

МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЯ И ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА И СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ЭТОГО СИСТЕМЫ

Д.С. Барбашин

dmitriy.barbashin@inlinegroup-c.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Выполнен краткий анализ проблемы космического мусора в околоземном космическом пространстве, представлено описание причин данной проблемы и рисков, связанных с ней. Выполнен обзор методов отслеживания объектов космического мусора на геостационарной и на средней орбите, а также проведен структурного анализа системы, которая будет обеспечивать данный процесс. Рассмотрено четыре основных способа контроля области геостационарной орбиты и сформирована общая функционально-техническая структура. Разработан детальный перечень функционально-технических требований к проектируемой системе контроля космического пространства, отслеживающей объекты космического мусора на геостационарной орбите.

Ключевые слова: ракетно-космическая отрасль, космический аппарат, космический мусор, геостационарная орбита, техногенные космические объекты, системное проектирование, функционально-технические требования, структурный анализ

Введение. На сегодняшний день более 40 государств имеют собственные геостационарные спутники. Наибольшее их количество имеется у США — 1308, у Китая их 356, у Российской Федерации — 167, у Великобритании — 130, у Японии — 78, у Индии — 58, у Канады — 39, у Франции — 36. Ежегодно запускаются десятки новых спутников. Со временем космическое пространство на орбите заполняется отработавшими спутниками и ракетносителями. Более того, некоторые космические объекты взрываются, из-за чего возникает множество осколков, превращающихся в космический мусор. Загрязнение орбиты космическим мусором приводит к увеличению риска аварий с работающими аппаратами, что, в свою очередь, может повлиять на их стабильное функционирование [1].

Основной проблемой космического мусора является то, что объекты могут достаточно долго находиться на орбите. И если объекты с высотой орбиты менее 600 км благодаря тормозящему эффекту атмосферы постепенно снижаются и сгорают (при высоте орбиты меньше 200 км — за несколько дней, а при высоте от 200 до 600 км — до нескольких лет), то объекты с высотой орбитой (более 800 км) могут находиться в космосе столетиями. Если го-

ворить о геостационарной орбите (35 786 км над поверхностью Земли), которая считается наиболее привлекательной и выгодной для решения множества научных, народно-хозяйственных, военных, навигационных, коммерческих и других задач, то объекты могут оставаться на ней вечно.

Единственным возможным решением проблемы (а вернее, уходом от нее) является каталогизация объектов космического мусора [2]. В каталог следует внести все необходимые данные об объекте:

– полный набор элементов орбит каждого спутника, достаточный для выполнения прогнозов его движения с необходимой точностью (орбитальные данные);

– международный номер, данные о времени и месте запуска, типе объекта, национальной принадлежности, назначении, размерах, массе и т. п. (некоординатная информация).

Указанная информация позволяет безопасно выводить на орбиту новые объекты и учитывать риск их столкновения в процессе эксплуатации, а при необходимости изменять орбиту действующих спутников для предотвращения чрезвычайной ситуации [3]. Также отметим, что мониторинг околоземного космического пространства не является решением проблемы космического мусора, а представляет собой всего лишь временную меру [4].

Основные способы мониторинга [5]. Первый способ заключается в том, что для обнаружения и наблюдением за космическим мусором используют космический аппарат (КА), размещенный на геостационарной орбите и снабженный необходимыми системами, включая системы ориентации, наблюдения и связи с пунктом управления полетом КА.

Размеры области наблюдения геостационарной области (ГО) выбирают по результатам анализа каталогизированных техногенных космических объектов (ТКО), находящихся в ГО, при этом форму области наблюдения ГО задают в виде кольца или части кольца прямоугольного поперечного сечения геостационарной области (ПСГО), располагаемого вдоль геостационарной орбиты (ГСО), в котором находятся полностью от апогея до перигея большинство орбит каталогизированных ТКО.

Устанавливают границу ПСГО выше ГСО не более 200 км, определяемую высотой орбит захоронения отработавших свой жизненный цикл КА, границу ниже ГСО высотой перигеев большинства каталогизированных ТКО, а к югу и к северу от ГСО углом наклона i большинства каталогизированных ТКО, находящихся на геосинхронных орбитах, при этом КА снабжают аппаратурой обнаружения объектов ТКО, определения их угловых координат и параметров движения, аппаратурой получения детальных изображений объектов ТКО, вычислительным комплексом с блоком памяти (рис. 1).

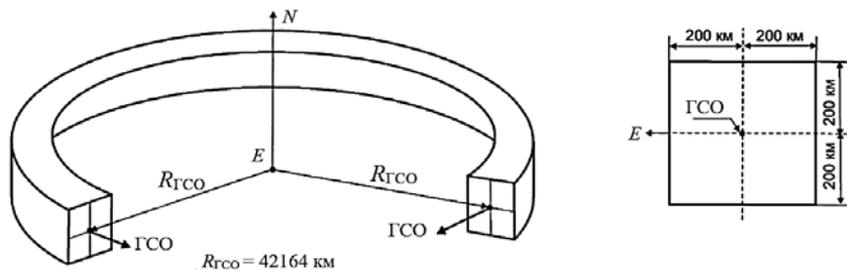


Рис. 1. Размеры области наблюдения

Космический аппарат размещают на круговой орбите в плоскости экватора или выше ГСО для движения на запад, или ниже ГСО для движения на восток, причем используют последовательно аппаратуру обнаружения объектов ТКО, определения их угловых координат и параметров движения, а также аппаратуру получения детальных изображений объектов ТКО для сбора информации об объектах космического мусора, кроме того, высоту орбиты КА устанавливают от ГСО на расстоянии h км, определяемом из условий возможности получения аппаратурой детальных изображений наибольшего, по имеющимся каталогизированным данным, количества ТКО, находящихся в сфере пространства вокруг КА радиусом предельной дальности $R_{ПД}$ получения детальных изображений, и обеспечения при этом максимально возможной скорости дрейфа КА $\omega_{др}$ относительно ГСО.

Устанавливают поле зрения аппаратуры обнаружения объектов ТКО, определения их координат и параметров движения по направлению движения КА, дрейфующего вдоль геостационарной орбиты на район, в котором располагается движущееся параллельно с КА ПСГО, причем расстояние D от КА до ПСГО, при которой поле зрения аппаратуры обнаружения, определения координат и параметров движения объектов ТКО полностью накрывает ПГСО, определяют как величину, рассчитываемую по формуле $D = d/\text{tg}(\omega_{ПЗ}/2)$, где d — половина диагонали прямоугольного ПСГО, $\omega_{ПЗ}$ — поле зрения аппаратуры обнаружения КА, вычисляют угол наклона θ поля зрения аппаратуры обнаружения КА вниз от вектора скорости КА по формуле $\theta = \arcsin D/(2R_{ГСО})$, где радиус ГСО $R_{ГСО} = 42164 \text{ км}$, и наводят аппаратуру обнаружения на выбранное ПСГО, выполняют обзор ПСГО, обнаруживают, селектируют от звезд искомые объекты ТКО, определяют параметры их движения, сравнивают с имеющимися данными в блоке памяти вычислительного комплекса КА (рис. 2).

Выбирают из обнаруженных объекты ТКО для получения их детальных изображений, рассчитывают время сближения с ними, в расчетное время наво-

дят аппаратуру получения детальных изображений объектов на выбранный объект ТКО, получают его детальные изображения. Эти данные заносят в блок памяти вычислительного комплекса КА, затем возобновляют обзор поперечного сечения геостационарной области, а при сеансах связи по радиолинии передают полученную информацию на пункт управления полетом КА.

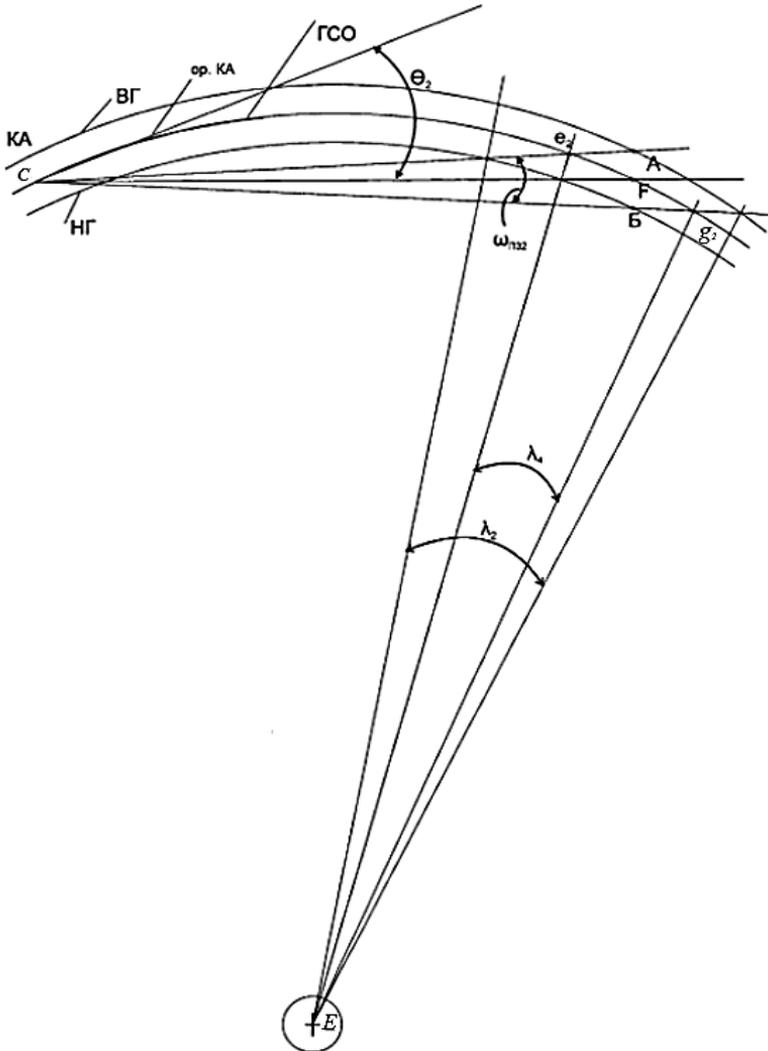


Рис. 2. Определение направления полей зрения наблюдательных систем

Второй способ имеет отличия, заключающиеся в том, что по завершении наблюдения части кольца ПСГО при расположении КА на орбите выше или

ниже ГСО осуществляют перевод КА на орбиту ниже или выше ГСО соответственно. Далее наводят аппаратуру обнаружения на выбранное ПСГО, выполняют обзор ПСГО, обнаруживают, селектируют от звезд искомые объекты ТКО, определяют параметры их движения, сравнивают с имеющимися данными в блоке памяти вычислительного комплекса КА.

Среди обнаруженных выбирают объекты ТКО для получения их детальных изображений, рассчитывают время сближения с ними, в расчетное время наводят аппаратуру получения детальных изображений объектов на выбранный объект ТКО, получают его детальные изображения. Эти данные заносят в блок памяти вычислительного комплекса КА, затем возобновляют обзор поперечного сечения геостационарной области, а при сеансах связи по радиолинии передают полученную информацию на пункт управления полетом КА, причем маневр КА вверх-вниз повторяют до поступления новой команды с пункта управления полетом КА.

Третий способ обзора геостационарной области отличается тем, что в режиме управления с КА с пункта управления полетом КА аппаратуру обнаружения наводят по небесным координатам, передаваемым на КА с пункта управления полетом КА, и проводят обзор в заданных координатах. Обнаруживают объект ТКО, определяют его координаты и параметры движения, и полученные данные по радиолинии передают на пункт управления полетом КА.

Четвертый способ заключается в том, что по командам, передаваемым с пункта управления полетом КА, меняют орбиту полета КА, переходят на режим сближения с заданным объектом. По достижении необходимого расстояния наводят аппаратуру получения детальных изображений на заданный объект и полученные изображения по радиолинии передают на пункт управления полетом КА.

Информацию передают по радиолинии при сеансах связи на пункт управления полетом КА. В режиме управления КА командами с пункта управления полетом аппаратуру обнаружения объектов наводят в заданные небесные координаты, обнаруживают объект и выполняют все операции по определению его координат и параметров движения, которые передают на пункт управления. Пункт управления полетом при необходимости передает команды для совершения маневра КА для сближения с заданным техногенным объектом и получения его детальных изображений. Определяют размеры области космического пространства, подлежащей наблюдению. Находят координаты и параметры движения обнаруженных объектов, получают их детальные изображения [6]. Для любого из перечисленных выше способов мониторинга необходимо создать единую информационную систему для хранения и обработки данных, получаемых с КА и с пунктов управления [7].

Системное проектирование информационной системы каталогизации космического мусора и выявление требований. Информационная система мониторинга и каталогизации космического мусора должна удовлетворять ряду функциональных требований, чтобы обеспечить эффективное и точное отслеживание объектов космического мусора и управление ситуацией, связанной с ними.

Сформулируем основные аспекты для выявления требований системы каталогизации космического мусора [8].

1. Учет и идентификация объектов.

Необходимо учитывать различные типы космического мусора, включая спутники, обломки ракет и другие объекты, и разрабатывать систему, способную их идентифицировать и классифицировать. Также важно идентифицировать уже добавленные в каталог объекты [9].

2. Отслеживание и прогнозирование траекторий.

Система должна быть способна отслеживать траектории космического мусора, предсказывать возможные столкновения с активными КА и предоставлять информацию о потенциальной опасности.

3. Обнаружение и устранение угроз.

Необходимо учитывать возможные угрозы, связанные с космическим мусором, и разрабатывать систему, способную обнаруживать и устранять потенциально опасные объекты.

4. Управление и контроль.

Система должна обеспечивать управление космическим мусором и его контроль, включая возможность маневрирования для избегания столкновений, удаления опасных объектов и другие меры по предотвращению угроз.

5. Международное сотрудничество.

Учитывая глобальную природу проблемы космического мусора, необходимо предусмотреть механизмы международного сотрудничества для обмена информацией и координации усилий по предотвращению угроз.

6. Техническая и правовая основа.

Система каталогизации космического мусора должна быть основана на соответствующей технической и правовой базе, которая учитывает международные нормы и стандарты, а также законы и положения в отношении космической деятельности [10]. Для выявления функциональных требований будем использовать инструменты системного проектирования, в частности, структурная модель (рис. 3).

Данная модель позволяет более точно определить блоки функциональных требований к разрабатываемой системе, а разделение требований на бло-

ки упрощает как процесс выявления, так и процесс управления требованиями к системам. Выявленные функционально-технические требования представлены ниже.

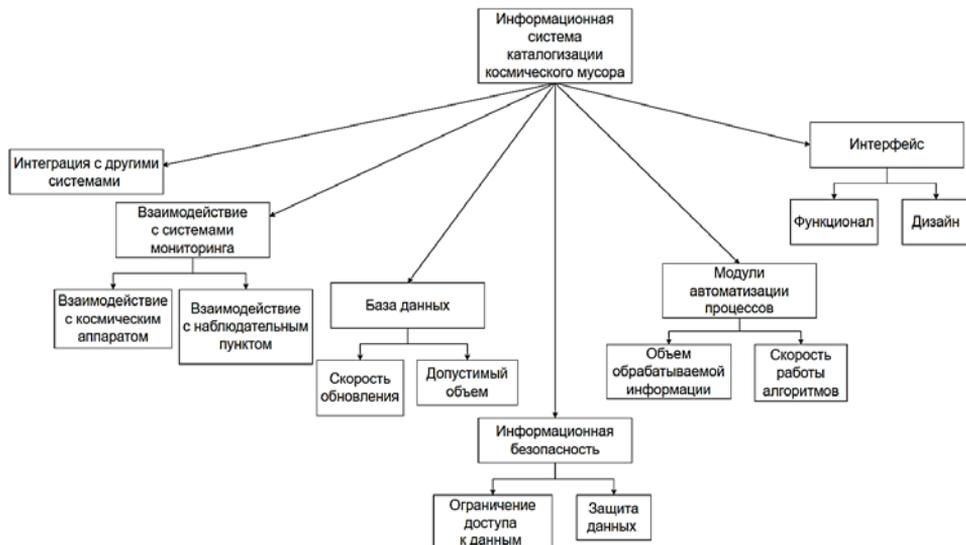


Рис. 3. Модель структурного проектирования системы

Блок «Взаимодействие с системами мониторинга»:

- возможность регистрации и отслеживания каждого объекта космического мусора;
- предоставление подробных данных об орбите и положении каждого объекта;
- возможность глобального мониторинга космического мусора с помощью спутников и других средств;
- возможность обнаружения и идентификации новых объектов космического мусора.

Блок «База данных»:

- обновление информации об объектах космического мусора в режиме реального времени;
- хранение и доступ к истории данных об объектах космического мусора для анализа и исследований;
- разработка механизмов резервного копирования и восстановления данных для обеспечения безопасности информации.

Блок «*Интеграция с другими системами*»:

- интеграция с другими системами космического контроля для обмена данными;
- интеграция с системами прогнозирования орбитальной динамики для точного отслеживания движения мусора;
- интеграция с системами космической навигации для обеспечения безопасности полетов;
- интеграция дополнительной информации о каждом объекте космического мусора;
- создание системы мониторинга интегрированных радиоизмерительных устройств для обнаружения космического мусора.

Блок «*Обеспечение безопасности системы*»:

- аутентификация и авторизация доступа к данным об объектах космического мусора;
- обеспечение конфиденциальности данных об объектах космического мусора и безопасности доступа к ним;
- управление доступом к информации о космическом мусоре для различных категорий пользователей.

Блок «*Модули автоматизации процессов*»:

- прогнозирование столкновений между объектами космического мусора и активными космическими аппаратами;
- автоматизированное оповещение об опасности столкновения с мусором;
- гибкая настройка уведомлений и отчетов по обнаруженному мусору;
- автоматизированная коррекция данных и обнаружения ошибок;
- обеспечение высокой отказоустойчивости и надежности работы системы;
- поддержка механизмов анализа рисков столкновения с космическим мусором и разработка сценариев мероприятий;
- поддержка функций мониторинга и предупреждения об изменениях в состоянии и движении объектов космического мусора;
- поддержка механизмов анализа тенденций в изменении состояния космического мусора;
- разработка механизмов автоматизированного уведомления международных организаций о состоянии космического мусора;
- возможность прогнозирования динамики роста космического мусора и разработка мер по его уменьшению;
- создание инструментов для анализа влияния космического мусора на окружающую среду и инфраструктуру космических полетов;
- разработка механизмов автоматизированного уведомления международных организаций о состоянии космического мусора;

- разработка механизмов предупреждения и предотвращения законодательных и экологических проблем, связанных с космическим мусором;
- создание системы мониторинга и управления пусковыми установками для беспрепятственного вывода космических аппаратов, минимизирующей воздействие космического мусора;

Блок «Интерфейс»:

- возможность расширенной классификации мусора по типу, размеру, массе и другим параметрам;
- возможность установки приоритетов для отслеживания определенных объектов космического мусора;
- отображение информации о космическом мусоре на карте условий земной орбиты;
- обеспечение визуализации данных об объектах космического мусора для удобного восприятия пользователями;
- возможность фильтрации информации о мусоре по различным критериям для управления представлением данных;
- возможность отображения и предоставления пользовательского интерфейса для работы с данными о мусоре;
- обеспечение совместимости с международными стандартами обработки и обмена данными о космическом мусоре;
- разработка механизмов предупреждения и предотвращения законодательных и экологических проблем, связанных с космическим мусором;
- возможность использования данных об объектах космического мусора для научных исследований в области космической астрономии и физики;
- создание системы мониторинга и управления пусковыми установками для беспрепятственного вывода космических аппаратов, минимизирующей воздействие космического мусора.

Заключение. В рамках данной статьи была поднята одна из актуальных проблем ракетно-космической отрасли — мониторинг космического мусора на геостационарной орбите. В статье рассмотрены некоторые способы мониторинга космических объектов в области геостационарной орбиты, а также сделан один из основных этапов системного проектирования информационной системы каталогизации космического мусора.

Литература

- [1] Назаренко А.И. *Моделирование космического мусора*. Москва, ИКИ РАН, 2013.
- [2] Вениаминов С.С. *Введение в теорию планирования поиска космического объекта по неточной априорной информации о его орбите*. Москва, ИКИ РАН, 2010.

- [3] Смирнов М.А., Микиша А.М. *Вековая эволюция высокоорбитальных космических объектов под действием светового давления. Проблема загрязнения космоса (космический мусор)*. Москва, Космосинформ, 1993, с. 126–142.
- [4] *Руководящие принципы Комитета по использованию космического пространства в мирных целях по предупреждению образования космического мусора*, 2007.
- [5] Кулешов Ю.П. *Способ обзора геостационарной области для обнаружения и наблюдения космического мусора с космического аппарата*. Патент № 2775095 РФ, МПК В64G 1/10, В64G 3/00, 2022, 3 с.
- [6] Карпов Н.В., Сергеев А.В., Тарадий В.К. Наблюдение событий в околоземном пространстве на пике Терскол. 1997–2007 гг. *Околоземная астрономия: тр. конф.* Нальчик, М. и В. Котляровы, 2008, с. 299–305.
- [7] Бордовицына Т.В., Авдюшев В.А. *Теория движения искусственных спутников Земли, аналитические и численные методы*. Томск, Том. ун-т, 2007, 220 с.
- [8] Андреев М.В., Бахтигараев Н.С., Сергеев А.В., Титов Д.Л. Исследования мало-размерных геостационарных объектов в обсерватории на пике Терскол в 2006–2007 годах. *Околоземная астрономия: тр. конф.* Нальчик, М. и В. Котляровы, 2008, с. 331–335.
- [9] Аксенов О.Ю., Вениаминов С.С., Якубовский С.В. Возможности радиолокационных средств системы предупреждения о ракетном нападении по обнаружению космических объектов. *Околоземная астрономия: тр. конф.* Москва, Янус-К, 2015, с. 261–265.
- [10] Аксенов Е.П. *Теория движения искусственных спутников Земли*. Москва, Наука, 1977, 360 с.

Поступила в редакцию 07.05.2024

Барбашин Дмитрий Сергеевич — студент магистратуры кафедры «Экономика и организация производства», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

Научный руководитель — Корянов Всеволод Владимирович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия. E-mail: vkoryanov@mail.ru; SPIN-код: 6616-8654.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Барбашин Д.С. Методы наблюдения и обнаружения объектов космического мусора и структурный анализ необходимой для этого системы. *Политехнический молодежный журнал*, 2024, № 04 (93). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/arise/nateeu/985.html>

METHODS OF THE SPACE DEBRIS OBSERVATION AND DETECTION AND STRUCTURAL ANALYSIS OF THE REQUIRED SYSTEM THEREFOR

D.S. Barbashin

dmitriy.barbashin@inlinegroup-c.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

The paper briefly analyzes the problem of space debris in the near-Earth space and presents the causes of this problem and risks associated with it. It reviews methods in tracking space debris objects in the geostationary and mean orbits, and provides structural analysis of the system that would ensure this process. The paper considers four main methods for monitoring the geostationary orbit area and forms a general functional and technical structure. A detailed list of functional and technical requirements is developed for the designed space monitoring system that tracks space debris objects in the geostationary orbit.

Keywords: rocket and space industry, spacecraft, space debris, geostationary orbit, man-made space objects, system engineering, functional and technical requirements, structural analysis

Received 07.05.2024

Barbashin D.S. — Master's Program Student, Department of Economics and Production Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.

Scientific advisor — Koryanov V.V., Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia. E-mail: vkoryanov@mail.ru; SPIN-code: 6616-8654.

Please cite this article in English as:

Barbashin D.S. Methods of the space debris observation and detection and structural analysis of the required system therefor. *Politekhnicheskiiy molodezhnyy zhurnal*, 2024, no. 04 (93). (In Russ.). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/arise/nateeu/985.html>