

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСТРОЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ НАНОСПУТНИКОВ ПОПУТНЫМ ЗАПУСКОМ

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

*БГУ, Минск, Республика Беларусь
E-mail: sansan@tut.by*

В работе разработана маршрутная карта построения региональной группировки наноспутников путем попутного запуска по известной информации китайских провайдеров. Проанализированы запуски с космодромов Тайюань и Цзюцюань на орбиты с наклоном около 90° , наилучшим образом соответствующие пролету над Минском (широта $\varphi = 53^\circ 54' 27''$ С.Ш., долгота $\lambda = 27^\circ 33' 52''$ В.Д.). Разработан метод предполетного прогнозирования орбиты наноспутника при попутном запуске на основании времени запуска, координат целевого космодрома, типа ракетносителя, наклона, высоты (периода) орбиты, а также анализа истории запусков с целевого космодрома и динамики движения космических аппаратов предыдущих запусков на близкие по высоте и наклону орбиты. Установлено, что достаточно пяти запусков для организации региональной группировки со средней продолжительностью перерыва радиовидимости не более 36 мин при максимальном значении 85 мин.

Ключевые слова: *группировка наноспутников, попутный запуск, предполетное прогнозирование орбиты.*

В последнее десятилетие во всем мире наблюдается тенденция создания группировок малоразмерных космических аппаратов (МКА) различного назначения [1]. На начало 2022 г. продолжали разворачиваться 52 группировки МКА. Из них 27 группировок связи (радио и оптический диапазон, передача данных, интернет), 13 группировок дистанционного зондирования Земли, 5 группировок исследование погодных явлений, 3 группировки автоматического слежения за подвижными объектами, 4 группировки научных исследований. Количество космических аппаратов (КА) в группировке варьируется от десятков до тысяч. При создании группировки наноспутников для решения задач сбора данных с подвижных объектов и обслуживания региональных сервисов на территории отдельного региона с периодичностью повторных наблюдений 15- 20 раз в сутки не требуется большое количество аппаратов, разнесенных в различных плоскостях. Для обеспечения требования потребителей информации таких систем необходимо 5-6 МКА, чтобы период повторных наблюдений составлял не более 1-2 ч.

При развертывании группировок наноспутников используют две схемы запуска: с международной космической станции (МКС) и попутный запуск (чаще всего на солнечно-синхронную орбиту) в группировке из нескольких единиц или десятков КА обычно вместе с основной полезной

нагрузкой. Информация о запуске заранее предоставляется провайдером запуска для того, чтобы разработчики МКА могли выбрать подходящий по параметрам запуск для выполнения целевой задачи. Эта информация включает в себя время запуска, наклонение орбиты, высоту орбиты и название ракетносителя, который будет осуществлять запуск.

Для минимизации стоимости цикла создания группировки наноспутников с целью решения задачи регионального мониторинга над территорией Минска предлагается схема развертывания путем попутного запуска наноспутников с нескольких космодромов. Группировка начинает выполнять целевую задачу через неделю после запуска последнего наноспутника. Предполагается, что наноспутники не имеют двигательной установки, которая позволила бы разводить их по орбите при совместном попутном запуске. Поэтому в каждом запуске предполагается запускать один наноспутник. Анализировалась информация по запускам 2021 г. с китайских космодромов за период июнь-ноябрь, так как у БГУ есть положительный опыт работы с китайскими партнерами. С учетом географических координат г. Минска (широта $\varphi = 53^{\circ}54'27''$ СШ, долгота $\lambda = 27^{\circ}33'52''$ ВД) были выбраны 15 запусков с орбитальным наклонением близким к 90° с двух космодромов: Цзюцюань (широта $40^{\circ}58'03''$ С.Ш., долгота $100^{\circ}16'43''$ В.Д.), Тайюань (широта $38^{\circ}50'56.71''$ С.Ш., долгота $111^{\circ}36'30.59''$ В.Д.).

В работе [2] для попутного запуска на солнечно-синхронную околокруговую орбиту разработан метод определения вектора состояния запускаемого спутника в модели возмущенного кругового движения. Для расчета вектора состояния наноспутника в первые сутки полета и оценки его орбиты на момент начала работы группировки был разработан метод предполетного прогнозирования орбиты при попутном запуске. Метод использует данные времени запуска, координат целевого космодрома, типа ракетносителя, наклонения, высоты (периода) орбиты, а также анализ истории запусков с целевого космодрома и динамики движения МКА предыдущих запусков на схожих по высоте и наклонению орбитах. Для расчета вектора состояния наноспутника в первые сутки полета предполагается, что значения долготы λ_{new} , широты φ_{new} МКА новых запусков схожими ракетносителями в моменты времени $t_0 + \tau_a + \Delta t$ (t_0 – момент времени запуска; τ_a – продолжительность активного участка траектории выведения; Δt – интервал в несколько минут) должны совпадать со значениями предыдущих запусков долготы λ_{old} и широты φ_{old} . Блок-схема для расчета вектора состояния наноспутника в первые сутки полета и оценки его на момент начала работы группировки показана на рис. 1. После расчета вектора состояния каждого наноспутника в момент запуска в модели упрощенного возмущенного движения МКА

(учитываем вековые возмущения от второй зональной гармоники и от производной среднего движения) проводится оценка его орбиты на момент начала работы группировки.

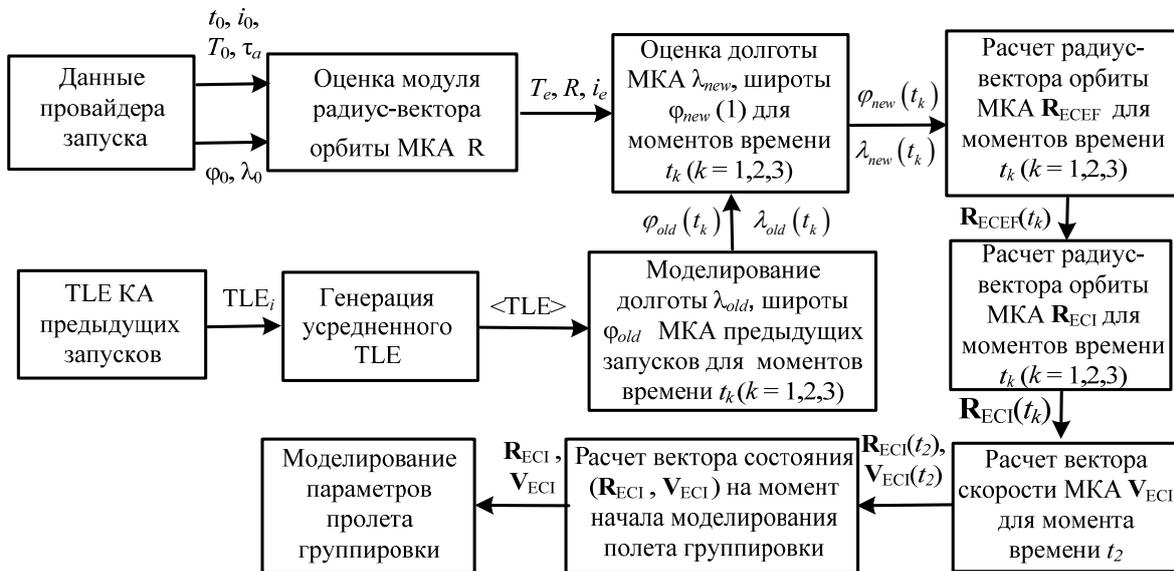


Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчета вектора состояния наноспутника при проектировании региональной группировки

Для 15 запусков с космодромов Цзюцюань и Тайюань на 00:00:00 11.11.2021 г. (UTC) были рассчитаны орбитальные параметры МКА группировки и выбраны 5 запусков (11.06, 03.07, 24.08, 14.10, 03.11) для того, чтобы получить 5 орбитальных плоскостей, отличающихся по долготе восходящего узла Ω (20° , 24.8° , 37.9° , 80.3° , 140.4°). Для близких орбитальных плоскостей МКА были выбраны запуски, разнесенные по аргументу широты u (для $\Omega = 20^\circ$ аргумент широты w равен 124.4° , а для $\Omega = 24.8^\circ$ аргумент широты w равен 279.1°), как показано в табл. 1.

Таблица 1

Орбитальные параметры наноспутников для 5 выбранных запусков

Дата и время запуска (Космодром)	№ МКА	$i, ^\circ$	H, км	$\Omega, ^\circ$	$u, ^\circ$
11.06.2021 (Тайюань)	4	97.50	493	24.8	279.1
03.07.2021 (Тайюань)	5	97.52	536	20	124.4
24.08.2021 (Цзюцюань)	1	86.41	1099	37.9	73.3
14.10.2021 (Тайюань)	3	97.46	514	140.4	47.6
03.11.2021 (Цзюцюань)	2	98.10	695	80.3	131.8

На суточном интервале 11.11.2021 г. была промоделирована группировка из 5 наноспутников при ее пролете над Минском. На рис.2 представлен график видимости наноспутников группировки от времени. Установлено, что наибольшее количество раз (10 раз) в зоне видимости Минска находился МКА №1, с максимальным интервалом в 18 мин.

Остальные (МКА №2-№5) пролетали 7-8 раз с максимальным интервалом в 13 мин. При этом средняя продолжительность перерыва радиовидимости МКА группировки составила 36 мин при максимальном значении 85 мин.

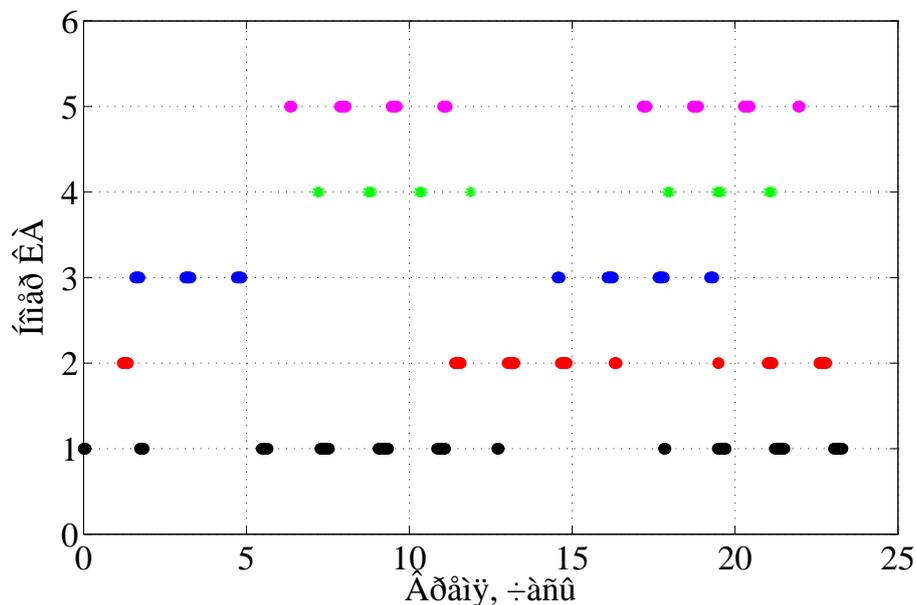


Рис. 2. График видимости наноспутников группировки от времени

В работе разработана маршрутная карта построения региональной группировки наноспутников путем попутного запуска на основе известной информации китайских провайдеров. Проанализированы запуски с космодромов Тайюань и Цзюцюань на орбиты с наклоном около 90° , наилучшим образом соответствующие пролету над Минском. Разработан метод предполетного прогнозирования орбиты наноспутника при попутном запуске в первые сутки полета и оценки его вектора состояния на момент начала работы группировки. Выявлено, что достаточно пяти запусков для организации региональной группировки со средней продолжительностью перерыва радиовидимости не более 36 мин при максимальном значении 85 мин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Спиридонов А. А., Велиган В. А., Шалатонин И. А. и др. Низкоорбитальные группировки малоразмерных космических аппаратов. // Квантовая электроника: материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. Мн.: БГУ, 2021. С. 421-424.
2. Spiridonov A. A., Saetchnikov V. A., Ushakov D. V., Cherny V. E. Pre-Flight calculation of the orbital parameters of a small satellite. // AIP Conference Proceedings. 2022. Vol .2456. N. 030037.