

УДК 51.74

Об определении необходимого числа резервных космических аппаратов в составе низкоорбитальной группировки спутниковой связи

Плахотнюк Арсений Вячеславович

plakhotniuk.av@phystech.edu

Притыкин Дмитрий Аркадьевич

pritykin.da@mipt.ru

МФТИ, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрено проектирование орбитального построения низкоорбитальных группировок спутниковой связи в аспекте необходимого резерва космических аппаратов на орбите с учетом требований к сетевой доступности предоставляемого сервиса при наличии внезапных отказов космических аппаратов в течение периода нормальной эксплуатации. Предложен способ определения параметров орбитального построения, гарантирующего глобальное или региональное покрытие поверхности Земли. Реализована численная процедура оценки покрытия поверхности Земли космическими аппаратами группировки в динамике. При заданном номинальном построении, графике развертывания группировки на номинальных орбитах, предположениях о составе группировки и вероятностях безотказной работы, входящих в нее аппаратов, определен алгоритм оценки потребного числа резервных аппаратов в зависимости от требований к сетевой связности.

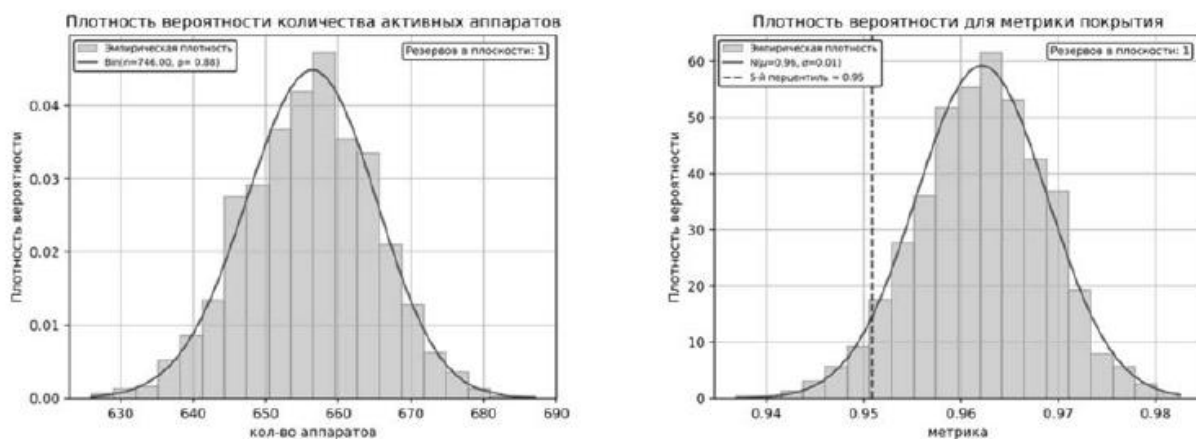
Ключевые слова: космическая группировка, глобальное покрытие, резервирование аппаратов, метрика качества, Монте-Карло моделирование, внезапный отказ

Введение. Надежность космических систем определяется способностью поддерживать требуемый уровень выполнения основной функции при возникновении отказов отдельных узлов. Для низкоорбитальных спутниковых систем связи [1] вопрос резервирования является ключевым, поскольку отказы космических аппаратов приводят к деградации покрытия, а следовательно, и к деградации сетевой доступности предоставляемого сервиса. Цель исследования — определить метрику покрытия для заданного состава орбитальной группировки и предложить способ расчета необходимого количества резервных аппаратов, позволяющих сохранять заданный порог качества метрики покрытия. Среди решенных в ходе исследования задач можно отметить: конструктивно определенную метрику качества глобального покрытия для любой орбитальной конфигурации; оценку вероятностного распределения числа активных аппаратов и метрики покрытия спустя среднее время наработки на отказ; рекомендации по количеству резервных аппаратов в каждой плоскости орбитальной группировки. Актуальность исследования обусловлена растущими требованиями к непрерывному глобальному сервису и ограниченными ресурсами размещения спутников. Новизна работы заключается в введении универсальной метрики покрытия и интеграции аналитических орбитальных моделей со статистическими методами оценки отказов.

Методы и материалы; результаты. В качестве исследуемого объекта использована группировка из семейства Walker constellation [2, 3], обеспечивающая однократное полное покрытие земной поверхности. Также учитывался процесс развертывания группировки в течение 1 года. Состояние космической системы моделировалось на момент $t = 5$ лет с момента первого запуска при выведении группировки. Выбранный промежуток времени совпадает со средним временем наработки аппаратов на отказ. Было использовано экспоненциальное распределение для оценки вероятности внезапных отказов аппаратов [4]. Вероятность того, что аппарат будет находиться в работоспособном состоянии в момент времени t определяется следующим образом: $P(t) = 1 - \exp(-\lambda t)$, где λ — интенсивность отказов, которая в период нормальной эксплуатации остается постоянной. В работе определена метрика покрытия, являющаяся метрикой качества сервиса орбитальной группировки, расчет которой использует разбиение поверхности Земли на соты Uber N3 [5].

Методика расчета метрики покрытия для заданного момента времени эксплуатации космической системы использует следующий итерационный процесс: определение доли покрытых N3 сот на Земле, аналитический прогноз орбитального движения с учетом второй гармоники геопотенциала с шагом в половину характерного размера подспутникового пятна, кумулятивное суммирование и усреднение полученной доли покрытых сот. Критерием остановки алгоритма выбрана стабилизация кумулятивной средней величины доли покрытых сот близи некоторого значения с допуском 0,1 % по относительной величине ее изменения за 0,25 периода орбитального движения. Проводилась серия Монте – Карло экспериментов для получения плотности распределения количества активных аппаратов и метрики покрытия. Оценка параметров полученных распределений осуществлялась с помощью метода максимального правдоподобия [6].

Ниже приведены результаты расчетов (см. рисунок) для следующей исходной конфигурации параметров: высота орбиты 647,8 км, наклонение $89,2^\circ$, 30 аппаратов в плоскости, 24 плоскостей, фазовый параметр $9,4^\circ$, сдвиг по долготе восходящего узла $6,2^\circ$, угол раствора конуса для аппарата 90° .



Закключение. Разработана методика расчета минимального резервирования для поддержания требуемого уровня метрики глобального покрытия. Полученные результаты показывают, что сформированная на основе данной методики стратегия резервирования космической системы позволяет количественно оценить необходимое резервирование, что позволяет повысить надежность оказываемого сервиса. Предложенный подход универсален относительно орбитальной конфигурации и может быть внедрен при проектировании любых многоспутниковых группировок, где критична глобальность сервиса.

Список источников

- [1] Улыбышев Ю.П. Проектирование спутниковых систем непрерывного обзора: краткий исторический обзор, современное состояние и новые решения. *Труды МАИ*, 2009, № 34. URL: https://mai.ru/upload/iblock/d81/proektirovanie-sputnikovykh-sistem-nepreryvnogo-obzora-kratkiy-istoricheskiy-obzor_-sovremennoe-sostoyanie-i-novye-resheniya.pdf (дата обращения 06.11.2025).
- [2] Можаяев Г.В. *Синтез орбитальных структур спутниковых систем: теоретико-групповой подход*. Москва, Машиностроение, 1989, 303 с.
- [3] Walker J.G. Some Circular Orbit Patterns Providing Continuous Whole Earth Coverage. *Journal of the British Interplanetary Society*, 1971, vol. 24, pp. 369–384.
- [4] Акимов В.А., Лапин В.Л., Попов В.М., Пучков В.А., Томаков В.И., Фалеев М.И. *Надежность технических систем и техногенный риск*. Москва, Финансовый издательский дом «Деловой экспресс», 2002.
- [5] *Uber Technologies Inc. H3: Hexagonal hierarchical geospatial indexing system*. URL: <https://h3geo.org/> (accessed 11.11.2025).
- [6] Лагутин М.Б. *Наглядная математическая статистика*. Москва, БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012, 116 с.