

20. Huang K., Wu S., Li F., Yang C. Fault diagnosis of hydraulic systems based on deep learning model with mutilate data samples, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, November 2022, Vol. 33, Issue 11.
21. Feng H., Yin C., Ma W., Yu H., Cao D. Parameters identification and trajectory control for a hydraulic system, *ISA Transactions*, September 2019, Vol. 92, pp. 228-240.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.П. Ковалев.

Чернусь Петр Павлович – БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова; e-mail: petr.chernus@yandex.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78124900518; к.т.н.; доцент.

Чернусь Павел Павлович – e-mail: pavel.chernus@yandex.ru; тел.: +78124900518; к.т.н.; доцент.

Яковлев Александр Анатольевич – АО «Конструкторское бюро «Арсенал» им. М.В. Фрунзе; e-mail: aa.yakovlev@kbarsenal.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79052500726; к.т.н.; начальник управления.

Сахабудинов Роман Владиславович – e-mail: srv@kbarsenal.ru; тел.: +79211852881; к.т.н.; коммерческий директор.

Голосий Александр Сергеевич – e-mail: as.golosiy@kbarsenal.ru; тел.: +79213025903; к.т.н.; советник.

Chernus Peter Pavlovich – BSTU "VOENMEH" D.F. Ustinova; e-mail: petr.chernus@yandex.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +78124900518; cand. of eng. sc; associate professor.

Chernus Pavel Pavlovich – e-mail: pavel.chernus@yandex.ru; phone: +78124900518; cand. of eng. sc; associate professor.

Yakovlev Aleksandr Anatolievich – Arsenal Design Bureau JSK; e-mail: aa.yakovlev@kbarsenal.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +79052500726; cand. of eng. sc; head of department.

Sakhbudinov Roman Vladislavovich – e-mail: srv@kbarsenal.ru; phone: +79211852881; cand. of eng. sc; commercial director.

Golosiy Aleksandr Sergeevich – e-mail: as.golosiy@kbarsenal.ru; phone: +79213025903; cand. of eng. sc.; adviser.

УДК 629.3.051

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-31-40

И.А. Шипов, Е.В. Ветошкин

**ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
КОМПЛЕКСИРОВАННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ
СИСТЕМЫ НАЗЕМНОГО ОБЪЕКТА**

Цель работы – создание эффективной программно-аппаратной модели навигационной системы наземного подвижного объекта. Процесс моделирования является одним из ключевых инструментов, позволяющих проводить отработку технических решений на всех этапах жизненного цикла сложной технической системы. В процессе проектирования комплексированных инерциальных систем возникает ряд научно-технических задач, эффективность решения которых зависит от степени их отработки. Моделирование – один из вариантов апробации технических решений. В статье приведено описание решения задачи моделирования комплексированной инерциальной навигационной системы наземного объекта. Модель навигационной системы, описанная в данной работе, является программно-аппаратной и реализована в виде программных модулей, поддерживающих аппаратное взаимодействие друг с другом. Описанная система моделирования навигационной системы наземного объекта была разработана в рамках ряда опытно-конструкторских и научно-исследовательских работ. Сформированная модель навигационной системы наземного подвижного объекта включает в себя несколько про-

граммных блоков, каждый из которых имитирует функционирование реального изделия с достаточным уровнем достоверности. Внутренние и внешние интерфейсы взаимодействия, протоколы обмена навигационной системы также промоделированы с соблюдением циклограмм работы реального объекта. При этом одним из основных преимуществ программного моделирования перед стендовой отработкой или макетированием является возможность проведения глубокого анализа алгоритмов функционирования без задействования дополнительных ресурсов. Однако для обеспечения соответствия процедуры моделирования реальному функционированию зачастую требуется проектирование программно-аппаратных средств. Процедура моделирования архитектуры навигационной системы позволяет провести сравнительный анализ нескольких вариантов набора базовых компонентов и схем их взаимодействия. Результатом такого сравнения является оптимальная структура, позволяющая обеспечить потребителя навигационной информацией с наибольшей эффективностью. В статье определены основные задачи процесса моделирования. При проектировании сложной технической системы этап моделирования может стать критически важным для достижения оптимального результата. Предложенная структура, перечень ключевых элементов системы моделирования наземной навигации и подходы организации взаимосвязи между ними были апробированы в рамках нескольких опытно-конструкторских работ. При этом было определено, что достоверность разработанных моделей и их соответствие моделируемым блокам позволяет производить анализ навигационных систем с высоким уровнем объективности. Разработанная программно-аппаратная модель позволила провести обработку записей телеметрии, полученных при различных условиях эксплуатации изделий, провести анализ и выработать технические решения, повышающие эффективность функционирования навигационных систем.

Моделирование; навигационная система; программное моделирование; математическая модель; техническая реализация.

I.A. Shipov, E.V. Vetoshkin

HARDWARE-IN-THE-LOOP SIMULATION OF AN INTERCONNECTED INERTIAL NAVIGATION SYSTEM OF A GROUND OBJECT

The purpose of this paper is creation of an efficient software and hardware model of a ground mobile object navigation system. Simulation process is one of the key instruments for engineering solutions development at all stages of a complex technical system lifecycle. Navigation system model described in this paper is software-hardware by nature and is implemented as software modules that support hardware interaction with each other. The described system of ground object navigation system simulation has been developed in the course of several design projects and scientific research works. The developed model of a ground mobile object navigation system includes several programming units. Each of these units simulates the operation process as close as possible to the original. Internal and external interaction interfaces and navigation system communication protocols are also simulated with the account for real object operation cyclograms. It should be noted that one of the main advantages of a software simulation over a developmental testing or breadboarding is the opportunity to perform a profound analysis of operation algorithms without the use of any additional resources. At the same time, it is often necessary to perform firmware design in order to make the simulation process identical with the real operation. The process of navigation system architecture simulation allows performing a comparative analysis of several base components sets and their interaction patterns. Such comparison results in an optimal system structure providing the information user with navigation data in the most efficient way. The paper determines basic simulation process tasks. The simulation stage may become crucial for complex systems design as it may aid achieving the best technical result. The proposed structure, key elements of a ground navigation simulation system and approaches to their interaction arrangement have been approved in the course of several research and development works. At the same time, it was found that the validity of developed models and their compliance to simulated units allows performing a highly reliable navigation system analysis. The developed software-hardware model allowed processing telemetry records obtained under different product operation conditions, performing their analysis and developing engineering solutions that increase the efficiency of navigation systems.

Simulation; navigation system; software simulation; mathematical model; engineering implementation.

Введение. Программно-аппаратное моделирование является эффективным инструментом при проектировании наземных объектов и отработке технических решений на уровне их подсистем. При этом значимость этапа моделирования возрастает вместе со сложностью структуры и расширением набора функциональных задач изделия. Также пропорционально сложности системы возрастает и сложность разработки ее эквивалента.

Цель данного исследования – формирование облика и программно-алгоритмических решений в области моделирования комплексированной инерциальной навигационной системы. Для достижения поставленной были решены задачи:

- ◆ сформулирована концепция программно-аппаратной модели комплексированной инерциальной системы;
- ◆ разработаны алгоритмы функционирования и внутреннего взаимодействия модулей;
- ◆ разработаны программные модули;
- ◆ спроектированы аппаратные решения, обеспечивающие необходимый уровень детализации.

Навигационная система наземного объекта (НС) как сложная техническая система может быть представлена в виде программно-аппаратной модели. При ее проектировании необходимо учитывать особенности функционирования, внутреннюю структуру и каналы взаимодействия элементов, циклограмму функционирования и ряд других особенностей. Построение объективной программно-аппаратной модели системы навигации позволит проводить отработку как внутренних алгоритмов функционирования, так и взаимодействия в составе объекта. Учитывая ключевую роль навигационной информации в контуре системы управления наземного объекта, программная модель НС может быть использована на различных этапах ее проектирования.

Роль моделирования. Учитывая значительную стоимость и длительность закупки электронных компонентов, уровень сложности проектирования современных аппаратных средств на отечественной элементной базе [1–4] и необходимость проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в кратчайшие сроки, можно сделать вывод, что имитационное моделирование является одним из важнейших этапов разработки навигационной системы. Создание математических и программных моделей может существенно снизить риски конструктивных дефектов при одновременном сокращении длительности проектирования. Экономическая целесообразность проведения процедуры моделирования заключается в том, что эффект от улучшения модели должен быть больше, чем связанные с его разработкой затраты. Ключевым фактором применения разработанных моделей также является уровень их достоверности, который, как правило, обратно пропорционален ущербу от их использования.

На рис. 1 иллюстративно изображены кривые затрат на проведение моделирования, ущерба от использования модели и суммарная кривая, показывающая условные границы предела целесообразности ее уточнения [5].

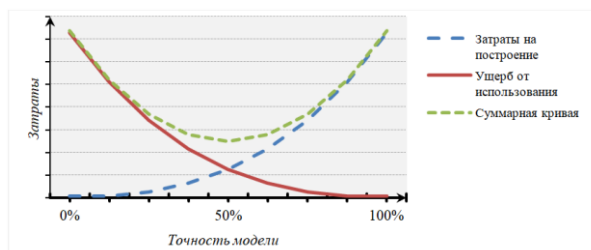


Рис. 1. Сопоставление затрат на моделирование

Применительно к навигационной системе средствами моделирования могут быть отработаны:

- ◆ алгоритмы решения задачи ориентирования;
- ◆ алгоритмы и протоколы внутреннего взаимодействия;
- ◆ алгоритмы определения местоположения объекта в различных режимах;
- ◆ временная циклограмма работы.

Также могут быть скорректированы основные функции НС с учетом специфики ее применения, и определен облик системы в целом.

Процесс моделирования навигационной системы наземных объектов можно разделить на два основных типа:

- ◆ моделирование архитектуры;
- ◆ моделирование поведения.

Проведение моделирования архитектуры НС позволяет сформировать облик будущей навигационной системы [6] с учетом типовых особенностей каждого структурного элемента [7, 8]. При этом разрабатываемая модель может иметь более детальную проработку на уровне взаимодействия элементов, но иметь обобщенный вид в части алгоритмов их функционирования. Для проведения объективного сравнительного анализа вариантов архитектуры разрабатываемой НС должен быть сформирован перечень критериев с учетом ранжирования по значимости. Стоит отметить, что процедура определения приоритетов критериев, как правило, носит экспертный характер.

Моделирование навигационной системы. Эффективность моделирования поведения навигационной системы зависит от полноты реализации функций используемых моделей. Немаловажную роль играет реализация имитации взаимосвязей между элементами с учетом привязки к единой шкале времени [9, 10].

Процесс создания программно-аппаратного комплекса моделирования делится на несколько этапов. На начальном этапе были спроектированы программные модули, являющиеся эквивалентами всех ключевых элементов типовой структуры НС. На следующем этапе были разработаны аппаратные решения, обеспечивающие их взаимодействие друг с другом и возможность встраивания при стендовой отработке.

Впоследствии спроектированные модули были объединены в единый программно-аппаратный комплекс, который состоит из следующих основных элементов:

- ◆ модуль имитации функционирования навигационной системы;
- ◆ модуль имитации аппаратуры спутниковой навигации;
- ◆ модуль имитации одометрических датчиков;
- ◆ модуль имитации блока чувствительных элементов инерциальной системы;
- ◆ модуль имитации инерциальной системы ориентирования;
- ◆ модуль унифицированного потребителя навигационной информации.

Набор элементов был определен исходя из принципа обеспечения проведения глубокого анализа функционирования как системы в целом, так и отдельных ее элементов.

В связи с тем, что проектируемый программно-аппаратный комплекс моделирования должен поддерживать возможность взаимодействия с аппаратными средствами, было принято решение о разработке каждого модуля как полноценного исполняемого файла, написанного на языке C++.

Одним из ключевых требований к проектируемым модулям являлась реализация возможности встраивания в контур штатной структуры НС без дополнительных доработок. Таким образом, должно быть реализовано программное и аппаратное соответствие программных протоколов и аппаратных интерфейсов информационного взаимодействия всех элементов.

Модуль имитации инерциальной системы ориентирования (ИСО) может как взаимодействовать с аппаратным блоком чувствительных элементов по каналам информационного взаимодействия, так и моделировать функционирование по унифицированным записям телеметрии, полученным при различных условиях эксплуатации.

Наличие функции работы с файлами данных делает возможным анализ алгоритмов функционирования ИСО, построенных на чувствительных элементах различного типа, а также повышает эффективность анализа модели компенсации систематических погрешностей и фильтрации первичной информации [11–13]. Экранная форма управления основными режимами работы модели ИСО изображена на рис. 2.

При этом во всех режимах работы модуля происходит индикация, в том числе в виде графической информации, и фиксирование в файл промежуточных параметров функционирования. Пример экранной формы изображен на рис. 3.

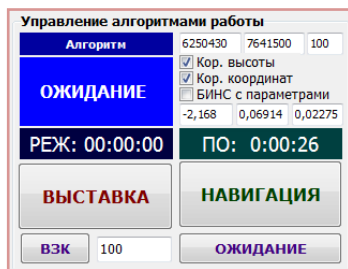


Рис. 2. Экранная форма управления режимами ИСО

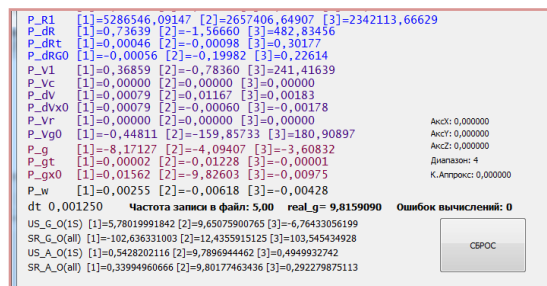


Рис. 3. Экранная форма промежуточных параметров функционирования инерциальной системы

Функция коррекции переменных предназначена для моделирования поведения ИСО в случае возникновения нештатных ситуаций.

В рамках программно-аппаратного комплекса реализована возможность воспроизведения сценариев функционирования. В связи с этим одним из возможных подходов к расширению функционала модели в целом является накопление базы статистических данных. Так, например, модуль имитации аппаратуры спутниковой навигации позволяет воспроизводить треки движения, полученные во время эксплуатации наземного объекта, отслеживать пропадание сигналов и имитировать работу алгоритмов компенсации погрешностей [14]. На рис. 4 представлена экранная форма генерирования сигналов спутниковой навигации [15]. Модуль поддерживает взаимодействие по штатным протоколам с формированием признаков работы спутниковой аппаратуры, работу в нескольких системах координат.

Функция задания пункта назначения позволяет осуществлять передачу данных, формируемых спутниковой аппаратурой при движении по маршруту между двумя и более точками.

Данный модуль также позволяет работать с электронными картами местности (рис. 5). Реализованы функции масштабирования, наложения маршрутов, корректировки коэффициентов, нанесения контрольных точек и ряд других. Поддерживается загрузка потоковых файлов данных стандартных протоколов обмена спутниковой аппаратуры.

Реализована поддержка растровых карт из общедоступных источников с возможностью их адаптации и масштабирования по контрольным точкам.

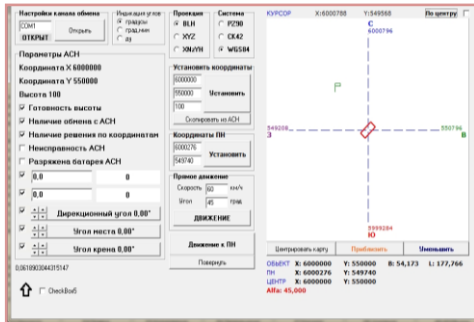


Рис. 4. Структура вычислителя инерциальной навигационной системы

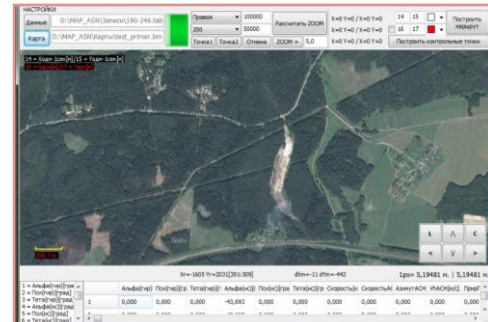


Рис. 5. Экранная форма работы с цифровой картой местности

На рис. 6 изображена экранная форма модуля имитации инерциальной системы ориентирования. Циклограмма работы выполнена в строгом соответствии штатной системе. При этом оператор может в оперативном режиме менять параметры и создавать исключительные ситуации для отработки сценариев поведения потребителя навигационного решения.

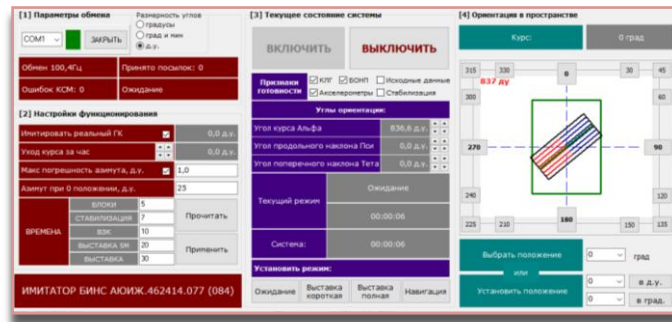


Рис. 6. Модуль имитации инерциальной системы ориентирования

Еще одним ключевым элементом навигационной системы наземного объекта является датчик сигналов скорости. В рамках работы были разработаны программно-аппаратные модели двух типов датчиков. На рис. 7 изображена экранная форма механического датчика скорости. Данный модуль выполнен в форме программно-аппаратного решения и способен формировать исходящие аналоговые сигналы. Использование модуля имитации сигналов скорости исключает необходимость использования реального прибора и снижает загрузку стендового оборудования.

Разработанный программно-аппаратный модуль имитации доплеровского датчика скорости позволяет осуществлять отработку алгоритмов автономного счисления координат и комплексирования без использования реального прибора. При этом оператор может задавать скорость движения, необходимую дистанцию, направление движения и другие параметры. Экранная форма управления изображена на рис. 8.

Данный модуль позволяет провести отработку алгоритма работы навигационной системы наземного объекта с «эталонной» путевой системой. Таким образом, могут быть отработаны алгоритмические решения без учета ряда источников погрешностей.

Программные модули одометрических датчиков в сочетании с имитацией аппаратуры спутниковой навигации обеспечивают возможность проведения исследований в области создания эффективных алгоритмов комплексирования при различных условиях эксплуатации.

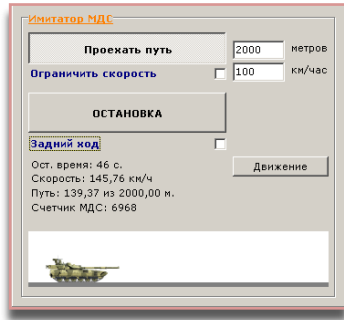


Рис. 7. Экранная форма модуля имитации механического датчика скорости

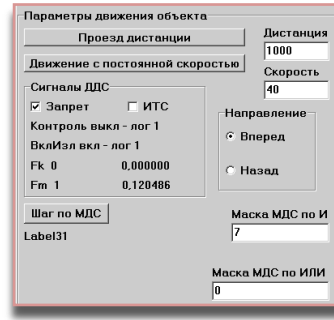


Рис. 8. Экранная форма модуля имитации доплеровского датчика скорости

На рис. 9 представлена обобщенная схема [16, 17] взаимодействия разработанных модулей, входящих в единую систему моделирования навигационной системы наземного подвижного объекта. Внутренние и внешние протоколы взаимодействия соответствуют штатным, поэтому любой из элементов может быть заменен на штатный прибор, а любой имитационный модуль может быть встроен в штатную систему [18–20].

При этом на каждом этапе формирования навигационного решения могут быть зафиксированы промежуточные данные расчета для дальнейшего анализа в виде файлов.

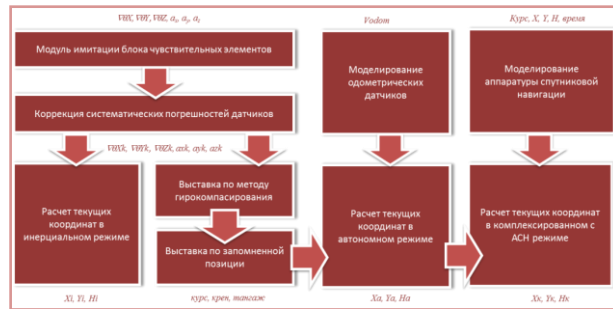


Рис. 9. Схема взаимодействия имитационных программных модулей

Для обеспечения полноты набора инструментов анализа и отработки алгоритмов работы НС, а также воспроизведения условий их эксплуатации в составе программно-аппаратного комплекса моделирования предусмотрен модуль взаимодействия со стендовым оборудованием. На данный момент реализована поддержка трехосных, двухосных стендов моделирования движения и климатических камер.

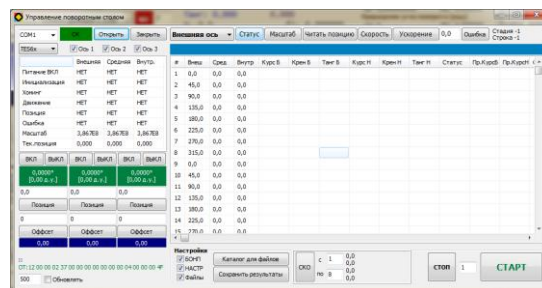


Рис. 10. Экранная форма модуля управления стендом имитации движения

Экранная форма формирования сценария работы стенда моделирования движения представлена на рис. 10. Данный модуль может взаимодействовать с другими компонентами программно-аппаратного комплекса и осуществлять управление режимами их работы.

Заключение. Учитывая сложность и специфику построения навигационной системы наземного объекта, можно выделить следующие основные задачи программно-аппаратного моделирования:

- ◆ отработка алгоритмов определения углов ориентирования и компенсации систематических погрешностей датчиков;
- ◆ отработка алгоритмов автономной, комплексированной и инерциальной навигации;
- ◆ моделирование поведения систем по записям телеметрии в реальных условиях эксплуатации;
- ◆ гибкая модульная структура обеспечивает применение в нескольких работах;
- ◆ взаимодействие со стендовым оборудованием, в том числе со стендами моделирования движения;
- ◆ функционирование как с использованием реальных приборов, так и по записям телеметрии.

В рамках проведенного исследования была определена концепция программно-аппаратной модели комплексированной инерциальной навигационной системы, проведена ее разработка и апробация.

Основные перспективы развития разработанного комплекса моделирования заключаются в расширении набора протоколов взаимодействия со стендовым оборудованием, а также в поддержке файлов записей телеметрии. При этом к основным направлениям можно отнести:

- ◆ накопление базы типовых математических моделей подвижных объектов различного типа;
- ◆ расширение перечня имитируемых подсистем наземного объекта;
- ◆ повышение уровня автоматизации проводимых исследований;
- ◆ реализацию возможности удаленного взаимодействия с компонентами систем;
- ◆ внедрение встроенного интерпретатора для написания развернутых сценариев моделирования;
- ◆ расширение поддержки стендового оборудования (климатические камеры, вибростенды и другие).

Разработанный комплекс имитационного моделирования навигационных систем позволяет решать широкий спектр исследовательских задач на различных этапах жизненного цикла навигационных систем наземных объектов. В связи с тем, что каждый модуль выполнен в виде автономного программного обеспечения, поддерживающего взаимодействие по штатным протоколам, возможно комбинирование элементов в различные сочетания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Шутов И.А.* Реализация распределенных вычислений на отечественных микропроцессорных устройствах // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – №1 (225). – С. 218-226.
2. *Белов А.В.* Конструирование устройств на микроконтроллерах. – СПб.: Наука и Техника, 2005. – 256 с.
3. *Vincent Mahout.* Assembly Language Programming: Arm Cortex-M3, 2011.
4. *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.
5. *Systems Engineering Handbook, version 2a.* INCOSE, 2004.
6. *Шутов И.А., Ветошкин Е.В.* Комплексированная навигация наземных робототехнических комплексов // Робототехника и техническая кибернетика. – 2021. – Т. 9, № 2 (225). – С. 127-132.

7. Брозгуль Л.И., Зайцев А.В. Состояние и перспективы развития инерциальных навигационных систем // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2006. – № 3.
8. 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».
9. 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.
10. Stallings W. Operating Systems: Internals and Design Principles. – Seventh ed. – Prentice Hall, 2011.
11. Grewal M., Henderson V., Miyasako R. Application of Kalman filtering to the calibration and alignment of inertial navigation systems/M. Grewal // IEEE Transactions, Automatic Control. – 1991. – Vol. 36.
12. 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.
13. 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>.
14. Tel G. Introduction to Distributed Algorithms. Second edition. – Cambridge University Press, 2000.
15. 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>.
16. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / под ред. В.Я. Распопова. – СПб.: ГИЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 2009. – 280 с.
17. Volkov V.L. Mathematical modeling of inertial measurement systems // International Journal of Applied and Fundamental Research. – 2015. – № 2. – URL: www.science-sd.com/457-24631.
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. – 37 p. – <http://www.cl.cam.ac.uk/techreports/> 2007.
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. Shipov I.A. Realizatsiya raspredelennykh vychisleniy na otechestvennykh mikroprotssomykh ustroystvakh [Implementation of distributed computing on domestic microprocessor devices], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 1 (225), pp. 218-226.
2. Belov A.V. Konstruirovaniye ustroystv na mikrokontrollerakh [Designing devices on microcontrollers], *Nauka i tekhnika* [Science and Technology]. Saint Petersburg, 2005, 256 p.
3. Vincent Mahout Assembly Language Programming: Arm Cortex -M3, 2011.
4. Alyamov A.E., Balasov I.Yu., Bazhanov V.A. Importozameshchenie elektronnoy komponentnoy bazy v oboronnom proizvodstve [Import substitution of electronic components in the production of defense], *Vserossiyskiy ekonomicheskii zhurnal EKO* [All-Russian ECO Journal], 2015, No. 11 (497), pp. 19-29.
5. Systems Engineering Handbook, version 2a. INCOSE, 2004.
6. Shipov I.A., Vetoshkin E.V. Kompleksirovannaya navigatsiya nazemnykh robototekhnicheskikh kompleksov [Integrated navigation of unmanned ground vehicles], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2021, Vol. 9, No. 2 (225), pp. 127-132.
7. Brozgul L.I., Zaytsev A.V. Sostoyaniye i perspektivy razvitiya inertsial'nykh navigatsionnykh sistem [The state and development prospects of inertial navigation systems], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2006, No. 3.

8. Shipov I.A., Vetoshkin E.V., Morozov A.V. Integrirovannye inertsiyal'no-sputnikovye sistemy nazemnykh robototekhnicheskikh kompleksov [Integrated inertial satellite systems of ground-based robotic complexes], *Sbornik trudov XXXII konferentsii pamyati N.N. Ostryakova v napravlenii "Giroskopicheskie i integrirovannye inertsiyal'no-sputnikovye sistemy"* [Proceedings of the XXXIIth Conference in Memory of N.N. Ostryakov in the Field of Gyroscopic and Integrated Inertial Satellite Systems].
9. Vasil'ev K.K., Anikin A.A. Kalmanovskoe kompleksirovanie i modelirovanie navigatsionnykh sistem [Kalman complexation and navigation systems simulation], *Electronnaya tekhnika: Mezhevuzovskiy sbornik nauchnykh trudov, pod red. D.V. Andreeva, Ulyanovsk: UIGTU* [Electronic Technology: Interuniversity Collection of Scientific Papers], ed. by D.V. Andreev. Ulyanovsk: UISTU, 2005.
10. Stallings W. Operating Systems: Internals and Design Principles. Seventh Edition. Prentice Hall, 2011.
11. Grewal M., Henderson V., Miyasako R. Application of Kalman Filtering to the Calibration and Alignment of Inertial Navigation Systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1991, Vol. 36.
12. Belochkin P.E., Katsay D.A. Osobennosti modelirovaniya besplatformennoy sistemy orientatsii po uravneniyam Eylera v srede Matlab i Mathcad [Features of strapdown orientation system simulation using Euler equations in Matlab and Mathcad], *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern High Technologies], 2014, No. 5, pp. 18-20.
13. Zhidkova N.V., Volkov V.L. Modelirovanie besplatformennoy sistemy orientatsii [Modeling of a strapdown system of orientation], *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education], 2015, No. 1. Available at: <http://www.science-education.ru/121-17099>.
14. Tel G. Introduction to Distributed Algorithms. Second ed. Cambridge University Press, 2000.
15. 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>.
16. Matveev V.V., Raspopov V.Ya. Osnovy postroeniya besplatformennykh inertsiyal'nykh navigatsionnykh sistem [Fundamentals of strapdown inertial navigation system design], ed. by V.Ya. Raspopov. St. Petersburg: SSC RF JSC "Concern "Central Research Institute "Electropribor", 2009, 280 p.
17. Volkov V.L. Matematicheskoe modelirovanie inertsiyal'nykh sistem izmereniya [Mathematical modeling of inertial measurement systems], *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Research], 2015, No. 2. Available at: www.science-sd.com/457-24631.
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*, 37 p. Available at: <http://www.cl.cam.ac.uk/techreports>, 2007.
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. 6.
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 system engineering methods and tools in creation of ground 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.