

4. McDowell, J. Space Report, Jonathan's Space Report № 484. Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics. – Cambridge. USA. – 2002.
5. Sedelnikov A.V., Accuracy assessment of microaccelerations simulation on the spacecraft “Foton-M” no. 2 according to magnetic measuring instruments data, Microgravity Science and Technology. – 2020. – Vol. 32. – № 3. – P. 259–264.
6. T. Lyubimova, N. Zubova, V. Shevtsova, Effects of Non-Uniform Temperature of the Walls on the Soret Experiment, Microgravity Science and Technology. – 2019. – Vol. 31. – №1. – P. 1–11.
7. Anshakov G.P., Belousov A.I., Sedelnikov A.V., The problem of estimating microaccelerations aboard Foton-M4 spacecraft, Russian Aeronautics. – 2017. – Vol. 60. – № 1.– P. 83–89.
8. Sedelnikov A.V., Control of microaccelerations as the major characteristics of space laboratory of specialized technological appointment as constructive methods, Testing. Diagnostics. – 2014.– №7. – P. 57–63.
9. Abrashkin V.I., Puzin Y.Y., Voronov K.E., Piyakov I.V., Semkin N.D., Sazonov V.V., Chebukov S.Y. Determining the rotational motion of the BION M-1 satellite with the GRAVITON instrument, Cosmic Research. – 2015. – Vol. 53.– № 4. – P. 286–299.
10. Hu W.R. Space Program SJ-10 of Microgravity Research / W.R. Hu, J.F. Zhao, M. Long et al. // Microgravity Science and Technology. – 2014. – Vol. 26. – № 3. – P. 159–169.
11. A. Ivanov, K. Elkin, G. Karabadzhak, V. Mironov, L. Neznamova, G. Uspensky Served by ISS free-flying spacecraft OKA-T and its usage for microgravity experiments and technological exploration of space, 65th International Astronautical Congress 2014 (IAC 2014). – 2014. – Vol. 1. – P. 607–612.
12. Orlov D.I. Modeling the temperature shock impact on the movement of a small technological spacecraft, Proceedings International Conference “Problems of Applied Mechanics”, Bryansk, Russia, 1–3 December 2020, 050001.
13. M.F. Barschke, P. Werner, K. Gordon, M. Lehmann, W. Frese, D. Noack Initial Results from the TechnoSat in-Orbit Demonstration Mission, 32nd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites. – 2018. – SSC18-WKX-03. – P. 1–11.
14. Схиртладзе А.Г., Ярушин С.Г. Проектирование нестандартного оборудования: учебник. – М.: Новое знание, 2006. – С. 424.
15. Naumov A. The method of world creation to the 100th anniversary of discovery of the method Chochral and 60th anniversary of receiving the first crystal germany in Russia, Electronics: science, technology, business. – 2016. – № 9. – P. 157–167.

УДК 528.837:629.78; УДК 621.003

Кучеров А.С., Пупков Е.А.

ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ КАК СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Для оценки одного из основных показателей эффективности космической системы наблюдения (КСН) – показателя производительности – могут использоваться методы теории массового обслуживания. При съёмке точечных объектов

наблюдения КСН может рассматриваться как система массового обслуживания (СМО) с отказами – одноканальная или многоканальная, в зависимости от числа входящих в её состав космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ). При этом объекты наблюдения образуют поток заявок, поступающих на вход СМО в процессе орбитального движения КА [1].

Одноканальная СМО с отказами может находиться в одном из двух состояний: S_0 – канал свободен, S_1 – канал занят, идёт обслуживание поступившей заявки (рис. 1).

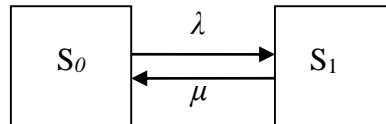


Рис. 1. Граф состояний одноканальной СМО с отказами

Здесь λ – интенсивность потока заявок, μ – интенсивность потока обслуживания.

Вероятности состояний системы P_0 , P_1 описываются известными уравнениями Колмогорова [2]:

$$\begin{cases} \frac{dP_0}{dt} = -\lambda p_0 + \mu p_1; \\ \frac{dP_1}{dt} = -\mu p_1 + \lambda p_0. \end{cases}$$

Предельные вероятности состояний выражаются следующими зависимостями:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu}; \quad \lim_{t \rightarrow \infty} P_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}.$$

К основным характеристикам одноканальной СМО с отказами, как известно, относятся следующие:

1) относительная пропускная способность q , равная отношению среднего числа заявок, обслуживаемых системой, к среднему числу заявок, поступивших в систему в единицу времени: $q = 1 - P_1$;

2) абсолютная пропускная способность A – среднее число заявок, обслуживаемых системой в единицу времени: $A = q\lambda$.

Если в системе имеется n обслуживающих каналов, то граф состояний системы выглядит следующим образом:

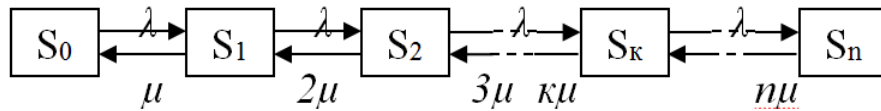


Рис. 2. Граф состояний многоканальной СМО с отказами

Здесь индекс состояния соответствует числу занятых каналов.

Предельные вероятности для такой системы выражаются зависимостями

$$P_k = \frac{P_0 \rho^k}{k!}, \quad k = \overline{1, n}; \quad P_0 = \left[1 + \rho + \frac{\rho^2}{2} + \dots + \frac{\rho^n}{n!} \right]^{-1},$$

где $\rho = \lambda/\mu$ – приведённая интенсивность потока.

Пропускные способности системы:

$$q = 1 - P_{\text{отк.}} = 1 - P_n; \quad A = \lambda(1 - P_n).$$

Среднее число занятых каналов

$$\bar{k} = \frac{A}{\mu} = \frac{\lambda(1 - P_n)}{\mu} = \rho(1 - P_n).$$

При моделировании КСН системой массового обслуживания будем исходить из следующих предположений:

- КСН работает в режиме съёмки точечных объектов наблюдения (ОН);
- ОН распределены равномерно по широте и долготе;
- задано общее число ОН в полосе обзора на одном витке орбиты N;
- задан закон перенацеливания КА с одного ОН на другой при развороте КА по углу крена.

Интенсивность потока заявок $\lambda = N/T$, где T – период обращения КА. Интенсивность потока обслуживания $\mu = 1/t_{cp}$, где t_{cp} – среднее время перенацеливания КА ДЗЗ с одного ОН на другой.

В работе [1] предложен алгоритм, при котором перенацеливание включает три этапа: ускорения, поворота с постоянной угловой скоростью и торможения. Схема, иллюстрирующая процесс перенацеливания, приведена на рис. 3.

При этом среднее время перенацеливания определяется зависимостью

$$t_{cp} = \left(\frac{16\gamma_{cp}}{3\varepsilon} \right)^{1/2},$$

где γ_{cp} – средний угол поворота КА ДЗЗ по углу крена, ε – максимальное угловое ускорение поворота.

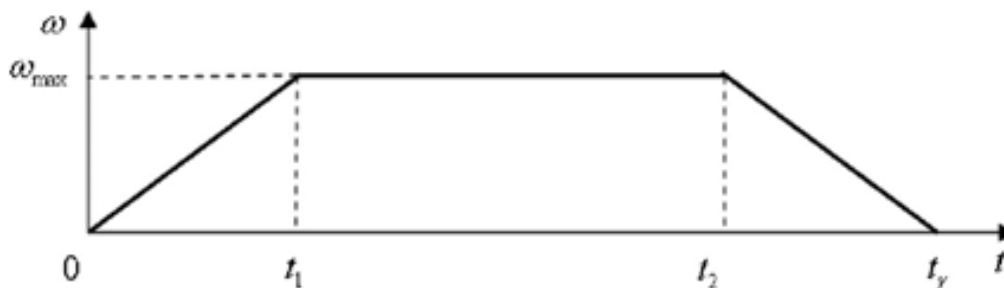


Рис. 3. Схема, иллюстрирующая изменение скорости поворота космического аппарата в зависимости от времени

Количество ОН, снятых на одном витке орбиты КА, равно

$$N_B = Nq \frac{\alpha_c}{2\pi},$$

где α_c – угол солнечного пятна [1].

Для иллюстрации рассмотренного подхода используем следующие исходные данные: высота орбиты $H= 500$ км, $N = 100$, $\gamma_{cp} = 45^\circ$, $\varepsilon = 2 \cdot 10^3 \text{ с}^{-2}$, $\alpha_c = 120^\circ$.

Задача оценки производительности КСН была решена для следующих трёх вариантов.

1. Один КА ДЗЗ в составе КСН – $N_B = 18$.
2. Два КА ДЗЗ в составе КСН – $N_B = 28$, при этом среднее число занятых каналов (постоянно занятых съёмкой КА ДЗЗ) $\bar{k} = 0,68$.
3. Три КА ДЗЗ в составе КСН – $N_B = 32$, $\bar{k} = 0,77$.

Можно видеть, что при увеличении числа КА ДЗЗ в составе КСН с двух до трёх её производительность увеличивается несущественно, при этом, если в случае двух КА постоянно задействованы 34 % от их общего количества, то в случае трёх КА – только 26 %. Такая относительно невысокая производительность объясняется случайным распределением ОН в полосе обзора – если несколько объектов наблюдения расположены достаточно близко в направлении движения КА, но удалены друг от друга по углу крена, космический аппарат может не успеть переацелиться, и часть объектов не будет снята.

Предложенный упрощённый подход не учитывает многих реальных аспектов решаемой проблемы, но может быть полезен для оперативной оценки производительности КСН на ранних стадиях её разработки.

В дальнейшем представляется целесообразным усовершенствовать используемые модели в следующих направлениях:

1. Рассмотреть более сложное распределение ОН в полосе обзора – например, равномерное по географической долготе и нормальное по широте, как это схематично показано на рис. 4 (рядом с осями координат приведены условные графики распределения ОН по соответствующим координатам).

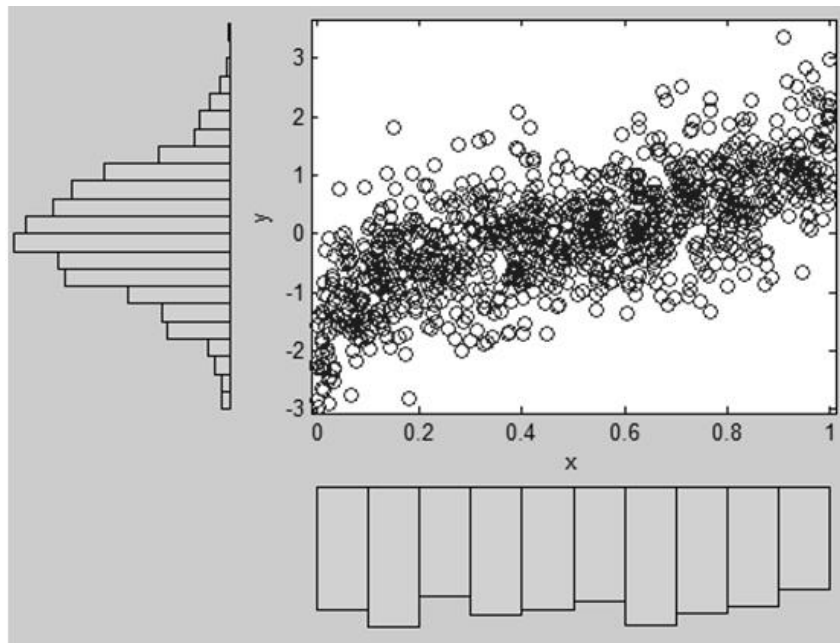


Рис. 4. Вид совместного распределения объектов наблюдения по широте (координата y) и долготе (координата x)

2. Осуществлять оценку производительности при неизвестных законах распределения ОН с использованием аппарата нечёткой логики.

3. Использовать модель системы массового обслуживания с очередью.

4. Решить задачу оптимизации числа КА ДЗЗ в КСН с учётом затрат на её создание и экономической эффективности.

Библиографический список

1. Куренков, В.И. Основы устройства и моделирования целевого функционирования космических аппаратов наблюдения / В.И. Куренков, В.В. Салмин, Б.А. Абрамов. Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 296 с.

2. Вентцель, Е.С. Исследование операций. – М.: Наука, 1974. – 519 с.