

15. Shepel' I.O. Algoritm kompleksirovaniya neskol'kikh istochnikov dannykh v obshchuyu kartu zanyatosti [Algorithm for integrating several data sources into a common employment map], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 3 (220), pp. 64-71.
16. Shepel' I.O. Obnaruzhenie dinamicheskikh ob"ektov na karte zanyatosti s nakopleniem na osnove filtra chastits [Detection of dynamic objects on an occupancy map with accumulation based on a particle filter], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 3, pp. 192-201.
17. Shepel I. [et al.]. Occupancy Grid Generation With Dynamic Obstacle Segmentation in Stereo Images, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, Vol. 23, No. 9, pp. 14779-14789.
18. Shepel' I.O. Postroenie modeli prokhodimosti okruzhayushchey sredy po oblaku tochek stereokamery s ispolzovaniem ierarkhicheskoy karty vysot [Construction of a model of environmental cross-country ability using a point cloud of a stereo camera using a hierarchical height map], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2018, 1 (48).
19. Thrun S. Learning occupancy grid maps with forward sensor models, *Autonomous robots*, 2003, Vol. 15, No. 2, pp. 111-127.
20. Collins T., Collins J., Ryan D. Occupancy grid mapping: An empirical evaluation, *2007 mediterranean conference on control & automation*. IEEE, 2007, pp. 1-6.
21. Behley J. [et al.]. SemanticKITTI: A Dataset for Semantic Scene Understanding of LiDAR Sequences, *Proc. of the IEEE International Conf. on Computer Vision (ICCV)*, 2019.
22. Caesar H. [et al.]. nuScenes: A Multimodal Dataset for Autonomous Driving, *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 06.2020.
23. Dosovitskiy A. [et al.]. CARLA: An Open Urban Driving Simulator, *Proceedings of the 1st Annual Conference on Robot Learning*, 2017, pp. 1-16.
24. Mihelich P., Konolige K., Leibs J. stereo_image_proc / Open Source Robotics Foundation, 2024. Available at: https://github.com/ros-perception/image_pipeline/tree/rolling/stereo_image_proc.
25. Zhu Y. [et al.]. Improving semantic segmentation via video propagation and label relaxation, *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*, 2019, pp. 8856-8865.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Курейчик.

Шепель Илья Олегович – Южный федеральный университет; e-mail: chepsiilya@gmail.com; г. Москва, Россия; тел.: +79085180350; кафедра математического обеспечения и применения ЭВМ; соискатель.

Shepel Ilya Olegovich – Southern Federal University; e-mail: chepsiilya@gmail.com; Moscow, Russia; phone: +79085180350; the department of mathematical support and computer applications; post-graduate.

УДК 629.3.051

DOI 10.18522/2311-3103-2024-2-246-253

И.А. Шипов, Е.В. Ветошкин

ПОДХОДЫ К МОДУЛЬНОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ НАЗЕМНЫХ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Цель исследования – сформировать и обобщить подходы, применяемые при проектировании программного обеспечения навигационных систем наземных подвижных объектов. В статье описан опыт разработки программного обеспечения навигационных систем различных наземных объектов. В зависимости от типа шасси, характера решаемых функциональных задач, требований к эргономике, степени автономности и ряда других факторов будет определяться сложность принимаемых программно-алгоритмических решений. Алгоритмы функционирования системы навигации со всеми входящими в нее компонентами, как правило, не являются требовательными к вычислительным мощностям, за исключением реализации работы с цифровыми картами местности. В связи с этим, не смотря на значительное отставание отечественной элементной базы от зарубежных аналогов, формирование комплексированного навигационного решения может быть реализовано на ее базе. Еще одной особенностью проектирования программного обеспечения навигационных систем является необходимость функционирования их в режиме реального времени. Это необходимо для синхронной обработки, поступающей от различных источников первичной информации, и обеспечения формирования потребителю навигационного решения со стабильной

частотой. Модульный подход проектирования программного обеспечения построен на принципах унификации внутренних функций навигационной системы и переносимости полученных ранее решений между проектами. При таком подходе каждый элемент выполнен в форме самостоятельного модуля, который представляет законченную подпрограмму с набором входных и выходных параметров. Реализация взаимодействия между модулями зависит от типа его исполнения и может быть выполнена как на уровне встраивания исходного кода, так и на уровне обмена параметрами через каналы информационного взаимодействия. Применение модульного подхода при проектировании программного обеспечения навигационных систем наземных объектов позволяют за короткий период создавать полнофункциональные технические решения, обеспечивающие потребности конечного пользователя. При этом снижается риск последующих конструктивных ошибок и доработок в связи с увеличенным объемом проверок и накопленным опытом применения разработанного ранее алгоритма.

Наземная навигация; навигационная система; программное обеспечение; математическая модель; техническая реализация.

I.A. Shipov, E.V. Vetoshkin

APPROACHES TO MODULAR DESIGN OF SOFTWARE FOR LANDINGS NAVIGATION SYSTEMS

The purpose of the study is to formulate and generalize the approaches used in the design of software for navigation systems of ground-based moving objects. The article describes the experience of developing software for navigation systems of various ground objects. Depending on the type of chassis, the nature of the functional tasks being solved, ergonomic requirements, degree of autonomy and a number of other factors, the complexity of the software and algorithmic solutions used will be determined. Algorithms for the operation of a navigation system with all its components, as a rule, are not demanding on computing power, with the exception of the implementation of work with digital terrain maps. In this regard, despite the significant lag of the domestic element base from foreign analogues, the formation of an integrated navigation solution can be implemented on its basis. Another feature of the design of software for navigation systems is the need for them to function in real time. This is necessary for synchronous processing coming from various sources of primary information and ensuring the formation of a navigation solution for the consumer with a stable frequency. The modular approach to software design is built on the principles of unifying the internal functions of the navigation system and the portability of previously obtained solutions between projects. With this approach, each element is made in the form of an independent module, which is a complete subroutine with a set of input and output parameters. The implementation of interaction between modules depends on the type of its execution and can be performed both at the level of embedding source code and at the level of exchanging parameters through information interaction channels. The use of a modular approach to the design of software for navigation systems of ground objects allows us to create fully functional technical solutions that meet the needs of the end user in a short period of time. At the same time, the risk of subsequent design errors and modifications is reduced due to the increased volume of checks and the accumulated experience in using the previously developed algorithm.

Land navigation; navigation system; software; mathematical model; technical implementation.

Введение. Разработка программно-алгоритмического обеспечения является ключевым этапом создания всех современных навигационных систем (НС) наземных подвижных объектов. В зависимости от типа выбранной аппаратной платформы, набора решаемых функциональных задач, сложности алгоритмов, количества внутренних компонентов и других факторов будет определяться сложность программных решений, применяемых при проектировании. При этом аппаратная часть вычислителей современных НС может быть построена на базе практически любой из существующих архитектур (x86, ARM и другие) [1].

В свою очередь сложность программных решений возрастает вместе со сложностью структуры и расширением набора функциональных задач навигационной системы.

Основное противоречие развития направления алгоритмов функционирования современных НС заключается в том, что для достижения максимально возможных выходных технических характеристик необходима комплексная обработка данных от всех имеющихся источников первичной информации. При этом оптимальная обработка сигналов может быть реализована только на уровне каждого элемента системы.

Цель данного исследования – систематизация подходов проектирования программно-алгоритмического обеспечения навигационных систем наземных объектов на основе модульного принципа. Для достижения цели исследования были решены задачи:

- ◆ сформулирована концепция модульной структуры программного обеспечения комплексированной системы навигации;
- ◆ сформированы подходы к проектированию взаимодействия между программными модулями;
- ◆ сформирован банк программных решений, позволяющий ускорить создание навигационных систем наземных объектов.

Описанные подходы являются результатом обобщения опыта, полученного при проектировании средств навигации для наземных подвижных объектов различного типа и назначения.

Роль программно-алгоритмического обеспечения. Современные навигационные системы являются сложными техническими системами. Они состоят из нескольких компонентов, взаимодействие между которыми реализовано аппаратно-программными средствами [2]. Ключевая роль программного обеспечения обусловлена тем, что преобладающее количество функций НС реализовано именно на программном уровне. При этом кроме реализации самих компонентов важную роль играет тип взаимосвязей между ними и интерфейс взаимодействия с пользователем.

Для разработки систем навигации и ориентирования нового поколения [3–6] требуются программно-алгоритмические решения, которые кроме выполнения основных функций позволяют:

- ◆ ускорить и упростить отладку алгоритмов функционирования;
- ◆ максимально глубоко анализировать функционирование системы на протяжении всего жизненного цикла;
- ◆ проводить исследования и наработки с целью развития и модернизации имеющихся систем;
- ◆ снизить вероятность ошибок в программной части конечного изделия.

Критическая зависимость навигационных систем от программно-алгоритмических решений не только дает возможность исключения ряда компонентов и подсистем и их последующей программной реализации, но и задает высокие требования к эффективности применяемых алгоритмов. Методика разработки НС по «классической» структуре, при которой узконаправленные группы разработчиков создают отдельные блоки, а затем ведущий интегратор строит из них конечную навигационную систему, может не обеспечить эффективный результат. Разработка современных навигационных систем предъявляет особые требования к уровню вовлеченности всех участников разработки и делает ключевой роль взаимодействия их между собой. Происходит размытие зон ответственности отдельных разработчиков, а результатом их интеллектуальной деятельности становится не отдельный блок или подсистема, а система навигации в целом. При должном уровне эффективности управления такой многофункциональной командой существенно повышается заинтересованность всех участников проекта в успешности завершения разработки в целом и как следствие качество конечной продукции [7].

Модульный подход создания программного обеспечения позволяет создавать программное обеспечение навигационной системы за короткий период за счет использования набора отлаженных ранее решений, программных библиотек и функций.

Проектирование программно-алгоритмического обеспечения. Под программным обеспечением навигационной системы, как правило, понимают совокупность алгоритмов функционирования всех ее составных частей. Типовая внутренняя структура НС изображена на рис. 1 и состоит из нескольких элементов.

При такой структуре НС определяющим для потребителя является «вычислитель навигационной информации», в котором будет также реализован интерфейс внешнего взаимодействия и формироваться пакет навигационных данных.

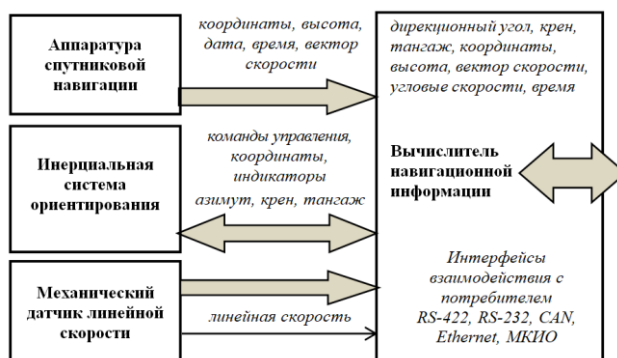


Рис. 1. Типовая структура навигационной системы

К ключевым функциям типовой НС в общем виде можно отнести:

- ◆ решение задачи ориентирования;
- ◆ определение местоположения объекта в автономном режиме;
- ◆ определение местоположения объекта в комплексированном режиме;
- ◆ информационное взаимодействие с элементами системы;
- ◆ диспетчеризация внутренних потоков и подпрограмм;
- ◆ взаимодействие с потребителем;

Все обозначенные функции реализовываются в виде программных модулей с возможностью сопряжения друг с другом:

- ◆ модуль функционирования навигационной системы;
- ◆ модуль аппаратуры спутниковой навигации;
- ◆ модуль взаимодействия с одометрическими датчиками;
- ◆ модуль блока чувствительных элементов инерциальной системы;
- ◆ модуль функционирования инерциальной системы ориентирования;
- ◆ модуль взаимодействия с потребителем навигационной информации.

На рис. 2 приведен типовой алгоритм формирования пакета навигационной информации для потребителя в современной системе навигации. Также дополнительно может быть реализована фильтрация, в том числе на основе фильтра Калмана [8, 9].

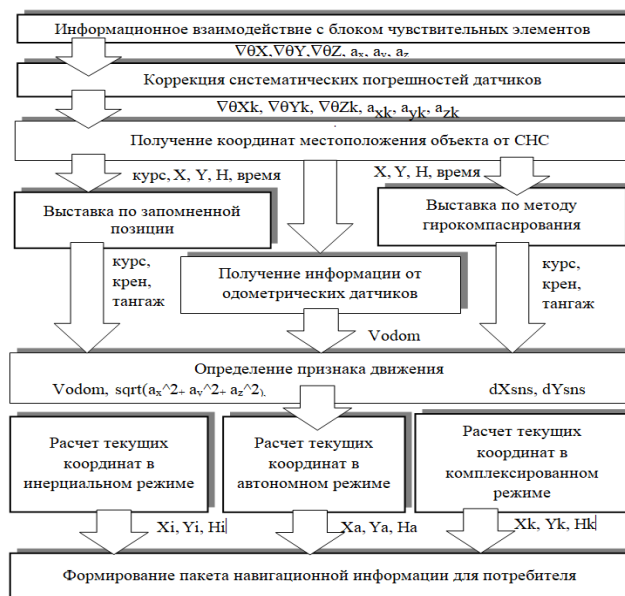


Рис. 2. Типовая структура навигационной системы

Применение современных электронных компонентов при построении вычислительных систем позволяет обеспечить высокий уровень унификации программных решений [10–12]. Типовое программно-алгоритмическое обеспечение функционирования навигационной системы условно состоит из следующих основных составных частей:

- ◆ модуль взаимодействия с сопряженными устройствами;
- ◆ модуль первичной обработка поступающей информации;
- ◆ блок решения навигационных задач;
- ◆ модуль мониторинга технического состояния и самодиагностики;
- ◆ модуль работы с цифровой картой местности;
- ◆ модуль решения навигационных и сервисных задач;
- ◆ модуль взаимодействия с FLASH памятью.

Одним из наиболее распространённых языков программирования, применяемых при создании современных средств автоматизации, является C++. При использовании одного языка программирования при разработке модулей повышается переносимость кода между элементами, однако для обеспечения встраиваемости также может быть реализован механизм сборки программных решений методом библиотек.

При модульном проектировании программного обеспечения одним из ключевых требований является обеспечение возможности встраивания всех модулей в контур будущей структуры НС без дополнительных доработок. Таким образом, должно быть реализовано программное и аппаратное соответствие программных протоколов и аппаратных интерфейсов информационного взаимодействия всех элементов.

Рассмотрим такой подход на примере модуля программного инерциальной системы ориентирования. Он может быть реализован в форме унифицированного алгоритма определения углов ориентации объекта на основе первичных данных от двух триад гироскопических и акселерометрических датчиков. Еще одним параметром необходимым для обеспечения функционирования модуля является время получения показаний датчиков. Выходные параметры могут иметь сокращенный вид и представлять себя значения азимута, крена и тангажа или расширенный включающий в себя другие представления угловой ориентации, такие как например кватернион поворота.

На рис. 3 представлена обобщенная схема [13–15] взаимодействия модулей навигационной системы наземного подвижного объекта.

При этом функционирование модулей может осуществляться как в рамках одного адресного пространства вычислителя, так и быть выполнено в виде нескольких приложений или выполняться на разных аппаратных платформах.

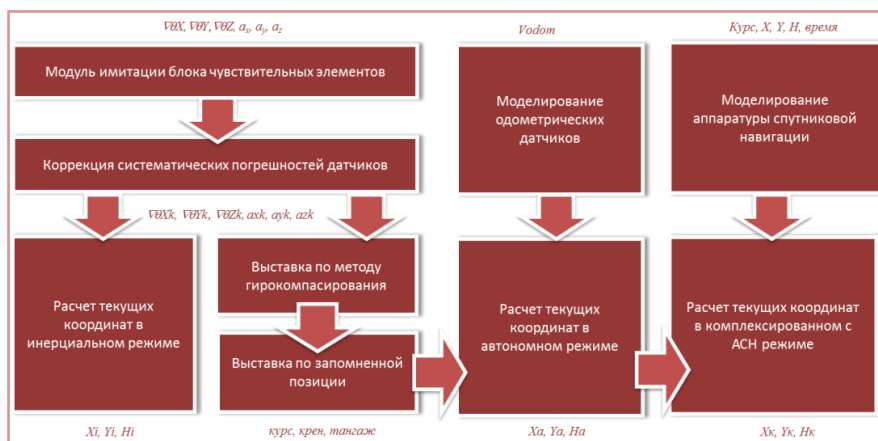


Рис. 3. Схема взаимодействия программно-алгоритмических модулей

Описанный в статье [17] подход показывает пример распределения программных функций внутри одного вычислителя на базе нескольких процессоров. Аналогичным образом может быть выполнено разделение на базе ядер одного процессора, потоков одного программного модуля, подпрограмм и даже программ.

Формирование навигационного решения для потребителя происходит на основе набора исходных данных [18], которые формируются несколькими источниками (инерциальная система, аппаратура спутниковой навигации, датчики скорости и другие) в разные моменты времени. Современные навигационные системы функционируют в режиме реального времени, в связи с чем съем информации происходит с высокой частотой, а обработка данных происходит синхронно.

Применение описанного модульного принципа к построению программно-алгоритмического обеспечения, за счет оптимального сочетания элементов и реализации взаимосвязей между ними, позволяет обеспечить наилучшие выходные тактико-технические характеристики создаваемой системы в целом.

Опыт проектирования современных НС [19, 20] показал возможность реализации полного функционала на базе встраиваемых 32 разрядных микроконтроллеров. При этом успешно были реализованы режимы работы, алгоритм расчета углов ориентации, фильтрация первичной информации, взаимодействие с потребителем по нескольким каналам обмена. Дополнительные мощности и высокопроизводительная аппаратная часть необходима в случае решения задач электронной картографии и развернутого графического интерфейса взаимодействия с пользователем. Таким НС включают в своем составе, как правило, панельный компьютер на базе операционной системы семейства Linux.

Заключение. Учитывая сложность структуры и специфику построения современных навигационных систем наземных объектов, их создание необходимо вести с применением эффективных подходов к проектированию. Разработка программно-алгоритмического обеспечения на базе модульного принципа позволяет снизить трудозатраты при создании новых систем и уменьшить риски конструктивных ошибок. При этом должны быть обеспечены:

- ◆ адаптивность разработанных ранее модулей и возможность их быстрого встраивания в структуру создаваемой НС;
- ◆ возможность масштабируемости структуры программно-алгоритмического обеспечения навигационной системы;
- ◆ накопление опыта использования алгоритмических решений в нескольких сценариях применения.

Создание же каждого модуля необходимо вести с учетом нескольких основных принципов, а именно:

- ◆ унификации внешних интерфейсов взаимодействия;
- ◆ переносимость кода между различными средами программирования;
- ◆ адаптивность и встраиваемость внутренней структуры;
- ◆ наличие изменяемых входных и выходных параметров.

Описанные подходы к проектированию программного обеспечения навигационных систем наземных объектов позволяют за короткий период создавать полнофункциональные технические решения обеспечивающие потребности конечного потребителя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белов А.В. Конструирование устройств на микроконтроллерах. – СПб.: Наука и Техника, 2005. – 256 с.
2. Алямов А.Э., Баласов И.Ю., Бажанов В.А. Импортзамещение электронной компонентной базы в оборонном производстве // Всероссийский экономический журнал ЭКО. – 2015. – № 11 (497). – С. 19-29.
3. Шипов И.А., Ветошкин Е.В. Комплексированная навигация наземных робототехнических комплексов // Робототехника и техническая кибернетика. – 2021. – Т. 9, № 2 (225). – С. 127-132.
4. Брозгуль Л.И., Зайцев А.В. Состояние и перспективы развития инерциальных навигационных систем // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2006. – № 3.

5. Шупов И.А., Ветошкин Е.В., Морозов А.В. Интегрированные инерциально-спутниковые системы наземных робототехнических комплексов // Сб. трудов XXXII конференции памяти Н.Н. Острякова в направлении «Гироскопические и интегрированные инерциально-спутниковые системы».
6. Stallings W. Operating Systems: Internals and Design Principles. – 7th ed. – Prentice Hall, 2011.
7. Systems Engineering Handbook. Version 2a. INCOSE, 2004.
8. Васильев К.К., Аникин А.А. Калмановское комплексирование и моделирование навигационных систем // Электронная техника: Межвузовский сборник научных трудов / под ред. Д.В. Андреева. – Ульяновск: УлГТУ, 2005.
9. Grewal M., Henderson V., Miyasako R. Application of Kalman filtering to the calibration and alignment of inertial navigation systems // IEEE Transactions, Automatic Control. – 1991. – Vol. 36.
10. Vincent Mahout. Assembly Language Programming: Arm Cortex-M3, 2011.
11. Белочкин П.Е., Кацай Д.А. Особенности моделирования бесплатформенной системы ориентации по уравнениям Эйлера в среде Matlab и Mathcad // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 5. – С. 18-20.
12. Жидкова Н.В., Волков В.Л. Моделирование бесплатформенной системы ориентации // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – URL: <http://www.science-education.ru/121-17099>.
13. Tel G. Introduction to Distributed Algorithms. Second edition. – Cambridge University Press, 2000.
14. Tranquilla J.M., Cam J.P., Al-Rizzo H.M. Analysis of a Choke Ring Groundplane for Multipath Control in Global Positioning System (GPS) Applications // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1994. – Vol. 42, No. 7. – P. 905-911. – DOI: <https://doi.org/10.1109/8.299591>.
15. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / под ред. В.Я. Распопова. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – 280 с.
16. Volkov V.L. Mathematical modeling of inertial measurement systems // International Journal of Applied and Fundamental Research. – 2015. – No. 2. – URL: www.science-sd.com/457-24631.
17. Шупов И.А. Реализация распределенных вычислений на отечественных микропроцессорных устройствах // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 1 (225). – С. 218-226.
18. Woodman O.J. An introduction to inertial navigation // Technical reports published by the University of Cambridge Computer Laboratory are freely available via the Internet: <http://www.cl.cam.ac.uk/techreports/> 2007. – 37 p.
19. Bilich A., Larson K. M., Axelrad P. SNR-Based Multipath Corrections to GPS Phase Measurements: Improving the Accuracy of Permanent GPS Stations // AGU Fall Meeting Abstracts. – 2002. – Vol. 1. – P. 06.
20. Филиппов С.И., Матахин В.В., Шупов И.А., Петров А.В. Применение методик и инструментов системной инженерии при создании систем наземной навигации // Оборонная техника. – 2017. – № 7-8. – С. 38-44.

REFERENCES

1. Belov A.V. Konstruirovaniye ustroystv na mikrokontrollerakh [Design of devices on microcontrollers]. St. Petersburg: Nauka i Tekhnika, 2005, 256 p.
2. Alyamov A.E., Balasov I.Yu., Bazhanov V.A. Importozameshchenie elektronnoy komponentnoy bazy v obronnom proizvodstve [Import substitution of electronic components in defense production], *Vserossiyskiy ekonomicheskiy zhurnal EKO* [All-Russian Economic Journal ECO], 2015, No. 11 (497), pp. 19-29.
3. Shipov I.A., Vetoshkin E.V. Kompleksirovannaya navigatsiya nazemnykh robototekhnicheskikh kompleksov [Integrated navigation of ground robotic systems], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and technical cybernetics], 2021, Vol. 9, No. 2 (225), pp. 127-132.
4. Brozgul' L.I., Zaytsev A.V. Sostoyaniye i perspektivy razvitiya inertsial'nykh navigatsionnykh sistem [State and prospects for the development of inertial navigation systems], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2006, No. 3.
5. Shipov I.A., Vetoshkin E.V., Morozov A.V. Integrirovannyye inertsial'no-sputnikovyye sistemy nazemnykh robototekhnicheskikh kompleksov [Integrated inertial-satellite systems of ground-based robotic complexes], *Sb. trudov XXXII konferentsii pamyati N.N. Ostryakova v napravlenii «Gyroskopicheskie i integrirovannyye inertsial'no-sputnikovyye sistemy»* [Collection of proceedings of the XXXII conference in memory of N.N. Ostryakov in the direction of “Gyroscopic and integrated inertial-satellite systems”].
6. Stallings W. Operating Systems: Internals and Design Principles. 7th ed. Prentice Hall, 2011.

7. Systems Engineering Handbook. Version 2a. INCOSE, 2004.
8. *Vasil'ev K.K., Anikin A.A.* Kalmanovskoe kompleksirovanie i modelirovanie navigatsionnykh sistem [Kalman integration and modeling of navigation systems], *Elektronnaya tekhnika: Mezhdvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov* [Electronic technology: Interuniversity collection of scientific papers], pod red. D.V. Andreeva. Ul'yanovsk: UIGTU, 2005.
9. *Grewal M., Henderson V., Miyasako R.* Application of Kalman filtering to the calibration and alignment of inertial navigation systems, *IEEE Transactions, Automatic Control*, 1991, Vol. 36.
10. *Vincent Mahout.* Assembly Language Programming: Arm Cortex-M3, 2011.
11. *Belochkin P.E., Katsay D.A.* Osobennosti modelirovaniya besplatformennoy sistemy orientatsii po uravneniyam Eйлера v srede Matlab i Mathcad [Features of modeling a strapdown orientation system using Euler's equations in Matlab and Mathcad], *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high technology], 2014, No. 5, pp. 18-20.
12. *Zhidkova N.V., Volkov V.L.* Modelirovanie besplatformennoy sistemy orientatsii [Simulation of a strapdown orientation system], *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2015, No. 1. Available at: <http://www.science-education.ru/121-17099>.
13. *Tel G.* Introduction to Distributed Algorithms. Second edition. Cambridge University Press, 2000.
14. *Tranquilla J.M., Cam J.P., Al-Rizzo H.M.* Analysis of a Choke Ring Groundplane for Multipath Control in Global Positioning System (GPS) Applications, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1994, Vol. 42, No. 7, pp. 905-911. DOI: <https://doi.org/10.1109/8.299591>.
15. *Matveev V.V., Raspopov V.Ya.* Osnovy postroeniya besplatformennykh inertial'nykh navigatsionnykh sistem [Fundamentals of constructing strapdown inertial navigation systems], ed. by V.Ya. Raspopova. St. Petersburg: GNTS RF OAO «Kontsem «TSNII «Elektropribor», 2009, 280 p.
16. *Volkov V.L.* Mathematical modeling of inertial measurement systems, *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2015, No. 2. Available at: www.science-sd.com/457-24631.
17. *Shipov I.A.* Realizatsiya raspredelennykh vychisleniy na otechestvennykh mikroprotsessornykh ustroystvakh [Implementation of distributed computing on domestic microprocessor devices], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 1 (225), pp. 218-226.
18. *Woodman O.J.* An introduction to inertial navigation [An introduction to inertial navigation], *Technical reports published by the University of Cambridge Computer Laboratory are freely available via the Internet: http://www.cl.cam.ac.uk/techreports/ 2007* [Technical reports published by the University of Cambridge Computer Laboratory are freely available via the Internet: <http://www.cl.cam.ac.uk/techreports/ 2007>], 37 p.
19. *Bilich A., Larson K. M., Axelrad P.* SNR-Based Multipath Corrections to GPS Phase Measurements: Improving the Accuracy of Permanent GPS Stations, *AGU Fall Meeting Abstracts*, 2002, Vol. 1, pp. 06.
20. *Filippov S.I., Matakhin V.V., Shipov I.A., Petrov A.V.* Primenenie metodik i instrumentov sistemnoy inzhenerii pri sozdanii sistem nazemnoy navigatsii [Application of systems engineering methods and tools in the creation of land navigation systems], *Oboronnaya tekhnika* [Defense technology], 2017, No. 7-8, pp. 38-44.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. А.И. Новиков.

Шипов Илья Александрович – АО «Всероссийский научно-исследовательский институт «Сигнал»; e-mail: pil14@inbox.ru; г. Ковров, Россия; тел.: +79100905025; заместитель начальника отдела.

Ветошкин Евгений Владимирович – e-mail: vetoshkin@vniisignal.ru; тел.: +79206244967; главный конструктор средств навигационно-геодезического обеспечения.

Shipov Ilya Aleksandrovich – All-Russian Scientific Research Institute “Signal” JSC; e-mail: pil14@inbox.ru; Kovrov, Russia; phone: +79100905025; deputy head of department.

Vetoshkin Evgeniy Vladimirovich – e-mail: vetoshkin@vniisignal.ru; phone: +79206244967; chief designer of navigation and geodetic systems.