

Исследование устойчивости алгоритма управления -Bdot на примере малого космического аппарата дистанционного зондирования Земли SXC3-219 по данным прямых бортовых измерений компонент вектора угловой скорости

Е. С. Хнырева

Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С. П. Королева, Самара, 443086, Россия
E-mail: khnyryova@gmail.com

Вопросы устойчивости управления движением космического аппарата существенным образом влияют на эффективность выполнения им целевых задач. Особенно это касается проведения съёмок высокого разрешения. Известные алгоритмы управления являются теоретически устойчивыми. Однако из-за различных погрешностей работы реальных исполнительных органов и средств измерений сходимость этих алгоритмов может быть ниже теоретической. Одним из широко применяемых алгоритмов для малых космических аппаратов представляется -Bdot. Для его реализации требуются магнитные исполнительные органы, которые при своей работе не используют рабочее тело. Проводится анализ устойчивости управляемого движения малого космического аппарата дистанционного зондирования Земли SXC3-219 с целью повышения эффективности выполнения им целевых задач. Исследуется устойчивость алгоритма управления -Bdot на участке снижения угловой скорости магнитными исполнительными органами. Применяется классический метод функции Ляпунова. Для исследования используются данные измерений компонент угловой скорости SXC3-219 с помощью многофункционального устройства iNEMO inertial module LSM9DS1. Это устройство входило в состав информационно-измерительной системы. Результаты работы могут быть использованы для совершенствования алгоритмов управления малыми космическими аппаратами с целью повышения эффективности выполнения задач дистанционного зондирования.

Ключевые слова: устойчивость движения, алгоритм управления -Bdot, малый космический аппарат дистанционного зондирования Земли, функция Ляпунова, угловое движение

Одобрена к печати: 17.03.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-3-88-95

Введение

Алгоритмы управления движением малого космического аппарата (МКА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) существенно влияют на качество полученных изображений (Овчинников и др., 2016; Akhmetov et al., 2023; Sedelnikov et al., 2023a). В настоящее время сформулированы жёсткие требования к ориентации МКА ДЗЗ при выполнении ими целе-

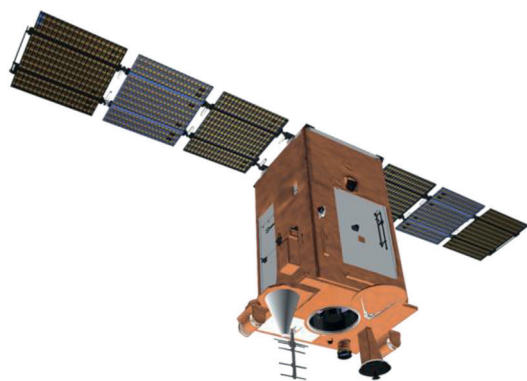


Рис. 1. Внешний вид МКА ДЗЗ «Аист-2Д» (Sedelnikov et al., 2023b)

вых задач (Abrashkin et al., 2019; Kazanskiy et al., 2020; Sedelnikov, 2022). Так, для МКА «Аист-2Д» (рис. 1 (Sedelnikov et al., 2023b)) точность в режиме трёхосной ориентации в орбитальной системе координат должна составлять 3 угл. мин (Кирилин и др., 2017). В режиме стабилизации точность по угловой скорости для этого же МКА обозначена в пределах 0,0002 град/с (Кирилин и др., 2017). Эти требования повышаются при выполнении высокоточной съёмки (Chen, 2022; Sedelnikov, 2020a; Shu et al., 2017). Поэтому устойчивость реализуемых алгоритмов управления важна при выполнении задач ДЗЗ из космоса.

Теоретическая устойчивость известных алгоритмов хорошо исследована и не вызывает сомнений (Klyushin et al., 2024; Li, 2017; Sedelnikov et al., 2021). Однако с учётом неопределённостей оценки параметров (Nikolaeva et al., 2025; Zhu et al., 2024) и различного рода погрешностей (Fu et al., 2023; Jamshidi, Mirzaei, 2024; Sedelnikov et al., 2024a) практическая ценность работ по исследованию устойчивости алгоритмов управления по-прежнему высока.

В настоящей работе рассматривается участок снижения угловой скорости вращения МКА ДЗЗ SXC3-219 (Ivliev et al., 2022, 2024; Sedelnikov et al., 2024b) при помощи магнитных исполнительных органов. На данном участке они работали по известному алгоритму управления -Bdot (Ovchinnikov et al., 2018; Roldugin, Ovchinnikov, 2025; Sedelnikov et al., 2024b). Цель работы — подтверждение устойчивости алгоритма управления -Bdot с учётом неопределённостей работы реальных исполнительных органов и погрешностей средств измерений МКА ДЗЗ SXC3-219.

Материалы и методы

Малый космический аппарат ДЗЗ SXC3-219 был запущен 09.08.2022 (рис. 2, <https://sputnix.ru/ru/sputniki/na-orbite/sxc3-219-iso1>). Для измерений угловой скорости вращения МКА использовалось многофункциональное устройство iNEMO inertial module LSM9DS1 (<https://www.st.com/resource/en/datasheet/lsm9ds1.pdf>). Оно включало в себя следующие средства измерений: трёхкомпонентный акселерометр, гироскопический измеритель вектора угловой скорости и трёхкомпонентный магнитометр.

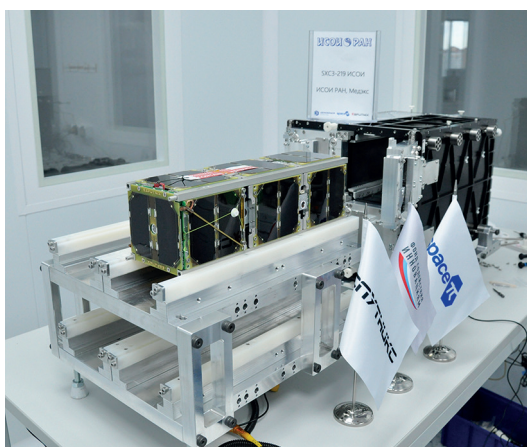


Рис. 2. Внешний вид МКА ДЗЗ SXC3-219 ИСОИ (<https://sputnix.ru/ru/sputniki/na-orbite/sxc3-219-iso1>)

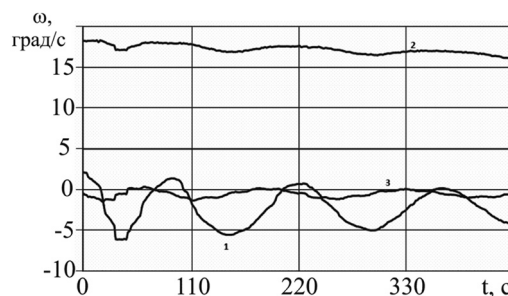


Рис. 3. Динамика компонент вектора угловой скорости по данным измерений 25.09.2023 с 12:30:31 по 12:37:46 мск: 1 — ω_x ; 2 — ω_y ; 3 — ω_z

Для исследования устойчивости алгоритма управления -Bdot был выбран отрезок длительного использования магнитных исполнительных органов для снижения угловой скорости вращения МКА ДЗЗ SXC3-219 перед его ориентацией для выполнения целевой задачи. Эксперимент был проведён 25.09.2023 в период с 12:30:31 по 12:37:46 по московскому времени (мск). Было использовано 252 измерения. Графики компонент угловой скорости, которые были измерены в этот период с помощью iNEMO inertial module LSM9DS1, приведены на рис. 3.

По измерениям, представленным на рис. 3, было оценено среднее угловое ускорение между двумя соседними измерениями:

$$\varepsilon_i = \frac{\omega_i - \omega_{i-1}}{\Delta t_i}, \quad (1)$$

где ε_i — среднее значение компоненты вектора углового ускорения между $(i-1)$ -м и i -м измерением; ω_i и ω_{i-1} — соответственно измеренные значения компоненты вектора угловой скорости; Δt_i — интервал времени между $(i-1)$ -м и i -м измерением.

Результаты оценки угловых ускорений представлены на *рис. 4*.

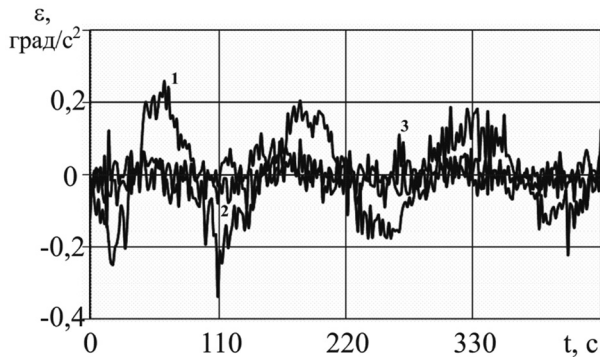


Рис. 4. Динамика компонент вектора углового ускорения по данным измерений 25.09.2023 с 12:30:31 по 12:37:46 мск

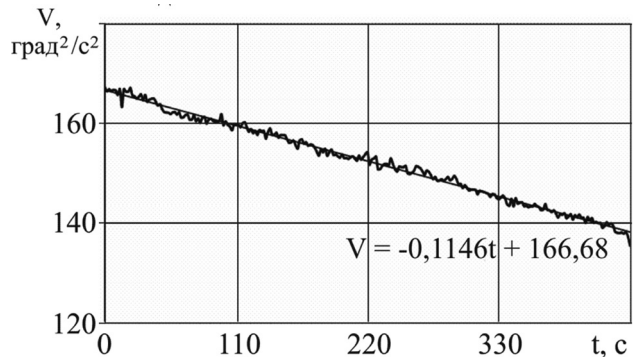


Рис. 5. Динамика изменения функции Ляпунова (2) по данным измерений 25.09.2023 с 12:30:31 по 12:37:46 мск

Исследуем устойчивость управления с помощью алгоритма -Bdot по данным измерений относительно компонент вектора угловой скорости. Для этой цели возьмём в качестве функции Ляпунова следующую положительно определённую функцию:

$$V = \frac{1}{2}(\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2). \quad (2)$$

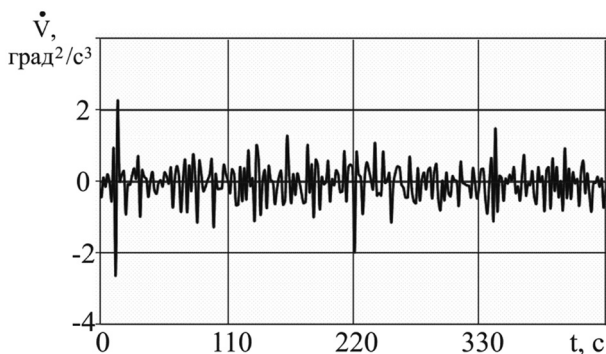
Очевидно, что уравнение (2) — определённо-положительная функция, включающая в себя все исследуемые возмущения. Она равна нулю только в начале координат. Исходя из данных измерений (см. *рис. 3*), покажем динамику изменения функции (2). Эта динамика вместе с выделенным нисходящим трендом представлена на *рис. 5*.

На *рис. 5* также изображена линейная аппроксимация функции V и приведено уравнение этой аппроксимации. Анализ *рис. 5* показывает, что глобально наблюдается снижение угловой скорости. Однако локально она может возрастать.

Вычислим полную производную функции (2) по времени:

$$\dot{V} = \omega_x \varepsilon_x + \omega_y \varepsilon_y + \omega_z \varepsilon_z. \quad (3)$$

Если функция (3) является определённо-отрицательной или тождественно равна нулю, то угловое движение МКА ДЗЗ SXC3-219 с использованием алгоритма управления -Bdot будет устойчивым по теореме Ляпунова. Построим функцию (3) по данным измерений компонент вектора угловой скорости и оценке среднего значения компонент вектора углового ускорения по формуле (1). Результаты представлены на *рис. 6*.



Как видно из *рис. 6*, функцию (3) следует считать знакопеременной. Однако эта знакопеременность наблюдается в узком диапазоне. Поэтому такое явление может быть связано не с самой функцией (2).

Рис. 6. Динамика изменения производной функции Ляпунова (3) по данным измерений 25.09.2023 с 12:30:31 по 12:37:46 мск и оценке (1)

Известно, что измерения компонент вектора угловой скорости и оценка (1) содержат различного рода погрешности. Из этих погрешностей можно выделить погрешность средств измерений и методическую погрешность оценки углового ускорения с помощью формулы (1). Поэтому с точностью $\pm 2,5$ град/с функцию (3), исходя из представленной на *рис. 6* зависимости в рамках измерительных данных, можно считать тождественно равной нулю. В целом значения производной функции Ляпунова (3) лишь три раза по модулю превышали значение 2,0 град/с, а её среднее по модулю значение составляет около 0,5 град/с. При этом гарантированная точность установки ориентации МКА ДЗЗ SXC3-219 в режиме стабилизации достигала $\pm 5^\circ$ (Седельников и др., 2024). Погрешность $\pm 2,5$ град/с хорошо согласуется с результатами её оценки в работе (Седельников и др., 2024). Другие расчёты показывают, что косвенные измерения компонент вектора угловой скорости допускают и более высокие измерительные погрешности, чем $\pm 2,5$ град/с. Например, при её оценке с помощью магнитометрических средств измерения (Carletta, Teofilatto, 2018; Sedelnikov, 2020b; Sedelnikov et al., 2018). Следовательно, знакопеременность производной функции Ляпунова (3) можно трактовать не как свойство самой функции (2), а объяснить его измерительной погрешностью iNEMO inertial module LSM9DS1 и методической погрешностью формулы (1). Тогда с точностью $\pm 2,5$ град/с функцию (3) гарантированно (в рамках измерительных данных) можно считать тождественно равной нулю или с точностью $\pm 2,0$ град/с с вероятностью 0,99 тождественно равной нулю. Тогда выполнены все условия теоремы Ляпунова об устойчивости углового движения МКА ДЗЗ SXC3-219 по данным измерений с учётом их погрешности. Поэтому угловое движение с применением алгоритма управления -Bdot является устойчивым. Этот вывод хорошо согласуется с теоретическими оценками и данными других авторов (Сёмкин и др., 2015; Busch et al., 2023; Liu et al., 2007; Roldugin, Ovchinnikov, 2025; Thiel et al., 2007). Косвенно исследования, проведённые в работе, подтверждают штатную работу системы управления движением МКА ДЗЗ SXC3-219 в режиме управления -Bdot.

Резюме основных результатов работы

Таким образом, в работе было проведено исследование устойчивости углового движения МКА ДЗЗ SXC3-219 с применением алгоритма управления -Bdot на основе измерений. Для этой цели использованы данные, содержащие 252 измерения компонент вектора угловой скорости с помощью средства измерений iNEMO inertial module LSM9DS1. Устойчивость исследовалась относительно компонент вектора угловой скорости МКА ДЗЗ SXC3-219.

Полученные результаты позволяют утверждать об устойчивости углового движения МКА ДЗЗ SXC3-219 с точностью $\pm 2,5$ град/с относительно компонент вектора угловой скорости на основании теоремы Ляпунова. Значение точности $\pm 2,5$ град/с объясняется погрешностью измерений компонент вектора угловой скорости и методической погрешностью оценки компонент вектора углового ускорения с помощью формулы (1).

Проведённые исследования свидетельствуют о штатной работе системы управления МКА ДЗЗ SXC3-219 и выполнении заявленных характеристик, по крайней мере, в режиме управления -Bdot. Это является важным для дальнейшего повышения качества решения задач ДЗЗ с помощью МКА.

Литература

1. Кирилин А. Н., Ахметов Р. Н., Шахматов Е. В., Ткаченко С. И., Бакланов А. И., Салмин В. В., Семкин Н. Д., Ткаченко И. С., Горячкин О. В. Опытнo-технологический малый космический аппарат «АИСТ-2Д». Самара: СамНЦ РАН, 2017. 324 с.
2. Овчинников М. Ю., Пеньков В. И., Ролдугин Д. С., Иванов Д. С. Магнитные системы ориентации малых спутников. М.: ИПМ им. М. В. Келдыша, 2016. 366 с.
3. Седельников А. В., Скиданов Р. В., Браткова М. Е. и др. Реконструкция вращательного движения малого космического аппарата дистанционного зондирования Земли ИСОИ (SXC3-219) по дан-

- ным бортовых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 5. С. 75–82. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-75-82.
4. Сёмкин Н. Д., Сазонов В. В., Воронов К. Е., Пияков А. В., Дорофеев А. С., Ильин А. Б., Пузин Ю. Я., Видманов А. С. Измерение параметров магнитного поля и анализ возмущений на борту малых космических аппаратов «Аист» // Физика волновых процессов и радиотехн. системы. 2015. Т. 18. № 4. С. 67–73.
5. Abrashkin V. I., Voronov K. E., Dorofeev A. S. et al. Detection of the rotational motion of the AIST-2D small spacecraft by magnetic measurements // Cosmic Research. 2019. V. 57. No. 1. P. 48–60. DOI: 10.1134/S0010952519010015.
6. Akhmetov R., Filatov A., Khalilov R. et al. “AIST-2D”: Results of flight tests and application of earth remote sensing data for solving thematic problems // The Egyptian J. Remote Sensing and Space Science. 2023. V. 26. No. 3. P. 427–454. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2023.06.003>.
7. Busch S., Koss P. A., Horch C. et al. Magnetic cleanliness verification of miniature satellites for high precision pointing // Acta Astronautica. 2023. V. 210. P. 243–252. DOI: 10.1016/j.actaastro.2023.05.017.
8. Carletta S., Teofilatto P. Design and numerical validation of an algorithm for the detumbling and angular rate determination of a CubeSat using only three-axis magnetometer data // Intern. J. Aerospace Engineering. 2018. V. 2018. No. 3. Article 9768475. DOI: 10.1155/2018/9768475.
9. Chen H. High-precision target detection of remote sensing image based on feature enhancement with 6G technology // Advances in Multimedia. 2022. V. 2022. No. 1. Article 6095308. 14 p. DOI: 10.1155/2022/6095308.
10. Fu X., Liang L., Ma W. et al. Efficient uncertainty analysis of external heat flux of solar radiation with external heat flux expansion for spacecraft thermal design // Aerospace. 2023. V. 10. No. 8. Article 672. <https://doi.org/10.3390/aerospace10080672>.
11. Ivliev N., Evdokimova V., Podlipnov V. et al. First Earth-imaging CubeSat with harmonic diffractive lens // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 9. Article 2230. DOI: 10.3390/rs14092230.
12. Ivliev N., Podlipnov V., Petrov M. et al. 3U CubeSat-based hyperspectral remote sensing by Offner imaging hyperspectrometer with radially-fastened primary elements // Sensors. 2024. V. 24. No. 9. Article 2885. <https://doi.org/10.3390/s24092885>.
13. Jamshidi S., Mirzaei M. Novel scheme for uncertainty and disturbance estimation to control of spacecraft system with input constraint // Proc. Institution of Mechanical Engineers, Pt. I: J. Systems and Control Engineering. 2024. V. 238. P. 1738–1751. DOI: 10.1177/09596518241263371.
14. Kazanskiy N., Ivliev N., Podlipnov V., Skidanov R. An airborne Offner imaging hyperspectrometer with radially-fastened primary // Sensors. 2020. V. 20. No. 12. Article 3411. DOI: 10.3390/s20123411.
15. Klyushin M. A., Maksimenko M. V., Tikhonov A. A. Electrodynamic attitude stabilization of a spacecraft in an elliptical orbit // Aerospace. 2024. V. 11. No. 11. Article 956. DOI: 10.3390/aerospace11110956.
16. Li H. Control system stability // Control theory for practical applications. With MATLAB demonstration programs. Singapore: Springer, 2017. P. 69–96. DOI: 10.1007/978-981-97-5008-5_4.
17. Liu H., Wang H., Cheng Y. Attitude control of micro-satellite with only magnetic actuators // Chinese J. Space Science. 2007. V. 27. No. 5. P. 425–429. DOI: 10.11728/cjss2007.05.425.
18. Nikolaeva A. S., Evtushenko M. A., Manukyan L. A. Investigation of the accuracy of an approximate solution of the initial boundary value problem of thermal conductivity with boundary conditions of the third kind // Intern. J. Mathematical Modelling and Numerical Optimisation. 2025. V. 15. No. 1. P. 52–63. <https://doi.org/10.1504/IJMMNO.2025.145634>.
19. Ovchinnikov M. Yu., Roldugin D. S., Tkachev S. S., Penkov V. I. B-dot algorithm steady-state motion performance // Acta Astronautica. 2018. V. 146. P. 66–72. DOI: 10.1016/j.actaastro.2018.02.019.
20. Roldugin D. S., Ovchinnikov M. Yu. Explicit solution for the attitude motion of a bias momentum satellite under Bdot magnetic damping // Aerospace Science and Technology. 2025. V. 159. Article 110019. DOI: 10.1016/j.ast.2025.110019.
21. Sedelnikov A. V. (2020a) Accuracy assessment of microaccelerations simulation on the spacecraft “Foton-M” No.2 according to magnetic measuring instruments data // Microgravity Science and Technology. 2020. V. 32. No. 3. P. 259–264. DOI: 10.1007/s12217-019-09766-y.
22. Sedelnikov A. V. (2020b) The assessment problem of microaccelerations at the experimental sample of the small spacecraft “AIST” after the battery degradation and the method of its solution // Microgravity Science and Technology. 2020. V. 32. No. 4. P. 673–679. DOI: 10.1007/s12217-020-09789-w.
23. Sedelnikov A. V. Algorithm for restoring information of current from solar panels of a small spacecraft prototype “AIST” with help of normality conditions // J. Aeronautics, Astronautics, and Aviation. 2022. V. 54. No. 1. P. 67–76. DOI: 10.6125/JoAAA.202203_54(1).05.
24. Sedelnikov A. V., Filippov A. S., Gorozhakina A. S. Evaluation of calibration accuracy of magnetometer sensors of Aist small spacecraft // J. Physics: Conf. Series. 2018. V. 1015. Article 032045. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032045.

25. Sedelnikov A. V., Taneeva A. S., Khnyryova E. S. et al. Investigation of the rotational motion stability of the AIST small spacecraft prototype according to the measurements of the Earth's magnetic field // J. Physics: Conf. Series. 2021. V. 1901. Article 012022. DOI: 10.1088/1742-6596/1901/1/012022.
26. Sedelnikov A., Orlov D., Serdakova V., Nikolaeva A. (2023a) The symmetric formulation of the temperature shock problem for a small spacecraft with two elastic elements // Symmetry. 2023. V. 15. No. 1. Article 172. DOI: 10.3390/sym15010172.
27. Sedelnikov A., Serdakova V., Nikolaeva A. (2023b) Method of taking into account influence of thermal shock on dynamics of small satellite and its use in analysis of microaccelerations // Microgravity Science and Technology. 2023. V. 35. No. 3. Article 25. DOI: 10.1007/s12217-023-10049-w.
28. Sedelnikov A., Manukyan L., Maslowa U. (2024a) The methodology for estimating the angular velocity of rotation of a small spacecraft based on a limited number of magnetometric measurements // 8th Intern. Conf. on Computing, Control and Industrial Engineering (CCIE2024). Lecture Notes in Electrical Engineering. V. 1253. Singapore: Springer, 2024. P. 435–440. DOI: 10.1007/978-981-97-6937-7_52.
29. Sedelnikov A., Skidanov R., Taneeva A. et al. (2024b) 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. V. 36. No. 6. Article 59. DOI: 10.1007/s12217-024-10148-2.
30. Shu S., Fang J.-C., Zhang W. et al. High-precision attitude control method based on MSCMG for large-scale remote sensing satellite // Zhongguo Guanxing Jishu Xuebao/J. Chinese Inertial Technology. 2017. V. 25. No. 4. P. 421–431. DOI: 10.13695/j.cnki.12-1222/o4.2017.04.001.
31. Thiel F., Schnabel A., Knappe-Grüneberg S. et al. Demagnetization of magnetically shielded rooms // Review of Scientific Instruments. 2007. V. 78. No. 3. Article 035106. DOI: 10.1063/1.2713433.
32. Zhu W., Yang Y., Tian B., Zong Q. Global finite-time adaptive attitude control for coupled spacecraft with model uncertainty and actuator faults // IEEE Trans. Control Systems Technology. 2024. V. 32. No. 6. P. 2428–2435. DOI: 10.1109/TCST.2024.3405668.

Study of the stability of the -Bdot control algorithm using the example of the SXC3-219 small Earth remote sensing spacecraft based on onboard measurements of angular velocity vector components

E. S. Khnyryova

*Samara National Research University, Samara 443086, Russia
E-mail: khnyryova@gmail.com*

Spacecraft motion control stability issues significantly impact the effectiveness of its missions. This is especially true for high resolution imaging. Known control algorithms are theoretically stable. However, due to various operational errors in real actuators and measurement instruments, the convergence of these algorithms may be lower compared to the theory. One widely used algorithm for small spacecraft is -Bdot. Its implementation requires magnetic actuators that do not use the working fluid. The paper analyzes the stability of the controlled motion of the SXC3-219 small Earth remote sensing spacecraft in order to improve the efficiency of its target tasks. The stability of -Bdot is studied in the section of decreasing angular velocity by magnetic actuators. The classical Lyapunov function method is used. The study uses SXC3-219 velocity components data measured by the iNEMO inertial module LSM9DS1 multifunctional device. This device is part of the information and measuring system. The results of the work can be used to improve the control algorithms of small spacecrafts in order to improve the efficiency of solving remote sensing tasks.

Keywords: stability of motion, control algorithm -Bdot, small spacecraft for remote sensing of the Earth, Lyapunov function, angular motion

Accepted: 17.03.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-3-88-95

References

1. Kirilin A. N., Akhmetov R. N., Shakhmatov E. V., Tkachenko S. I., Baklanov A. I., Salmin V. V., Semkin N. D., Tkachenko I. S., Goryachkin O. V., *Opytno-tekhnologicheskii maliy kosmicheskii apparat "AIST-2D"* (Experimental technological small spacecraft "Aist-2D"), Samara: SamNTs RAN, 2017, 324 p. (in Russian).
2. Ovchinnikov M. Yu., Penkov V. I., Roldugin D. S., Ivanov D. S., *Magnitnye sistemy orientatsii malykh sputnikov* (Magnetic navigation systems of small satellites), Moscow: Institut prikladnoi matematiki imeni M. V. Keldysha, 2016, 366 p. (in Russian).
3. Sedelnikov A. V., Skidanov R. V., Bratkova M. E. et al., 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, V. 21, No. 5, pp. 75–82 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-75-82.
4. Semkin N. D., Sazonov V. V., Voronov K. E., Piyakov A. V., Dorofeev A. S., Ilyin A. B., Puzin Yu. Ya., Vidmanov A. S., Magnetic field measurements at small spacecraft "Aist", *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2015, V. 18, No. 4, pp. 67–73 (in Russian).
5. Abrashkin V. I., Voronov K. E., Dorofeev A. S. et al., Detection of the rotational motion of the AIST-2D small spacecraft by magnetic measurements, *Cosmic Research*, 2019, V. 57, No. 1, pp. 48–60, DOI:10.1134/S0010952519010015.
6. Akhmetov R., Filatov A., Khalilov R. et al., "AIST-2D": Results of flight tests and application of earth remote sensing data for solving thematic problems, *The Egyptian J. Remote Sensing and Space Science*, 2023, V. 26, No. 3, pp. 427–454, <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2023.06.003>.
7. Busch S., Koss P. A., Horch C. et al., Magnetic cleanliness verification of miniature satellites for high precision pointing, *Acta Astronautica*, 2023, V. 210, pp. 243–252, DOI: 10.1016/j.actaastro.2023.05.017.
8. Carletta S., Teofilatto P., Design and numerical validation of an algorithm for the detumbling and angular rate determination of a CubeSat using only three-axis magnetometer data, *Intern. J. Aerospace Engineering*, 2018, V. 2018, No. 3, Article 9768475, DOI: 10.1155/2018/9768475.
9. Chen H., High-precision target detection of remote sensing image based on feature enhancement with 6G technology, *Advances in Multimedia*, 2022, V. 2022, No. 1, Article 6095308, 14 p., DOI: 10.1155/2022/6095308.
10. Fu X., Liang L., Ma W. et al., Efficient uncertainty analysis of external heat flux of solar radiation with external heat flux expansion for spacecraft thermal design, *Aerospace*, 2023, V. 10, No. 8, Article 672, <https://doi.org/10.3390/aerospace10080672>.
11. Ivliev N., Evdokimova V., Podlipnov V. et al., First Earth-imaging CubeSat with harmonic diffractive lens, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, No. 9, Article 2230, DOI: 10.3390/rs14092230.
12. Ivliev N., Podlipnov V., Petrov M. et al., 3U CubeSat-based hyperspectral remote sensing by Offner imaging hyperspectrometer with radially-fastened primary elements, *Sensors*, 2024, V. 24, No. 9, Article 2885, <https://doi.org/10.3390/s24092885>.
13. Jamshidi S., Mirzaei M., Novel scheme for uncertainty and disturbance estimation to control of spacecraft system with input constraint, *Proc. Institution of Mechanical Engineers, Pt. I: J. Systems and Control Engineering*, 2024, V. 238, pp. 1738–1751, DOI: 10.1177/09596518241263371.
14. Kazanskiy N., Ivliev N., Podlipnov V., Skidanov R., An airborne Offner imaging hyperspectrometer with radially-fastened primary, *Sensors*, 2020, V. 20, No. 12, Article 3411, DOI: 10.3390/s20123411.
15. Klyushin M. A., Maksimenko M. V., Tikhonov A. A., Electrodynamical attitude stabilization of a spacecraft in an elliptical orbit, *Aerospace*, 2024, V. 11, No. 11, Article 956, DOI: 10.3390/aerospace11110956.
16. Li H., Control system stability, In: *Control theory for practical applications. With MATLAB demonstration programs*, Singapore: Springer, 2017, pp. 69–96, DOI: 10.1007/978-981-97-5008-5_4.
17. Liu H., Wang H., Cheng Y., Attitude control of micro-satellite with only magnetic actuators, *Chinese J. Space Science*, 2007, V. 27, No. 5, pp. 425–429, DOI: 10.11728/cjss2007.05.425.
18. Nikolaeva A. S., Evtushenko M. A., Manukyan L. A., On modern mathematical modelling and optimization methods, *Intern. J. Mathematical Modelling and Numerical Optimisation*, 2025, V. 15, No. 1, pp. 52–63, <https://doi.org/10.1504/IJMMNO.2025.145634>.
19. Ovchinnikov M. Yu., Roldugin D. S., Tkachev S. S., Penkov V. I., B-dot algorithm steady-state motion performance, *Acta Astronautica*, 2018, V. 146, pp. 66–72, DOI: 10.1016/j.actaastro.2018.02.019.
20. Roldugin D. S., Ovchinnikov M. Yu., Explicit solution for the attitude motion of a bias momentum satellite under Bdot magnetic damping, *Aerospace Science and Technology*, 2025, V. 159, Article 110019, DOI: 10.1016/j.ast.2025.110019.
21. Sedelnikov A. V. (2020a), Accuracy assessment of microaccelerations simulation on the spacecraft "Foton-M" No. 2 according to magnetic measuring instruments data, *Microgravity Science and Technology*, 2020, V. 32, No. 3, pp. 259–264, DOI: 10.1007/s12217-019-09766-y.

22. Sedelnikov A. V. (2020b), The Assessment problem of microaccelerations at the experimental sample of the small spacecraft “AIST” after the battery degradation and the method of its solution, *Microgravity Science and Technology*, 2020, V. 32, No. 4, pp. 673–679, DOI: 10.1007/s12217-020-09789-w.
23. Sedelnikov A. V., Algorithm for restoring information of current from solar panels of a small spacecraft prototype “AIST” with help of normality conditions, *J. Aeronautics, Astronautics, and Aviation*, 2022, V. 54, No. 1, pp. 67–76, DOI: 10.6125/JoAAA.202203_54(1).05.
24. Sedelnikov A. V., Filippov A. S., Gorozhakina A. S., Evaluation of calibration accuracy of magnetometer sensors of Aist small spacecraft, *J. Physics: Conf. Series*, 2018, V. 1015, Article 032045, DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032045.
25. Sedelnikov A. V., Taneeva A. S., Khnyryova E. S. et al., Investigation of the rotational motion stability of the AIST small spacecraft prototype according to the measurements of the Earth’s magnetic field, *J. Physics: Conf. Series*, 2021, V. 1901, Article 012022, DOI: 10.1088/1742-6596/1901/1/012022.
26. Sedelnikov A., Orlov D., Serdakova V., Nikolaeva A. (2023a), The symmetric formulation of the temperature shock problem for a small spacecraft with two elastic elements, *Symmetry*, 2023, V. 15, No. 1, Article 172, DOI: 10.3390/sym15010172.
27. Sedelnikov A., Serdakova V., Nikolaeva A. (2023b), Method of taking into account influence of thermal shock on dynamics of small satellite and its use in analysis of microaccelerations, *Microgravity Science and Technology*, 2023, V. 35, No. 3, Article 25, DOI: 10.1007/s12217-023-10049-w.
28. Sedelnikov A., Manukyan L., Maslowa U. (2024a), The methodology for estimating the angular velocity of rotation of a small spacecraft based on a limited number of magnetometric measurements, In: *8th Intern. Conf. on Computing, Control and Industrial Engineering (CCIE2024). Lecture Notes in Electrical Engineering*, V. 1253, Singapore: Springer, 2024, pp. 435–440, DOI: 10.1007/978-981-97-6937-7_52.
29. Sedelnikov A., Skidanov R., Taneeva A. et al. (2024b), 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, V. 36, No. 6, Article 59, DOI: 10.1007/s12217-024-10148-2.
30. Shu S., Fang J.-C., Zhang W et al., High-precision attitude control method based on MSCMG for large-scale remote sensing satellite, *Zhongguo Guanxing Jishu Xuebao/J. Chinese Inertial Technology*, 2017, V. 25, No. 4, pp. 421–431, DOI: 10.13695/j.cnki.12-1222/o4.2017.04.001.
31. Thiel F., Schnabel A., Knappe-Grüneberg S. et al., Demagnetization of magnetically shielded rooms, *Review of Scientific Instruments*, 2007, V. 78, No. 3, Article 035106, DOI: 10.1063/1.2713433.
32. Zhu W., Yang Y., Tian B., Zong Q., Global finite-time adaptive attitude control for coupled spacecraft with model uncertainty and actuator faults, *IEEE Trans. Control Systems Technology*, 2024, V. 32, No. 6, pp. 2428–2435, DOI: 10.1109/TCST.2024.3405668.