

УДК 629.195.2

В. Н. БРАНЕЦ

## УПРАВЛЕНИЕ И НАВИГАЦИЯ В ЗАДАЧЕ УДАЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

*В настоящей статье предлагается система удаления космического мусора с геостационарной орбиты искусственного спутника Земли. Предложения основаны на реальных существующих достижениях современной космической техники и рациональной схеме построения процесса сбора космического мусора, выполняемого автоматическими аппаратами многоразового длительного использования. Можно ожидать, что разработка и создание такой космической системы приведет к ряду инновационных разработок в определяющих направлениях космонавтики, таких как реактивное движение с высоким удельным импульсом, межорбитальные перелеты и транспортировка космических грузов по заданному назначению, автоматического управления и сложных операций, выполняемых автоматизированными системами.*

### 1. Экология космических полетов

Проблема засорения околоземного космического пространства так называемым космическим мусором как чисто теоретическая возникла, по существу, сразу после запусков первых искусственных спутников Земли в конце пятидесятых годов. Официальный статус на международном уровне она получила после доклада Генерального секретаря ООН под названием «Воздействие космической деятельности на окружающую среду» 10 декабря 1993г., где особо отмечено, что проблема имеет международный, глобальный характер: нет засорения национального околоземного космического пространства, есть засорение космического пространства Земли, одинаково негативно влияющее на все страны.

В фундаментальной работе С.С. Вениаминова и А.М. Червонова «Космический мусор – угроза человечеству» издания Института космических исследо-

---

**Бранец** Владимир Николаевич. Доктор физико-математических наук, профессор кафедры Московского физико-технического института, заместитель генерального конструктора ОАО «Газпром – космические системы». Действительный член Академии навигации и управления движением.

Статья по докладу на XXXV Общем собрании Академии навигации и управления движением.

ваний РАН [1] детально рассмотрен ряд вопросов от общего обзора проблемы, обнаружения и измерения траекторий объектов этого класса – до рассмотрения методов решения проблемы. В этой работе читатель может найти более подробные детали приводимых в этом разделе статьи обзорных сведений.

Известны случаи катастроф, связанных с явлением столкновения космических аппаратов.

14 апреля 1973 года первая орбитальная посещаемая станция (сокращенное название ОПС разработки ЦКБМ) «Алмаз», выведенная на низкую околоземную орбиту 3 апреля, «пропал», по данным американской системы слежения “Nogad”, превратившись в 14 объектов на этой орбите.

29 марта 2006 года в 03:41 (московское время) произошла авария (потеря) спутника связи «Экспресс-АМ11» на геостационарной орбите; в результате внешнего воздействия был разгерметизирован жидкостный контур системы терморегулирования, космический аппарат получил значительный динамический импульс, потерял ориентацию в пространстве и начал неконтролируемое вращение. По предварительным данным, причиной аварии стало столкновение с «космическим мусором».

10 февраля 2009 года коммерческий спутник американской компании спутниковой связи Iridium, выведенный на орбиту в 1997 году, столкнулся с военным российским спутником связи «Космос-2251», запущенным в 1993 году и выведенным из эксплуатации в 1995 году.

Оценка по текущим данным временного периода между такими катастрофами приближается к одной за один-два года.

На Международной космической станции МКС, общее управление полетом которой выполняет американская сторона, предусмотрено постоянное прогнозирование траектории полета станции и маневры уклонения от космического мусора. Кроме того, на все модули этой станции по требованию NASA установлены противометеоритные экраны

Необходимость мер по уменьшению интенсивности техногенного засорения космоса становится понятной при рассмотрении возможных сценариев освоения космоса в будущем. Настораживающие оценки дает так называемый «каскадный эффект» от взаимного столкновения объектов и лавинообразного увеличения частиц космического мусора - так называемый синдром Кесслера (D.J. Kessler – советник NASA). По его оценкам [1] этот эффект может в долгосрочной перспективе привести к катастрофическому росту количества объектов орбитального мусора на низкой орбите и, как следствие, к практической невозможности дальнейших космических полетов.

По состоянию на 3 апреля 2013 г. в каталоге Стратегического командования США [2], осуществляющего непрерывное слежение за космическим пространством, находится 16649 объектов искусственного происхождения

Из этого количества 3588 – это космические аппараты (действующие и вышедшие из строя), 13061 объект – космический мусор, т.е. ступени ракет, разгонные блоки и обломки космической техники.

Первое место по засорению космоса занимает Россия. Ей принадлежит 6257 объектов космического мусора. На втором месте США – 4938 объектов, третье место занимает Китай – 3752 объекта. За Францией числится 498 объектов, за Японией – 208, за Индией – 174, за Европейским космическим агентством – 88 объектов. Другим странам принадлежит 734 объекта космического мусора.

По данным стратегического командования США, к концу 2012 года число действующих спутников на орбитах искусственных спутников Земли составляло около 1000 единиц, их распределение по орбитам представлено в таблице. При ее составлении использована общепринятая классификация орбит искусственных спутников Земли: низкие (LEO – Low Earth Orbit), средние (MEO – Middle Earth Orbit) и геостационарные (GEO – Gestational Earth Orbit).

Спутники	LEO	MEO	GEO	Эллиптическая	Всего
Научные и астрофизические	61	5	3	22	91
Связи	229	4	341	11	585
Дистанционного зондирования Земли	87	0	23	2	112
Навигационные	12	51	3	0	66
Военные	57	0	12	—	69
Всего	446	60	382	35	923

Несмотря на то что до настоящего времени нет законодательных актов ответственности государств за засорение космического пространства, идет позитивный процесс совершенствования космической техники, в том числе и в этом направлении. Так космическая транспортная система «Спейс Шаттл» после доставки на орбиту полезного груза не оставляла после своего полета каких-либо механических частей в космосе. Этому примеру пытаются следовать и другие страны.

Космический мусор на LEO удаляется естественным образом за счет влияния атмосферы – здесь вопрос только времени завершения процесса торможения и падения в атмосферу космического объекта..

Первой активной системой удаления космического мусора может стать геостационарная орбита

## **2. Предлагаемая космическая система удаления космического мусора с GEO**

### **2.1. Баллистические оценки**

Космический аппарат, выведенный на круговую геостационарную орбиту, навечно остается на ней. Первые геостационарные спутники связи после завершения штатного функционирования просто оставлялись неуправляемыми на этой же орбите. Позднее появилось рекомендательное предложение удалять спутник перед завершением его работы на «орбиту захоронения», находящуюся на ~ 70-100 км выше GEO. Однако, поскольку орбита КА, находящегося на GEO, не является стабильной из-за гравитационного воздействия Солнца, Луны и планет, рекомендательная мера удаления КА на орбиту захоронения проблему не решает (проблема отодвигается на несколько десятилетий). После истечения некоторого периода времени траектория удаленного КА вновь может пересечь геостационарную орбиту..

Баллистический анализ дает следующие данные для геостационарной орбиты: её геоцентрический радиус (большая полуось орбиты), равен примерно 42200 км, орбитальная скорость находящегося на этой орбите механического объекта равна 3060 м/с.

Изменение радиуса этой орбиты может быть выполнено за счет изменения этой скорости за счет либо своего, либо каким-то образом доставленного и прикрепленного к объекту реактивного двигателя.

Если поставить задачу удаления фрагмента путем спуска его на Землю (т.е. снижения его орбитальной скорости таким образом, чтобы его орбита достигла атмосферы), нужен маневр изменения (уменьшения) скорости на величину  $\Delta V \geq 1490$  м/с.

Для удаления фрагмента из пространства около Земли нужен маневр увеличения его орбитальной скорости на величину  $\Delta V \geq 1270$  м/с.

Тем самым механическое тело на ГЕО находится в достаточно глубокой «потенциальной яме» и оба рассмотренных способа удаления представляются дорогостоящими из-за существенных затрат характеристической скорости реактивного движения, которое необходимо сообщить рассматриваемому объекту.

Между тем энергетика маневрирования в окрестности геостационарной орбиты позволяет маневром величиной  $\Delta V = 3,62$  м/с изменить большую полуось орбиты КА, выполняющего маневр, примерно на  $\sim 100$  км. Эта механика космического полета и определяет концепцию построения предлагаемой системы.

## **2.2. Система удаления космического мусора (КМ) с геостационарной орбиты (общая схема).**

Предлагаемая система содержит две основные части: *космический сегмент* системы и привлекаемые наземные средства управления – *наземный комплекс управления*.

*Космический сегмент* содержит в свою очередь два типа космических объектов: активный аппарат – *космический буксир* (КБ, один или несколько) и пассивный объект – *центр сбора* (ЦС) космического мусора, находящегося на геостационарной орбите.

*Космический буксир* – активный аппарат, осуществляющий все системные операции. Космический буксир должен иметь систему навигации и управления, обеспечивающую все виды ориентации, сближения и входа к космическим объектам (в т.ч. к так называемым «некооперируемым» КА, не содержащим технических средств для обеспечения и поддержки процесса сближения и стыковки). КБ должен иметь также возможность механического захвата (манипуляторами), а затем и транспортировки захваченного объекта, т.е. осуществлять управляемое движение по орбите. Для этой цели используются электрореактивные ракетные двигатели (ЭРД) с высоким удельным импульсом, КБ может осуществлять дозаправку топливом (рабочим телом для ЭРД), иметь развитый информационный обмен с наземным комплексом управления (НКУ). Будучи выведенным стандартной ракетой носителем (РН) на низкую орбиту вместе с другими компонентами системы, он должен быть способен доставлять (довыводить) на ГЕО все элементы системы, иметь длительный ресурс работы (20-30 лет), минимальные массовые характеристики.

*Центр сбора* космического мусора – пассивный элемент – ферма, содержащая «причалы» (точки прикрепления доставляемых КБ фрагментов космического мусора КМ). ЦС имеет пассивную гравитационную стабилизацию, для которой начальная ориентация, успокоение и т.д. обеспечиваются КБ во время его подходов к ЦС. На ЦС устанавливаются баки с топливом для КБ, пассивные оптические мишени и отражатели. Доставка ЦС или его последующих фрагментов в точку стояния осуществляется с помощью КБ.

*Наземный комплекс управления* (центр управления полетом) работает в тесном взаимодействии с радиолокационной системой контроля космического пространства. Обеспечивает управление КБ в любой точке их нахождения на GEO.

Конечной целью системы является сбор всех космических фрагментов, находящихся на близких к GEO орбитах (отработавшие спутники на GEO или орбитах «захоронения», разгонные блоки и другие объекты) в одну выбранную при проектировании точку – ЦС, так чтобы впоследствии обеспечить свободный доступ и использование этой орбиты (GEO). Реальную опасность представляет рассеянное в пространстве «облако» космических фрагментов, а не одиночная точка, движение которой может быть сделано управляемым и учитываемым.

Энергетические затраты на операции буксировки фрагментов космического мусора и автономных пролетов КБ могут быть сделаны оптимальными. Для фрагментов, находящихся на орбитах, близких к GEO, они могут быть достаточно малыми – порядка нескольких десятков метров характеристической скорости. Поскольку вся система – постоянно действующая и многоазовая, то для её работы на орбиту доставляется только рабочее тело для ЭРД.

### **3. Ориентация, управление и навигация в задаче удаления космического мусора**

Системой ориентации, управления движением и навигации оборудуются только космические буксиры (КБ). ЦС является пассивным объектом, и все необходимые задачи по управлению могут выполнять КБ, периодически подходящие к ЦС.

Перечислим задачи системы ориентации, управления движением и навигации КБ:

- наведение солнечных батарей на Солнце и остронаправленных антенн радиосвязи на Землю (приемо-передающие станции связи НКУ),
- обеспечение ориентации в одиночном полете и с присоединенным грузом в любой системе координат,
- обеспечение безрасходной стабилизации в одиночном полете и с присоединенным грузом, в том числе при движении с малым ускорением с использованием силовых гироскопов (СГ)
- обеспечение стабилизации с достаточным управляющим моментом при работе манипулятора во время операций «захвата» объекта и его фиксации на ЦС,
- обеспечение разгрузки СГ во время маневров,
- маневры межорбитальных перелетов, сближение и операции вблизи с кооперируемой целью,
- зависание у цели и ЦС для обеспечения работы манипуляторов, установка фрагментов КМ на ЦС,
- подходы и стыковки к танкерам ЦС для дозаправки,
- выполнение задач демпфирования и коррекции положения ЦС.

*Система ориентации* КБ может быть построена по классической схеме с использованием высокоточной бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС), корректируемой по информации от звездных датчиков. В качестве исполнительных органов безрасходной системы стабилизации рационально использование двухступенных силовых гироскопов (гиродинов), соз-

дающих максимальные управляющие моменты. Последнее очень важно при обеспечении работы манипуляторов (механические несбалансированные системы) и транспортировке – создания требуемого направления в пространстве ускорения для объекта с неизвестным расположением центра масс.

Для управления движением центра масс предлагается применение электроактивных двигателей с высоким удельным импульсом. Энергетика солнечных батарей КБ должна для обеспечения их работы быть достаточно высокой. Число ЭРД подлежит определению исходя из требования обеспечения по сути двух режимов движения: создания постоянного ускорения одного направления, в том числе с транспортируемым грузом, и создания координатных ускорений при сближении (также для двух случаев – одиночного полета и при транспортировке). Угловая стабилизация при работе ЭРД может быть обеспечена либо электронным управлением вектором тяги – изменением направления потока плазмы, либо механическим изменением конфигурации (смещением центра масс связи за счет движений «рук» манипуляторов). Необходимо при разработке системы выбрать метод определения ускорений центра масс путем использования высокоточных акселерометров либо по данным непосредственных измерений текущей орбиты, выполняемых радиолокационными системами слежения за космическим пространством (Norad).

*Задачи сближения* выполняются методами оптимальных межорбитальных переходов по информации об орбитах активного корабля (КБ) и цели. Орбита фрагмента космического мусора, являющегося некооперированной целью, может быть определена только наземными радиолокационными средствами. Тем не менее, на средней и малой дальности необходимо применение оптических измерений цели с помощью тех же звездных датчиков в режиме передачи и обработки изображений, или же лазерных локаторов, измеряющих не только направление, но и дальность, по типу лазерного сканера, представленного канадской компанией MDA в РКК «Энергия» в 2006 году.

В реализации процессов управления движением, и особенно операций на ближнем участке при подходе к цели, инспекции и операций механического захвата манипуляторами, желательно иметь сочетание телеоператорных режимов управления с участием НКУ и автономных автоматических режимов управления. Заметим, что фрагмент космического мусора не имеет ответных приспособлений; так что в отличие от манипуляторов МКС потребуются особые технические решения для манипуляторов КБ, имитирующих, скорее всего, строение человеческой руки.

*Космический буксир и его бортовой комплекс управления (БКУ).* Бортовой комплекс управления КБ (БКУ КБ) строится как интегрированная полностью цифровая бортовая система, состоящая из вычислительной системы, радиоканалов информационного цифрового обмена с центром управления полетом НКУ (включая телевидение), устройств сопряжения и обмена со всей бортовой аппаратурой космического буксира.

Цифровая вычислительная система обеспечивает своими ресурсами все задачи управления движением и навигации, обработки цифровых данных с оптических приборов наблюдения в задачах телеоператорного, полуавтоматического и автоматического управления манипуляторами, задачи сближения и работы КБ в ближней зоне у цели и ЦС.

БКУ должен обеспечивать своей архитектурой все процедуры наземной обработки и интеграции бортовых систем космического буксира, его наземных испытаний, включая все операции взаимодействия с НКУ.

Управление работой такой системы в полете – тесное взаимодействие космического автомата с наземными операторами для решения поставленных задач.

#### 4. Заключение

Современная космическая техника достигла того уровня, который позволяет создать практически промышленную многообразную систему длительного функционирования. Техническими предпосылками реализуемости предлагаемого проекта являются следующие достаточно хорошо освоенные космические технологии, проектные и технические решения, применяемые в современных космических аппаратах, такие как:

- операции сближения, стыковки, захвата и механического соединения космических объектов,
- автоматические дозаправки рабочим телом (топливом) космических станций, выполняемые космическими грузовыми кораблями
- различного рода манипуляторы для выполнения механических соединений (захватов, переносов и установок)
- большая энергетика современных космических аппаратов,
- использование электрореактивных двигательных установок с высоким удельным импульсом,
- компьютеризированные бортовые комплексы управления с обеспечением высокоинформативной связью с наземными комплексами управления, способными решать сложные задачи космического полета,
- системы управления и навигации, решающие задачи ориентации, маневрирования, сближения.

В современной космической технике имеются практические прецеденты, соответствующие всем техническим аспектам рассматриваемой системы.

С другой стороны, специфика задач предлагаемой космической системы, создаваемой в интересах всех стран, предполагает их участие и международное сотрудничество. Разработка такой системы может быть выполнена по примеру Международной космической станции, при создании которой были использованы возможности всех стран-участников.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Вениаминов С.С., Червонов А.М.** Космический мусор – угроза человечеству. - М.: ИКИ РАН, 2012. - 196 с.
2. **Kessler D.J.** Collisional Cascading the Limits of Population Growth in Low Earth Orbits // *Advances in Space Research* 11: 2137-2146, 1991.
3. **Интерфакс**, 17.04.2013.

**Abstract.** The system for removing space debris from the geostationary orbit of the Earth artificial satellite is proposed. The proposals are based on advanced space technologies and rational process of space debris collection by automatic reusable spacecraft. Development and production of such a system is expected to entail a number of innovative technologies in space industry such as reactive motion with high specific impulse, interorbital transfers and transportation of space cargo, automatic control and complex operations performed by automated systems.

**Key words:** space pollution, space debris, space debris removal system, orientation, navigation and motion control system