

УПРАВЛЕНИЕ ПРИ РАЗВЕРТЫВАНИИ ТРОСОВОЙ ГРУППИРОВКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ КОНФИГУРАЦИИ «КВАДРАТ» С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ СВЯЗЯМИ

Ю.М. Заболотнов, А.А. Назарова

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева

anazarova63@gmail.com

В работе рассматривается метод формирования вращающейся тросовой группировки космических аппаратов (ТГКА) в виде квадрата с дополнительными механическими связями (рисунок 1). Дополнительные связи (тросы) используются для повышения структурной устойчивости системы (сохранения ее геометрии) при действии возмущений. Группировка состоит из четырех малых космических аппаратов (спутников) и груза, расположенного в центре и связанного с ними тросами. Показано, что введением в систему дополнительного груза с тросами повышает структурную устойчивость системы с точки зрения сохранений ее геометрической конфигурации при действии возмущений. Для формирования системы предлагается использовать комбинированный способ управления, который предполагает совместное применение двигателей малой тяги и устройств выпуска троса, расположенных на спутниках. Номинальная программа управления строится на основе модели с нерастяжимыми, прямолинейными и невесомыми тросами, полученной с помощью уравнений Лагранжа. Для проверки реализуемости предлагаемых законов применяется математическая модель, записанная в геоцентрической неподвижной системе координат. При этом учитываются: растяжимость троса, движение космических аппаратов (КА) относительно своих центров масс, ошибки при разделении КА и др. возмущения.

Ключевые слова: тросовая группировка космических аппаратов, формирование, управление, возмущения.

В настоящее время имеется большое количество проектов полезного применения ТГКА различных конфигураций. Такие ТГКА могут быть использованы, например, как многоточечные распределенные системы измерений гравитационного и магнитного полей Земли, ее ионосферы, как звездные интерферометры с большой базой, как распределенные системы дистанционного зондирования Земли и т.д. Впервые возможности замкнутых ТГКА были описаны еще в 90-х годах прошлого века, например в [1]. На данный момент существует большое количество публикаций, посвященных замкнутым ТГКА, в частности, работ, посвященных структурам в виде правильного треугольника [2–9]. Анализ работ, в которых рассматривается динамика и управление движением замкнутых ТГКА, показывает, что во многих случаях КА рассматривались как материальные точки, то есть задачи решались в ограниченной постановке. Авторам неизвестны работы, где с этой точки зрения, то есть с учетом движения КА вокруг центров масс, рассматривались бы замкнутые плоские структуры ТГКА с вершинами больше трех.

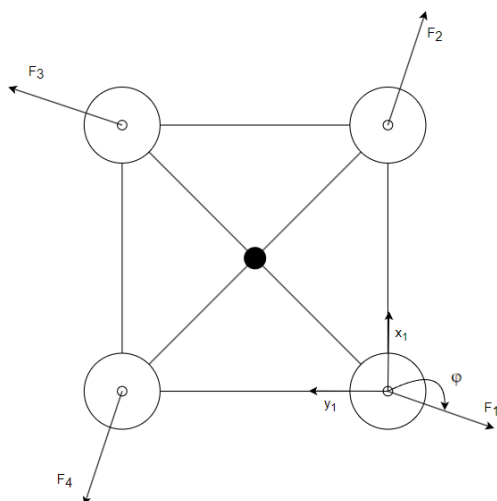


Рисунок 1 – Схема ТГКА

В статье [10] было показано, что ТГКА «квадрат» по сравнению с более сложными структурами (например, пяти-, шести-, семиугольниками) при одном и том же уровне одних и тех же возмущений обладает пониженной степенью структурной устойчивости. Это выразалось в том, что квадрат во многих случаях деформировался в ромб, хотя регулирование натяжения тросов происходило почти идеально в соответствии с построениями номинальной программой развертывания системы. Поэтому была рассмотрена немного более сложная четырехугольная ТГКА с грузом в центре, причем при выпуске дополнительных тросов регулирование их натяжения не производится, то есть управления остаются теми же, что и раньше [10]. В исходном состоянии КА жестко связаны между собой, то есть представляют собой твердое тело, геометрическая конфигурация которого повторяет структуру системы в конечном состоянии. При этом система вращается с некоторой начальной угловой скоростью, причем плоскость вращения в номинальном случае совпадает с плоскостью орбитального движения центра масс системы.

Управление процессом формирования ТГКА происходит за счет двигателей малой тяги, расположенных на каждом КА, и с помощью механизмов выпуска тросов, которые работают только на их торможение. Двигатели малой тяги работают в релейном режиме, причем силы тяги постоянны, постоянны и их направления, определенные относительно направления тросов. В процессе развертывания ТГКА имеются два активных участка для сил тяги и один средний — пассивный. Первый участок начинается при выпуске тросов КА. Назначения этого участка компенсировать падение угловой скорости вращения системы из-за увеличения ее момента инерции при увеличении длины тросов. На втором (пассивном) участке с помощью механизмов выпуска тросов, которые работают только на торможение, регулируется сила натяжения тросов так, чтобы при достижении заданных длин тросов их скорость выпуска была равна нулю. После окончания выпуска тросов реактивные двигатели включаются вновь для доведения угловой скорости вращения системы до заданной величины.

Для обоснования представленной схемы формирования квадратной ТГКА используются две математические модели ее движения.

Первая упрощенная модель движения ТГКА получается с помощью уравнений Лагранжа и служит для построения номинальной программы выпуска тросов. В этой модели применяются следующие допущения: 1) при развертывании системы сохраняется квадратная форма; 2) тросы

– нерастяжимые идеальные механические связи; 3) КА – материальные точки; 4) рассматривается плоское движение системы; 5) учитывается только кинетическая энергия движения системы относительно ее центра масс; 6) пренебрегается действием гравитационных сил. Таким образом, фактически рассматривается система, которая вращается относительно неподвижной точки – центра симметрии квадрата. Простая модель движения системы позволяет выбрать направления действия реактивных сил относительно направления тросов и доказать асимптотическую устойчивость конечного состояния системы на пассивном участке ее движения в силу упрощенных уравнений. Номинальная программа развертывания ТГКА учитывает ограничения на силы натяжения тросов, которые в процессе формирования системы должны быть натянуты.

При построении более полной модели движения ТГКА используется методика, описанная в работе [10], где рассматривалось формирование кольцевых ТГКА в виде правильных многоугольников с количеством вершин от четырех до семи вершин включительно. На рисунках 2 и 3 показаны положения ТГКА в различные моменты времени в двух случаях: без использования дополнительного груза и с использованием. Исходные данные (включая учитываемые возмущения) при расчете процессов развертывания полностью соответствуют исходным данными, представленным в [10], массы спутников 20 кг, радиус описанной относительно квадрата окружности 500 м и т.д. Масса груза в середине квадрата 5 кг. Рисунки 2 и 3 построены в орбитальной подвижной системе координат, связанной с центром масс системы (0,0) (размерность по осям в км).

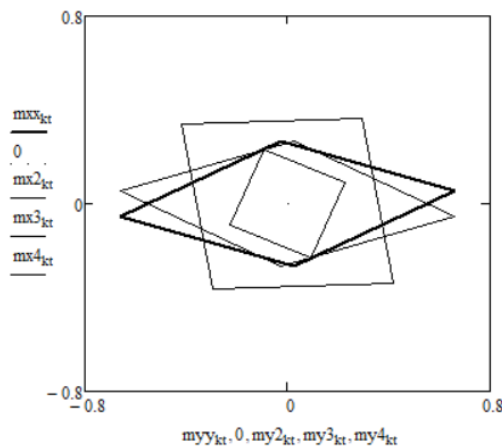


Рисунок 2 – Пример движения ТГКА относительно центра масс (0.0) при развертывании без использования дополнительного груза

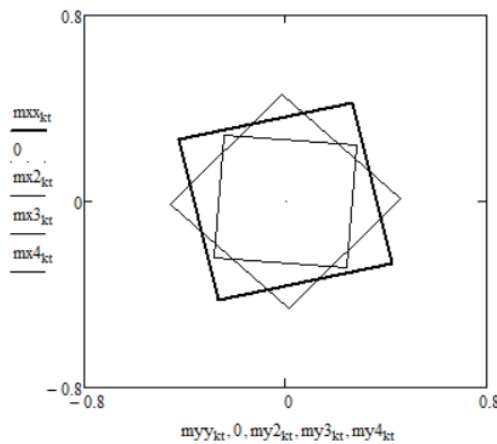


Рисунок 3 – Пример движений ТГКА относительно центра масс (0.0) при развертывании с использованием дополнительного груза

Таким образом, введение дополнительных механических связей (тросов) и дополнительного груза, расположенного в центре масс системы, позволило обеспечить структурную устойчивость конфигурации ТГКА «квадрат» при ее формировании.

Список литературы:

1. Белецкий В.В., Левин Е.М. Динамика космических тросовых систем. М.: Наука, 1990. 336 с.
2. Kumar K.D., Yasaka T. Rotating formation flying of three satellites using tethers // J. Spacecr. 2004. V. 41. № 6. P. 973–985. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.14251>.
3. Kim M., Hall C.D. Control of a rotating variable-length tethered system // J. Guid. Contr. Dyn. 2004. V. 27. № 5. P. 849–858. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.3226>.
4. Williams P. Optimal deployment/retrieval of a tethered formation spinning in the orbital plane // J. Spacecr. 2006. V. 43. № 3. P. 638–650. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.17093>.
5. Su B., Zhang F., Huang P. Robust control of triangular tethered satellite formation with unmeasured velocities // Acta Astronaut. 2021. V. 186. P. 190–202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.04.045>.
6. Razzaghi P., Assadian N. Study of the Triple-Mass Tethered Satellite System under Aerodynamic Drag and J2 Perturbations // Adv. Space Res. 2015. V. 56 (10). P. 2141–2150. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ASR.2015.07.046>.
7. Cai Z., Li X., Wu Z. Deployment and retrieval of a rotating triangular tethered satellite formation near libration points // Acta Astronaut. 2014. V. 98. P. 37–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2014.01.015>.
8. Cai Z., Li X., Zhou H. Nonlinear dynamics of a rotating triangular tethered satellite formation near libration points // Aerosp. Sci. Technol. 2015. V. 42. P. 384–391. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2015.02.005>.
9. Pizarro-Chong A., Misra A.K. Dynamics of multi-tethered satellite formations containing a parent body // Acta Astronaut. 2008. V. 63. P. 1188–1202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2008.06.021>
10. Заболотнов Ю.М., Назарова А.А., Чанцин Ван. Анализ динамики и управление при развертывании кольцевой тросовой группировки космических аппаратов // Изв. РАН. МТТ. 2023. № 4. С. 110-124.