

МЕТОДИКА БАЛІСТИЧНОГО ПЛАНУВАННЯ МІСІЙ НИЗЬКООРБІТАЛЬНОГО СЕРВІСНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ З МАЛОЮ ПОСТІЙНОЮ ТЯГОЮ РУШІЙНИХ СИСТЕМ

Інститут технічної механіки

Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: aalpatov@ukr.net; jura_gold@meta.ua

Сучасний етап розвитку космонавтики характеризується підвищеним інтересом до розробки, розгортання та експлуатації низькоорбітальних супутникових угруповань (НСУ) для дистанційного зондування Землі і навколоземного простору у військових та цивільних цілях і забезпечення глобального та регіонального супутникового зв'язку. Космічні ракети-носії багаторазового використання суттєво знизили вартість виведення супутників на орбіти. Завдяки цьому супутникові оператори розробляють і розгортають великомасштабні НСУ з різноманітною орбітальною структурою і великою чисельністю космічних апаратів (КА). За існуючими оцінками, понад 70 % з усіх діючих супутників працюють на низьких навколоземних орбітах (ННО) на висотах від 160 км до 2 000 км. Оскільки супутники на ННО, як правило, набагато дешевші, ніж супутники на геостационарних орбітах, вони не були основним об'єктом досліджень стосовно можливостей проведення їх орбітального сервісного обслуговування (ОСО). Проте використання ОСО на ННО має перспективу зростання. На теперішній час вже розроблено і продовжується розробка методик для балістичного планування місій низькоорбітального сервісного обслуговування. До недоліків наближених методик належить використання спрощених моделей динаміки польоту. Більшість існуючих точних методик базуються на використанні повних математичних моделей динаміки польоту і методу стрільби для розв'язку крайової задачі міжорбітального перельоту. Використання методу стрільби потребує завадання досить точного початкового наближення, яке важко визначити. Для отримання другого наближення використовують, головним чином, методи оптимізації, які не завжди приводять до глобального мінімуму. У зв'язку із цим виникає потреба в розробці нових методик, які позбавлені перелічених недоліків. Метою статті є розробка методики балістичного планування місій низькоорбітального сервісного обслуговування з рушійними системами малої постійної тяги. Методика включає в себе визначення перспективних для проведення ОСО областей ННО, математичну модель динаміки збурених низькоорбітальних перельотів ОСО в модифікованих рівноденних змінних і алгоритм розв'язку крайової задачі з параметрами для визначення керуючих параметрів орбіт збурених низькоорбітальних перельотів ОСО. Методами розв'язку задачі є методи статистичного аналізу, динаміки польоту, стрільби, генетичної оптимізації і математичного моделювання. Новизна отриманих результатів полягає у визначенні перспективних для проведення ОСО областей ННО, розробці математичної моделі динаміки в модифікованих рівноденних змінних і алгоритм визначення керуючих параметрів орбіт збурених низькоорбітальних перельотів ОСО. Результати роботи можуть бути використані при обґрунтуванні і плануванні місій ОСО на ННО та формуванні вимог до рушійних систем низькоорбітальних місій ОСО.

Ключові слова: модифіковані рівноденні змінні, генетичний алгоритм оптимізації, метод стрільби, орбітальне сервісне обслуговування, мала тяга.

1. База даних параметрів орбіт космічних об'єктів NORAD міністерства оборони США. URL: <https://www.space-track.org/NORAD/> (Дата звернення: 20.03.2024).
2. Hastings D. E., Putbrese B. L., La Tour, P. A. When Will On-Orbit Servicing Be Part of the Space Enterprise?. *Acta Astronautica*. 2016. Vol. 127. P. 655–666. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.07.007>
3. Ho K., Wang H., DeTrempe P. A., du Jonchay T. S. Semi-Analytical Model for Design and Analysis of On-Orbit Servicing Architecture. *Journal of Spacecraft and Rockets*. 2020. P. 1–10. <https://doi.org/10.2514/1.A34663>
4. Edelbaum T. N. Optimal nonplanar escape from circular orbits. *AIAA J.* 1971. P. 2432–2436. <http://dx.doi.org/10.2514/3.50047>
5. Kechichian J. A. The streamlined and complete set of the nonsingular J2-perturbed dynamic and adjoint equations for trajectory optimization in terms of eccentric longitude. *J. Astronaut. Sci.* 2007. P. 325–348. <http://dx.doi.org/10.1017/9781108560061.013>
6. Cerf M. Low-thrust transfer between circular orbits using natural precession. *J. Guid. Control Dyn.* 2016. Vol. 39, №10. P. 2232–2239. <https://doi.org/10.2514/1.G001331>
7. Zhang S., Han C., Sun X. New solution for rendezvous between geosynchronous satellites using low thrust. *J. Guid. Contr. Dynam.* 2018. Vol. 41, № 3. P. 1–10. <https://doi.org/10.2514/1.G003270>
8. Alpatov A. P., Holdstein Y. M. On the choice of the ballistic parameters of an on-orbit service spacecraft. *Tekhnical mekhaniks*. 2019. № 1. P. 25–37.
9. Гольдштейн Ю. М., Фоков О. А. Оптимізація перельотів між низькими орбітами з суттєвою різницею довгот висхідних вузлів. *Технічна механіка*. 2022. № 3. С. 63–74. <https://doi.org/10.15407/itm2022.03.063>
10. Li H., Chen S., Baoyin H. J2-perturbed multitarget rendezvous optimization with low thrust. *J. Guid. Control Dyn.* 2018. Vol. 41, № 3. P. 802–808. <https://doi.org/10.2514/1.G002889>
11. NASA. Modified equinoctial orbital elements.

- URL:https://spsweb.fltops.jpl.nasa.gov/portaldatops/mpg/MPG_Docs/Source%20Docs/EquinoctalElements-modified.pdf/ (Дата звернення:20.03.2024).
12. *Shimane Yu., Gollins N., Ho Koki.* Orbital Facility Location Problem for Satellite Constellation Servicing Depots Journal of Spacecraft and Rockets Published Online:25 Mar 2024. URL: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.A35691/> (Дата звернення:20.03.2024).
 13. *Walker M., Ireland B., Owens J.* A set of modified equinoctial orbit elements. Celestial Mechanics. 1985. Vol. 36, № 4. P. 409–419. <https://doi.org/10.1007/BF01227493>
 14. *Zhang S., Han C., Sun X.* New solution for rendezvous between geosynchronous satellites using low thrust. J. Guid. Contr. Dynam. 2018. Vol. 41, №3. P. 1397–1406. <https://doi.org/10.2514/1.G003270>
 15. *Han C., Zhang S., Wang X.* On-orbit servicing of geosynchronous satellites based on low-thrust transfers considering perturbations. Acta Astronautica. 2019. № 159. P. 658–675. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.01.041>

Отримано 13.05.2024,
в остаточному варіанті 16.06.2024