

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИЕЙ СПУТНИКА CUBESAT НА ВЫСОКОЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ОРБИТАХ

Качай М. А.¹, Ефимкин А. Н.²

Научный руководитель – к. ф.-м. н., Начальник Баллистического центра ФКИ
МГУ Самыловский И. А.²

¹ОАНО Школа «ЛЕТОВО» mikhail.kachay@gmail.com

²ФКИ МГУ

e-mail: s24d_efimkin@179.ru, ivan.samylovskiy@cosmos.msu.ru

Введение

Современные спутники CubeSat на высокоэллиптических орбитах (HEO) [1] сталкиваются с проблемой слабых магнитных полей Земли, что делает традиционные магнитометры неэффективными для точного определения ориентации. Требуются оптические датчики (Солнце, Земля, звезды) для обеспечения высокой точности.

Существующие решения используют углы Эйлера, страдающие от эффекта gimbal lock, или SLERP (линейная интерполяция по сфере) интерполяцию, обеспечивающую только C^0 -непрерывность без гарантии непрерывности угловой скорости [6]. Отечественный опыт показывает применение кватернионов для описания ориентации твердого тела [2]. В зарубежной литературе широко представлены методы сглаживания кватернионных траекторий SQUAD (метод гладкой интерполяции кватернионов) [6], однако их адаптация для вычислительно эффективных алгоритмов управления малыми спутниками с оптическими датчиками в условиях ограниченных ресурсов ранее не рассматривалась.

Основная часть

Разработан автономный алгоритм управления ориентацией на основе SQUAD кватернионной интерполяции, обеспечивающей C^1 -непрерывность скорости вращения. Алгоритм реализован на Python с использованием библиотек rowan [4] и NumPy [5]. В качестве датчиков ориентации используются широкоугольные камеры, подключаемые к микроконтроллеру параллельно. Была разработана схема, позволяющая подключать множество камер к одному вычислителю. В каждый момент времени обрабатывается изображение с одной камеры. Это позволяет экономить в вычислительных ресурсах, при этом не теряя точность.

Входные данные – конечная последовательность пар (кватернион, время), заданная пользователем вручную или полученную в результате симуляции в программе Missions Integrated Development Environment (MIDE) [3]. Алгоритм вычисляет промежуточные кватернионы, генерирует SQUAD траекторию и плавные переходы для PID-регулятора маховиков.

В отличие от SLERP и прямого PID-регулятор (пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор) управления, SQUAD устраняет рывки, снижая пиковые нагрузки на систему электропитания и повышая надежность системы. Алгоритм протестирован на прототипе 2U CubeSat, подвешенном на нити (1 степень свободы).

Тестирование прототипа включало последовательное выполнение следующих этапов:

1. Задание целевой траектории: формирование последовательности опорных точек (кватернионов), определяющих желаемое положение спутника во времени.
2. Вычисление траектории: расчет промежуточных значений методом SQUAD для обеспечения плавности угловой скорости между опорными точками.
3. Активация управления: включение PID-регулятора, использующий разность

- между текущей ориентацией (с камер) и целевой траекторией.
4. Выполнение маневра: отработка системой маховиков разворота спутника по рассчитанной SQUAD-траектории.
 5. Удержание позиции: стабилизация спутника в конечной точке после завершения маневра.

В качестве датчиков использовались 2 широкоугольные камеры на плоскостях X+ и Y+. Для оптимизации вычислений в каждый момент времени использовалась только одна. Переключение происходило автоматически.

Результаты показали совпадение реальной траектории с целевой в пределах ± 5 пикселей. Анализ различных частот дискретизации (5, 20, 100 Гц) выявил усиление численных артефактов при малых Δt из-за конечных разностей, что не влияет на качество SQUAD траектории.

Выводы

Разработанный алгоритм обеспечивает автономное управление ориентацией CubeSat на высокоэллиптических орбитах с использованием оптических датчиков при слабых магнитных полях. Тестирование прототипа подтвердило точность ± 5 пикселей, монотонную сходимост и плавность перехода между целевыми значениями.

Результаты [7] применимы для спутников формата CubeSat в отсутствие магнитного поля. Предлагается внедрение в MIDE [3] и интеграция инерциальных датчиков для повышения точности и полной симуляции космического полета. Дальнейшие испытания – полная 3D ориентация прототипа по всем трем осям.

Литература

1. NASA. CAPSTONE (Cislunar Autonomous Positioning System Technology Operations and Navigation Experiment) [Электронный ресурс] // NASA. — 2022. — URL: <https://www.nasa.gov/smallspacecraft/capstone/> (дата обращения: 28.02.2026).
2. Бранец В. Н., Шмыглевский И. П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. — М.: Наука, 1973. — 320 с.
3. Astrodynamics Laboratory, МГУ. Missions Integrated Development Environment (MIDE) [Электронный ресурс] // Лаборатория астродинамики МГУ. — 2024. — URL: <https://astrodynlab.space/mide> (дата обращения: 28.02.2026).
4. Rowan Developers. rowan: Quaternion operations for Python (версия 1.3.0) [Электронный ресурс] // Read the Docs. — 2023. — URL: <https://rowan.readthedocs.io/> (дата обращения: 28.02.2026).
5. NumPy Developers. NumPy: Fundamental package for scientific computing in Python (версия 1.26) [Электронный ресурс] // NumPy. — 2024. — URL: <https://numpy.org/> (дата обращения: 28.02.2026).
6. Shoemake K. Animating Rotation with Quaternion Curves // ACM SIGGRAPH Computer Graphics. — 1985. — Vol. 19, № 3. — P. 245–254.
7. Качай М. А. CubeSat-attitude-control [Электронный ресурс] // GitHub. — 2025. — URL: <https://github.com/physly/CubeSat-attitude-control> (дата обращения: 28.02.2026).