

УДК 681.586.2; 623.4.084.2
PACS 06.30.Gv, 42.81.Pa

Модернизация устройства первичной обработки данных гироскопа

Э. Ю. Папырина^a, И. Л. Вольхин^a, К. В. Никулин^b

^a Пермский государственный национальный исследовательский университет

614990, Пермь, ул. Букирева, 15

email: eva95pa@gmail.com

^b ООО «ИЦ ВИС-Техника»

614002, Пермь, ул. Белинского, 31

В изготавливаемых Пермской научно-производственной приборостроительной компанией гироскопах погрешности первичных датчиков волоконно-оптических гироскопов, акселерометров и блока обработки первичных данных взаимно согласованы по условиям технического задания. Дальнейшее повышение точности определения положения движущегося объекта в пространстве с помощью гироскопа возможно только при согласованном уменьшении всех указанных погрешностей. Непрерывное совершенствование гироскопов и акселерометров существенно повышает точность определения первичной информации о положении движущегося объекта. В связи с этим возникает необходимость совершенствования блока обработки первичной информации. Изготавливаемый в настоящее время блок включает четыре устройства, размещённые на отдельных платах: аналого-цифровой преобразователь, вычислитель, плата внешних связей и источник питания. В настоящей работе рассматривается модернизация устройства первичной обработки данных гироскопа. Для этого выполнено сквозное проектирование одноплатного многофункционального устройства первичной обработки данных, которое включает в себя разработку принципиальной электрической схемы, монтажной схемы и чертежа печатной платы, моделирование, макетирование, изготовление и проведение испытаний. Испытания осуществлялись в термокамере в диапазоне температур от -30°C до $+55^{\circ}\text{C}$. Результаты испытаний показали, что трёхкратно улучшена одна из основных характеристик блока обработки первичных данных, прописанная в техническом задании, – температурный дрейф нуля аналого-цифрового преобразователя. В итоге уменьшены габариты, энергопотребление и масса гироскопа. Уменьшено количество межплатных соединений, что облегчает процесс сборки изделия и повышает его надёжность. В ближайшей перспективе планируется улучшить точность первичных датчиков, что позволит увеличить точность решения навигационных задач до трёх раз.

Ключевые слова: гироскоп; гироскоп; акселерометр

Поступила в редакцию 14.05.2019; принята к опубликованию 30.09.2019

Modernization of primary data processing device of gyrocompass

E. Y. Papyrina^a, I. L. Volkhin^a, K. V. Nikulin^b

^a Perm State University, Bukireva St. 15, 614990, Perm

email: eva95pa@gmail.com

^b LLC «EC VIS – Technics», Belinski St. 31, 614002, Perm

In the gyrocompasses manufactured by Perm Scientific and Production Instrument-Making Company, the errors of primary sensors of fiber-optic gyroscopes, accelerometers and primary data

processing unit are mutually agreed upon according to terms of reference. Further increase in the accuracy of determining position of moving object in space using gyrocompass is possible only with coordinated reduction of all these errors. Continuous improvement of gyroscopes and accelerometers significantly increases the accuracy of determining primary information about position of moving object. This requires improvement of primary information processing unit. The current unit manufactured in this block includes four devices located on separate boards. It's analog-to-digital converter, computer, external communications board and power source. In this work, the device for primary processing of gyrocompass data was modernized. For this, the through design of single-board multifunctional device for primary data processing was carried out, which includes development of circuit diagram, wiring diagram and drawing of printed circuit board, modeling, prototyping, manufacturing and testing. Tests were carried out in heat chamber for temperature range from -30°C to $+55^{\circ}\text{C}$. The test results showed that one of the main characteristics of primary data processing unit, prescribed in statement of work - the temperature zero drift of analog-to-digital converter is three times improved. As a result, the dimensions, power consumption and mass of gyrocompass were reduced. The number of inter board connections was reduced too, which facilitates the assembly process of product and increases its reliability. In near future, it is planned to improve accuracy of primary sensors, thus, promising system can increase accuracy of solving navigation problems up to three times.

Keywords: gyro-compass; gyroscope; accelerometer

Received 14.05.2019; accepted 30.09.2019

doi: 10.17072/1994-3598-2019-3-45-51

1. Введение

Проблема определения положения движущегося объекта на земле и в околоземном пространстве на сегодняшний день решается несколькими основными способами. Первый способ заключается в использовании систем спутниковой навигации GPS, ГЛОНАСС и аналогичных [1–3]. Эти системы коллективного пользования обладают существенными недостатками – слабой помехозащищенностью и значительным снижением точности при внешних воздействиях, таких как магнитные бури и, например, «gps-spoofing» [4, 5]. От этих недостатков свободны автономные системы навигации, основанные на использовании гироскопов. Гироскопы являются точными навигационными приборами, для правильной работы которых необходимы три ортогонально ориентированных гироскопа и три акселерометра [6, 7].

В настоящее время существуют три основных разновидности гироскопов: роторные [8], волоконно-оптические [9] и на основе кольцевого лазера [10]. Роторным гироскопам присущи следующие недостатки: для их корректной работы необходимы высокая точность изготовления самого ротора и минимальное трение подшипников, которые недолговечны вследствие износа трущихся частей. У таких гироскопов со временем появляется значительная погрешность измерения углов – они требуют частой проверки, и, соответственно, дополнительных расходов средств. Кроме того, они имеют большую массу и габариты, что в случае размещения их на летательных аппаратах ухудшает их основные характеристики: стартовую массу и свободный внутренний объем для разме-

щения научной аппаратуры [11]. Кольцевые лазеры, в свою очередь, имеют очень сложную систему юстировки и чувствительны к ударам и вибрациям.

От указанных недостатков свободны волоконно-оптические гироскопы, которые в настоящее время и являются основой навигационных комплексов самолетов, ракет, надводных и подводных кораблей [12].

Существует несколько типов акселерометров, отличающихся по чувствительным элементам и принципам действия: ёмкостные, пьезоэлектрические, пьезорезистивные, магниторезистивные, с использованием эффекта Холла и теплопередачи [13, 14]. Совместно с волоконно-оптическими гироскопами, как правило, используются маятниковые акселерометры, которые по исполнению конструкционного материала для подвеса маятника делаются на кремниевые и кварцевые [15, 16].

Современный волоконно-оптический гироскоп, кроме указанных устройств (гироскопов и акселерометров), снабжен системой электроники, обрабатывающей данные первичных датчиков и определяющей на основе математических методов обработки положение движущегося объекта в пространстве.

В настоящее время ведущие производители гироскопов добились точности определения координат, соизмеримой с точностью определения координат спутниковыми системами, однако волоконно-оптические системы являются более помехоустойчивыми.

В связи с повышением точности первичных датчиков погрешности, возникающие в системе обработки данных, зачастую соизмеримы, а иногда и превосходят ошибки датчиков. Дальнейшее по-

вышение точности измерений требует существенной модернизации электронных компонент гироскопа.

Настоящая работа решает именно эту проблему. Цель данной работы – сквозное проектирование одноплатного многофункционального устройства первичной обработки данных, которое включает в себя разработку принципиальной электрической схемы, монтажной схемы и чертежа печатной платы, моделирование, макетирование, изготовление и проведение испытаний.

Погрешность, вносимая многофункциональным устройством, не должна превышать погрешность первичных датчиков, а основная – электронная часть должна строиться на современной элементной базе, что повысит ресурс и надежность устройства.

Следует отметить, что разрабатываемое многофункциональное устройство первичной обработки данных, изготовленное на отдельной плате, предполагается внедрить в состав действующего гироскопа для выполнения следующих задач:

- обработка аналоговых показаний акселерометров;
- определение температуры акселерометров;
- решение задачи ориентации для гироскопа на основании данных, приходящих с трех ортогональных волоконно-оптических гироскопов и трех ортогональных акселерометров;
- хранение поправочных коэффициентов инерциальных измерителей и программы для решения задачи ориентации.

Предвидя в перспективе улучшение характеристик первичных датчиков, разработчики поставили дополнительную цель: добиться уменьшения погрешности преобразования их сигналов устройством первичной обработки данных не менее, чем в два раза по сравнению с существующим техническим заданием.

2. Плата обработки первичных данных

Используемая в настоящее время система обработки аналоговых показаний и температуры акселерометров, информации с блоков волоконно-оптических гироскопов объединена в блок первичной обработки данных (рис. 1), который состоит из отдельных электронных устройств, размещённых на четырёх платах, каждая из которых выполняет определенную функцию в составе комплекса:

- 1) плата «Аналого-цифровой преобразователь (АЦП)» для обработки данных с акселерометров;
- 2) плата «Вычислитель» для работы с данными волоконно-оптических гироскопов и обработанными данными акселерометров;
- 3) плата «Внешних связей» для формирования конечных данных потребителю в соответствии с

требуемыми протоколами информационного взаимодействия;

- 4) плата питания.

Разработанное нами устройство первичной обработки данных интегрировано на одной плате и выполняет функции первых трёх устройств (рис. 1), что позволяет в существующей конструкции гироскопа уменьшить энергопотребление и массу, а перспективных разработках – его габариты. В существующей конструкции межплатные соединения выполнены с помощью разъёмных соединений, а в разработанной плате они являются частью печатного монтажа, что облегчает процесс сборки изделия и повышает его надёжность.

На рис. 2 представлена блок-схема разработанного устройства первичной обработки данных.

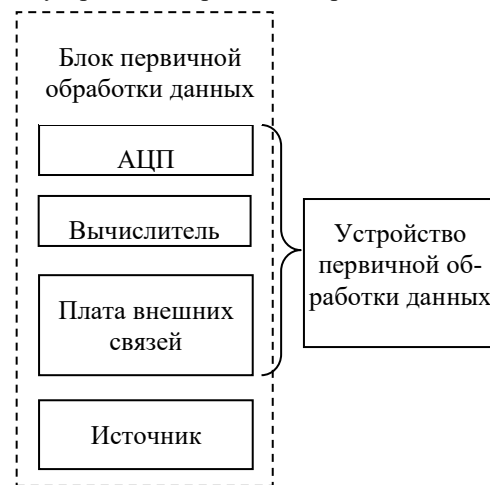


Рис. 1. Структура блока первичной обработки данных

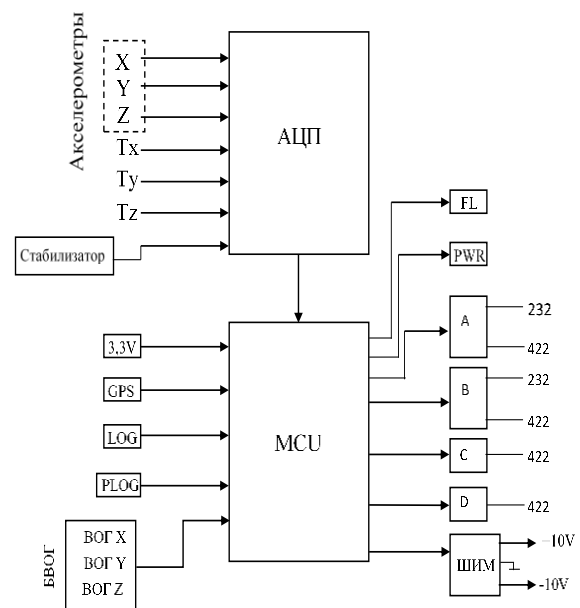


Рис. 2. Блок-схема устройства первичной обработки данных

Данные с блока волоконно-оптических гироскопов (БВОГ) поступают на вычислитель (MCU) уже в оцифрованном виде по последовательному интерфейсу в двоичном коде. Выходные аналоговые сигналы с трёх акселерометров X, Y, Z и с их датчиков температуры T_x, T_y, T_z поступают на АЦП, оцифровываются и передаются на MCU. Полученная с акселерометров и волоконно-оптических гироскопов информация обрабатывается в вычислителе на основе «метода кватернионов» [17].

Окончательная корректировка выходных данных происходит с помощью поправочных коэффициентов, которые определяются для каждого гироскопа в процессе калибровки. Коррекция показаний может осуществляться также от внешних источников информации о широте и скорости, таких как GPS, лаг и импульсный лаг. Поправочные коэффициенты хранятся в памяти вычислителя. Обработанная информация поступает с каналов A, B, C и D на устройства индикации положения движущегося объекта и другие устройства в зависимости от задачи.

Многофункциональное устройство, смонтированное на печатной плате, не должно вносить погрешности в данные, поступающие с акселерометров, поэтому дрейф нуля аналого-цифрового преобразователя должен быть не более 30 *mkg* в диапазоне температур от -30°C до $+55^{\circ}\text{C}$. Оценка температурного дрейфа производится по сигналу на выходе канала A. Предварительно проведенные исследования показали, что сигналы на выходах других каналов такие же, поэтому можно ограничиться анализом выходных данных с одного канала, которые пропорциональны температурному дрейфу нуля АЦП.

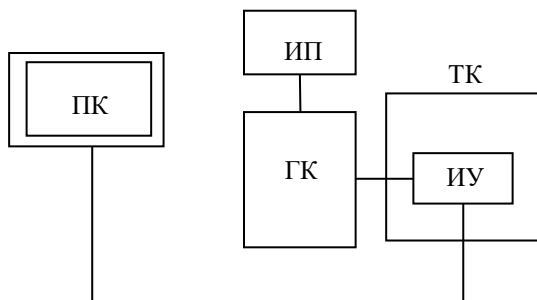


Рис. 3. Блок-схема установки для температурного исследования устройства первичной обработки данных

Блок-схема установки для температурного исследования устройства первичной обработки данных представлена на рис. 3. Она состоит из источника питания ИП, гироскопа ГК, исследуемого устройства первичной обработки данных ИУ, размещенного в термокамере ТК, и персонального компьютера ПК. Для снятия дрейфа нуля АЦП необходимо замкнуть его входы и считать оцифрованное напряжение с выхода канала A. Полу-

ченные данные обрабатываются с помощью технологической программы, установленной на персональном компьютере, и там же переводятся в единицы измерения *mkg*. Гироскопас во время исследования находится в неподвижном состоянии.

Для исследования платы в указанном температурном диапазоне измерения проводились в термокамере [18]. Режим изменения температуры в пределах одного термоцикла приведен на рис. 4. Он состоит из нескольких частей. В течение «холодного пуска» продолжительностью до 30 мин производится настройка оборудования и подготовка к проведению эксперимента. Затем плата с устройством первичной обработки данных охлаждается от комнатной температуры $+25^{\circ}\text{C}$ до -30°C . Из предварительно проведенных опытов установлено, что выход на стационарный режим происходит примерно за 30 мин, стационарный режим длится от 15 до 40 мин. Далее следует нагрев до $+55^{\circ}\text{C}$, который происходит за 15 мин, затем происходит выход на второй стационарный режим, время которого определяется задачами эксперимента и обычно составляет от 15 до 40 мин. В течение всего термоцикла производится измерение дрейфа нуля АЦП.

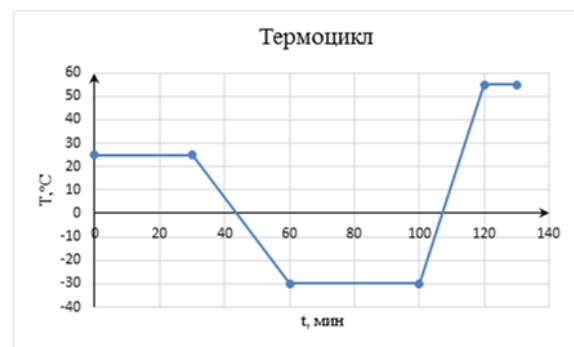


Рис. 4. Изменение температуры по времени

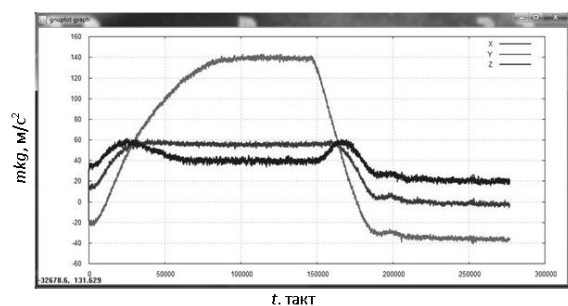


Рис. 5. Зависимости дрейфов нуля АЦП в *mkg(t)* в диапазоне температур от -30°C до $+55^{\circ}\text{C}$

При первом исследовании изготовленного прототипа платы с устройством первичной обработки данных были получены зависимости, представленные на рис. 5. По вертикальной оси отложена

величина ускорения, измеренная в единицах mkg , а по горизонтальной – время в тактах. Для того чтобы получить реальное время в секундах, необходимо один такт поделить на 100. Сопоставив реальное время, прошедшее с начала исследования платы, с графиком на рис. 4, можно определить температуру, которая воздействовала на плату в тот или иной момент.

Из рис. 5 видно, что погрешности преобразования сигналов с трёх короткозамкнутых входов X, Y, Z аналого-цифрового преобразователя при изменении температуры ведут себя по-разному, а их значения от минимального до максимального значения составляют:

- 1) для оси X ~ 60 mkg ;
- 2) для оси Y ~ 180 mkg ;
- 3) для оси Z ~ 40 mkg .

Такие данные не удовлетворяют необходимому значению <30 mkg .

Для уменьшения дрейфов нуля проведено детальное исследование как самой платы (влияния длины дорожек до места короткого замыкания, чистоты поверхности платы), так и размещённого на ней устройства первичной обработки данных (наличие шунтирующих конденсаторов). Было установлено, что значительное уменьшение погрешностей аналого-цифровых преобразователей, а также выравнивание формы температурных зависимостей дрейфов нулей произошло при подключении к аналого-цифровому преобразователю буферной схемы [19].

На рис.6 представлены результаты температурных измерений платы с буферным каскадом. Видно, что температурные изменения погрешности преобразования сигналов с трёх короткозамкнутых входов АЦП уменьшились в 4÷30 раз, выровнялись друг относительно друга и имеют похожее поведение, а их значения составляют:

- 1) для оси X ~ 11 mkg ;
- 2) для оси Y ~ 6 mkg ;
- 3) для оси Z ~ 11 mkg .

Таким образом, по результатам тестирования установлено, что последние данные соответствуют необходимому условию для погрешностей и не

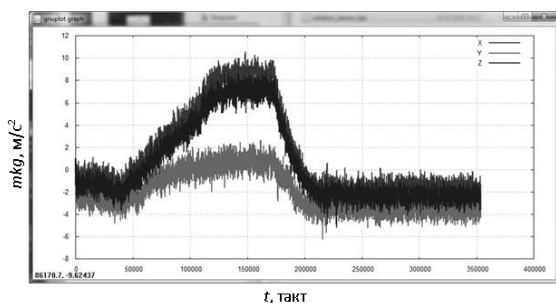


Рис. 6. Зависимости дрейфов нулей АЦП с установленным буферным каскадом в $mkg(t)$ в диапазоне температур от $-30^{\circ}C$ до $+55^{\circ}C$

превышают 30 mkg . Буферная схема обеспечивает входное масштабирование сигнала и его низкочастотную фильтрацию, тем самым уменьшая влияние шумов в системе. Достигнутые результаты примерно в три раза лучше, чем установленные техническим заданием.

Следует отметить, что в настоящее время по техническому заданию точность первичных датчиков и погрешности блока обработки первичных данных строго согласованы. Поэтому улучшение характеристик только одного устройства обработки первичных данных не повышает точность определения пространственного положения объекта гироскопом. Однако в ближайшей перспективе предполагается повысить точность первичных датчиков, в связи с чем потребуются улучшить технические характеристики блока обработки. Настоящая работа выполнила эту перспективную задачу.

Заключение

В результате проделанной работы проведено сквозное проектирование одноплатного многофункционального устройства первичной обработки данных, которое включает в себя разработку принципиальной электрической схемы, монтажной схемы и чертежа печатной платы, моделирование, макетирование, изготовление и проведение испытаний. Это позволило оптимизировать блок первичной обработки данных гироскопа за счёт замены использовавшихся ранее устройств на трёх платах устройством обработки первичных данных интегрированным на единой плате, выполняющим те же функции. В итоге уменьшены габариты, энергопотребление и масса гироскопа, сокращено количество межплатных соединений, что в дальнейшем облегчит процесс сборки изделия и повысит его надёжность. Использование современной элементной базы и разработка новой электрической схемы позволили достигнуть трёхкратного улучшения одной из основных характеристик блока обработки первичных данных, прописанной в техническом задании, – температурного дрейфа нуля аналого-цифрового преобразователя в диапазоне температур от $-30^{\circ}C$ до $+55^{\circ}C$.

Создан задел для дальнейшего повышения точности определения положения объектов в пространстве, которое возможно за счёт повышения точности первичных датчиков, что улучшит характеристики системы навигации в целом.

Список литературы

1. Карлацук В. И. Спутниковая навигация. Методы и средства. М.: СОЛОН-Пресс, 2009. 288 с.
2. Яценков В. С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. М.: Горячая линия-Телеком, 2005. 272 с.

3. *Генике А. А., Побединский Г. Г.* Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии. М.: Картгеоцентр, 2004. 355 с.
4. *Михаленко Е. Б., Загрядская Н. Н., Беляев Н. Д., Вилькевич В. В., Петров В. В., Смирнов А. А.* Инженерная геодезия. Современные методы геодезических измерений с использованием искусственных спутников Земли. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. С. 72–77.
5. *Graham M.* GPS Use in U.S. Critical Infrastructure and Communications. URL: <https://www.gps.gov/multimedia/presentations/2012/10/USTTI/graham.pdf>. (дата обращения: 15.04.2019).
6. *Луниц Я. Л.* Введение в теорию гироскопов. М.: Наука, 1972. 296 с.
7. *Солодовников В. В.* Устройства и элементы систем автоматического регулирования и управления. Кн. 1. Измерительные устройства, преобразующие элементы и устройства. М.: Машиностроение, 1973. С. 231–249.
8. *Лысов А. Н., Виниченко Н. Т., Лысова А. А.* Прикладная теория гироскопов. Ч. 3: учеб. пособие. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. С. 171–180.
9. *Шереметьев А. Г.* Волоконный оптический гироскоп. М.: Радио и связь, 1987. 152 с.
10. *Бычкова С. И.* Лазерный гироскоп. М.: Советское радио, 1975. 424 с.
11. *Закиров Р. Г., Абдураимов О. Ш.* Применение волоконно-оптического гироскопа в инерциальных системах воздушных судов малой авиации // *Техника. Технологии. Инженерия*. 2017. №3. С. 19–22. URL <https://moluch.ru/th/8/archive/62/2489/> (дата обращения: 16.04.2019).
12. *Филатов Ю. В.* Волоконно-оптический гироскоп: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2003. С. 44–45.
13. *Бабушкин И. А., Демин В. А., Пенелаяев Д. В.* Принципы регистрации инерционных сигналов с помощью конвективных датчиков // *Известия Томского политехнического университета*. 2010. Т. 317. № 4. С. 38–43.
14. *Бабушкин И. А., Демин В. А., Пенелаяев Д. В.* Численное моделирование работы конвективного датчика при действии центробежной силы // *Известия Томского политехнического университета*. 2011. Т. 318. № 4. С. 23–28.
15. *Ветрова Е. В., Смирнов И. П., Козлов Д. В., Запетляев В. М.* Особенности создания чувствительных элементов кремниевых и кварцевых маятниковых акселерометров // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2017. Т. 4. Вып. 2. С. 95–102. DOI 10.17238/issn2409-0239.2017.2.95
16. *Beitia J., Clifford A., Fell C., Loisel P.* Quartz pendulous accelerometers for navigation and tactical grade systems // *Inertial Sensors and Systems Symposium (ISS)*. Karlsruhe, Germany. September 22–23, 2015. P. 1–20.
17. *Амелькин Н. И.* Динамика твердого тела. М.: МФТИ, 2010. 80 с.
18. Камера тепла и холода KTX-60 URL: <https://clim-tech.ru/teplo-holod/model-kth-60> (дата обращения: 20.10.2018).
19. ADS1258 – 16-Channel, 24-Bit Analog-to-Digital Converter. Datasheet. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1258.pdf> (дата обращения: 10.09.2018).

References

1. *Karlaschuk V. I.* *Satellite navigation. Methods and techniques*. Moscow: SOLON-Press, 2009. 288 p (In Russian).
2. *Yatsenkov V.S.* *Basics of satellite navigation. GPS, NAVSTAR and GNSS systems*. Moscow: Hotline-Telecom, 2005, 272 p (In Russian).
3. *Genike A. A., Pobedynskiy G. G.* *Global satellite location determination systems and their application in geodesy*. Moscow: Cartgeocentre, 2004. 355 p (In Russian).
4. *Mikhhalenko E. B., Zagryadskaya N. N., Belyaew N. D., Vilkevich V. V., Petrov V. V., Smirnov A. A.* *Engineering geodesy. Modern methods of geodesic measures with the usage of artificial Earth satellites*. Saint-Petersburg: Polytechnic University, 2009. pp. 72–77 (In Russian).
5. *Graham M.* *GPS Use in U.S. Critical Infrastructure and Communications*. URL: <https://www.gps.gov/multimedia/presentations/2012/10/USTTI/graham.pdf>. (application date 15.04.2019)
6. *Luntz J. L.* *Introduction to the theory of gyroscopes*. Moscow: Science, 1972. 296 p (In Russian).
7. *Solodovnikov V. V.* *Devices and elements of automatic regulation and control systems. B.1. Measuring devices transforming elements and devices*. Moscow: Mechanic engineering, 1973. pp. 231–249 (In Russian).
8. *Lysov A. N., Vinichenko N. T., Lysova A. A.* *Applied theory of gyroscopes. Part.3: tutorial*. Chelyabinsk: South Ural State University, 2009. pp. 171–180 (In Russian).
9. *Sheremetyev A. G.* *Fiber-Optic Gyroscope*. Moscow: Radio and Connection, 1987. 152 p (In Russian).
10. *Bychkova S. I.* *Laser Gyroscope*. Moscow: Soviet Radio, 1975. 424 p (In Russian).
11. *Zakirov R. G., Abduraimov O. Sh.* Application of Fiber-Optic Gyroscope in inertial systems of light aviation. *Technic. Technology. Engineering*, 2017. pp. 19–22 (In Russian). URL: <https://moluch.ru/th/8/archive/62/2489/> (application date: 16.04.2019)

12. Filatov U. V. *Fiber-Optic Gyroscope*: tutorial. Saint-Petersburg: Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", 2003. pp. 44–45 (In Russian).
13. Vetrova E. V., Smirnov I. P., Kozlov D. V., Zapletyaev V. M. Creation peculiarities of sensitive elements of silicon and quartz pendulum accelerometers. *Space Rocket Instrument Engineering and Information Systems*, 2017. pp. 95–102 (In Russian).
14. Babushkin I. A., Demin V. A., Pepelyaev D. V. Printsipy registratsii inertsiyonnykh signalov s pomoshch'iu konvektivnykh datchikov (Principles of inertial signal registration by convective sensors). *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, vol. 317, №4, 2010. pp. 38–43 (In Russian).
15. Babushkin I. A., Demin V. A., Pepelyaev D. V. Chislennoe modelirovanie raboty konvektivnogo datchika pri deistvii tsentrobezhnoi sily (Numerical simulation of convective sensor under centrifugal force). *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, vol. 318, №4, 2011. pp. 23–28 (In Russian).
16. Beitia J., Clifford A., Fell C., Loisel P. Quartz pendulous accelerometers for navigation and tactical grade systems. *Inertial Sensors and Systems Symposium (ISS)*, 2015, Karlsruhe, Germany, pp. 1–20.
17. Amelkin N. I. *Solid body dynamics*, Moscow: MFTI, 2010. 80 p (In Russian).
18. *Chamber of heat and cold*. URL: <https://climtech.ru/teplo-holod/model-kth-60> (application date: 20.10.2018)
19. *ADS1258 – 16-Channel, 24-Bit Analog-to-Digital Converter*. Datasheet. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1258.pdf> (application date 10.09.2018)

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Папырина Э. Ю., Вольхин И. Л., Никулин К. В. Модернизация устройства первичной обработки данных гирокомпаса // Вестник Пермского университета. Физика. 2019. № 3. С. 45–51. doi: 10.17072/1994-3598-2019-3-45-51

Please cite this article in English as:

Papryina E. Y., Volkhin I. L., Nikulin K. V. Gyrocompass primary data processing device modernization. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2019, no. 3, pp. 45–51. doi: 10.17072/1994-3598-2019-3-45-51