

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Научная статья
УДК 629.052.7
DOI: 10.34759/vst-2023-1-190-197

МЕТОДИКА СТЕНДОВОЙ КАЛИБРОВКИ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ НА БАЗЕ РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА

Ангело Сальватор Эспиноза Валлес

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва (Самарский университет),
Самара, Россия
esalvator24@gmail.com

Аннотация. Предложена методика калибровки микроэлектромеханических (МЭМС) гироскопов с использованием робота-манипулятора. Основная идея методики состоит в применении звеньев робота в качестве высокоточного поворотного устройства. Предложен модифицированный шестипозиционный метод в качестве последовательности выполнения лабораторной калибровки. Изготовлена бесплатформенная инерциальная навигационная система для тестирования методики, и проведены стендовые испытания, показавшие целесообразность использования робота-манипулятора. Описаны особенности результатов обработки экспериментальных данных измерений при испытаниях коммерческих гироскопов с использованием методики. Применение разработанного подхода уменьшает погрешности измерений при наземных испытаниях в пять раз по сравнению с начальными.

Ключевые слова: калибровка МЭМС-гироскопов, математическая модель измерений, модифицированный шестипозиционный метод, бесплатформенная инерциальная навигационная система

Финансирование: работа выполнена в рамках проекта 0777-2020-0018, финансируемого из средств государственного задания победителям конкурса научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Минобрнауки России.

Для цитирования: Эспиноза Валлес А.С. Методика стендовой калибровки микроэлектромеханических гироскопов на базе робота-манипулятора // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 1. С. 190–197. DOI: 10.34759/vst-2023-1-190-197

MACHINE-BUILDING ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original article

BENCH CALIBRATION TECHNIQUE FOR MICROELECTROMECHANICAL GYROSCOPES BASED ON A ROBOT MANIPULATOR

Angelo Salvator Espinoza Valles

Samara National Research University named after academician S.P. Korolev (Samara University),
Samara, 443086, Russia
esalvator24@gmail.com

Abstract. Spacecraft orientation determining and angular motion control are among the crucial tasks being solved in the space-rocket engineering area. Measuring modules, including gyroscopes based on microelectromechanical systems (MEMS), are employed to solve this problem in the nano-class spacecraft. However, MEMS gyroscopes belong to the type of sensors of relatively medium and low measurement accuracy. Besides, space factors, such as cosmic radiation, solar activity, aerodynamic forces, or temperature gradients, lead to the sensor reading drift over time, depending on its stability. The sensors of inertial navigation systems are calibrated thereby automatically in flight. Despite this fact, the pre-flight ground calibration, which is necessary to be performed to confirm all sensors integrated into the system correspond to the minimum requirements placed on the space mission, occupies an important place. There are special turntables on the market for gyroscopes calibration, which set predefined turns at certain velocities and orientations, though they are rather costly. As of now, robot manipulators are widespread all over the world, and they are most often employed to perform certain motions with high precision. In this sense, robot manipulator represents a possible option for solving this issue. Thus, the article proposes reliable technique for bench calibration employing robot manipulator to eliminate systematic errors of commercial MEMS gyroscopes. The main idea of this technique is based on using the wrist of robot manipulator as a high-precision rotary device. The author proposes a modified six-position method in the form of the sequence of rotations to perform laboratory calibration. This technique allows determining systematic errors of the sensor output signals, particularly bias, scale factor and the axes non-orthogonality. Bench tests form a set of experimental data for subsequent processing by the calibration algorithms, and allow identifying all systematic errors and assess the degree of applicability of this bench. For this technique testing, a Strapdown Inertial Navigation System was manufactured, and bench tests were performed, which revealed the possibility of employing a robot manipulator as a calibration instrument. The features of the results of processing experimental measurement data during tests of commercial gyroscopes using this technique are described. The application of the developed approach leads to a five-fold reduction of the error by five times compared to raw measurements.

Keywords: MEMS gyroscopes calibration, mathematical model of measurement, modified six-position method, strapdown inertial navigation system

Funding: the work was performed within the framework of the project 0777-2020-0018, financed from the funds of the State Assignment to the Winners of the Competition of Scientific Laboratories of Educational Institutions of higher education subordinated to the Ministry of Education and Science of Russia.

For citation: Espinoza Valles A.S. Bench Calibration Technique for Microelectromechanical Gyroscopes Based on a Robot Manipulator. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 1, pp. 190–197. DOI: 10.34759/vst-2023-1-190-197

Введение

Определение ориентации и управление угловым движением являются главными задачами, решаемыми при эксплуатации космических аппаратов (КА). Для решения этих задач на малоразмерных КА часто применяются датчики инерциальных измерений на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС) [1–3].

Инерциальные МЭМС-датчики широко используются [1, 4, 5] благодаря их компактности, низкой стоимости и низкому энергопотреблению. Однако МЭМС-датчики являются измерительными средствами средней и низкой точности, в результате которой при их эксплуатации возникают систематические [6–8] и случайные погрешности [9]. На сегодняшний день имеется несколько методов лабораторной калибровки МЭМС-датчиков, при которых необходимо проводить измерения с высокой точностью при различных ориентациях в динамике вращательного движения [10–13]. В работах [6–8, 14] оценены систематические ошибки измерений инерциальной измерительной модели с использованием трехосевого поворотного стенда при различных угловых скоростях. Однако результаты калибровки получаются приемлемыми только для случаев, когда доступно высокоточное поворотное устройство.

В большинстве учебных заведений в составе учебно-лабораторного оборудования имеются роботы-манипуляторы. Роботы-манипуляторы создают дополнительную ценность за счет возможности использования их в качестве калибровочного средства.

Представленная работа посвящена методике калибровки коммерческих МЭМС-гироскопов и ее экспериментальной проверке на роботе-манипуляторе.

Методика калибровки и испытаний на роботе для определения калибровочных коэффициентов

Целью испытаний является формирование набора экспериментальных данных для последующей обработки алгоритмов калибровки для оценки калибровочных параметров и степени применимости данного стенда. Методика позволяет определить систематические погрешности выходных сигналов датчиков, в частности смещение нуля, коэффициенты масштабирования и неортогональности осей. В качестве объекта испытаний использован прототип бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) [15–17] наноспутника, включающей два типа

коммерческих трехосевых датчиков MPU-9250 (гироскоп, акселерометр, магнитометр, датчик температуры) и LSM6DS3 (гироскоп, акселерометр, датчик температуры), модуль связи, микроконтроллер и аккумулятор (рис. 1). Эти датчики имеют настраиваемые диапазоны измерений. Для MPU-9250 выбран диапазон ±250 градус/с, причем чувствительность равна 131 LSB/(градус/с). LSM6DS3 с чувствительностью 262 LSB/(градус/с) измеряет в диапазоне ±125 градус/с.

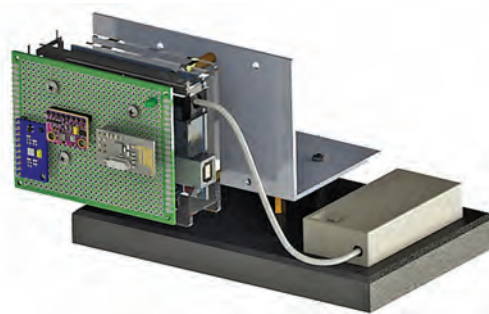


Рис. 1. Модель БИНС

Экспериментальная БИНС разработана для проведения динамических экспериментов с целью определения ориентации. В данной работе БИНС используется исключительно в качестве инерциальной измерительной модели в рамках экспериментального решения задачи калибровки гироскопов.

В общем виде методика состоит из двух этапов. На первом этапе испытывается БИНС на роботе согласно модифицированной шестипозиционной схеме, описанной в следующем разделе; на втором проводится обработка полученных измерений и вычисляются калибровочные коэффициенты.

Математическая модель измерений гироскопов

Согласно [18] для гироскопов модель выходных сигналов может быть представлена следующим выражением:

$$U_{\text{вых}} = S_{\omega} N_{\omega} \omega_{\text{вх}} + B_{\omega} + \xi_{\omega}, \tag{1}$$

где $U_{\text{вых}}$ — вектор измерений, поступающих по каждой измерительной оси МЭМС-гироскопов; $\omega_{\text{вх}}$ — вектор компонент истинных значений угловой скорости; B_{ω} — вектор смещения нуля; ξ_{ω} — вектор шумов измерений; $S_{\omega} N_{\omega}$ — матрица, содержащая коэффициенты масштабирования и неортогональности осей:

$$[S_{\omega} N_{\omega}] = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xx} N_{xy} & S_{xx} N_{xz} \\ S_{yy} N_{yx} & S_{yy} & S_{yy} N_{yz} \\ S_{zz} N_{zx} & S_{zz} N_{zy} & S_{zz} \end{bmatrix},$$

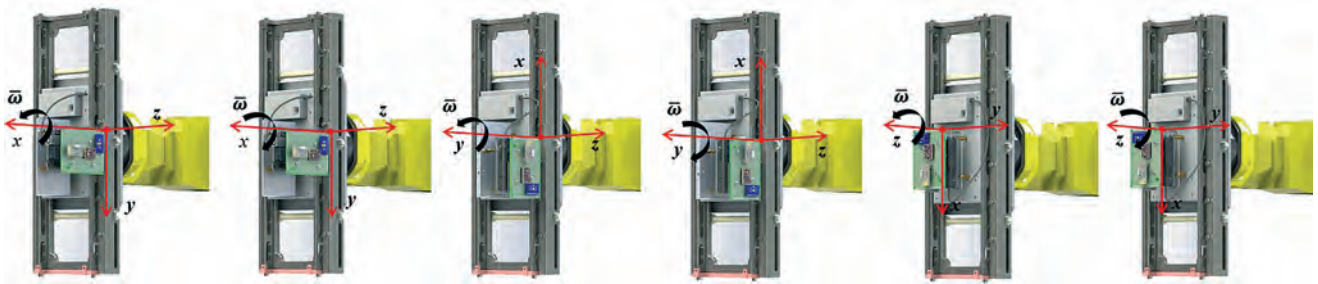


Рис. 2. Схема необходимых вращений модифицированного шестипозиционного метода

где S_{xx}, S_{yy}, S_{zz} — масштабные коэффициенты по измерительным осям; $N_{xy}, N_{xz}, N_{yx}, N_{yz}, N_{zx}, N_{zy}$ — коэффициенты неортогональности осей.

Калибровочные коэффициенты определяются методом наименьших квадратов, сводящимся к минимизации суммы квадратов отклонений измеренных угловых скоростей от эталонных.

Откалиброванные показания гироскопов вычисляются по формуле:

$$\omega_{отк} = (S_{\omega} N_{\omega})^{-1} (U_{вых} - B_{\omega}). \quad (2)$$

Точность калибровки оценивается с помощью двух критериев:

среднего квадратичного отклонения (СКО)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\omega_i - \bar{\omega})^2}{N - 1}}, \quad (3)$$

где N — количество измерений; ω_i — i -е откалиброванное измерение модуля угловой скорости; $\bar{\omega}$ — истинное значение модуля угловой скорости;

средней относительной погрешности модуля вектора угловой скорости

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^N \left| \frac{\bar{\omega} - \omega_i}{\bar{\omega}} \right| \cdot 100\%. \quad (4)$$

Испытательный стенд

Для испытания гироскопов необходимо использовать вспомогательное поворотное устройство, которое может обеспечивать стабильную опорную скорость вращения [19]. Для реализации эталонного вращательного движения можно запрограммировать робот-манипулятор [20]. Для решения задачи калибровки гироскопов используется модифицированный шестипозиционный метод [5, 21], согласно которому робот вращает БИНС в диапазоне угловых скоростей, измеряемых датчиками, для трех разных ориентаций осей и угловых скоростей в направлениях по и против часовой стрелки. Схема необходимых вращений метода приведена на рис. 2.

БИНС надежно закреплена так, чтобы испытуемая ось чувствительности была параллельна оси вращения звена робота. Система координат, показанная на рис. 2, представляет собой приборную систему координат, совпадающую с системами координат датчиков, в которых проводятся измерения.

В рабочем режиме кинематические характеристики робота позволяют управлять угловой скоростью конечного звена при ее ограничении в процентах от максимального значения. Для используемого робота-манипулятора максимальная угловая скорость составляет $\omega_{max} = 600$ градус/с.

При включении гироскопов измеряется угловая скорость; измерения обрабатываются и сравниваются с заданными угловыми скоростями движения запястья робота-манипулятора. В результате можно сделать вывод о программно заданной угловой скорости вращения.

Результаты натурных испытаний

Получены результаты экспериментальной проверки предложенной методики калибровки с использованием робота-манипулятора FANUC M-10iA (рис. 3). В ходе испытаний проведено пять запусков. Последние результаты описаны ниже.



Рис. 3. Экспериментальная установка

В табл. 1 приведены полученные калибровочные коэффициенты МЭМС-датчиков. На рис. 4 показаны модули вектора угловой скорости до и после устранения всех систематических ошибок измерений, вычисленных по формуле (2).

В табл. 2 приведены СКО модуля угловой скорости и средняя относительная погрешность датчиков, полученные по формулам (3) и (4), до и после калибровки.

Таблица 1

Полученные калибровочные коэффициенты

Коэффициент/датчик		MPU-9250	LSM6DS3
Смещение нуля, градус/с	b_x	0,2517	2,6534
	b_y	-0,5394	-3,6947
	b_z	-1,6425	-2,6476
Масштабный коэффициент	S_x	1,0378	1,0465
	S_y	1,0489	1,0242
	S_z	1,0459	1,0398
Коэффициенты неортогональности осей	N_{xy}	0,0155	0,0116
	N_{xz}	0,0251	0,0074
	N_{yx}	-0,0398	-0,0420
	N_{yz}	0,0183	0,0063
	N_{zx}	-0,0060	-0,0007
	N_{zy}	-0,0044	0,0109

Таблица 2

СКО и средняя относительная погрешность модуля вектора угловой скорости

МЭМС датчик	СКО, градус/с		Средняя относительная погрешность, %	
	До калибровки	После калибровки	До калибровки	После калибровки
MPU-9250	2,5897	0,5493	7,64	1,82
LSM6DS3	3,6591	0,8022	14,90	2,72

Понятно, что с увеличением объема измерений получаются более точные калибровочные коэффициенты, и тем самым лучше аппроксимируются эталонные значения угловой скорости, заданные роботом.

Если раскладывать вектор измерений на составляющие, то для LSM6DS3 они смещены на 2–3 градуса/с, а для MPU-9250 — на 0,2–2 градуса/с, что согласуется с полученными ошибками смещения, показанными в табл. 1.

На рис. 5 приведены относительные погрешности модуля угловой скорости во время одного испытания до и после компенсации систематических ошибок.

В итоге среднеквадратичная ошибка и относительная ошибка значительно уменьшаются — в три-пять для рассматриваемых МЭМС-датчиков, что подтверждает эффективность данной методики.

Выводы

Рассмотрена возможность использования робота-манипулятора для определения калибровочных параметров и характеристик гироскопов. Предложенная методика калибровки протестирована на натурных испытаниях с измерительными средствами на основе МЭМС-технологии. Этот метод уменьшает среднюю относительную погрешность в пять раз по сравнению с начальной.

Современные инерциальные навигационные системы постоянно калибруются в полете. Предполетная калибровка необходима для подтверждения, что все датчики, встроенные в систему, соответ-

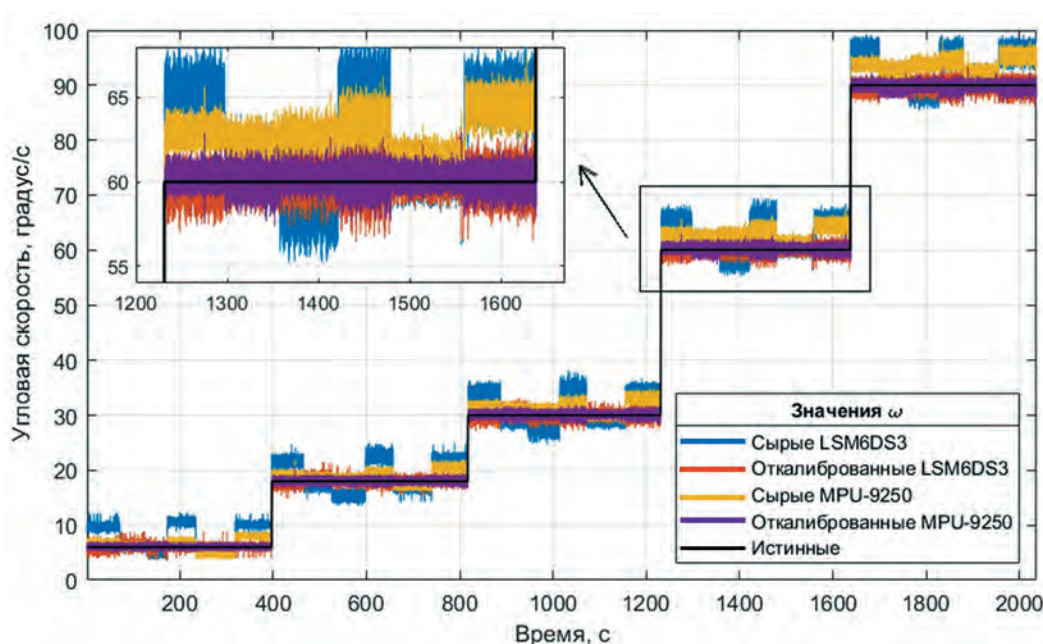


Рис. 4. Модуль вектора угловой скорости

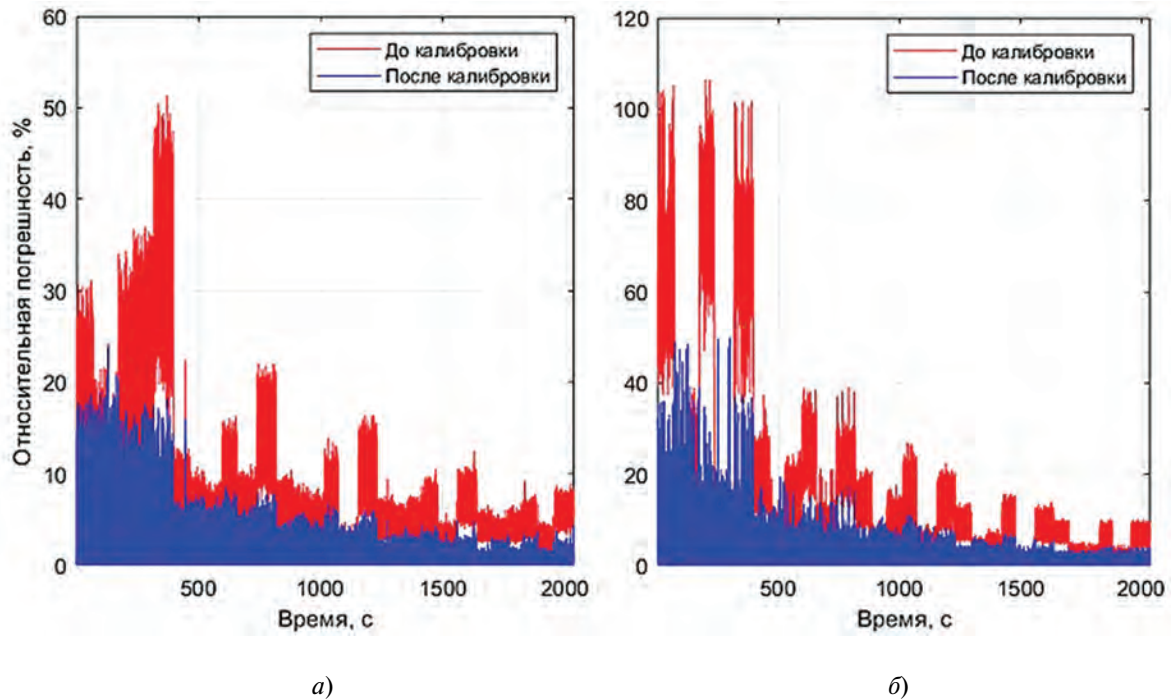


Рис. 5. Относительная погрешность модуля вектора угловой скорости: а — MPU-9250; б — LSM6DS3

ствуют минимальным требованиям, заявленным производителем.

Анализ полученных результатов показывает также наличие существенной корреляционной взаимосвязи между найденными калибровочными коэффициентами для испытуемых гироскопов, поэтому использование предложенной методики независимо от калибруемого средства может дать положительный результат. Необходимо, однако, отметить, что представленные гироскопы являются коммерческими датчиками низкой стоимости и, следовательно, отличаются высоким уровнем шума, который может привести к неточности полученных калибровочных коэффициентов. Хотя считается, что эти наблюдения напрямую не повлияли на основной результат исследования.

Разработанная методика может быть применена при испытаниях создаваемых научно-образовательных наноспутников и использована в учебном процессе при обучении основам испытаний наноспутников и их систем.

Список источников

1. You Z., Bin L., Yu S., Zhang G. Applications of MEMS devices in nanosatellite // 2nd International Conference on Recent Advances in Space Technologies (09–11 June 2005; Istanbul, Turkey), pp. 240–243. DOI: 10.1109/RAST.2005.1512569
2. Борисов М.В., Захаров М.А., Черноморский А.И., Чиркин М.В. Методы определения порога синхронизации встречных волн в малогабаритном лазерном гироскопе // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20. № 5. С. 170–178.
3. Алешин Б.С., Максимов В.Н., Черноморский А.И., Плеханов В.Е. Измерительная комплексная навигационная система одноосного колесного модуля // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т. 19. № 4. С. 120–128.
4. Коломенцев А.И., Якутин А.В. Исследование рабочих процессов в жидкостных ракетных микродвигателях, созданных на базе МЭМС-технологий // Вестник Московского авиационного института. 2010. Т. 17. № 4. С. 90–95.
5. Шаврин В.В., Конаков А.С., Тисленко В.И. Калибровка микроэлектромеханических датчиков ускорений и угловых скоростей в бесплатформенных инерциальных навигационных системах // Доклады ТУСУРа. 2012. № 1(25). Часть 2. С. 265–269.
6. Lee D., Lee S., Park S. and Ko S. Test and Error Parameter Estimation for MEMS — Based Low Cost IMU Calibration // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2011. Vol. 12. No. 4, pp. 597–603. DOI: 10.1007/s12541-011-0077-9
7. Niu X., Li Y., Zhang H. et al. Fast Thermal Calibration of Low-Grade Inertial Sensors and Inertial Measurement Units // Sensors. 2013. Vol. 13. No. 9, pp. 12192–217. DOI: 10.3390/s130912192
8. Ban J., Wang L., Liu Z., Zhang L. Self-calibration method for temperature errors in multi-axis rotational inertial navigation system // Optics Express. 2020. Vol. 28. No. 6. DOI: 10.1364/OE.384905
9. Lyu P., Lai J., Liu J., Nie M. The Compensation Effects of Gyros' Stochastic Errors in a Rotational Inertial Navigation System // Journal of Navigation. 2014. Vol. 67. No. 6, pp. 1069–1088. DOI: 10.1017/S0373463314000319

10. Мелешко В.В., Нестеренко О.И. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы. — Кировоград: ПОЛИМЕД, 2011. — 171 с.
11. Poddar S., Kumar V., Kumar A. A Comprehensive Overview of Inertial Sensor Calibration Techniques // *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*. 2016. Vol. 139. No. 1: 011006. Paper No: DS-16-1027. DOI:10.1115/1.4034419
12. Wang L., Zhang T., Ye L. et al. An Efficient Calibration Method for Triaxial Gyroscope // *IEEE Sensors Journal*. 2017. Vol. 21. No. 18, pp. 19896–19903. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3100589
13. Royo D. Development of a calibration procedure for gyroscopes in CubeSat missions. — Space Engineering, master's level, 2021. — 105 p.
14. Kozlov A., Sazonov I., Vavilova N. IMU calibration on a low grade turntable: Embedded estimation of the instrument displacement from the axis of rotation // 1st International Symposium on Inertial Sensors and Systems (25–26 February 2014; Laguna Beach, CA, USA). DOI:10.1109/ISS.2014.6782525
15. Веремеенко К.К., Желтов С.Ю., Ким Н.В. и др. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / Под ред. М.Н. Красильщикова, Г.Г. Себрякова. — М.: Физматлит, 2009. — 556 с.
16. Осипов А.М., Козорез Д.А., Сыпало К.И. Решение задачи навигационных определений высокоскоростного летательного аппарата // *Вестник Московского авиационного института*. 2011. Т. 18. № 4. С. 5–19.
17. Titterton D., Weston J.L., Weston J. Strapdown Inertial Navigation Technology. — 2nd Edition. — The Institution of Engineering and Technology, 2004. — 576 p.
18. Аврутов В.В. Испытания инерциальных приборов: Учебное пособие. — Киев: КПИ им. Игоря Сикорского, 2016. — 205 с.
19. Zhang R., Höflinger F., Reind L.M. Calibration of an IMU using 3-D rotation platform // *IEEE Sensors Journal*. 2014. Vol. 14. No. 6, pp. 1778–1787. DOI: 10.1109/JSEN.2014.2303642
20. Panchanand J. Inverse kinematic analysis of robot manipulators. — A thesis for the award of the degree of Doctor of Philosophy. — National Institute of Technology Rourkela, India, 2015. — 336 p.
21. Bai S., Lai J., Lyu P. et al. A System-Level Self-Calibration Method for Installation Errors in A Dual-Axis Rotational Inertial Navigation System // *Sensors*. 2019. Vol. 19. No. 18: 4005. DOI: 10.3390/s19184005
- uniaxial wheeled module. *Aerospace MAI Journal*, 2012, vol. 19, no. 4, pp. 120–128.
4. Kolomentsev A.I., Yakutin A.V. Research of working processes in MEMS based liquid microthruster. *Aerospace MAI Journal*, 2010, vol. 17, no. 4, pp. 90–95.
5. Shavrin V.V., Konakov A.S., Tislenko V.I. *Doklady TUSURa*, 2012, no. 1(25). Part 2, pp. 265–269.
6. Lee D., Lee S., Park S. and Ko S. Test and Error Parameter Estimation for MEMS — Based Low Cost IMU Calibration. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2011, vl. 12, no. 4, pp. 597–603. DOI: 10.1007/s12541-011-0077-9
7. Niu X., Li Y., Zhang H. et al. Fast Thermal Calibration of Low-Grade Inertial Sensors and Inertial Measurement Units. *Sensors*, 2013, vol. 13, no. 9, pp. 12192–217. DOI: 10.3390/s130912192
8. Ban J., Wang L., Liu Z., Zhang L. Self-calibration method for temperature errors in multi-axis rotational inertial navigation system. *Optics Express*, 2020, vol. 28, no. 6. DOI: 10.1364/OE.384905
9. Lyu P., Lai J., Liu J., Nie M. The Compensation Effects of Gyros' Stochastic Errors in a Rotational Inertial Navigation System. *Journal of Navigation*, 2014, vol. 67, no. 6, pp. 1069–1088. DOI: 10.1017/S0373463314000319
10. Meleshko V.V., Nesterenko O.I. *Besplatfornennye inertial'nye navigatsionnye sistemy* (Strapdown inertial navigation systems), Kirovograd, Polimed, 2011, 171 p.
11. Poddar S., Kumar V., Kumar A. A Comprehensive Overview of Inertial Sensor Calibration Techniques. *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 2016, vol. 139, no. 1: 011006. Paper No: DS-16-1027. DOI:10.1115/1.4034419
12. Wang L., Zhang T., Ye L. et al. An Efficient Calibration Method for Triaxial Gyroscope. *IEEE Sensors Journal*, 2017, vol. 21, no. 18, pp. 19896–19903. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3100589
13. Royo D. *Development of a calibration procedure for gyroscopes in CubeSat missions*. Space Engineering, master's level, 2021, 105 p.
14. Kozlov A., Sazonov I., Vavilova N. IMU calibration on a low grade turntable: Embedded estimation of the instrument displacement from the axis of rotation. *1st International Symposium on Inertial Sensors and Systems (25–26 February 2014; Laguna Beach, CA, USA)*. DOI:10.1109/ISS.2014.6782525
15. Veremeenko K.K., Zheltov S.Yu., Kim N.V. et al. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii v zadachakh navigatsii i navedeniya bespilotnykh manevrennykh letatel'nykh apparatov* (Modern information technologies in the tasks of navigation and guidance of unmanned maneuverable aircraft), Moscow, Fizmatlit, 2009, 556 p.
16. Osipov A. M., Kozorez D. A., Sypalo K. I. Solution to the problem of high-speed flying vehicle navigation. *Aerospace MAI Journal*, 2011, vol. 18, no 4, pp. 5–19.
17. Titterton D., Weston J.L., Weston J. *Strapdown Inertial Navigation Technology*, 2nd Edition. The Institution of Engineering and Technology, 2004, 576 p.
18. Avrutov V.V. *Ispytaniya inertial'nykh priborov* (Testing of inertial devices), Kiev, KPI im. Igorya Sikorskogo, 2016, 205 p.
19. Zhang R., Höflinger F., Reind L.M. Calibration of an IMU using 3-D rotation platform. *IEEE Sensors Jour-*

References

1. You Z., Bin L., Yu S., Zhang G. Applications of MEMS devices in nanosatellite. *2nd International Conference on Recent Advances in Space Technologies (09–11 June 2005; Istanbul, Turkey)*, pp. 240–243. DOI: 10.1109/RAST.2005.1512569
2. Borisov M.V., Zakharov M.A., Chernomorskii A.I., Chirkin M.V. Methods for determining the synchronization threshold of counter-propagating waves in a small-sized laser gyroscope. *Aerospace MAI Journal*, 2013, vol. 20, no. 5, pp. 170–178.
3. Aleshin B.S., Maximov V.N., Chernomorskii A.I., Plekhanov V.E. Integrated measurement navigation system for

- nal*, 2014, vol. 14, no. 6, pp. 1778–1787. DOI: 10.1109/JSEN.2014.2303642
20. Panchanand J. *Inverse kinematic analysis of robot manipulators*. A thesis for the award of the degree of Doctor of Philosophy. National Institute of Technology Rourkela, India, 2015, 336 p.
21. Bai S., Lai J., Lyu P. et al. A System-Level Self-Calibration Method for Installation Errors in A Dual-Axis Rotational Inertial Navigation System. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 18: 4005. DOI: 10.3390/s19184005

Статья поступила в редакцию 07.12.2022; одобрена после рецензирования 07.02.2023; принята к публикации 10.02.2023.

The article was submitted on 07.12.2022; approved after reviewing on 07.02.2023; accepted for publication on 10.02.2023.