вблизи Владивостока совсем мало надежных навигационных ориентиров, поэтому уточнение места лодки, особенно после шторма, нередко представляло для штурмана Александра Федорова довольно сложную задачу» [3, с. 57–58].

1 ноября 1934 г. Александр Дмитриевич был откомандирован в Ленинград на специальные курсы командного состава (ныне 6 ВОК ВМФ). Ему было рекомендовано продолжить службу по командной линии. Он был переведен в Учебный отряд подводного плавания имени С. М. Кирова на командирские курсы, которые окончил в сентябре 1935 г., и получил предписание на Тихоокеанский флот на должность помощника командира подводной лодки типа «Щ». В мае месяце 1937 г. старший лейтенант А. Д. Федоров назначен командиром подводной лодки «М-3». «Малюткой» Александр Дмитриевич командовал полтора года. С 1 мая 1938 г. капитан-лейтенант (с августа 1937 г.) А. Д. Федоров командовал средней подводной лодкой «Щ-127», затем в этом же году – большой подводной лодкой «Л-15». «Ленинцем» капитан 3 ранга (с 1940 г.) А. Д. Федоров командовал до конца 1940 г. В ноябре 1940 г. он назначен командиром дивизиона подводных лодок типа «Л». В должности командира дивизиона А. Д. Федоров был до декабря 1941 г. Приказом командующего Тихоокеанским флотом Александр Дмитриевич назначен начальником оперативно-планового отделения оперативного отдела штаба Тихоокеанского флота. В этой должности он проявил себя как хороший офицер-оператор, поэтому приказом Народного Комиссара ВМФ (НК ВМФ) его назначили в Главный Морской штаб ВМФ (ГМШ ВМФ) старшим офицером-оператором, а конце 1943 г. – заместителем начальника отдела Оперативного Управления ГМШ ВМФ. В 1944 г. ему присвоено воинское звание капитана 2 ранга, в 1948 г. – капитана 1 ранга. В Оперативном Управлении он проходил службу до ноября 1948 г. В это время он убыл на учебу в г. Ленинград на Академические курсы при Военно-Морской Академии (АКОС ВМС), после окончания которых был назначен начальником отдела Оперативного Управления ГШ ВМС.

В период Великой Отечественной войны, работая в Оперативном Управлении ГШ ВМС, Александр Дмитриевич приобрел большой опыт в оперативной работе как офицер-оператор. В августе месяце 1945 г. он находился в командировке на Тихоокеанском флоте, где под руководством Главнокомандующего ВМС Адмирала Флота Н. Г. Кузнецова принимал участие в разработке документов по проведению операций кораблями и частями Тихоокеанского флота в войне с империалистической Японией. В 1952 г. Александр Дмитриевич назначен начальником Оперативного Управления штаба Северного флота. В этой должности он получил воинское звание контр-адмирала и руководил Оперативным Управлением штаба Северного флота до 1954 г.

В 1956 г. Александр Дмитриевич был назначен начальником 2 Высшего Военно-Морского училища подводного плавания в г. Риге, где на 4 курсе учился его сын Юрий. Юрий был Сталинским стипендиатом и закончил училище с золотой медалью. В выпускной день Начальник училища контр-адмирал А. Д. Федоров вручал лейтенантские погоны и своему сыну.

1 ноября 1959 г. приказом МО СССР 2 ВВМУ ПП было расформировано, после чего контр-адмирал А. Д. Федоров проходил службу в научно-исследовательской группе при ГК ВМС. В августе 1960 г. он был уволен в запас по приказу МО СССР, находясь в запасе, трудился в г. Ленинграде в НПО «Морфизприбор». 26 января 1984 г. Александр Дмитриевич ушел из жизни.

Контр-адмирал в отставке А. Д. Федоров гордился службой своего сына Юрия, который прошел славный путь от лейтенанта до контр-адмирала, командира дивизии стратегических ракетных подводных крейсеров на 3 флотилии Северного флота. Отец и сын контр-адмиралы Александр Дмитриевич и Юрий Александрович вместе сфотографировались в 1978 г.



Отец и сын контр-адмиралы Александр Дмитриевич и Юрий Александрович Федоровы. Фото 1978 г.

Юрий Александрович Федоров закончил службу в Главном штабе ВМФ, будучи заместителем начальника Боевой подготовки ВМФ Советского Союза, образно говоря, Главным Подводником ВМФ СССР. В 1992 г. Ю. А. Федоров был уволен в запас по возрасту. До последних дней своей жизни (скончался 22 июня 2003 г.) он исполнял обязанности заместителя президента Общества ветеранов-подводников России.

ЛИТЕРАТУРА

1. «Подводные Силы России. 1906–2006 г.». Под общей редакцией Главнокомандующего ВМФ России адмирала В. Массорина. – М.: Издательский дом «Оружие и техника». – 2006. – 828 с.
2. Шпицберг И. П.. «Вся жизнь – флоту». К 50-летию XI выпуска ВВМУ им. М. В. Фрунзе. 1928–1932. – Л., 1982. – 80с.
3. Холостяков Г. Н.. «Вечный огонь». – М.: Воениздат. – 1976. – 414 с.

**ON THE OCCASION OF THE CENTENARY OF RUSSIA'S SUBMARINE FORCES
THE NAVIGATOR OF THE FIRST SOVIET SUBMARINE IN THE PACIFIC**

**K. Y. Bogomazov,
S. Y. Khlypalo
(GNINGI, RF MoD)**

The historic events and conditions under which the Submarine Forces in the Pacific Fleet were created are considered. The submarine «Щ-11» was the first Soviet submarine in the Pacific. G. N. Kholostyakov was her commanding officer, and A. D. Fedorov – her first navigator.

ГРНТИ 78.21.36

**УЧАСТИЕ ГИДРОГРАФОВ ГОСУДАРСТВЕННОГО НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО НАВИГАЦИОННО-ГИДРОГРАФИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
МО В ПРОВЕДЕНИИ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ НА СОЗДАНИЕ МЕТОДОВ
КАРТОГРАФИРОВАНИЯ АРКТИЧЕСКОГО БАССЕЙНА**

А. И. СОРОКИН

Статья освещает деятельность гидрографов ГНИНГИ МО РФ при проведении теоретических и экспериментальных исследований с целью создания методов картографирования Арктического бассейна

В послевоенные десятилетия изучение Северного Ледовитого океана велось ускоренными темпами. Советский Союз, владея большим сектором Арктики, еще в довоенные годы занимал ведущие позиции в освоении этого необъятного и сурового края. Достаточно вспомнить о подвиге папанинцев (1937–38 гг.), за дрейфом которых на льдине от Северного полюса до кромки арктических льдов с волнением следил весь мир.

Этим дрейфом были открыты систематические исследования на советских ледовых научных обсерваториях (Северный полюс), вахта которых продолжается, хотя и с перерывами, по настоящее время.

В послевоенные годы были приняты специальные решения правительства по вопросам изучения Северного Ледовитого океана в интересах народного хозяйства и обороны страны. В выполнении поставленных задач активное участие принял Военно-Морской Флот, его научные учреждения, в том числе и институт, который в настоящее время носит название Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт (ГНИНГИ МО РФ).

На повестку дня была поставлена задача разработки средств и методов обеспечения плавания атомных подводных лодок в Арктическом бассейне, а именно, оснащение средствами определения места подо льдами, а также

обеспечение навигационными картами, отвечающими особенностям данного театра военных действий.

В качестве одного из возможных способов определения координат места подводной лодки было предложено применение навигационных гидроакустических систем, разработка которых требовала проведения экспериментальных акустических исследований в реальных условиях Арктического бассейна.

Для выполнения этих исследований в состав высокоширотной воздушной экспедиции (Север-11) (1959 г.) был включен комплексный отряд ВМФ, состоящий из специалистов различных организаций флота, под руководством начальника отдела института капитана 1 ранга А. Г. Светлова.

На сотрудников института было возложено навигационно-гидрографическое обеспечение взрывных работ, проводившихся на различном удалении от ледовой станции (Северный полюс - б) дрейфовавшей в то время в приполюсном районе. На станции располагался штаб экспедиции и была развернута приемная аппаратура. Для выполнения взрывных работ на различных удалениях от полюса был сформирован авиадесантный отряд под руководством капитана 3 ранга А. И. Сорокина в составе двух самолетов ЛИ-2 Полярной авиации, двух минеров и двух гидрографов Северного Флота, а также сотрудников института.

Работа продолжалась со второй половины марта до середины мая – в тот период времени, когда возможны, хотя и опасны, посадки легких самолетов, оборудованных лыжами, на неподготовленные льдины – как правило, свежезамерзшие полыньи, поскольку старый лед восторошен, покрыт застругами и непригоден для посадки и взлета ни на колесах, ни на лыжах.

Вылетев 10 марта из Ленинграда в довольно теплую погоду (+10°C), мы попали через сутки в районе полюса в 45-градусный мороз. По пути нас не приняла Амдерма, и пришлось садиться уже в условиях темноты на запасной аэродром в Усть-Каре – при свете костров, разложенных вдоль посадочной полосы. Утром нас взял на борт легендарный полярный ас И. А. Мазурук. По радио нам сообщили, что Диксон закрыт из-за плохой погоды, но Илья Андреевич, один из немногих имевших право лично принимать решения на полеты, ознакомившись с метеоусловиями, сказал: "Ерунда – летим" и, действительно, вскоре благополучно доставил нас на остров Диксон, а затем и на «СП-6». Первая ночь на полюсе едва не стала для нас последней, поскольку все прибывшие отравились угарным газом во время сна в фанерном домике, и лишь случайные обстоятельства позволили вовремя (в 5 часов утра по московскому времени, по которому жила станция) поднять тревогу, позвать врача и коллективными усилиями привести в чувство потерявших сознание людей.

Работа авиадесантного отряда заключалась в определении координат мест посадок самолета по звездам в условиях полярного дня и производстве взрывов с помощью глубинных бомб и зарядов тола различной мощности в намеченных точках океана и на заданной глубине. В связи с тем, что посадка

самолета на необорудованные льдины была связана с определенным риском для жизни, все находившиеся на борту самолета, садившегося первым, получали (плату за страх) в сумме 30 руб. за каждую посадку.

Вторым днем, который мог оказаться последним для половины авиадесантного отряда, было 27 апреля 1959 г. В этот день один из самолетов ЛИ-2, пытаясь взлететь на лыжах с короткой взлетной полосы (длиной 600 м) в условиях внезапно наступившей оттепели и при боковом ветре, не смог набрать необходимой скорости (120 км в час) и при взлете задел лыжами и хвостовым оперением торосы, окружавшие полосу, после чего упал на лед и развалился на части. Однако, благодаря опыту пилота Г. В. Сорокина и бортмеханика, в считанные секунды перекрывшего все бензопроводы, пожара и взрыва не последовало, хотя все грузовое отделение было занято ящиками с толом. Несмотря на такие аварии, вся программа акустических испытаний была выполнена полностью. Одновременно были разработаны «Инструкция по проведению астрономических работ на дрейфующем льду», изданная УГС ВМФ в 1961 году (авторы А. И. Сорокин и П. Н. Селиванов), а также «Таблицы для вычисления координат места корабля по расстояниям и разностям расстояний» (УНГС ВМФ, 1960, автор А. И. Сорокин) [1, 2].

Кроме того, проведенные работы на льду навели на мысль о необходимости использования новых средств для изучения этого района. Так, при производстве взрывов нами отмечались многократно повторяющиеся и постепенно затихающие (дуплеты) отражений взрывной волны, дошедшей до дна непосредственно от точки взрыва и отраженной от ледяного покрова. Эти эффекты, а также появившиеся в печати сведения о связи рельефа дна с магнитными аномалиями, привели нас к геофизикам – в Институт геологии Арктики.

Установившиеся в результате творческие связи оказались весьма плодотворными и сохранялись в течение десятилетий. Прежде всего здесь следует вспомнить о первых энтузиастах этих совместных работ, уже ушедших из жизни геологах-геофизиках – Р. М. Деменицкой, А. М. Карасике и Ю. Г. Киселеве. В результате проведенных в то время совместных разработок была создана под руководством Р. М. Деменицкой и А. Г. Пожарского «Инструкция по применению геофизических методов при гидрографических исследованиях рельефа дна океана со льда», изданная УГС ВМФ в 1966 г. (авторы А. Г. Пожарский, А. М. Карасик, Ю. Г. Киселев и П. Н. Селиванов) [3] которая получила свое дальнейшее развитие в процессе развертывания широкомасштабных работ на Северном флоте.

В проведении экспериментальных исследований, связанных с разработкой геофизических методов, активное участие от института принимали также сотрудники: А. Г. Пожарский, П. Н. Селиванов, А. К. Мирошниченко, Г. Ф. Кузьмин, Г. В. Крицкий, В. С. Егорова.

Разработка и внедрение комплексных геофизических методов гидрографических исследований, выполненные в содружестве Военно-Морским Флотом и Министерством геологии, были удостоены Государственной премии СССР за 1986 г.

В результате проведенных исследований стало возможным составление крупномасштабных карт Арктики.

Однако район Северного Ледовитого океана отличается не только своим суровым климатом, но имеет и другие особенности. Так, в этом районе расположен географический полюс, что делает невозможным использование здесь карт в меркаторской проекции, а также традиционных курсоуказателей – гироскопических и магнитных компасов. Все это привело к необходимости изыскания иных курсоуказателей и проекций для навигационных и специальных карт, а также разработки эффективных способов и таблиц для их построения.

По заданию ГУНиО МО был подготовлен доклад «О наивыгоднейшей проекции для морских навигационных карт на район Арктики» (1958 г., авторы: А. И. Сорокин, П. Н. Селиванов, А. К. Мирошниченко).

В результате анализа свойств проекций с учетом предназначения карт было рекомендовано мелкомасштабные карты (1 : 3 000 000, 1 : 5 000 000) составлять в нормальной гномонической проекции, позволяющей прокладывать ортодромии (кратчайшие расстояния, радиопеленги) в виде прямых линий. Было показано, что наименьшими искажениями обладают карты в равноугольной конической проекции, пригодные в нормальном виде для любых районов, кроме тех, в которые попадает полюс. Последние могут быть изображены в стереографической проекции, представляющей собой частный случай равноугольной конической проекции Ламберта.

Для карт, предназначенных для определения места по расстояниям (полученным, например, с помощью навигационной гидроакустической системы), была рекомендована косая равнопромежуточная коническая проекция. Карты на соответствующие районы во всех перечисленных проекциях были составлены и изданы.

В то же время возникла необходимость создания карт для использования в штатных автопрокладчиках, приспособленных для плавания в высоких широтах. В качестве оптимальной для этих карт проекции сотрудниками ГНИНГИ (В. А. Монтели) и промышленности была рекомендована поперечная равноугольная цилиндрическая проекция (называемая часто поперечной проекцией Меркатора) [4], которая была разработана А. Ламбертом и предложена для использования в высоких широтах в обобщенном – косом положении Л. Тонта (1929 г.) и Л. Дриенкуром (1932 г.) [5], о чем сообщил российскому читателю советский полярник Е. С. Гернет (1933 г.).

Основной заслугой Е. С. Гернета следует считать его предложение наносить на навигационные карты, построенные в данной проекции,

развернутую на 90° сетку географических координат, изображение которой имеет те же свойства, что и обычная сетка меридианов и параллелей в нормальной меркаторской проекции. Это позволяет использовать повернутую сетку квазимеридианов и квазипараллелей, как ее теперь называют, для выполнения навигационной прокладки привычным для штурманов способом [6].

Однако в связи с отсутствием соответствующих технических средств, позволяющих в частности осуществлять курсоуказание по квазилоксодромии, в то время эта проекция должным образом не была востребована.

Отметим, что эффективному решению задачи построения необходимых карт способствовало наличие разработанных незадолго перед этим Таблиц для вычисления сеток изолиний на морских картах и приближенного решения геодезических задач на большие расстояния для равноугольного перехода от сфероида на шар с искажением длин третьего порядка малости и таблиц меридиональных частей шара. Эти таблицы, составленные и вычисленные под руководством и при участии сотрудников ГНИНГИ К. К. Цендровского, В. Ж. Соловейкина и В. С. Яшкевича, были изданы УНГС ВМФ в 1957 г. [7].

Новизна решений, предложенных специалистами ГНИНГИ и промышленности, обеспечивших первый поход отечественной атомной подводной лодки к Северному полюсу, была подтверждена авторским свидетельством на изобретение, удостоенное специальной премией Совета Министров СССР в 1962 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Инструкция по проведению астрономических работ на дрейфующем льду. – УГС ВМФ. – 1961. – 51с.
2. Таблицы для вычисления координат места корабля (по расстояниям и разностям расстояний) (ТВК-60). – Л. УНГС ВМФ, 1960. – 180 с.
3. Инструкция по применению геофизических методов при гидрографических исследованиях рельефа дна со льда. – УГС ВМФ. – 1966. – 240с.
4. Монтели В. А. Автономные средства навигации отечественных подводных лодок // Сб. «Наука Санкт-Петербурга и морская мощь России». – СПб.: Наука, 2002. – С. 213–271.
5. Каврайский В. В. Избранные труды (в 2-х томах). – Л.: УНГС ВМФ, 1956. – 1960. – 1484 с.
6. Гернет Е. С. Навигационные морские и авиационные карты с добавочными замкоординатами // Записки по гидрографии – 1933. – № 5. – С. 25–43.
7. Таблицы для вычисления сеток изолиний на морских картах и приближенного решения геодезических задач на большие расстояния. – УНГС ВМФ, 1957. – 288 с.

PARTICIPATION OF HYDROGRAPHERS OF GNINGI, RF MoD, IN THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH INTENDED TO CREATE THE METHODS OF CHARTING THE ARCTIC BASIN

A. I. Sorokin

The activities of hydrographers, GNINGI, RF MoD, when carrying out the theoretical and experimental explorations with the aim to create the methods of charting the Arctic basin are described.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

АЛЕКСЕЕВ Сергей Петрович, начальник ГНИНГИ МО РФ, заслуженный военный специалист РФ, председатель СПб регионального отделения Российского общественного института навигации, академик Академии транспорта РФ, контр-адмирал, докт. техн. н., профессор. Окончил Высшее военно-морское училище им. М. В. Фрунзе и Военно-морскую академию им. Н. Г. Кузнецова. Специализация – штурман. Автор более 200 печатных трудов.

БОГОМАЗОВ Константин Яковлевич, старший научный сотрудник ГНИНГИ, доцент, капитан 1 ранга в отставке. Окончил ТОВВМУ им. С. А. Макарова, Высшие специальные офицерские классы. Специализация – штурман. Автор около 50 печатных трудов, из них семь авторских монографий.

БОНДАРЕНКО Валерий Николаевич, профессор Политехнического института Сибирского Федерального университета, докторант, канд. т. н., доцент. Окончил Красноярский политехнический институт. Область научных интересов: повышение помехоустойчивости и точности радионавигационных систем с ограниченным частотным ресурсом. Автор и соавтор более 130 опубликованных научных работ.

БРОДСКИЙ Павел Григорьевич, главный научный сотрудник ГНИНГИ, капитан 1 ранга, докт. воен. н., профессор. Окончил Каспийское ВВМУ, Военно-морскую академию им. Н. Г. Кузнецова. Специализация: штурман. Автор более 120 печатных трудов.

БЫСТРОВ Валерий Николаевич, научный сотрудник ГНИНГИ МО РФ, старший лейтенант. Окончил Морской корпус Петра Великого – Санкт-Петербургский военно-морской институт. Специализация – спутниковые радионавигационные системы. Автор двух печатных работ.

ГЛУХОВ Юрий Андреевич, начальник лаборатории ГНИНГИ, капитан 2 ранга. Окончил Высшее военно-морское училище подводного плавания им. Ленинского комсомола, Высшие специализированные офицерские классы ВМФ. Специальность – штурман. Автор 11 публикаций.

Sergey P. ALEKSEYEV, Chief of the State Research Navigation-Hydrographic Institute, RF MoD, Rear-Admiral, DSc, professor. Honoured Military Specialist, chairman of St. Petersburg regional branch of the Russian Public Institute of Navigation, member of the Academy of Transport, RF. Graduated from Frunze Naval College and Naval Academy. Speciality: navigation. Author of more than 200 publications.

Konstantine Ya. Bogomazov, senior researcher, the State Research Navigation-Hydrographic Institute, RF MoD, reader, Captain 1-st rank (Ret.). Graduated from Makarov Naval College and Higher Special Officers' Classes, Speciality: navigation. Author of about 50 publications, including 7 books.

Valery N. Bondarenko, professor of the Polytechnical Institute of the Siberian Federal University. Cand Sc, working for DSc degree. Graduated from Krasnoyarsk Polytechnical Institute. Sphere of scientific interests: enhancement of noise resistance and accuracy of radionavigation systems with limited frequency resource. Author of more than 130 scientific publications.

Pavel G. BRODSKY, chief researcher, the State Research Navigation-Hydrographic Institute, RF MoD, Captain 1-st rank, DSc, professor. Graduated from Caspian Naval College and Naval Academy. Speciality: navigation. Author of more than 120 publications.

Valery N. BYSTROV, researcher, the State Research Navigation-Hydrographic Institute, RF MoD, Senior Lieutenant. Graduated from St. Petersburg Naval Institute. Speciality: radionavigation systems. Author of two publications.

Yuri A. GLUKHOV, chief of laboratory, the State Research Navigation-Hydrographic Institute, RF MoD, Captain 2-nd rank. Graduated from Naval Submarine Navigation College, Navy Higher Officers' Classes. Speciality: navigator. Author of 11 publications.

ДАНИЛОВА Галина Кирилловна, старший научный сотрудник ГНИНГИ МО РФ. Окончила Петрозаводский государственный университет. Специализация – навигация. Автор около 100 печатных трудов.

ЗЯЦ Леонид Андреевич, старший научный сотрудник Государственного научно-исследовательского навигационно-гидрографического института. Окончил Высшее военно-морское училище им. М. В. Фрунзе. Область научных интересов – навигационные комплексы.

ЗУБЧЕНКО Эдуард Семенович, преподаватель Военно-морской академии, капитан 1 ранга в отставке, докт. техн. н., старший научный сотрудник. Окончил высшее военно-морское училище им. М. В. Фрунзе, Военно-морскую академию им. Н. Г. Кузнецова. Специализация – гидрография, аэрокосмические методы сбора гидрографической информации. Автор 45 печатных трудов.

ИВАНОВ Борис Евгеньевич, главный научный сотрудник ГНИНГИ МО РФ, капитан 1 ранга в отставке, докт. техн. н., профессор, лауреат Государственной премии РФ, заслуженный деятель науки и техники, председатель секции НТО им. акад. А. Н. Крылова. Окончил Балтийское высшее военно-морское училище, Военно-морскую академию им. Н. Г. Кузнецова. Специализация – морская геодезия, гравиметрия, гидрография, навигация. Автор около 200 печатных трудов.

КАВРАЙСКИЙ Александр Владимирович, старший научный сотрудник Государственного научно-исследовательского навигационно-гидрографического института. Высшее военно-морское училище им. М. В. Фрунзе, Военно-морскую академию им. Н. Г. Кузнецова, капитан 1 ранга в отставке. Специализация – морская гидрография, математическая картография. Автор более 40 печатных трудов.

КОЗЛОВ Денис Васильевич, начальник отдела ОАО «НТП «НАВИДАЛС»). Окончил Санкт-Петербургский государственный технический университет. Специализация: радиоэлектроника.

Galina K. DANILOVA, senior researcher, the State Research Navigation-Hydrographic Institute, RF MoD. Graduated from Petrozavodsk State University. Speciality: navigation. Author of about 100 publications.

Leonid A. Zayats, senior researcher, the State Research Navigation-Hydrographic Institute, RF MoD. Graduated from Frunze Naval College. Sphere of scientific interests: navigational systems.

Edward S. ZUBCHENKO, teacher, the Naval Academy, DSc, senior researcher, Captain 1-st rank (Ret.). Graduated from Frunze Naval College, the Naval Academy. Speciality: hydrography, aerospace methods of collecting the hydrographic information. Author of 16 publications.

Boris E. IVANOV, chief researcher, the State Research Navigation-Hydrographic Institute, RF MoD, Captain 1-st rank (Ret.), DSc, professor, RF State Prize Winner, Honoured Scientist, chairman of Krylov STO section. Graduated from Baltic Naval College and Naval Academy. Speciality: marine geodesy, gravimetry, hydrography, navigation. Author of about 200 publications.

Alexander V. KAVRAISKY, senior researcher, the State Research Navigation-Hydrographic Institute, RF MoD, Captain 1-st rank (Ret.). Graduated from Frunze Naval College, Naval Academy. Speciality: marine hydrography, mathematical cartography. Author of more than 40 publications.

Denis V. KOZLOV, chief of division, STE «NAVI-DALS». Graduated from St. Petersburg Technical University. Speciality: radioelectronics.

Кокорин Владимир Иванович, профессор Политехнического института Сибирского Федерального университета, канд. т. н. Окончил Красноярский политехнический институт. Область научных интересов: наземные и спутниковые радионавигационные системы и устройства. Автор и соавтор более 250 опубликованных научных работ.

КУЗЬМИН Евгений Всеволодович, магистрант Политехнического института Сибирского Федерального университета Окончил Красноярский политехнический институт. Область научных интересов: имитация сигналов, алгоритмы цифровой обработки сигналов перспективных радионавигационных систем.

ЛАПШИНА Валентина Ивановна, старший научный сотрудник ГНИНГИ МО РФ. Окончила Ленинградский институт точной механики и оптики. Сфера научных интересов – программно-математическое обеспечение навигационных задач. Автор 15 научных публикаций.

ЛОБОЙКО Борис Иванович, ведущий научный сотрудник ГНИНГИ МО РФ, капитан 1 ранга в запасе, докт. техн. н., академик Академии военных наук, почётный радист. Окончил Высшее военно-морское училище радиоэлектроники им. С. Попова. Специализация – радиосвязь, навигация. Автор более 120 печатных трудов.

ЛУКЬЯНОВ Геннадий Геннадьевич, старший научный сотрудник ОАО «НТП «НАВИДАЛС»», канд. т. н. Окончил Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина. Специализация – автоматизированные системы управления. автор 10 публикаций.

ЛЬВОВ Константин Петрович, ведущий инженер-программист ОАО «Концерн «Океанприбор»». Окончил Ленинградский Электротехнический институт. Область научных интересов: доплеровские лаги. Автор пяти авторских свидетельств (патентов) на полезные модели. Автор и соавтор около 20 научных публикаций.

Vladimir I. KOKORIN, professor of the Polytechnical Institute of the Siberian Federal University. Graduated from Krasnoyarsk Polytechnical Institute, Cand Sc. Sphere of scientific interests: ground and satellite radionavigational systems. Author of more than 250 scientific publications.

Evgeny V. KUSMIN, magistrand, Polytechnical Institute of the Siberian Federal University. Graduated from Krasnoyarsk Technical University. Sphere of scientific interests: simulation of signals, algorithms for digital processing of signals of advanced radionavigation systems.

Valentina I. LAPSHINA, senior researcher, the State Research Navigation-Hydrographic Institute, RF MoD. Graduated from Leningrad Institute of Fine Mechanics and Optics. Sphere of scientific interests: software for navigation problems. Author of 15 publications.

Boris I. LOBOIKO, leading researcher, the State Research Navigation-Hydrographic Institute, RF MoD. Captain 1st rank (Ret.), DSc, academician of the Academy of Military Sciences, Honoured Radio Specialist. Graduated from Popov Naval College of Raioelectronics. Speciality: radio communications, navigation. Author of more than 120 publications.

Gennady G. LUKYANOV, senior researcher, STE «NAVI-DALS». Graduated from St. Petersburg Polytechnical Institute. Speciality: automated control systems. Author of 10 publications.

Konstantine P. L'VOV, leading engineer-programmer, «Concern «Okeanpribor»», open-type joint stock company. Graduated from Leningrad Electrotechnical Institute. Speciality: Doppler logs. Author and co-author of about 20 publications.

МАКОДА Виталий Сергеевич, заместитель главного конструктора ЦКБ МТ «Рубин», профессор, д. т. н. контр-адмирал запаса, лауреат Государственной премии. Окончил Высшее военно-морское училище им. М. В. Фрунзе и Военно-морскую академию им. Н. Г. Кузнецова, Специализация – инженер-штурман. Автор более 100 печатных трудов, включая монографию и учебные пособия.

МАЛЕЕВ Павел Иванович, ведущий научный сотрудник ГНИНГИ МО РФ, капитан 1 ранга в отставке, докт. техн. н. Окончил Казахский государственный университет, Специальные курсы при Военно-морской академии им. А. Н. Крылова. Специализация – технические средства навигации. Автор около 220 печатных трудов.

МАСТРЮКОВ Сергей Иванович, начальник отдела ГНИНГИ МО РФ, полковник, канд. техн. н. Окончил Ленинградский гидрометеорологический институт. Специализация – океанология. Автор около 100 печатных трудов.

МИХАЛЬСКИЙ Виталий Александрович, старший научный сотрудник ГНИНГИ, капитан 1-го ранга в отставке, канд. техн. н., доцент. Окончил Высшее военно-морское училище подводного плавания. Специализация: прикладная теория вероятностей и метрология в задачах кораблевождения. Автор более 180 печатных трудов.

ОБУХОВ Алексей Юрьевич, начальник отдела 46-ого Центрального научно-исследовательского института МО РФ, капитан 1 ранга. Окончил Высшее военно-морское училище им. М. В. Фрунзе и Военно-морскую академию им. Н. Г. Кузнецова. Специализация – военный гидрограф. Автор 14 печатных трудов.

ТОКАРЕВ Юрий Витальевич, заместитель начальника отдела ГНИНГИ МО РФ, капитан 2 ранга. Окончил Высшее военно-морское училище подводного плавания им. Ленинского комсомола, 6 ВСОК ВМФ, Военно-морскую академию им. Н. Г. Кузнецова. Специализация – штурман. Область научных интересов – спутниковая навигация.

ТРЕГУБОВ Виктор Свиридович, старший научный сотрудник ГНИНГИ МО РФ. Окончил Государственную морскую академию им. адм. С. О. Макарова. Область научных интересов – радионавигация. Автор 80 печатных трудов.

Vitaly S. MAKODA, Deputy Chief of Chief Designer, “Rubin” Central Design Bureau, MT. DSc, professor, Real Admiral (Reserve), State Award laureate. Graduated from Frunze Naval College, Naval Academy. Speciality: engineer-navigator. Author of more than 100 publications, including one monograph and textbooks.

Pavel I. MALEYEV, leading researcher, the State Research Navigation-Hydrographic Institute, RF MoD. Captain 1st rank (Ret.), DSc. Graduated from Kazakh State University, Specialized Course at Krylov Naval Academy. Speciality: technical means of navigation. Author of about 220 publications.

Sergei I. MASTRYUKOV, chief of division, the State Research Navigation-Hydrographic Institute, MoD RF, Colonel, CandSc. Graduated from St. Petersburg Hydrometeorological Institute. Speciality: oceanology. Author of about 100 publications.

Vitaly A. MIKHALSKY, senior researcher, the State Research Navigation-Hydrographic Institute, RF MoD. CandSc, Senior reader, Captain 1-st rank (Ret.). Graduated from Naval College of Submerged Sailing. Speciality: applied probabilities theory and metrology used for ship navigation. Author of more than 180 publications.

Alexei Y. OBUKHOV, chief of division, 46 Central Research Institute, RF MoD. Captain 1st rank. Graduated from Frunze Naval College, Naval Academy. Speciality: military hydrographer. Author of 14 publications.

Yuriy V. TOKAREV, deputy chief of division GNINGI, RF MoD. Captain 2nd range, Graduated from Naval College of Submerged Sailing, Naval Academy. Speciality: navigator. Sphere of scientific interests: satellite navigation.

Victor S. TREGUBOV, senior researcher, the State Research Navigation-Hydrographic Institute, RF MoD. Graduated from Makarov State Maritime Academy. Speciality: radionavigation. Author of 80 publications.

ПЫЛЕНКОВ Виктор Алексеевич, старший научный сотрудник ГНИНГИ МО РФ, капитан 1 ранга (в отставке), канд. техн. н. Окончил Высшее военно-морское училище подводного плавания (Калининград), Академию им. Ф. Э. Дзержинского. Специализация – спутниковая навигация. Автор более 50 печатных трудов.

СОРОКИН Александр Иванович, член-корреспондент РАН, контр-адмирал (в отставке), д. т. н., заслуженный деятель науки и техники, лауреат Государственной премии СССР. Окончил гидрографический факультет ВВМУ им. М. В. Фрунзе (1946), ВМА им. Н. Г. Кузнецова (1955). Специализация: гидрография, картография, навигация. Автор более 200 печатных трудов.

ФИРСОВ Юрий Георгиевич, доцент Государственной морской академии им. адм. С. О. Макарова, канд. техн. н. Окончил Ленинградское высшее инженерное морское училище им. адм. С. О. Макарова. Специализация: гидрография, морская геоматика, геоинформатика. Автор более 60 печатных трудов.

ХЛЫПАЛО Сергей Юрьевич, научный сотрудник ГНИНГИ МО РФ, ст. лейтенант. Окончил Санкт-Петербургский военно-морской институт – Морской корпус Петра Великого. Специализация – штурман. Автор двух печатных трудов.

Victor A. PYLENKOV, senior researcher, the State Research Navigation-Hydrographic Institute, RF MoD. CandSc. Captain 1-st rank (Ret.). Graduated from the Naval College of Submerged Sailing in Kaliningrad and Dzerzhinsky Academy. Speciality: satellite navigation. Author of more than 50 publications.

Alexander I. SOROKIN, Corresponding Member of RAS, Rear-Admiral (Ret.), DSc, Honoured Scientist, USSR State Prize Winner. Graduated from Frunze Naval College (1946) and Naval Academy (1955). Speciality: hydrography, cartography, navigation. Author of more than 200 publications.

Yuri G. FIRSOV, reader, department «Hydrography of the Sea», Makarov State Maritime Academy, CandSc. Graduated from Leningrad Higher Engineering Marine College. Speciality: engineer-hydrographer. Sphere of scientific interests: hydrography, marine geomatics, geoinformatics. Author of more than 60 publications.

Sergei Y. Khlypalo, researcher, the State Research Navigation-Hydrographic Institute, MoD RF, senior lieutenant. Graduated from St. Petersburg Naval Institute. Author of two publications.