

УПРАВЛЕНИЕ ГРУППИРОВКОЙ МАЛОРАЗМЕРНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СЕТЬЮ НАЗЕМНЫХ СТАНЦИЙ

**А.А. Спиридонов, В.С. Баранова, В.Е Евчик, И. А. Шалатонин,
В.Е. Черный, Д.В. Ушаков, В.А. Саечников**

*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь
E-mail: Spirid@bsu.by*

В работе представлен алгоритм распределения задач управления группировкой малоразмерных космических аппаратов между станциями наземной сети в условиях видимости максимального числа спутников. Рассмотрена модель распределения управления спутников группировки Planet между тремя наземными станциями приема Минск, Калуга, Самара.

Ключевые слова: группировка малоразмерных космических аппаратов; наземные станции приема.

Среди малоразмерных космических аппаратов (МКА)- наиболее перспективными и привлекательными с точки зрения качество, цена, время разработки, надежность функционирования является проектирование и использование группировок нано- и пикоспутников, позволяющее существенно повысить соотношение качество/эффективность для решения различных задач (радио и оптической связи, дистанционного зондирования Земли, исследование погодных явлений, слежения за подвижными объектами, научных исследований) [1]. Необходимость большого количества спутников в группировке диктуется возрастающими требованиями к непрерывному доступу к данным, которые поставляют космические системы. В идеале любая космическая услуга должна быть предоставлена в любое время, в любом месте, с требуемым качеством, за умеренную плату. На начало 2024 г. продолжали разворачиваться более 70 группировок МКА. Наземный сегмент является критически важной частью распределения задач управления и отслеживания группировок, а также сбора и распределения данных, особенно в условиях видимости максимального числа МКА, что соответствует режиму перегруженности наземных станций.

При управлении группировкой МКА решаются следующие задачи: прогнозирование пролётов МКА для организации устойчивой командной и телеметрической радиолиний; удалённое командное управление отдельными наземными станциями приема (НСП); анализ оперативной обстановки состояния МКА, оценка состояния работоспособности спутников группировки, выявление возникновения внештатных ситуаций; планирование сеансов управления и приема телеметрии со спутниками группировки; планирование внешнетраекторных измерений; планирование сценариев целевой миссии группировки [2].

Распределение МКА между НСП для решения задач по управлению группировкой в условиях видимости максимального числа спутников проводится согласно следующему алгоритму:

1. Загрузка начальных орбитальных параметров МКА группировки в формате TLE или в виде вектора состояния. Определение текущих орбитальных параметров группировки и расчет начального вектора состояния (в необходимом формате, например, в модели кругового движения используется орбитальные параметры: наклонение, период, долгота восходящего узла, аргумент широты) на интервале моделирования.

2. Расчет параметров приема каждого МКА группировки для НСП на 24 ч интервале: интервалы видимости МКА (при минимальном угле места); временная диаграмма количество видимых МКА для НСП; суммарное время видимости МКА (при минимальном угле места) для НСП.

3. Оценка временных интервалов с максимальным количеством видимых МКА для распределенного управления НСП группировкой.

4. Расчет параметров приема каждого МКА группировки для НСП на временных интервалах с максимальным количеством видимых МКА.

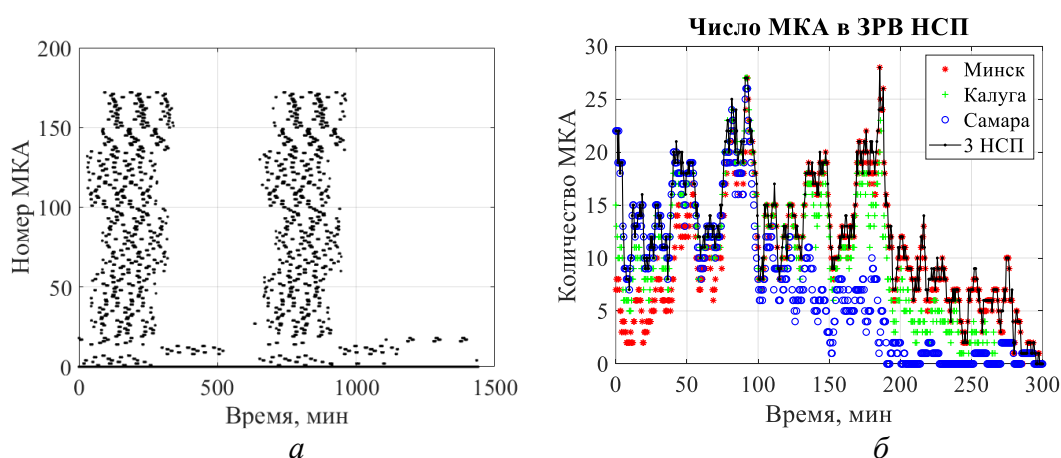
5. Разбиение интервалов с максимальным количеством видимых МКА на подинтервалы, содержащие локальные максимумы числа спутников; расчет параметров наведения антенных систем НСП и радиосигналов для каждого МКА группировки; отбор МКА с временем радиовидимости не менее 4 мин для назначения НСП на управление с учетом минимальных отклонений по параметрам наведения антенных систем и текущему приоритету (определяемому на основе анализа актуальной телеметрии и необходимостью работы с полезной нагрузкой или основными бортовыми системами).

Рассмотрим моделирование распределения управления МКА группировки ДЗЗ Planet между тремя НСП (Минск, Калуга, Самара). Группировка ДЗЗ Planet из 172 наноспутников (массой 4,7 кг и размерами 10*10*30 см), расположенных на околокруговых (эксцентриситет $e \ll 1$) солнечно-синхронных орбитах, позволяющим обеспечить постоянство времени пересечения экватора 9:30 – 11:30 (UTC). За один день спутники снимают больше 200 млн кв. км и покрывают почти весь мир самыми актуальными снимками.

Первоначально загружаются начальные орбитальные параметры МКА группировки Planet в формате TLE или в виде вектора состояния. Проводится расчет текущих орбитальных параметров группировки и расчет начального вектора состояния на момент начала времени моделирования. Как показали результаты моделирования текущих орбитальных параметров группировки Planet на 4 марта 2024 г. у большинства МКА группировки высоты орбит составляют 400-540 км, наклонения -97,02-97,50°,

при периодах обращения от 92,91 до 95,74 мин. Две основные орбитальные плоскости сдвинуты по долготе восходящего узла на угол $10-14^\circ$ при равномерном распределении МКА по аргументу широты. У 100% МКА эксцентриситет орбиты e не превосходит 0,005, что позволяет при моделировании движения спутников на кратковременных интервалах (в несколько часов) использовать модели кругового движения.

Затем проводится моделирование параметров приема каждого МКА группировки на 24 ч интервале над каждой НСП, как показано на рис. 1, а, а для основной НСП Минск. Моделирование позволяет для НСП, которые решают задачи по управлению МКА группировки, провести оценку интервалов видимости МКА, суммарного времени видимости каждого МКА, временных интервалов с максимальным количеством видимых МКА, параметров приема, и затем распределить задачи по управлению каждым МКА между НСП. Как показали результаты моделирования, за сутки пролета 06:00:00 4 марта - 06:00:00 5 марта 2024 г. над НСП Минск наблюдалось два интервала времени порядка 300 мин с временным промежутком между ними порядка 360 мин (от 06:44:00 до 11:28:00 и от 17:17:00 до 21:58:00), когда в зоне радиовидимости находилось максимальное количество видимых МКА от 5 до 28 спутников. При этом каждый МКА группировки за сутки находился в зоне радиовидимости НСП Минск (при минимальном угле места 5°) суммарно от 30 до 45 мин с максимальным интервалом на одном пролете до 8 мин.



Интервалы видимости МКА (при минимальном угле места 5°) за сутки пролета 06:00:00 4 марта - 06:00:00 5 марта 2024 г. над НСП Минск (а) и количество видимых МКА на 5 часовом временном интервале от 06:44:00 до 11:44:00 4 марта 2024 г. над НСП Минск, Калуга, Самара (б)

После этого на 5 часовых временных интервалах от 06:44:00 до 11:44:00 и от 17:17:00 до 22:17:00 4 марта 2024 г., когда над основной НСП

Минск наблюдалось максимальное количество видимых МКА, проводилось моделирование группировки для НСП Минск, Калуга, Самара, как показано на *Рис. 1, б*. На заданном интервале количество видимых МКА изменялось от 0 до 28, каждый МКА группировки находился в зоне радиовидимости (ЗРВ) трех НСП (при минимальном угле места 5°) суммарно от 7 до 29 мин с максимальным интервалом на одном пролете до 8 мин. При этом интервалы между минимумами и максимумами графика количества видимых МКА для НСП для заданного интервала от 06:44:00 до 11:44:00 меняются от 20 до 50 мин. Разбивая заданный интервал от 06:44:00 до 11:44:00 на 10 временных подинтервалов длительностью от 20 мин до 50 мин, проводится расчет параметров наведения антенных систем для НСП (угла места азимута) и принимаемого радиосигнала (доплеровского сдвига частоты) каждым МКА группировки и отбор МКА с временем радиовидимости не менее 4 мин для назначения НСП на управление с учетом минимальных отклонений по параметрам наведения антенных систем и текущему приоритету (определяемому на основе анализа актуальной телеметрии и необходимостью работы с полезной нагрузкой).

Реализован программный модуль распределения задач управления МКА группировки ДЗЗ Planet между тремя НСП (Минск, Калуга, Самара), который позволяет выявить интервалы видимости максимального числа спутников над основной станцией. Затем, определить на этих интервалах подинтервалы с общим максимальным количеством видимых спутников над всеми НСП, провести расчет параметров наведения антенных систем для НСП и принимаемого радиосигнала каждым МКА группировки. И окончательно реализовать отбор МКА с временем радиовидимости не менее 4 мин для назначения НСП управления, с учетом минимальных отклонений по параметрам наведения антенных систем и текущему приоритету, определяемому на основе анализа актуальной телеметрии и необходимостью работы с полезной нагрузкой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. A.A. Spiridonov, V.S. Baranova, V.A. Saetchnikov, D.V. Ushakov. The regional nanosatellite constellation modelling formation by a piggyback launch from different spaceports // Journal of the Belarusian State University. Physics. 2022. № 2. P. 50-59.
2. Моделирование построения региональной группировки наноспутников попутным запуском / А.А. Спиридонов, В.С. Баранова, В.Е. Евчик, И.А. Шалатонин [и др.] // Компьютерные технологии и анализ данных (СТДА'2022): материалы III Междунар. науч.-практич. конф., Минск, 21-22 апр. 2022 г. / БГУ; редкол.: В.В. Скакун (отв. ред.) [и др.]. Минск, 2022. С. 240-243.