

УДК 520.6.07

МЕТОД ПРОВЕДЕНИЯ ОБЗОРА И ВАРИАНТ ПОСТРОЕНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТАХ

*Жуков А. О.¹, Прохоров М. Е.², Захаров А. И.³, Николаев Ф. Н.⁴, Тучин М. С.⁵,
Шахов Н. И.⁶*

METHOD OF REVIEW AND AN OPTION FOR BUILDING OF A SPACE SYSTEM FOR SPACE
OBJECTS MONITORING IN EARTH ORBIT

Zhukov A. O., Prokhorov M. E., Zakharov A. I., Nikolaev F. N., Tuchin M. S., Shakhov N. I.

In this work it is shown that there is an effective strategy of space objects control from space by observations in the visible range. To solve the mentioned problem just two spacecraft is enough, which can be created with the basis of modern technologies. In the work possible design's variations of spacecrafts and simulation's results of observation session are presented.

Keywords: system of space control, space objects, space observations.

Введение

Ближайшие окрестности Земли плотно заполнены действующими искусственными спутниками Земли (ИСЗ) и космическим мусором (КМ). К последнему относятся любые искусственные объекты, возникшие в результате космической деятельности, непосредственное управление которыми невозможно. К ним относятся ИСЗ, деятельность которых завершилась, части ракетносителей, детали и обломки космических аппаратов (КА), возникших как в ходе их запуска и эксплуатации, так и при столкновениях. Размеры ИСЗ и их частей лежат в интервале от десятков метров до десятков сантиметров, а частиц КМ — от метров до миллиметров. Распределение перечисленных объектов неравномерно, наиболее плотно заполнены ИСЗ и КМ

область низкоорбитальных спутников до высот в 2000 км и геостационарная зона.

Далее КМ и ИСЗ будем называть космическими объектами (КО).

Низкоорбитальные КО на высотах в 200–3000 км эффективно обнаруживаются с помощью радиолокации с поверхности Земли. Для более высоких объектов сегодня используются наземные оптические методы наблюдений. Эти методы позволяют в течение нескольких суток после запуска обнаруживать и затем отслеживать объекты размером более 70 см на геостационарной орбите и до нескольких сантиметров на низких орбитах. Ниже описывается предлагаемый нами метод контроля космических объектов на околоземных орбитах с помощью только оптических наблюдений с орбиты, имеющий боль-

¹Жуков Александр Олегович, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник Института астрономии РАН; e-mail: aozhukov@mail.ru

²Прохоров Михаил Евгеньевич, д-р физ.-мат. наук, доцент, заведующий лабораторией космических проектов Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова; e-mail: mike@sai.msu.ru.

³Захаров Андрей Игоревич, научный сотрудник Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова; e-mail: zakh@sai.msu.ru.

⁴Николаев Федор Николаевич, младший научный сотрудник Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова; e-mail: vorch@list.ru.

⁵Тучин Максим Сергеевич, младший научный сотрудник Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова; e-mail: maksim.tuchin@gmail.com.

⁶Шахов Николай Иванович, канд. техн. наук, докторант 4-го Центрального научно-исследовательского института Минобороны РФ; e-mail: shahoffnik@mail.ru.

шую полноту, хорошую оперативность и высокую проникающую способность.

1. Условия проведения наблюдений

Наблюдения КО проводятся при соблюдении следующих условий:

- наблюдения ведутся в видимом диапазоне — в максимуме спектра излучения Солнца;
- требуется обзор КО на всех высотах, от минимальной, 120–150 км, до геостационара;
- требуется обзор КО с любой ориентацией орбит — на всей небесной сфере;
- обзор должен производиться максимально быстро;
- в получаемых изображениях выделяются и отождествляются изображения как звезд, так и целевых объектов;
- для определения координат целевых объектов используются известные координаты звезд.

Заметим, что требование высокой скорости проведения обзора означает желательность использования широкоугольных оптических систем с большой апертурой, а также ведения наблюдений в сканирующем режиме, который уменьшает непроизводительные потери наблюдательного времени.

2. Методика контроля космических объектов

Предположим, что спутник-контролёр (СК) движется по круговой орбите. Так как этот КА должен функционировать длительное время, то из-за влияния земной атмосферы высота его орбиты не может быть меньше 500–600 км. Условия наблюдения с борта СК КО, движущихся ниже его, и КО, движущихся выше его, существенно различаются.

КО на более высоких орбитах виден большую часть времени, его можно наблюдать практически в любом направлении (исключая диск Земли и окрестность Солнца). Только некоторая часть КО заходит за Землю, но проводит там сравнительно небольшую долю времени.

Ситуация с нижелетающими КО иная. Их невозможно наблюдать за Землёй, где они проводят существенное время. КО также невозможно наблюдать на фоне Земли: над дневной частью диска наблюдениям мешает яркая освещенная поверхность планеты; над ночной частью Земли КО практически

всегда находятся в тени Земли и не видны; вблизи терминатора, где проводятся наземные наблюдения низкоорбитальных КО, условия наблюдения с орбиты также не оптимальны.

Единственное место и время, когда СК гарантированно можем наблюдать нижелетающие объекты — во время их пролета над лимбом Земли. Причем, чем ниже орбита наблюдаемых КО, тем ближе он находится к краю Земли и тем меньшее время может наблюдаться.

Отсюда следует предварительный вывод, что в любой стратегии контроля космического пространства (ККП) в видимом диапазоне большая доля наблюдательного времени должна уделяться наблюдению областей вблизи лимба Земли. Идеальный вариант — наблюдения лимба в течение 100% времени.

Что можно увидеть, когда телескоп СК направлен на лимб Земли? По мере возрастания дальности в поле зрения телескопа попадают низколетающие КО, расположенные между контролёром и лимбом, затем КО непосредственно над лимбом, далее — все более высокоорбитальные КО, попадающие на луч зрения телескопа по другую сторону лимба Земли, до предельной дальностей обнаружения КО.

Для того, чтобы регистрировать КО, пролетающие над разными частями лимба, необходимо перемещать поле зрения телескопа вдоль него, сохраняя высоту над краем Земли. Очень удобен следующий способ: СК придается медленное вращение (несколько оборотов за один виток вокруг Земли) вдоль продольной оси КА, которая сохраняет направление на центр Земли [1]. Для выполнения последнего условия на борту СК должна быть установлена система управления ориентацией на основе гироскопов или гиродинов.

Телескоп или телескопы устанавливаются под фиксированным углом к продольной оси СК, угол выбирается так, чтобы в поля зрения попадали самые низкоорбитальные КО (120–150 км).

Если центр поля зрения телескопа равномерно перемещается вдоль лимба Земли, то его траектория на небесной сфере (с учетом орбитального движения СК) будет описывать гиперциклоиду, размах которой немного превышает видимый угловой диаметр Земли с орбиты СК (рис. 1).

На СК можно установить несколько одинаковых телескопов, под одинаковыми углами к продольной оси КА. Возможная компо-

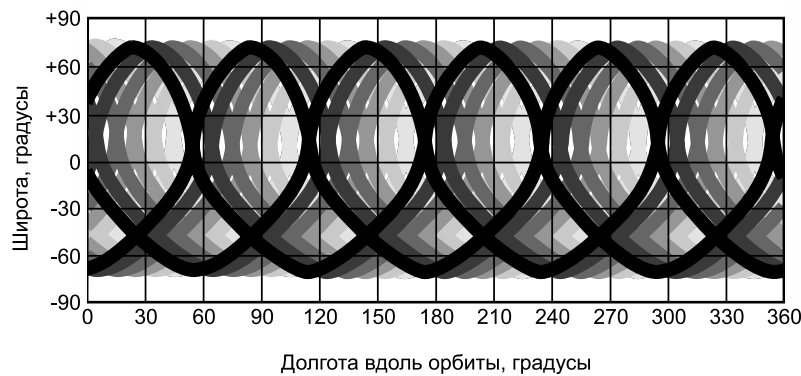


Рис. 1. Покрытие сферического пояса наблюдениями при следующих параметрах спутника-контролёра: $h = 800$ км, $P_{orb}/P_{axe} = 6$, $N = 6$ и $W = 10^\circ$. Для большей наглядности ширина полос сканирования уменьшена до 9°

новка спутника-контролёра с 6 телескопами показана на рис. 2. Поскольку оси визирования телескопов наклонены к продольной оси КА под углом меньшим 90° , возможна одновременная установка нескольких двухзеркальных телескопов с пересекающимися оптическими осями, т.к. зеркала устанавливаются на концах телескопов, а их центральная часть не содержит оптических конструкций. Учитывая, что максимальные габариты головных обтекателей современных ракетополетителей достигают 3,8–4,1 м, при такой компоновке (с 6 телескопами) на КА можно установить телескопы диаметром до 1,8–2,0 м [2].

Такая конструкция с несколькими телескопами сможет полностью заместить поверхность сферического пояса с шириной равной ширине гиперциклоиды, показанной на рис. 2, за следующее число орбитальных витков КА

$$n = N \times (P_{orb}/P_{axe}) \times (W/360^\circ),$$

где N — число телескопов на спутнике-контролёре, W — ширина поля зрения (полосы сканирования) в градусах, P_{orb} и P_{axe} — периоды орбитального и осевого вращения спутника-контролёра, соответственно. Отметим, что за n витков, к моменту полного покрытия поверхности сферического пояса наблюдениями каждая его точка замечается дважды. Это связано с самопересечениями гиперциклоиды. Покрытие пояса наблюдениями показано на рис. 1.

Наблюдения не захватывают области неба вблизи полюсов орбиты СК. Для полного покрытия небесной сферы наблюдениями необходим второй СК, аналогичный первому, плоскость орбиты которого примерно ортогональна орбите первого. Пока ширины сфери-

ческих поясов превышают 90° , что выполняется на круговых орбитах с $h < 2400$ км, для полного покрытия неба достаточно двух СК.

3. Моделирование наблюдений

Данные, приведенные на рис. 1, позволяют ответить на вопрос о наблюдении неподвижных небесных объектов (звезд), но не гарантируют полный охват движущихся КО. Для ответа на этот вопрос было проведено моделирование процесса регистрации КО. Моделирование было проведено для СК с $N = 6$ и $W = 10^\circ$. Высоты орбит СК брались равными $h = 800$ км (период обращения $P_{orb} = 1,7^h$), а отношение периодов вращения $P_{orb}/P_{axe} = 6$. Параметры орбит наблюдаемых КО брались из части каталога NORAD [3], содержащей функционирующие ИСЗ (всего 1352 ИСЗ). При моделировании учитывалось попадание ИСЗ в тень Земли. Были смоделированы две следующие конфигурации СККП: 1) один СК на солнечно-синхронной орбите (наклонение $i = 98^\circ$, другой на околоэкваториальной орбите ($i = 8^\circ$) и 2) один СК на солнечно-синхронной орбите (наклонение $i = 98^\circ$), другой на околоэкваториальной орбите с контрвращением ($i = 188^\circ$). Моделирование проводилось для одного витка и одних суток наблюдений. Результаты моделирования показаны на рис. 3–4.

Заключение

На основе приведенных данных можно сделать следующие выводы:

– Найдено эффективное решения проблем ККП в видимом диапазоне из космоса;

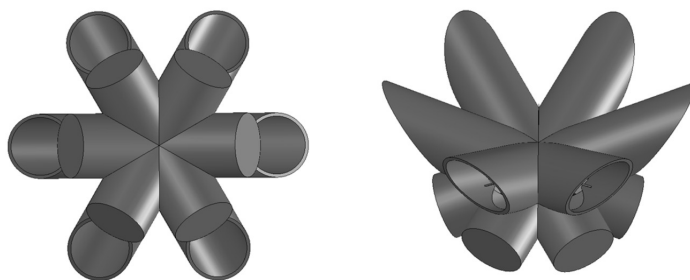


Рис. 2. Возможная компоновка спутника-контролёра с 6 телескопами

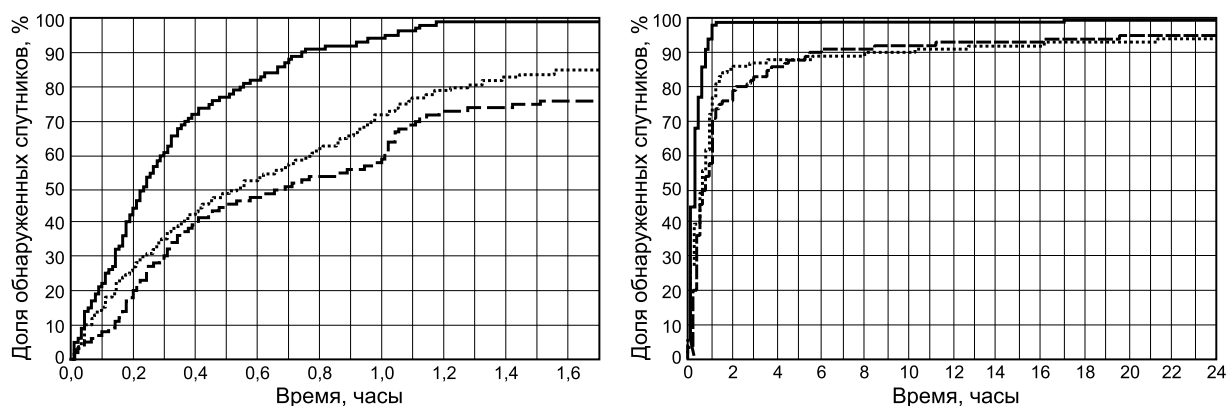


Рис. 3. Возрастание доли зарегистрированных спутников каталога NORAD со временем: слева — в ходе одного орбитального оборота СК, справа — за одни сутки. Параметры специализированного ИСЗ: высота орбиты — 800 км, отношение периодов орбитального и осевого вращения КА $P_{orb}/P_{axe} = 6$, число телескопов — 6, ширина поля зрения каждого — 10° . Штриховая линия — наблюдения со спутника на полярной орбите ($i = 98^\circ$), линия из точек — наблюдения со спутника на околоэкваториальной орбите ($i = 8^\circ$). Сплошная линия — одновременные наблюдения с обоих спутников. Одиночные спутники регистрируют около 80% объектов каталога NORAD за один орбитальный оборот, два спутника в совокупности — около 97%. Одиночные спутники за сутки регистрируют около 95% объектов каталога NORAD, оба спутника совместно — около 99,8%. Вертикальные линии под графиками соответствуют обнаружению незарегистрированных ранее объектов совокупностью двух СК для $t > 3$ ч.

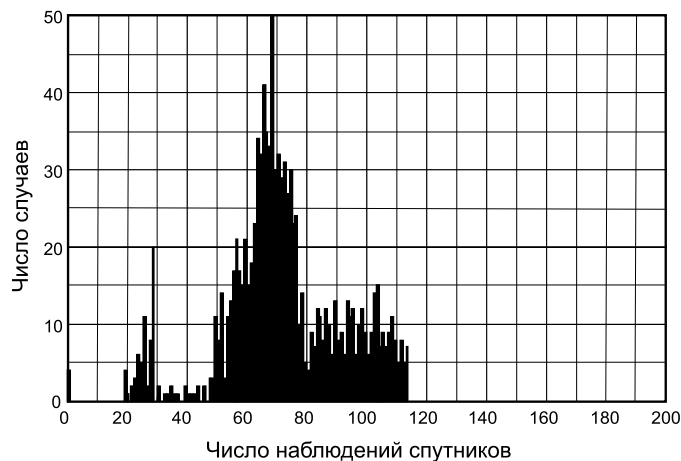


Рис. 4. Распределение числа наблюдений спутников каталога NORAD двумя СК с $i = 98^\circ$ и $i = 8^\circ$ за 24 ч. Левый бин гистограмм — пропущенные ИСЗ (0 наблюдений)

– Минимальная группировка КА, достаточная для полного решения указанной задачи, составляет 2 КА;

– Специализированные КА для решения задач ККП могут быть реализованы современными техническими средствами.

Литература

1. Прохоров М. Е., Захаров А. И. Сравнительный анализ стратегий обзора неба из космоса в задачах астероидно-кометной опасности

и контроля космического мусора // Вестник СибГАУ. 2011. №6(39). С. 118–123.

2. Официальный сайт ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», раздел: Ракета-носитель «Союз 2-3». Самара: 2012. [URL]: http://www.samspace.ru/products/launch_vehicles/rn_soyuz_2_3/ (дата обращения 24.04.2013).

3. Hoots F. R., Roehrich R. L. Models for Propagation of NORAD Element Sets // United States Department of Defense Spacetrack Report (3). 1988.

Ключевые слова: система контроля космического пространства, космические объекты, космические наблюдения.

Статья поступила 11 декабря 2013 г.

Институт астрономии РАН, г. Москва

Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, г. Москва

4-й Центральный научно-исследовательский институт Минобороны РФ, г. Москва

© Жуков А. О., Прохоров М. Е., Захаров А. И., Николаев Ф. Н., Тучин М. С., Шахов Н. И., 2013