

МОДЕЛИРОВАНИЕ НИЗКООРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ СОВМЕСТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ СЕРВИСОВ

К. А. Васильцов, Д. Н. Казеко

kirillvas61@gmail.com, rct.kazeco@bsu.by;

Научный руководитель — А. А. Спиридонов, старший преподаватель

В данной работе проведено моделирование различных конфигураций группировок малых космических аппаратов (МКА) с целью нахождения оптимальной конфигурации для обслуживания региональных сервисов.

Ключевые слова: орбитальное движение; группировки спутников; малый космический аппарат; наземная станция приема.

Группировки низкоорбитальных спутников стали значимым направлением в современных космических исследованиях, что обусловлено растущим спросом на глобальное покрытие связью и повышением доступности услуг в различных регионах мира [1, 2]. В ходе данной работы была разработана математическая модель расчета основных параметров группировок МКА, расположения наземных станций приема (НСП).

В работе рассмотрено формирование сети НСП студенческих радиостанций для приема данных с группировки МКА Spire Global со средней высотой орбит спутников 550 км и наклонениями i : 97,5; 82,9; 49,9 и 36,9 градусов [1]. Для начала оценивалось время приема данных Δt группировки одной станцией, находящейся в городе Минск (53,9° С.Ш. 27,6° В.Д.), как показано в табл. 1. В качестве устройств слежения за спутниками использовались антенны с поворотным устройством способные следить за МКА. Это позволяет увеличить зону радиовидимости МКА и снизить их количество в сети.

Таблица 1

Общее время приёма аппаратов для одной НСП

$i, ^\circ$	97,5°	82,9°	49,9°	36,9°
Δt , мин	36,25	36,5	40,8	26,8

Для увеличения общего времени приема данных с группировки были выбраны новые станции приема в следующих городах: Челябинск

(55,1° С.Ш. 61,4° В.Д.), Красноярск (56,0° С.Ш. 92,8° В.Д.) и Грозный (43,3° С.Ш. 45,7° В.Д.). Выбранные три города (Минск, Челябинск, Красноярск) имеют близкие значения широты и разнесены по долготе с учетом полученного угла зоны радиовидимости на 37°. Положение четвертой станции (Грозный) было выбрано на 10° ниже по широте, для обеспечения приема МКА с наклоном больше 24°, вместо 34° первоначальных, также такое расположение станции увеличивает время приема МКА и для аппаратов с полярными наклонениями. Полученное пересечение зон радиовидимости можно использовать для корректировки данных орбиты аппарата с помощью получения общих данных из совместной зоны радиовидимости. Время приема МКА данной конфигурацией наземных станций за сутки для каждого наклонения группировки Spire Global представлено в табл. 2.

Таблица 2

Общее время приёма аппаратов для сети НСП

$i, ^\circ$	97,5	82,9	49,9	36,9
Δt , мин	71,3	72,3	140,9	123,25

Таким образом, общее время приема спутников группировки увеличилось для наклонений: 97,5 на 96%, для 82,9 на 98%, для 49,9 на 245%, для 36,9 на 360%. Сеть наземных станций можно расширять, привлекая партнёров Белорусского государственного университета из России, что позволит увеличить зоны радиовидимости, общее время спутников и резервировать каналы связи с МКА группировки.

Рассмотрим формирование группировок МКА для сбора данных или региональных сервисов с ключевым параметром максимальным временем прерывания радиосвязи НСП со спутниками не более 50 мин. Этот параметр позволяет оценить время отсутствия спутников над определенной территорией, что критически важно для обслуживания тех или иных региональных сервисов [3]. Для моделирования пролетов спутников использована модель невозмущенного движения спутников. Координаты НСП 53,9° С.Ш. 27,6° В.Д. (г. Минск), минимальный угол места (элевации) 5°, временной интервал моделирования 24 часа, расчет позиций МКА каждые 5 секунд. В работе использована орбита студенческого спутника BSUSAT-1, как опорная орбита для создания группировки МКА.

При моделировании группировок МКА рассмотрены две конфигурации. Первая конфигурация группировки низкоорбитальных спутников с варьированием долготы восходящего узла Ω , вторая – с

варьированием и равномерным распределением средней аномалии M . Методика построения такова: путем добавления спутника N в группировку рассчитывалась динамика изменения максимального времени прерывания радиосвязи НСП со спутниками Δt (табл. 3).

Таблица 3

Результаты моделирования группировок

N	1	2	3	4	5	6	8
Δt_{Ω}	11:13:55	08:55:50	03:23:15	02:41:15	01:32:45	01:24:35	01:05:20
Δt_M	11:13:55	10:27:55	10:12:50	10:05:20	10:00:55	09:58:00	09:44:25

Как видно по графику (рис.) кривой a , оптимальным числом орбит спутников, при разнесении по долготе восходящего узла является 5, при этом угловое расстояние между соседними орбитальными плоскостями составило $\Delta\Omega = 72^\circ$. При добавлении новых аппаратов в модель изменения максимального интервала времени, отсутствия радиосвязи не наблюдается. Для кривой b (рис.), оптимальным числом спутников на орбите, при разнесении по средней аномалии является 3, при этом угловое расстояние между соседними МКА в одной орбитальной плоскости составило $\Delta M = 120^\circ$. Оценив временные интервалы для одного и трех МКА при разнесении их по средней аномалии, очевидно, что такая конфигурация группировки спутников нецелесообразна.

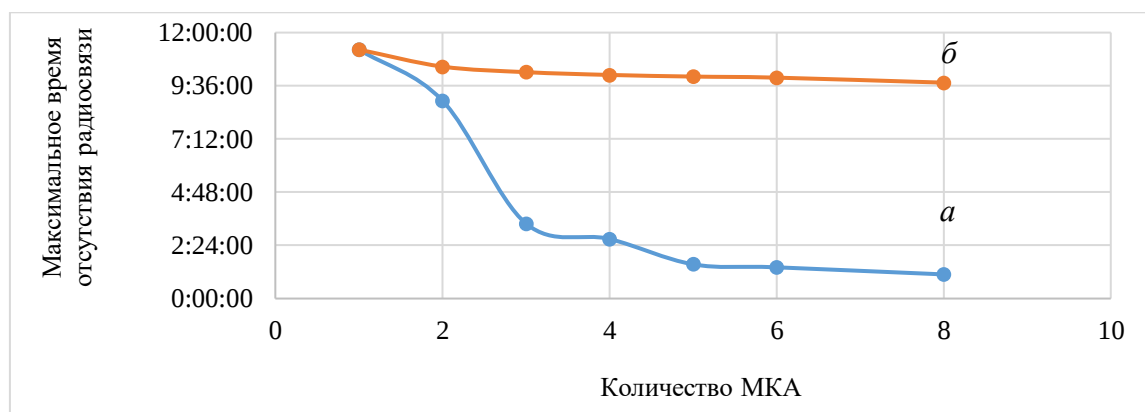


График зависимости максимального времени отсутствия радиосвязи от количества спутников: a – разнесение по долготе восходящего узла Ω , b – разнесение по средней аномалии M

Была предложена третья конфигурация группировки МКА, комбинированная, с разнесением спутников по долготе восходящего узла и средней аномалии. 5 орбит спутников были разнесены по долготе восходящего узла на угол $\Delta\Omega = 72^\circ$, затем в каждой орбитальной

плоскости равномерно разносились МКА по средней аномалии. Рассмотрены три конфигурации группировки (табл. 4): 5-1 (5 орбит по 1 спутнику), 5-2 (5 орбит по 2 спутника), 5-3 (5 орбит по 3 спутника) (табл.4). Оптимальной группировкой МКА является 5-3, с максимальным временем прерывания радиосвязи НСП со спутниками 47 мин 55с, что не превосходит максимальный интервал времени прерывания радиосвязи НСП со спутниками.

Таблица 4

Результаты моделирования комбинированной конфигурации

Количество спутников/ Группировка	5/5-1	10/5-2	15/5-3
Максимальное время отсутствия радиосвязи	1 ч 32 мин 45 с	1 ч 3 мин 0 с	47 мин 55 с

Исходя из результатов моделирования, были выявлены оптимальные группировки для каждой из конфигураций (табл. 5): при разнесении по долготе восходящего узла 5 МКА, $\Delta\Omega = 72^\circ$, при разнесении по средней аномалии 3 МКА, $\Delta M = 120^\circ$, при комбинированной группировке МКА 5 орбит по 3 спутника на каждой.

Таблица 5

Оптимальные конфигурации

Конфигурация группировки	По долготе восходящего узла	По средней аномалии	Комби- нированная
Оптимальная группировка	5 МКА, $\Delta\Omega = 72^\circ$, $M = \text{const}$	3 МКА, $\Delta M = 120^\circ$, $\Omega = \text{const}$	5-3 (15 МКА), $\Delta\Omega = 72^\circ$, $\Delta M = 120^\circ$
Δt	1ч 32 мин45 с	10 ч 12 мин 50 с	47 мин 55 с

Таким образом, построена модель сети студенческих наземных станций для приема данных с группировки МКА из четырех станций в городах Минск, Челябинск, Красноярск, Грозный. Предложено три конфигурации группировок МКА, выявлены оптимальные для каждой из конфигураций. Показано, что комбинированная конфигурация группировки МКА обеспечивает требуемый ключевой параметр – максимальный интервал времени прерывания радиосвязи НСП со спутниками не более 50 мин.

Библиографические ссылки

1. *Spiridonov A. A., Baranova V. S., Saechnikov V. A., Ushakov D. V.* The regional nanosatellite constellation modelling formation by a piggyback launch from different spaceports // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. 2022. № 2. С. 50–59.
2. *Антилогов В. Р.* Эффективность низкоорбитальных систем спутниковой связи на основе малых космических аппаратов // Технологии и средства связи. 2015. № 4. С. 62–66.
3. *Баранова В. С., Спиридонов А. А. [и др.]* Всенаправленное сканирование орбитальной группировки сверхмалых космических аппаратов// Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы седьмой межд. науч.-практ. конф. 18–19 мая 2023 г. Минск.2023. С. 394–396.