

Научная статья

УДК 51-74

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185644>

EDN: <https://www.elibrary.ru/KOBGMP>

САМОДИАГНОСТИКА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ВЫСОКИМ УРОВНЕМ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

Андрей Валерьевич Седельников¹, Евгений Владимирович Чугунков², Анастасия Сергеевна Танеева³✉

^{1,2,3}Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

¹axe_backdraft@inbox.ru

²chugunkov97@mail.ru

³taneeva.as@yandex.ru✉

Аннотация. В работе представлен процесс реализации самодиагностики информационно-измерительной системы малого космического аппарата, входящей в состав системы управления движением. Повышенный уровень шума измерителей угловой скорости может оказывать существенное влияние на качество решения задач ориентации и стабилизации космического аппарата. В данной работе проведена имитация движения и оценка точностных характеристик измерителей угловой для МКА типа «Аист». Далее проведено моделирование калибровки информационно-измерительной системы с использованием эталонного средства

измерений в виде звёздного датчика. Затем проведена оценка точности определения угловой скорости вращения малого космического аппарата с помощью измерителей угловой скорости. Показана эффективность предлагаемого подхода.

Ключевые слова: самодиагностика, измеритель угловой скорости, задача ориентации, малый космический аппарат, шум средства измерений

Финансирование: Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Проект FSSS-2023-0007).

Для цитирования: Седельников А.В., Чугунков Е.В., Танеева А.С. Самодиагностика информационно-измерительной системы малого космического аппарата с высоким уровнем погрешностей измерителя угловой скорости // Труды МАИ. 2025. № 143. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185644>

Original article

SELF-DIAGNOSIS THE INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM OF A SMALL SPACECRAFT WITH A HIGH LEVEL ERRORS IN THE ANGULAR VELOCITY METER

Andrey V. Sedelnikov¹, Evgeny V. Chugunkov², Anastasia S Taneeva³

^{1,2,3}Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia

¹axe_backdraft@inbox.ru

²chugunkov97@mail.ru

³taneeva.as@yandex.ru✉

Abstract. The problem is to improve the performance of the information measurement and control system included in the on-board motion control system for a small Earth remote sensing spacecraft. As a possible solution to this problem, it is proposed to implement the self-diagnostic process of information-measurement system and control system. The peculiarity of this system is the duplication of measuring instruments operating on different principles of action. Fiber-optic gyroscopes are considered as the main means of measuring the angular velocity vector components of a small spacecraft. Despite all the advantages of using these measuring instruments, they have well-known disadvantages. Thus, the increased noise level of angular velocity meters can have a significant influence on the quality of spacecraft orientation and stabilization solutions. This is especially true for high-precision shooting of space and ground objects. In this work, the angular motion of a small spacecraft and the operation of measuring instruments based on fiber-optic gyroscopes are simulated. Next, the accuracy of the model measurements of the angular velocity vector components of a small spacecraft was evaluated. In the numerical simulation, the main characteristics of a small spacecraft of remote sensing of the Earth type «AIST» were used. After carrying out the model measurements, a calibration simulation of the information-measurement and control system based on the reference measuring instrument was implemented. As such, a star sensor was used in this work. This device has a higher accuracy class than fiber-optic gyroscopes. Then, the noise component of fiber-optic gyroscope measurements was evaluated and removed from the measurement data. This has led to a significant improvement in the accuracy of the angular velocity vector components measurements. This is confirmed by the numerical simulation results

presented in this paper. Thus, the effectiveness of the proposed approach to estimate vector components of angular velocity of small spacecraft was demonstrated. The presented approach can be used to effectively control the angular motion of a small spacecraft when solving a number of target tasks, for example, high-precision remote sensing of the Earth from space.

Keywords: self-diagnosis, angular velocity meter, orientation problem, small spacecraft, noise of measuring instruments

Funding: This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in the framework of the State Assignments to higher education institutions and research organizations in the field of scientific activity (project FSSS-2023-0007).

For citation: Sedelnikov A.V., Chugunkov E.V., Taneeva A.S. Self-diagnosis the information and measurement system of a small spacecraft with a high level errors in the angular velocity meter. *Trudy MAI*. 2025. No. 143. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=185644>

Введение

Проблема повышения точности задач ориентации и стабилизации малых космических аппаратов (МКА) является актуальной из-за возрастающих требований к качеству решения целевых задач. Так, при высокоточной съёмке поверхности Земли разрешение отечественных гиперспектрометров достигает 7 м при наилучших условиях (10 м среднее разрешение) [1-3]. Эксплуатация МКА ИСОИ показала

достижимость этих значений [4, 5]. Однако для эффективного мониторинга объектов указанных размеров точность привязки должна составлять около $0,01^0$. Это накладывает серьёзные ограничения на точность ориентации МКА во время выполнения целевых задач [6, 7]. Другим примером является мониторинг космического мусора на орбите [8, 9]. Как отмечают авторы [10], с ростом загруженности околоземной сред наблюдение на орбите стало критически важным для безопасности МКА. При этом в реальных космических условиях достижение субсантиметрового разрешения 0,005 м на расстоянии наблюдения 100 км может удовлетворить требованиям точного распознавания объектов в различных сценариях [10]. Таким образом, также возникает потребность точной ориентации МКА для обеспечения указанной точности. Одним из путей решения проблемы точной ориентации является использование самодиагностики информационно-измерительной и системы (ИИС), которая содержит избыточное число средств измерений, в том числе, и эталонное средство измерений. Миниатюризация современной космической техники и её элементов позволяет использовать такой подход, критически не увеличивая общую массу МКА [11-13].

Постановка задачи

Рассмотрим работу ИИС, имеющую в своем составе: три ВОГ, оптический солнечный датчик (СД), звездный датчик (ЗД). Исполнительными органами СУД для совершения необходимых программных поворотов (ПП) являются двигатели-маховики (ДМ). Предположим, что для выполнения целевой задачи МКА

необходимо сориентировать и произвести построение ориентации по трём осям. Построение осуществляется с помощью ДМ, используя данные с измерителей угловой скорости и звёздных датчиков [14, 15]. Для выполнения задачи необходимо перейти от связанной системы координат (ССК) в инерциальную систему координат (ИСК), которая является неподвижной относительно звёзд. Для этого по данным со звёздного датчика с помощью ДМ производим первый поворот. На рисунке 1 показана зависимость угловой скорости МКА.

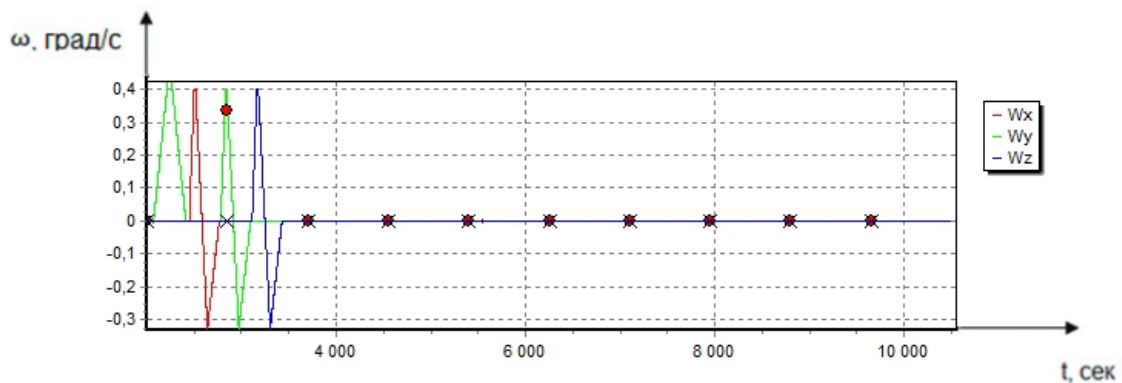


Рисунок 1 – Угловая скорость МКА при построении трёхосной солнечной ориентации

Угловое положение осей ССК относительно ИСК определяется выражением [16]:

$$\bar{I}_{sc} = \Lambda_n \circ \bar{I}_{si} \circ \tilde{\Lambda}_n \quad (1)$$

где: $\bar{I}_{sc}$ - единичный вектор s-ой оси связанной системы координат; $\bar{I}_{si}$ - единичный вектор s-ой оси инерциальной системы координат ($s = x, y, z$); Λ_n - кватернион, описывающий положение связанной системы координат относительно

инерциальной системы координат в момент времени t и обеспечивающий коррекцию; $\tilde{\Lambda}_n$ - сопряжённые кватернион.

Угловая скорость, получаемая при помощи ВОГ определяется как производная от углов Эйлера в связанной системе координат следующим выражением [10]:

$$\begin{aligned}\dot{\theta} &= \omega_{yc} \sin \gamma + \omega_{zc} \cos \gamma + k_{\theta}(\theta^* - \theta) + \int_{t_0}^{t_1} k_{\theta}^I (\theta^* - \theta) dt; \\ \dot{\gamma} &= \omega_{xc} - (\omega_{yc} \cos \gamma - \omega_{zc} \sin \gamma) \operatorname{tg} \theta + k_{\gamma}(\gamma^* - \gamma) + \int_{t_0}^{t_1} k_{\gamma}^I (\gamma^* - \gamma) dt; \\ \dot{\psi} &= \frac{\omega_{yc} \cos \gamma - \omega_{zc} \sin \gamma}{\cos \theta} + k_{\psi}(\psi^* - \psi) + \int_{t_0}^{t_1} k_{\psi}^I (\psi^* - \psi) dt.\end{aligned}\quad (2)$$

где $\vec{\omega}(\omega_{xc}, \omega_{yc}, \omega_{zc})$ – вектор угловой скорости вращения КА и его проекции в связанной системе координат; θ, γ, ψ – оценки углов рыскания, тангажа и крена МКА на основе бортовых измерений; $\theta^*, \gamma^*, \psi^*$ – модельные тригонометрические оценки углов рыскания, тангажа и крена МКА; $k_{\theta}, k_{\gamma}, k_{\psi}$ и $k_{\theta}^I, k_{\gamma}^I, k_{\psi}^I$ – соответственно коэффициенты передачи позиционной и интегральной радиальной коррекции.

Полученные значения с учётом поправок, представленных в системе (1), переводят в ССК координат МКА. Далее используют динамические уравнения Эйлера для анализа вращательного движения МКА с целью оптимального управления им [17, 18]:

$$\begin{cases} I_{xx}\dot{\omega}_x - I_{xy}\dot{\omega}_y - I_{xz}\dot{\omega}_z + \omega_y(I_{zz}\omega_z - I_{xz}\omega_x - I_{yz}\omega_y) - \omega_z(I_{yy}\omega_y - I_{xy}\omega_x - I_{yz}\omega_z) = M_x \\ I_{yy}\dot{\omega}_y - I_{xy}\dot{\omega}_x - I_{yz}\dot{\omega}_z + \omega_z(I_{xx}\omega_x - I_{xy}\omega_y - I_{xz}\omega_z) - \omega_x(I_{zz}\omega_z - I_{xz}\omega_x - I_{yz}\omega_y) = M_y \\ I_{zz}\dot{\omega}_z - I_{xz}\dot{\omega}_x - I_{yz}\dot{\omega}_y + \omega_x(I_{yy}\omega_y - I_{xy}\omega_x - I_{yz}\omega_z) - \omega_y(I_{xx}\omega_x - I_{xy}\omega_y - I_{xz}\omega_z) = M_z \end{cases}, \quad (3)$$

где $\hat{I} = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix}$ – тензор инерции малого космического аппарата в ССК

(рисунок 2); $\vec{\varepsilon}(\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z)$ и $\vec{\omega}(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ – соответственно векторы углового ускорения и угловой скорости вращения МКА вокруг центра масс в связанной системе координат; $\vec{M}(M_x, M_y, M_z)$ – вектор внешнего возмущающего момента, действующего на МКА и его проекции в связанной системе координат.

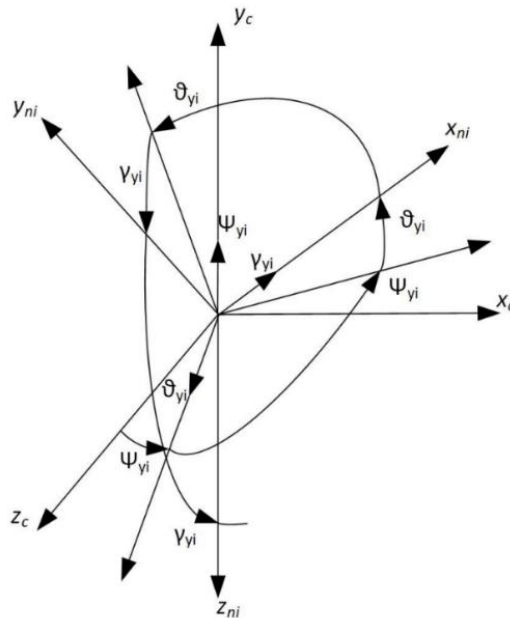


Рисунок 2 – Схема взаимного расположения связанной и приборных систем координат: $x_c y_c z_c$ - связанная система координат; $x_{ni} y_{ni} z_{ni}$ - приборная система координат i -го измерителя угловой скорости (где $i=1,2$) [10]

Для оценки качества выполнения программного поворота используем рассогласование заданной в модели движения МКА угловой скорости и угловой скорости полученной с помощью модели измерителя угловой скорости. На рисунке

3 представлен график рассогласований угловой скорости при описанном выше процессе построения трёхосной ориентации. ω_{cp}

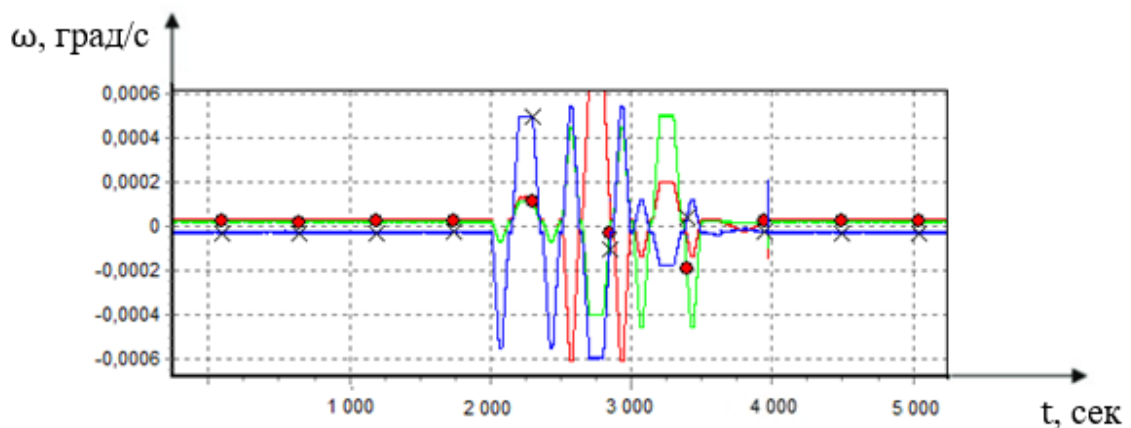


Рисунок 3 – Динамика рассогласования данных по угловой скорости при выполнении трёхосной ориентации

Рассогласование связано с наличием различных погрешностей при измерении угловой скорости. Наиболее значимыми из них являются:

- погрешности масштабного коэффициента;
- постоянной составляющей ошибки измерения проекций вектора угловой скорости (скорости ухода) на осях чувствительности;
- шумовая составляющая ошибки измерения угловой скорости.

Для улучшения точностных характеристик прибора используем калибровку. Результатом калибровки является выявление постоянных составляющих ошибки измерения угловой скорости и погрешности масштабного коэффициента [19, 20]. Для этого производим эталонные испытания, выбрав в качестве эталонного средства измерений звёздный датчик, который имеет более высокий класс точности, чем

измерители угловой скорости. Аппроксимация измерений по трём осям показана на рисунках 4-6.

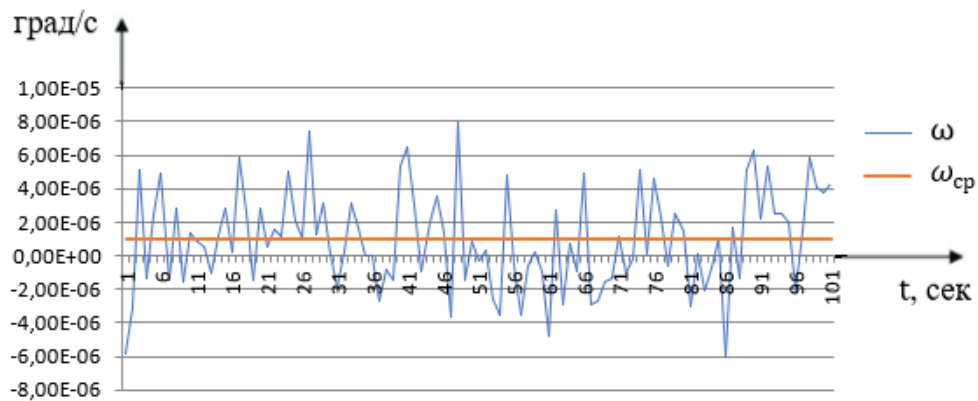


Рисунок 4 – Данные измерений угловой скорости с помощью ВОГ по оси x:

1 ряд – аппроксимация измерений угловой скорости; 2 ряд – среднее значение угловой скорости

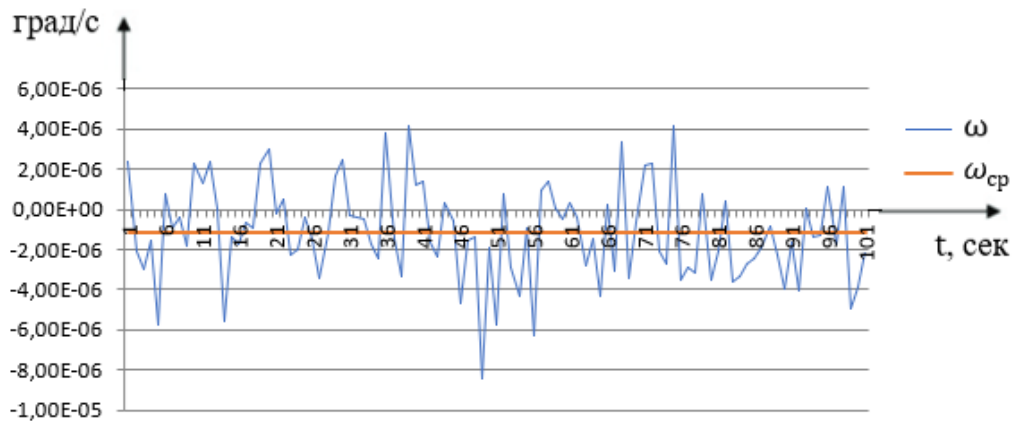


Рисунок 5 – Данные измерений угловой скорости с помощью ВОГ по оси y:

1 ряд – аппроксимация измерений угловой скорости; 2 ряд – среднее значение угловой скорости

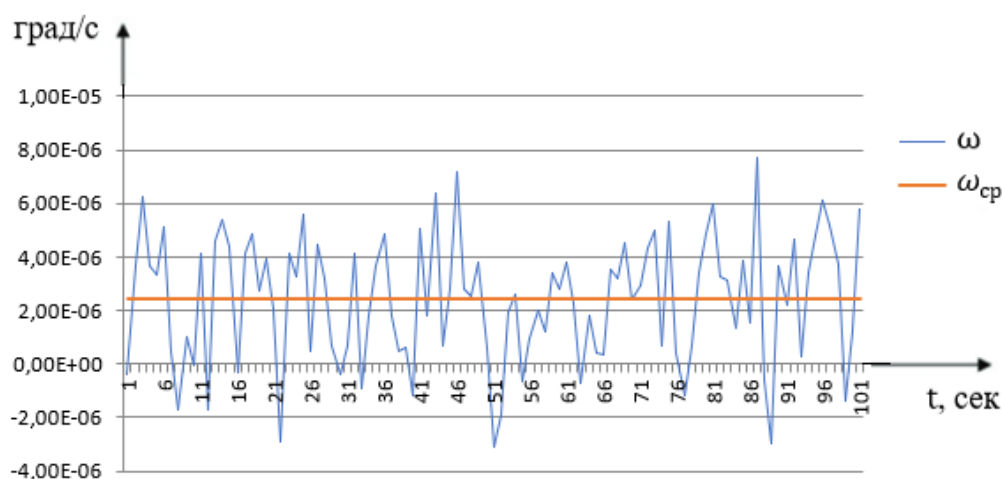


Рисунок 6 – Данные измерений угловой скорости с помощью ВОГ по оси z:

1 ряд – аппроксимация измерений угловой скорости; 2 ряд – среднее значение угловой скорости

Для последующего этапа калибровки осуществляем расчёт масштабного коэффициента (МК) по следующему выражению.

$$K_{МК} = \frac{\omega_{\text{эталон}}}{\omega_{\text{изм}}} . \quad (4)$$

где $K_{МК}$ – масштабный коэффициент; $\omega_{\text{эталон}}$ – эталонные значения угловой скорости; $\omega_{\text{изм}}$ – измеренные значения угловой скорости.

В качестве эталонного значения угловой скорости используем данные, полученные при помощи ЗД. Определение угловой скорости по ЗД описывается формулой ниже:

$$\begin{aligned} \omega_{3Д_x}^{\text{ССК}} &= f(\Delta t_x, \Lambda_{АД_x}^H, \Lambda_{АД_x}^K) \\ \omega_{3Д_y}^{\text{ССК}} &= f(\Delta t_y, \Lambda_{АД_y}^H, \Lambda_{АД_y}^K), \\ \omega_{3Д_z}^{\text{ССК}} &= f(\Delta t_z, \Lambda_{АД_z}^H, \Lambda_{АД_z}^K) \end{aligned} \quad (5)$$

,

где $\omega_{3Д_{x,y,z}}^{ССК}$ – угловая скорость с 3Д по осям x, y, z в связанной системе координат;
 $\Lambda_{АД_{x,y,z}}^n$ – начальный (текущий) кватернион по осям x, y, z ; $\Lambda_{АД_{x,y,z}}^k$ – конечный кватернион по осям x, y, z ; Δt – изменения времени.

Зависимость кватернионов от времени на участке измерений показана на рисунке 7.

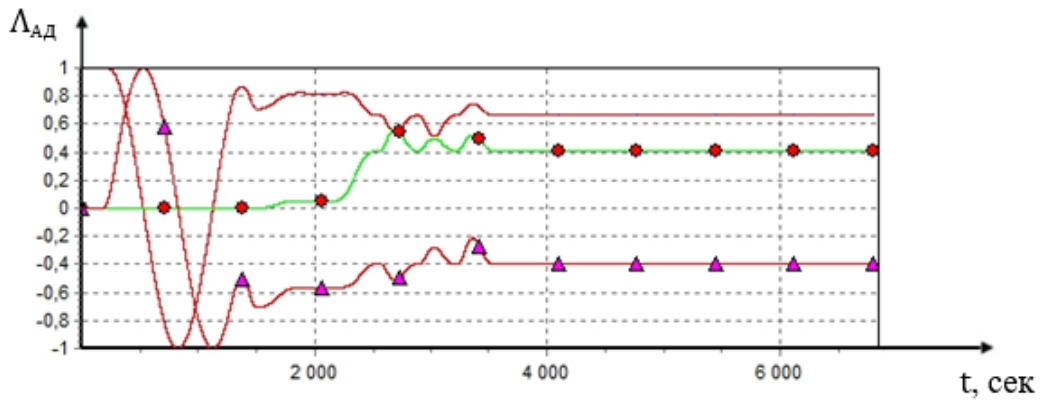


Рисунок 7 – Динамика изменения кватернионов по осям ССК

Далее рассчитываем проекции средней угловой скорости на оси чувствительности измерителей угловой скорости по данным со звёздного датчика:

$$\begin{aligned}\omega_{3Д_x}^{ОЧ} &= M_{ССК \leftarrow ГИУС} \cdot \omega_{АД_x}^{ССК} \\ \omega_{3Д_y}^{ОЧ} &= M_{ССК \leftarrow ГИУС} \cdot \omega_{АД_y}^{ССК}, \\ \omega_{3Д_z}^{ОЧ} &= M_{ССК \leftarrow ГИУС} \cdot \omega_{АД_z}^{ССК}\end{aligned}\tag{6}$$

где $M_{ССК \leftarrow ГИУС}$ матрица перехода от ССК к осям чувствительности ВОГ; $\omega_{3Д_{x,y,z}}^{ССК}$ – угловая скорость с 3Д по осям x, y, z в связанной системе координат; $\omega_{3Д_{x,y,z}}^{ОЧ}$ – угловая скорость с 3Д по осям x, y, z в связанной системе координат.

Затем рассчитываются проекции средней угловой скорости по информации с ОИУС на оси чувствительности за времена $\Delta t_x, \Delta t_y, \Delta t_z$:

$$\begin{aligned}
\omega_{\text{ОИУС}_x}^{\text{ОЧ}} &= \frac{I_{\text{ОИУС}_x}^{\text{ОЧ}_K} - I_{\text{ОИУС}_x}^{\text{ОЧ}_H}}{\Delta t_x} \\
\omega_{\text{ОИУС}_y}^{\text{ОЧ}} &= \frac{I_{\text{ОИУС}_y}^{\text{ОЧ}_K} - I_{\text{ОИУС}_y}^{\text{ОЧ}_H}}{\Delta t_y} \\
\omega_{\text{ОИУС}_z}^{\text{ОЧ}} &= \frac{I_{\text{ОИУС}_z}^{\text{ОЧ}_K} - I_{\text{ОИУС}_z}^{\text{ОЧ}_H}}{\Delta t_z}
\end{aligned} \tag{7}$$

Далее оцениваются величины рассогласования проекций средних угловых скоростей на оси чувствительности по информации АД и ОИУС:

$$\begin{aligned}
\Delta \omega_x &= \omega_{\text{ОИУС}_x}^{\text{ОЧ}} - \omega_{\text{АД}_x}^{\text{ОЧ}} \\
\Delta \omega_y &= \omega_{\text{ОИУС}_y}^{\text{ОЧ}} - \omega_{\text{АД}_y}^{\text{ОЧ}} \\
\Delta \omega_z &= \omega_{\text{ОИУС}_z}^{\text{ОЧ}} - \omega_{\text{АД}_z}^{\text{ОЧ}}
\end{aligned} \tag{8}$$

Далее рассчитываются дополнительные переменные для калибровки:

$$\begin{aligned}
\Delta xy(i) &= \frac{\Delta \omega_x(i) - \omega_{yx}^{\text{ОЧ}}(i)}{\omega_{\text{АД}_x}^{\text{ССК}}(1)} + \frac{\Delta \omega_y(i) - \omega_{yx}^{\text{ОЧ}}(i)}{\omega_{\text{АД}_y}^{\text{ССК}}(2) \cos(\beta_{\text{ИУС}}^K(i))} \sin(\alpha_{\text{ИУС}}^K(i)) \sin(\beta_{\text{ИУС}}^K(i)) \\
\Delta zy(i) &= \frac{\Delta \omega_z(i) - \omega_{yz}^{\text{ОЧ}}(i)}{\omega_{\text{АД}_z}^{\text{ССК}}(3)} + \frac{\Delta \omega_y(i) - \omega_{yx}^{\text{ОЧ}}(i)}{\omega_{\text{АД}_y}^{\text{ССК}}(2) \cos(\beta_{\text{ИУС}}^K(i))} \sin(\alpha_{\text{ИУС}}^K(i)) \sin(\beta_{\text{ИУС}}^K(i))
\end{aligned} \tag{9}$$

Производим расчёт результатов калибровки:

$$\begin{aligned}
\delta \alpha_{\text{ИУС}}(i) &= \frac{\Delta xy(i) \cos(\alpha_{\text{ИУС}}^K(i)) - \Delta zy(i) \sin(\alpha_{\text{ИУС}}^K(i))}{\cos(\beta_{\text{ИУС}}^K(i))} \\
\delta k_{\text{ИУС}}(i) &= \frac{\Delta xy(i) \sin(\alpha_{\text{ИУС}}^K(i)) + \Delta zy(i) \cos(\alpha_{\text{ИУС}}^K(i))}{\cos(\beta_{\text{ИУС}}^K(i))} + \sin(\beta_{\text{ИУС}}^K(i)) \operatorname{tg}(\beta_{\text{ИУС}}^K(i)), \\
\delta \beta_{\text{ИУС}}(i) &= \frac{\Delta \omega_y(i) - \omega_{yx}^{\text{ОЧ}}(i)}{\omega_{\text{пз}}^{\text{ССК}}(3) \cos(\beta_{\text{ИУС}}^K(i))} - \operatorname{tg}(\beta_{\text{ИУС}}^K(i)) \delta k_{\text{ИУС}}(i)
\end{aligned} \tag{10}$$

где $\delta \alpha_{\text{ИУС}}(i)$, $\delta \beta_{\text{ИУС}}(i)$ – погрешности углов, определяющих положение чувствительных осей ВОГ в ССК (рисунок 8).

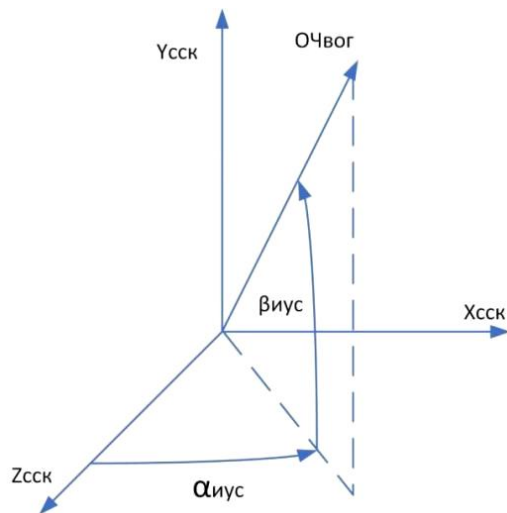


Рисунок 8 – Положение оси чувствительности ВОГ в ССК

Используя (6), можно оценить масштабные коэффициенты по формуле (4).

Результаты представлены на рисунках 9-11.

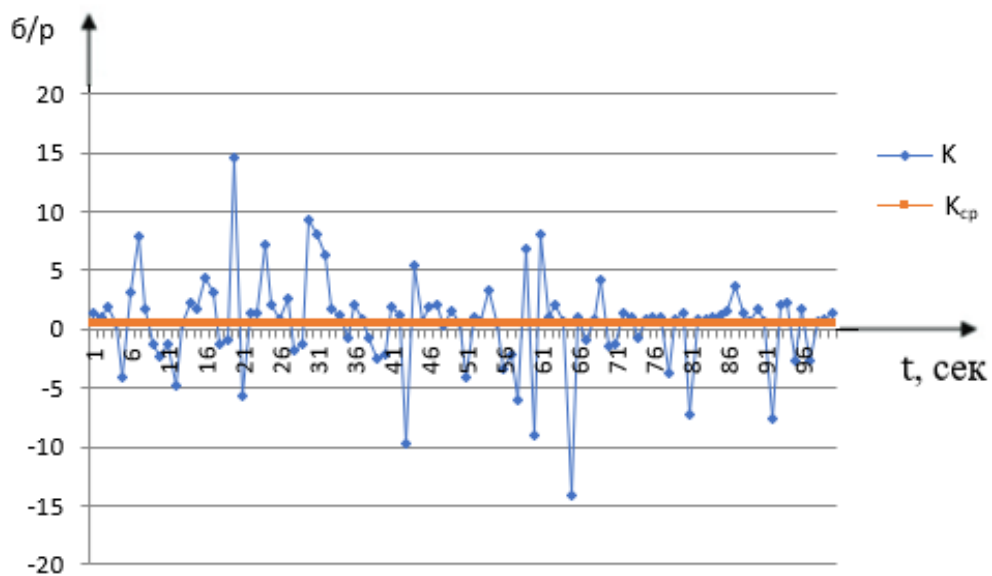


Рисунок 9 – Масштабный коэффициент для ω_x

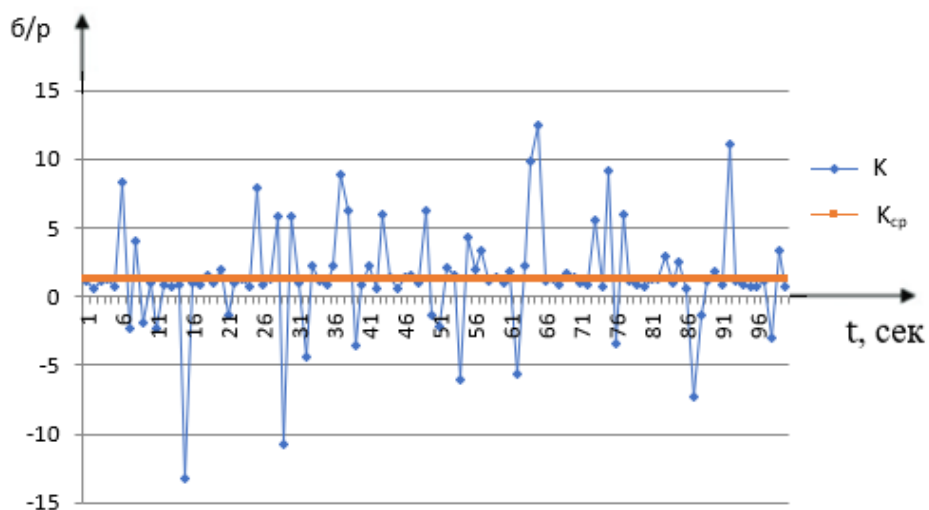


Рисунок 10 – Масштабный коэффициент для ω_y

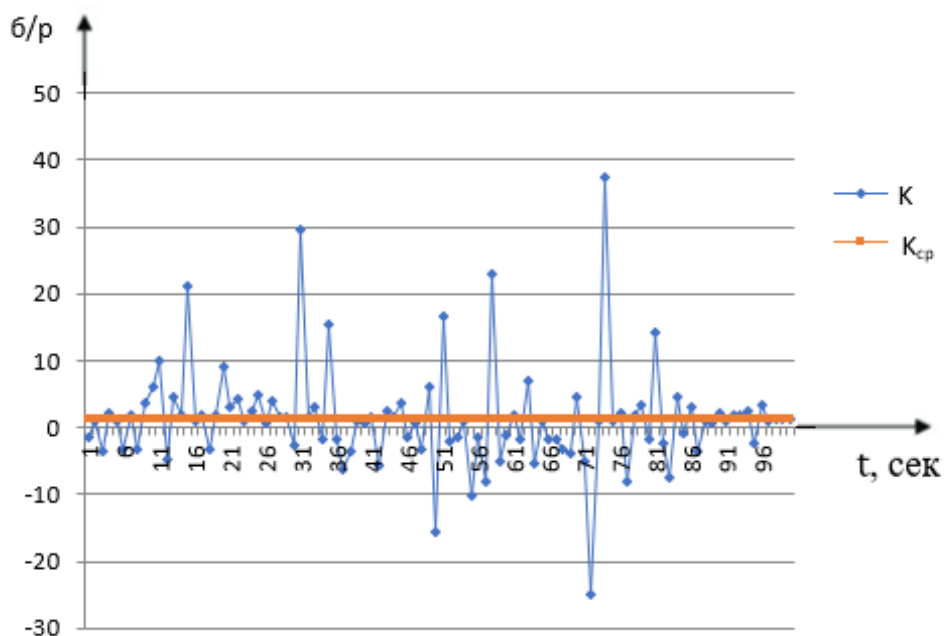


Рисунок 11 – Масштабный коэффициент для ω_z

Оценка масштабного коэффициента и углового положения происходит по исходным данным, сформированным при проведении программных поворотов в целях калибровки измерителей угловой скорости. На рисунке 12 представлен график моделирования процесса калибровки. На начальном этапе (до $t=7000\text{с}$)

производим оценку угловой скорости КА в ориентации по трём осям, затем (от $t=7000\text{с}$ до $t=8500\text{с}$) проводим программные повороты для дополнительной оценки рассогласования угловой скорости и точности углового положения. Затем осуществляем стабилизацию МКА для завершения переходных процессов после программного поворота. Далее (от $t=9300\text{с}$ до $t=11100\text{с}$) производим программный поворот с калибровкой канала измерения угловой скорости с наибольшим рассогласованием измеренной угловой скорости (в данном случае канал Z). После чего возвращаем МКА в первоначальное положение и осуществляем последующее применение результатов калибровки. Все программные повороты производим при помощи двигателей маховиков.

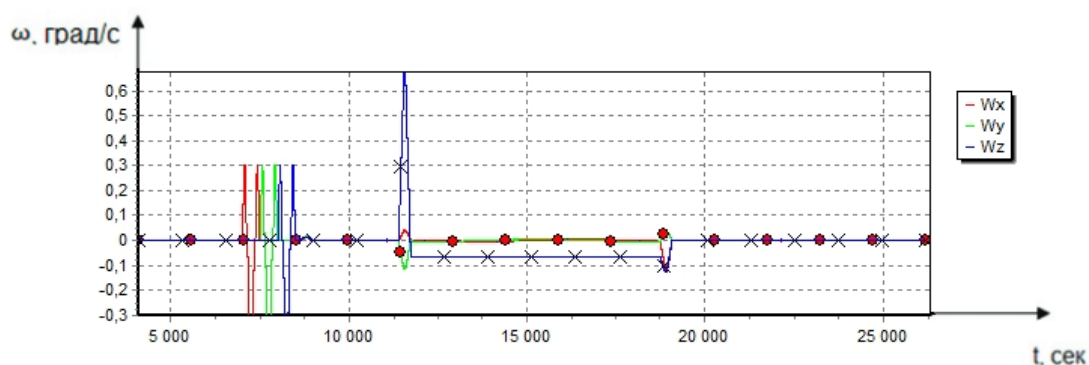


Рисунок 12 – Динамика изменения угловой скорости МКА при проведении калибровки измерителей угловой скорости

На рисунке 13 представлен график рассогласования между измерениями угловой скорости и её эталонной моделью после проведения калибровки.

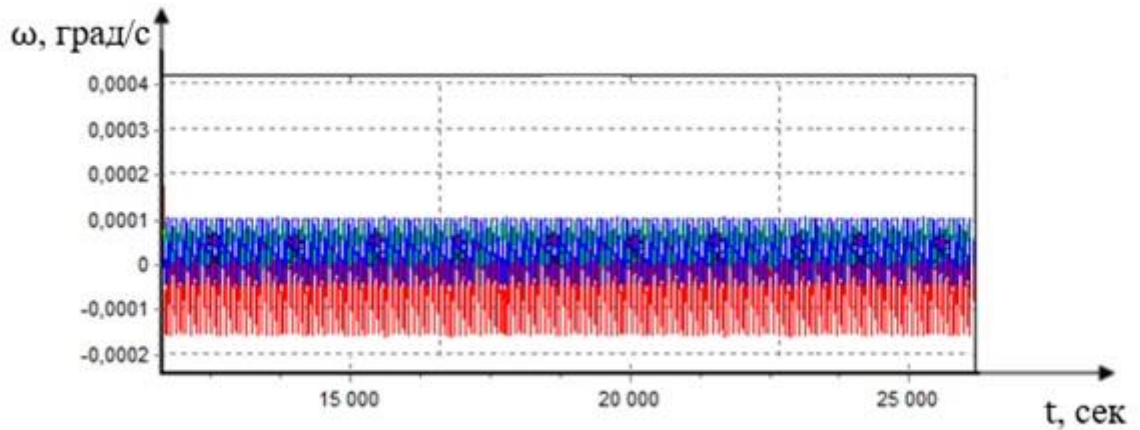


Рисунок 13 – Разность данных по скоростям с измерителя угловой скорости и из модели движения МКА после проведения калибровки измерителей угловой скорости

Однако данный метод является не полным по причине отсутствия оценки шумов средств измерений. Как показывают исследования [8], шумовая составляющая измерений компонентов вектора угловой скорости способна привести к ухудшению качества управления МКА. Оценку шума производим путём расчёта математического ожидания и дисперсии измеренных проекций абсолютной угловой скорости МКА на оси чувствительности используемых ВОГ:

$$\begin{aligned}
 M_{i1}^{\omega} &= D_{i1}^{\omega} = 0 \\
 M_{i2}^{\omega} &= \frac{\omega_{i1} + \omega_{i2}}{2} \\
 M_{in}^{\omega} &= \frac{n-1}{n} M_{i(n-1)}^{\omega} + \frac{\omega_{in}}{n}, \\
 D_{i2}^{\omega} &= (\omega_{i2} - M_{i2}^{\omega})^2, \\
 \overline{D}_{in}^{\omega} &= \frac{n-1}{n} \overline{D}_{i(n-1)}^{\omega} + \frac{D_{in}^{\omega}}{n} \\
 D_{in}^{\omega} &= (\omega_{in} - M_{in}^{\omega})^2
 \end{aligned} \tag{11}$$

где $i = x, y, z$, а $n = 3, 4, 5, \dots$

Оценка шумовой составляющей и удаление её из данных измерений приводит к существенному улучшению точности измерений компонентов вектора угловой скорости (рисунок 14).

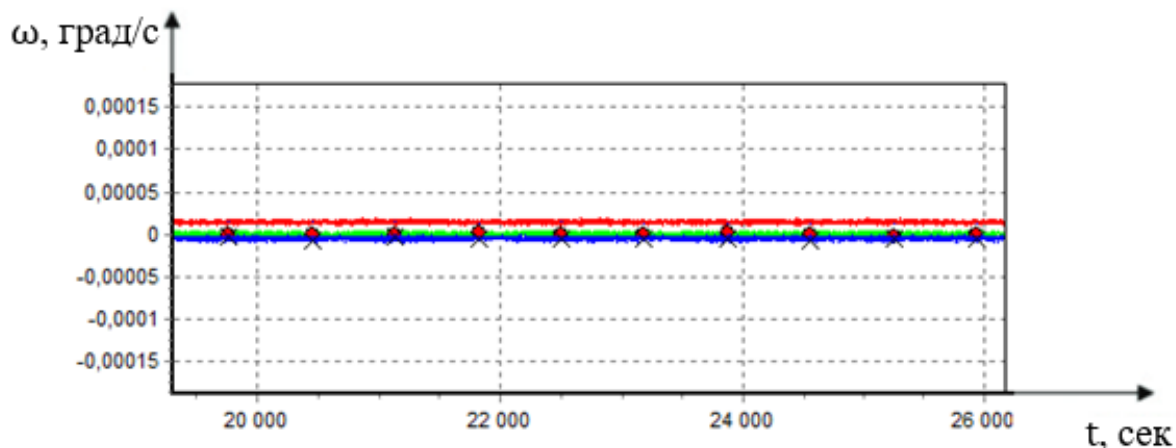


Рисунок 14 – Разность данных по скоростям с измерителя угловой скорости и из модели движения МКА после проведения калибровки измерителей угловой скорости после удаления шумовой составляющей

Таким образом, оценку шумов измерителей угловой скорости следует проводить для более точного определения угловой скорости и снижения ошибок ориентации МКА.

Заключение.

В ходе проведённых исследований было произведено моделирование процесса самодиагностики ИИС с проведением последующей калибровки и удаления шумовой составляющей на примере модельного движения МКА типа «Аист-2Д». В результате модельной реализации процесса самодиагностики удалось уменьшить рассогласования угловых скоростей с 0,006 до 0,00001. Таким образом проведенная работа показывает эффективность предложенного подхода в процессе эксплуатации

МКА. Его использование позволит увеличить эффективность выполнения целевых задач МКА.

Список источников

1. Хонина С.Н., Порфирьев А.П., Хорин П.А. и др. Многопорядковые оптические пространственные вихревые фильтры для одновременного выделения контуров различных частей объекта // Компьютерная оптика. 2024. Т. 48, № 4. С. 525-534.
2. Firsov N.A., Podlipnov V.V., Ivliev N.A. etc. Ensembles of spectral-spatial convolutional neural network models for classifying soil types in hyperspectral images // Computer Optics. 2023. Vol. 47, Issue 5. No. 5. P. 795-805. DOI: [10.18287/2412-6179-CO-1260](https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1260)
3. Hamza M., Skidanov R., Podlipnov V. Visualization of Subcutaneous Blood Vessels Based on Hyperspectral Imaging and Three-Wavelength Index Images // Sensors (Switzerland). 2023. Vol. 23, Issue 21. No. 21. DOI: [10.3390/s23218895](https://doi.org/10.3390/s23218895)
4. Ivliev N., Podlipnov V., Petrov M. etc. 3U CubeSat-Based Hyperspectral Remote Sensing by Offner Imaging Hyperspectrometer with Radially-Fastened Primary Elements // Sensors (Switzerland). 2024. Vol. 24, Issue 9. No. 9. DOI: [10.3390/s24092885](https://doi.org/10.3390/s24092885)
5. Седельников А.В., Скиданов Р.В., Браткова М.Е., Хнырева Е.С., Маслова У.В., Иванушкин М.А., Морданов М.Р. Реконструкция вращательного движения малого космического аппарата дистанционного зондирования Земли ИСОИ (SXC3-219) по данным бортовых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21, № 5. С. 75-82.

6. Sedelnikov A., Skidanov R., Taneeva A. etc. Investigation of the Applicability of the Boer Formula for Estimating the Angular Velocity of Rotation Of a Small Spacecraft by Measuring the Components of The Induction Vector of the Earth's Magnetic Field in Evaluating Micro-Accelerations and Forming Control Laws // Microgravity Science and Technology. 2024. Vol. 36, Issue 6. No. 6. DOI: [10.21203/rs.3.rs-4665280/v1](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4665280/v1)
7. Седельников А.В., Чугунков Е.В., Танеева А.С. и др. Моделирование управления движением космического аппарата на участке построения солнечной ориентации на основе измерительных данных // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2023. № 12. С. 1-7. DOI: 10.25791/pribor.12.2023.1457
8. Ледков А.С. Динамика и управление цилиндрическим космическим мусором при бесконтактной транспортировке ионным потоком // Труды МАИ. 2023. № 131. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=175910&eng=N>
9. Пикалов Р.С., Юдинцев В.В. Обзор и выбор средств увода крупногабаритного космического мусора // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=93299>
10. Shen R., Zhang J., Dong L., Zheng Z., Hu H. Analysis of Observation Modes for Space-Based Inverse Synthetic Aperture Lidar Based on Target Characteristics // Aerospace. 2025. Vol. 12, Issue 3. No. 236. DOI: [10.3390/aerospace12030236](https://doi.org/10.3390/aerospace12030236)
11. Белый Р.В., Мовляв А.С. Анализ перспективных технологий миниатюризации космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Вопросы электромеханики // Труды ВНИИЭМ. 2020. Т. 179, № 6. С. 23-27.

12. Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Построение миниатюрной антенной системы малых и сверхмалых космических аппаратов // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=93414>
13. Сенцов А.А., Коротков В.А., Иванов С.А., Турнецкая Е.Л. Математическое моделирование бесплатформенной инерциальной навигационной системы для бортовых радиолокационных станций // Труды МАИ. 2023. № 131. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=175926>. DOI: [10.34759/trd-2023-131-20](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-20)
14. Ахметов Р.Н., Соллогуб А.В., Макаров В.П., Головченко А.А., Филатов А.В. Повышение точности ориентации космических аппаратов мониторинга Земли в полёте // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (Национального исследовательского университета). 2012. № 4 (35). С. 29-37.
15. Sedelnikov A.V., Filippov A.S., Gorozhakina A.S. Evaluation of calibration accuracy of magnetometer sensors of Aist small spacecraft // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1015, P. 032045. DOI: [10.1088/1742-6596/1015/3/032045](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1015/3/032045)
16. Аншаков Г.П., Белоусов А.И., Седельников А.В. и др. Исследование влияния целевой и обеспечивающей аппаратуры на работу датчиков магнитометра КА «ФОТОН–М» № 2 // Известия вузов. Авиационная техника. 2019. № 4. С. 43–47.
17. Овчинников М.Ю., Пеньков В.И., Ролдугин Д.С. и др. Магнитные системы ориентации малых спутников. - М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2016. - 366 с.
18. Sedelnikov A.V., Taneeva A.S., Khnyryova E.S., Kamaletdinova M.V., Martynova E.D. Investigation of the rotational motion stability of the AIST small spacecraft prototype

according to the measurements of the Earth's magnetic field // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1901, P. 012022. DOI: [10.1088/1742-6596/1901/1/012022](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1901/1/012022)

19. Цветков Э.И., Сулоева Е.С. Метрологические испытания средств измерений. - СПб.: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2019. - 224 с.

20. Седельников А.В., Чугунков Е.В., Манукян Л.А., Танеева А.С., Сердакова В.В., Евтушенко М.А. Оценка погрешности определения угловой скорости вращения опытного образца малого космического аппарата «Аист» с помощью магнитометров // Авиакосмическое приборостроение. 2024. № 6. С. 26–33.

References

1. Khonina S.N., Porfir'ev A.P., Khorin P.A. et. al Multiorder optical spatial vortex filters for simultaneous selection of the contours of different parts of the object. *Komp'yuternaya optika*. 2024. Vol. 48, No. 4. P. 525-534. (In Russ.)

2. Firsov N.A., Podlipnov V.V., Ivliev N.A. etc. Ensembles of spectral-spatial convolutional neural network models for classifying soil types in hyperspectral images. *Computer Optics*. 2023. Vol. 47, Issue 5. No. 5. P. 795-805. DOI: [10.18287/2412-6179-CO-1260](https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1260)

3. Hamza M., Skidanov R., Podlipnov V. Visualization of Subcutaneous Blood Vessels Based on Hyperspectral Imaging and Three-Wavelength Index Images // *Sensors (Switzerland)*. 2023. Vol. 23, Issue 21. No. 21. DOI: [10.3390/s23218895](https://doi.org/10.3390/s23218895)

4. Ivliev N., Podlipnov V., Petrov M. etc. 3U CubeSat-Based Hyperspectral Remote Sensing by Offner Imaging Hyperspectrometer with Radially-Fastened Primary Elements // *Sensors (Switzerland)*. 2024. Vol. 24, Issue 9. No. 9. DOI: [10.3390/s24092885](https://doi.org/10.3390/s24092885)

5. Sedel'nikov A.V., Skidanov R.V., Bratkova M.E., Khnyreva E.S., Maslova U.V., Ivanushkin M.A., Mordanov M.R. Reconstruction of rotational motion of the ISOI (SXC3-219) small spacecraft for Earth remote sensing from onboard measurements. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2024. Vol. 21, No. 5. P. 75-82. (In Russ.)
6. Sedelnikov A., Skidanov R., Taneeva A. etc. Investigation of the Applicability of the Boer Formula for Estimating the Angular Velocity of Rotation Of a Small Spacecraft by Measuring the Components of The Induction Vector of the Earth's Magnetic Field in Evaluating Micro-Accelerations and Forming Control Laws. *Microgravity Science and Technology*. 2024. Vol. 36, Issue 6. No. 6. DOI: [10.21203/rs.3.rs-4665280/v1](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4665280/v1)
7. Sedel'nikov A.V., Chugunkov E.V., Taneeva A.S. et al. Modeling of spacecraft motion control during solar orientation based on measurement data. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*. 2023. No. 12. P. 1-7. (In Russ.). DOI: [10.25791/pribor.12.2023.1457](https://doi.org/10.25791/pribor.12.2023.1457)
8. Ledkov A.S. Dynamics and control of cylindrical space debris during contactless ion beam assisted transportation. *Trudy MAI*. 2023. No. 131. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=175910&eng=N>
9. Pikalov R.S., Yudintsev V.V. Bulky space debris removal means review and selection. *Trudy MAI*. 2018. No. 100. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=93299>
10. Shen R., Zhang J., Dong L., Zheng Z., Hu H. Analysis of Observation Modes for Space-Based Inverse Synthetic Aperture Lidar Based on Target Characteristics. *Aerospace*. 2025. Vol. 12, Issue 3. No. 236. DOI: [10.3390/aerospace12030236](https://doi.org/10.3390/aerospace12030236)

11. Belyi R.V., Movlyav A.S. Analysis of Advanced Technologies for Miniaturization of Earth Remote Sensing Spacecraft Voprosy elektromekhaniki. *Trudy VNIEM*. 2020. Vol. 179, No. 6. P. 23-27. (In Russ.)
12. Generalov A.G., Gadzhiev E.V. Developing Miniature Antenna System for Small and Microsatellites. *Trudy MAI*. 2018. No. 100. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=93414>
13. Sentsov A.A., Korotkov V.A., Ivanov S.A., Turnetskaya E.L. Mathematical modeling of a free form inertial navigation system for airborne radar stations. *Trudy MAI*. 2023. No. 131. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=175926>. DOI: [10.34759/trd-2023-131-20](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-20)
14. Akhmetov R.N., Sollogub A.V., Makarov V.P., Golovchenko A.A., Filatov A.V. Improving the accuracy of orientation of Earth monitoring spacecraft in flight. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroleva (Natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta)*. 2012. No. 4 (35). P. 29-37. (In Russ.)
15. Sedelnikov A.V., Filippov A.S., Gorozhakina A.S. Evaluation of calibration accuracy of magnetometer sensors of Aist small spacecraft. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1015, P. 032045. DOI: [10.1088/1742-6596/1015/3/032045](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1015/3/032045)
16. Anshakov G.P., Belousov A.I., Sedel'nikov A.V. et al. Research of the Influence of Target and Supporting Equipment on the Operation of the Magnetometer Sensors of the Foton-M Spacecraft No. 2. *Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika*. 2019. No. 4. P. 43–47. (In Russ.)

17. Ovchinnikov M.YU., Pen'kov V.I., Roldugin D.S. et al. *Magnitnye sistemy orientatsii malykh sputnikov* (Magnetic Orientation Systems for Small Satellites). Moscow: IPM im. M.V. Keldysha Publ., 2016. 366 p.
18. Sedelnikov A.V., Taneeva A.S., Khnyryova E.S., Kamaletdinova M.V., Martynova E.D. Investigation of the rotational motion stability of the AIST small spacecraft prototype according to the measurements of the Earth's magnetic field. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1901, P. 012022. DOI: [10.1088/1742-6596/1901/1/012022](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1901/1/012022)
19. Tsvetkov E.I., Suloeva E.S. *Metrologicheskie ispytaniya sredstv izmerenii* (Metrological Testing of Measuring Instruments). Saint Petersburg: Izdatel'stvo SPbGETU «LETI» Publ., 2019. 224 p.
20. Sedel'nikov A.V., Chugunkov E.V., Manukyan L.A., Taneeva A.S., Serdakova V.V., Evtushenko M.A. Estimation of the Error in Determining the Angular Velocity of the Rotational Motion of the Prototype of the Small Spacecraft "Aist" Using Magnetometers. *Aviakosmicheskoe priborostroenie*. 2024. No. 6. P. 26–33. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 13.05.2025

Одобрена после рецензирования 15.06.2025

Принята к публикации 25.08.2025

The article was submitted on 13.05.2025; approved after reviewing on 15.06.2025; accepted for publication on 25.08.2025