

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЗАИМНОЙ НАВИГАЦИИ И ОРИЕНТАЦИИ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В ГРУППЕ

© 2019

А. В. Небылов доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; nebylov@aanet.ru

В. В. Перлюк кандидат технических наук, доцент кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; perlvv@mail.ru

Т. С. Леонтьева заместитель директора по развитию инженерной школы; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; tleontieva@mail.ru

Рассматривается задача обеспечения полёта группы малых космических аппаратов (микроспутников) с учётом небольших взаимных расстояний между ними. Целью использования указанной орбитальной группировки является создание системы радиосвязи для управления из центрального наземного поста удалёнными объектами в виде беспилотных летательных аппаратов и наземных роботов, расположенных в труднодоступных районах Земли. Для удешевления конструкции микроспутников было принято решение жёстко закреплять приёмо-передающие антенны на их корпусах и использовать для наведения антенны пространственную ориентацию всего аппарата. Это серьёзно усложнило задачи навигации и ориентации микроспутников в группировке и потребовало разработки нового метода определения ориентации одиночного микроспутника. Суть состоит в обработке изображения, получаемого с помощью видеокамеры, установленной на соседнем микроспутнике. При этом использовались методы технического зрения. Приводятся результаты математического моделирования, а также результаты натурного эксперимента на стенде, подтверждающие работоспособность предлагаемого метода.

Малый космический аппарат; группировка микроспутников; навигация; взаимная пространственная ориентация; техническое зрение.

Цитирование: Небылов А.В., Перлюк В.В., Леонтьева Т.С. Исследование технологии взаимной навигации и ориентации малых космических аппаратов в группе // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18, № 1. С. 88-93. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-1-88-93

Введение

В последнее десятилетие наблюдался значительный рост числа запусков микроспутников как в ведущих космических державах, так и в странах, сравнительно недавно начавших заниматься космическими технологиями. Этому обстоятельству способствует прежде всего их низкая цена и малое время разработки и вывода по сравнению с традиционными космическими аппаратами. В использовании микроспутников заложен ещё не полностью раскрытый потенциал, позволяющий на новом уровне решать широкий спектр образовательных, прикладных и научных задач.

Для этого потребуется решение комплекса научно-технических задач, ориентированных на обеспечение информационного, аппаратного и пространственно-траекторного взаимодействия между отдельными низковысотными микроспутниками, составляющими сложную систему. Одной из таких задач – исследованию технологии взаимной навигации и ориентации микроспутников в группе – и посвящена данная статья.

Постановка задачи

В последние годы авторы статьи участвуют в международном научном проекте ESIT, проводимом в Международном институте передовых аэрокосмических технологий (МИПАКТ) Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (ГУАП) при поддержке Минобрнауки РФ в рамках госзадания № 1559.2017 на 2017-2019 гг. Главной задачей проекта является организация системы управления из центрального поста удалёнными объектами, расположенными в труднодоступных районах Земли [1;2].

Основным направлением использования данного проекта является осуществление телемедицины действия, предполагающее оказание удалённой медицинской помощи нуждающимся в ней объектам из единого центра управления полётом (ЦУП) малыми космическими аппаратами (МКА). При этом обеспечивается отработка технологий удалённого управления наземными роботами (НР), включая медицинские типа Leonardo, беспилотными летательными аппаратами или воздушными дронами, решающими сложные задачи. На этапе отработки проекта предусматривается использование для обеспечения сеансов радиосвязи с МКА открытых радиоканалов связи с международной космической станцией (МКС).

Кроме реализации радиоканала управления НР с помощью ЦУП МКА совместно с Научно-исследовательским институтом энергетических сооружений (НИИЭС) и отделом территориальных сетевых организаций (ТСО) проект ESIT предполагает комплекс организационно-технических средств для подготовки персонала и обслуживания дополнительных каналов связи на основе сети Интернет.

Сформированная структура используемых каналов связи должна обеспечить высокую динамику в передаче данных, возможность оперативной реконфигурации каналов связи с помощью разделённых друг относительно друга космического и наземного сегмента. Наземный сегмент сети поддерживается каналами связи ЗЕМЛЯ-ОРБИТА, а космический сегмент – каналами связи ОРБИТА-ОРБИТА. Для внешнего контроля за процессом передачи могут быть привлечены внешние наземные абоненты, подключённые по сети Интернет.

Канал связи ЗЕМЛЯ-ОРБИТА должен обеспечивать передачу данных на существенно большие расстояния (для низкоорбитальной группировки – несколько сотен километров), чем канал связи ОРБИТА-ОРБИТА (сотни метров). Предъявляются также принципиально разные требования к пропускной способности этих типов канала. Канал связи между спутниками должен обеспечивать существенно большую производительность по сравнению с каналом связи спутника с Землёй, что должно позволять оперативно перестраивать космический сегмент. Всё это требует существенно разных подходов к выбору средств технической реализации каналов связи.

В процессе полёта спутника потребуются постоянное изменение ориентации приёмо-передающих антенн каналов связи ЗЕМЛЯ-ОРБИТА и ОРБИТА-ЗЕМЛЯ. И если для наземной станции это не представляет принципиальной трудности, то для МКА использование дополнительных механизмов перемещения антенны трудно реализовать из-за имеющихся ограничений по габаритам и энергетике.

Поэтому было принято решение жёстко закрепить антенну на корпусе микро-спутника и использовать для наведения антенны на наземный объект пространственную ориентацию самого МКА. Такое упрощение системы связи серьёзно усложняет задачи навигации и ориентации микро-спутников. Кроме того, близкое расположение траекторий МКА в группе накладывает дополнительные требования для снижения вероятности столкновения микро-спутников друг с другом. Так как мы рассматриваем строй (формацию) из микро-спутников, то необходимо обеспечить заданное взаимное положение космических аппаратов. Эта необходимость обусловлена не только требо-

ваниями по изменению или поддержанию взаимного положения, но и отличиями в параметрах орбит близко летящих спутников [3].

Управление малыми космическими аппаратами в группировке

Одна из главных задач при групповом полёте – распределение заданий и действий, которые возлагаются на каждый спутник.

Задача управления делится на две части: задача измерений и собственно задача управления [2]. Задача измерений возникает вследствие необходимости знать расстояние между спутниками для того, чтобы поддерживать их заданное взаимное расположение. Задача измерений делится на две части: ориентация и навигация. Для решения задачи навигации необходимо измерить расстояние от исследуемого объекта до навигационных спутников, координаты которых заранее известны и выбраны в качестве базовых точек. Навигационная задача разделяется на две части: относительно Земли (достаточно точности в несколько метров и десятков метров) и между спутниками. Спутники должны быть выстроены в строго определённом порядке, потому что для решения задач с помощью строя из спутников необходима очень высокая точность (порядка сантиметра или миллиметра).

Для определения относительного фазового состояния аппаратов в группе используется обработка видеоизображений, получаемых при съёмке одного аппарата с помощью видеокамеры, установленной на другом аппарате [1]. Используется метод, основанный на распознавании на снимке некоторых точек аппарата, положение которых известно в системе отсчёта, связанной с этим аппаратом. Далее определяются координаты микроспутника относительно станции (выбранного для ориентации микроспутника из группы).

Широко известны методы выделения (идентификации) характерных признаков в изображении сцены, которые используются в системах машинного зрения. Суть метода, применительно к формированию геометрической модели микроспутника по изображению, состоит в селекции из полученного входного массива точек изображения некоторых локальных признаков, определяющих отличительные особенности формы и геометрических размеров именно того реального объекта, для которого создаётся данная геометрическая модель.

Для трёхмерной сцены селекция характерных признаков (точек, отдельных линий, областей и пр.) для отдельных двумерных изображений позволяет сопоставить между собой информацию, полученную при сканировании с разных сторон, и в результате сформировать трёхмерную геометрическую модель. Положительным результатом такого метода является возможность осуществления автоматического сравнения по характерным точкам геометрической модели с реальным изображением объекта. Этот метод позволяет также упростить и повысить надёжность выбора геометрической модели по её описанию.

Кроме того, имеется возможность использования одной геометрической модели для описания объектов, имеющих разные размеры, а также составления структурно сложных моделей из набора простых геометрических моделей по их описаниям.

Данный метод относится к классу пространственно-временной селекции и позволяет оперировать непосредственно с информацией, полученной тем или другим способом путём сканирования трёхмерной сцены.

К недостаткам данного метода следует отнести необходимость использования специальных алгоритмов распознавания и хранения описаний изображений, получаемых по характерным признакам изображений реальных объектов.

В простейшем случае определяется контур по локальному градиенту уровня освещённости двухмерного изображения. Применяется оператор Собеля или ему аналогичные фильтры градиентов уровня сигнала.

Достоинствами данного метода является его простота, точность фиксации характерных признаков, а также соответствие естественному представлению человека о характерных признаках объектов или сцены.

К ограничениям метода градиентов, как известно, относятся высокая чувствительность к шумам и случайным помехам на изображении, необходимость последующего обобщающего анализа полученных точек для определения основных и второстепенных признаков среди массы полученных данных.

Реализация метода определения пространственной ориентации микроспутника

Для практической проверки метода определения ориентации микроспутника по изображению был изготовлен стенд, включающий макет МКА в формате Cubesat и оптическую камеру с системой технического зрения. В исследованиях широко используется селекция локального цветового градиента сцены, например, методом сравнительного контрастирования, позволяющего определять и локализовать объекты, не имеющие резких границ и отличающиеся главным образом по цвету.

Для определения граней МКА на фотоизображении была использована библиотека NI IMAQ Vision системы технического зрения в среде LabView. Для поиска рёбер МКА используются функции поиска прямых линий, реализованные на основе алгоритма Хафа. Алгоритм осуществляет поиск двух горизонтальных и двух вертикальных прямых. Вершины МКА определяются как точки пересечения прямых.

Проведённые исследования подтвердили достаточную точность определения расстояния от камеры до макета МКА (около 10 мм на расстояниях до 15 м). Но при этом точность определения углов пространственной ориентации оказалась крайне низкой. На сравнительно больших расстояниях до объекта (более 15 м) методы технического зрения оказались неработоспособными. Поэтому исследовательский стенд был доработан путём установки на поверхности корпуса макета микроспутника специальных оптических маркеров (светодиодов), имеющих жёсткую привязку к собственным координатам объекта.

На вершинах макета спутника (первый спутник моделируемой группы) установлено восемь инфракрасных светодиодов. На втором моделируемом спутнике в группе устанавливается видеокамера. Это и есть упрощённая система оптико-электронной относительной ориентации и навигации. Инфракрасные (ИК) светодиоды, расположенные на углах куба, отображаются изображением на чувствительной матрице видеокамеры. Разработана специальная программа, которая измеряет координаты этих светодиодов. Данные передаются для вычисления относительных координат x , y , z и для вычисления углов относительной ориентации.

Исследуется точность определения в зависимости от дальности до снимаемой камеры и размеров реперных точек. Чем дальше микроспутник расположен от камеры, тем меньше точность. Это объясняется тем, что микроспутник в формате CubeSat имеет малые размеры (10×10 см) и соответственно малые расстояния между реперными точками. Поэтому, если камера расположена далеко от макета микроспутника, то она не различает вершины граней, на которых находятся ИК светодиоды. На полученном изображении светодиоды начинают сливаться, не давая возможности судить об их точном расположении.

Рассмотрены варианты практической реализации и особенности эксплуатации систем, где предполагается, что для видеокамеры могут быть видны произвольные наборы от трёх до восьми светодиодов.

Ориентация одного спутника относительно другого спутника определяется тремя углами Эйлера.

Полученная матрица

$$C = \begin{vmatrix} \cos \theta \cos \psi & -\cos \gamma \cos \psi \sin \theta + \sin \gamma \sin \psi & \sin \gamma \cos \psi \sin \theta + \cos \gamma \sin \psi \\ \sin \theta & \cos \gamma \cos \theta & -\sin \gamma \cos \theta \\ -\cos \theta \sin \psi & \cos \gamma \sin \psi \sin \theta + \sin \gamma \cos \psi & -\sin \gamma \sin \psi \sin \theta + \cos \gamma \cos \psi \end{vmatrix}$$

устанавливает преобразование из трёхгранника $OX_bY_bZ_b$, связанного со вторым спутником, в исходный трёхгранник $OXYZ$:

$$[XYZ] = C[X_bY_bZ_b].$$

Было проведено 1000 измерений с фиксированными углами поворота макета микроспутника и получены следующие результаты:

- угол ψ – действительное значение 10 град, оценка 10.2773 град;
- угол ϑ – действительное значение 30 град, оценка 29.7426 град;
- угол γ – действительное значение 50 град, оценка 50.2259 град.

Полученные результаты можно считать приемлемыми для практического применения разработанного метода.

Заключение

Подтверждена целесообразность использования системы технического зрения для обеспечения взаимной ориентации малых космических аппаратов в группе.

Планируется включить в состав стенда оборудование, позволяющее в реальном времени отслеживать сигналы радиоканала, используемого для связи между спутниками на орбите. Такая доработка стенда позволит повысить точность натурного эксперимента при синтезе алгоритмов и законов управления полётом малых космических аппаратов в группе.

Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации, государственное задание 9.155.2017/2017 / ФН на 2017-2019 гг.

Библиографический список

1. Nebylov A., Panferov A., Brodsky S., Knyazhsky A. Relative navigation and positioning of nanosatellites in formation // AIRTEC 2017 Congress. Germany, 2017.
2. Panferov A., Nebylov A., Brodsky S. Synthesis of a control system for relative motion of closely spaced satellites // Journal of Aeronautics & Aerospace Engineering. 2017. V. 6, Iss. S2. P. 79. DOI: 10.4172/2168-9792-C1-017
3. Panferov A., Nebylov A., Brodsky S. Synthesis of a control system for relative movement of closely spaced satellites // 7-th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS) (July, 3-6, 2017, Milan, Italy). DOI: 10.13009/EUCASS2017-452

INVESTIGATION OF THE TECHNOLOGY OF MUTUAL NAVIGATION AND ORIENTATION OF SMALL SPACE VEHICLES FLYING IN FORMATION

© 2019

- A. V. Nebylov** Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the Department of Aerospace Measuring and Computing Complexes; Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg, Russian Federation; nebylov@aanet.ru
- V. V. Perliouk** Candidate of Science (Engineering), Senior Lecturer of the Department of Aerospace Measuring and Computing Complexes; Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg, Russian Federation; perlvv@mail.ru
- T. S. Leontieva** Deputy Director of Engineering School Development; Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg, Russian Federation; tleontieva@mail.ru

The paper presents the problem of ensuring support of the flight of a group of small spacecraft (microsatellites) taking into account the small mutual distances between them. The purpose of using the orbital constellation specified is to create a radio communication system to control remote objects like unmanned aerial vehicles and ground robots located in hard-to-reach areas of the Earth from the Central ground station. To reduce the cost of microsatellite design, it was decided to rigidly fix the receiving and transmitting antennas on their housings and use the spatial orientation of the entire apparatus for antenna guidance. This seriously complicated the tasks of navigation and orientation of microsatellites in a formation and required the development of a new method for determining the orientation of a single microsatellite. The essence of the method is to process the image obtained by means of a video camera mounted on a nearby microsatellite. We used methods of computer vision. The results of mathematical modeling simulation, as well as the results of full-scale bench experiment confirming the efficiency of the proposed method are presented.

Small spacecraft; microsatellite grouping; navigation; mutual spatial orientation; technical vision.

Citation: Nebylov A.V., Perliouk V.V., Leontieva T.S. Investigation of the technology of mutual navigation and orientation of small space vehicles flying in formation. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2019. V. 18, no. 1. P. 88-93. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-1-88-93

References

1. Nebylov A., Panferov A., Brodsky S., Knyazhsky A. Relative navigation and positioning of nanosatellites in formation. *AIRTEC 2017 Congress*. Germany, 2017.
2. Panferov A., Nebylov A., Brodsky S. Synthesis of a control system for relative motion of closely spaced satellites. *Journal of Aeronautics & Aerospace Engineering*. 2017. V. 6, Iss. S2. P. 79. DOI: 10.4172/2168-9792-C1-017
3. Panferov A., Nebylov A., Brodsky S. Synthesis of a control system for relative movement of closely spaced satellites. *7-th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS) (July, 3-6, 2017, Milan, Italy)*. DOI: 10.13009/EUCASS2017-452