UDK 629.5 https://doi.org/10.15407/itm2024.01.026

ЧАНЦІН ВАН[1], О. Е. ЗАКРЖЕВСКИЙ[2]

РОЗГОРТАННЯ КОСМІЧНОЇ ЗВ'ЯЗКИ В ПОЛІ ВІДЦЕНТРОВИХ СИЛ ІЗ ПРИВЕДЕННЯМ ДО МІСЦЕВОЇ ВЕРТИКАЛІ

[1] *Северо-Западный политехнический университет, 127 Юи Силу, Сиань, 710071, Китай; e-mail: wangcq@nwpu.edu.cn*

[2] Інститут космічних досліджень Національної академії наук і Державного космічного агентства України, Київ, 03680, Україна; e-mail: alex.e.zakr@gmail.com

Об'єктом дослідження є мала орбітальна зв'язка двох тіл, яка повинна бути розгорнута з космічного апарата таким чином, щоб після завершення розгортання вона була розташована вздовж місцевої вертикалі. Тіла зв'язки вважаються однаковими по масі; нитка, що з'єднує тіла, вважається невагомою. Мета проведеного дослідження полягає в тому, щоб побудувати програмний закон управління довжиною зв'язки, що враховує зміну кінетичного моменту зв'язки під впливом гравітаційного моменту від центрального ньютонівського поля сил. Проведено дослідження процесу розгортання космічної зв'язки двох тіл у полі відцентрових сил з вирівнюванням зв'язки наприкінці розгортання вздовж місцевої вертикалі. Для розгортання використовується попередня закрутка зв'язки довкола бінормалі до орбіти. Дослідження складається із двох етапів. У першому етапі проводиться побудова закону управління довжиною зв'язки, який забезпечує виконання запланованого розгортання. На цьому етапі використовуються рівняння руху зв'язки, записані у сферичних координатах для часткового випадку руху зв'язки у площині орбіти. На другому етапі дослідження проводиться чисельне моделювання динаміки розгортання зв'язки під дією побудованого програмного закону управління довжиною зв'язки. Як математична модель зв'язки використовуються рівняння Hill–Clohessy–Wiltshire, що описують просторовий рух тіл. Ці рівняння не містять у явному вигляді довжину зв'язки як змінну. Тому рівняння модифікуються. Зусилля натягу зв'язки, що входить у ці рівняння, виражено через програмний закон зміни довжини та двох його перших похідних за часом. Новизна проведеного дослідження полягає у побудові програмного закону управління, що дозволяє розгорнути зв'язку вздовж місцевої вертикалі за одну стадію. При виконанні дослідження використовувалися методи аналітичної механіки, чисельні методи і методи, розроблені авторами. Отримані результати дозволяють встановити області значень параметрів розгортання, що дозволяють проводити розгортання такого типу. Проведено оцінку помилок чисельного моделювання. Практична значущість отриманих результатів полягає у можливості проводити розгортання малих зв'язок на орбіті з вирівнюванням їх наприкінці режиму вздовж місцевої вертикалі за одну стадію з управлінням по довжині зв'язки без необхідності проводити надалі гасіння лібраційних коливань.

Ключові слова: *управління, космічна зв'язка, розгортання, місцева вертикаль, одна стадія*.

1. *Alpatov A. P., Wang Changqing, Zakrzhevskii A. E.* Feed-forward control of total retrieval of the space tether from vertical position Kosm. Nauka I Tekhnol. 2021. V.27. No.5. Pp. 71–85. https://doi.org/10.15407/knit2021.05.071
2. *Alpatov A. P., Zakrzhevskii A. E.*. Deployment of a tether of three bodies in the field of centrifugal forces. Technical mechanics. 2002. No. 2. Pp. 3–12.
3. *Alpatov A. P., Zakrzhevskii A. E.* Passive deployment of a tether between two bodies in orbit. International Applied Mechanics. 1999. V.35. No.10. Pp. 1053–1058. https://doi.org/10.1007/BF02682318
4. *Barkow B., Steindl A., Troger H., Wiedermann G.* Various Methods of Controlling the Deployment of a Tethered Satellite. Journal of Vibration and Control. 2003. No. 9. Pp.187–208. https://doi.org/10.1177/1077546303009001747
5. *Bekey I.* Tethers open new space options. Astronautics and Aeronautics. 1983. V.21, No.4. Pp. 32– 40.
6. *Bekey I., Penzo P. A.* Tether propulsion. Aerospace America. 1986. V.24. No.7. Pp. 40–43.
7. *Beletsky V. V.* Motion of an artificial satellite about its center of mass. Israel Program for Scientific Translations. Jerusalem. 1966.
8. *Beletsky V. V., Levin E. M.* Dynamics of space tether systems. Adv. Astronaut. Sci. 1993. Pp. 1–83.
9. *Cantafio L. J., Chobotov V. A., Wolfe M. G.* Photovoltaic gravitationaly stabilized, solid-state satellite solar power station. J. of Energy. 1977. V.1. No.6. Pp. 352–363. https://doi.org/10.2514/3.62346
10. *Hoyt R. P., Uphoff Ch.* Cislunar Tether Transport System. Journal of Spacecraft and Rockets. 2000. V.**37**. No. 2. Pp. 177–186. https://doi.org/10.2514/2.3564
11. *Levin E. M.* About deployment of the extended tether in the orbit. Space researches. 1983. V.71. No.1. Pp. 678–688.
12. *Levin E. M.* Dynamic Analysis of Space Tether Missions Univelt. 2007. 454 p.
13. *Lorenzini E. C. et al.*, Acceleration levels on board the space station and a tethered elevator for micro- and variable-gravity applications. In: Proc. 2-nd Int. Conf. on Space Tethers for Science in the Space Station Era. 1987. Venice. Pp. 4–8.
14. *Lur'e A.* Analytical Mechanics. Springer; 2002. 864 p.
15. *Modi V., Misra A.* Deployment dynamics of tethered satellite systems. AIAA Paper. 1978. No.1398. 10 p. https://doi.org/10.2514/6.1978-1398
16. *Napolitano L., Bevilacqua F.* Tethered constellations, their utilization as microgravity platforms and relevant features. 1984. Lausanne, Switzerland. IAF-84-439.

17. *Padgett, D. A., Mazzoleni, A. P*. Analysis and design for nospin tethered satellite retrieval. J. Guidance Control and Dyn. 2007. V.30. No.5. Pp. 1516–1519. https://doi.org/10.2514/1.25390
18. *Pearson J.* Anchored lunar satellites for cislunar transportation and communication. J. of the Astronautical Sciences. 1979. V.17. No.1. Pp. 39–62.
19. *Rupp C. C., Laue J. H.* Shuttle/Tethered Satellite System. Journal of Astronautical Sciences. 1978. V**.** 24. No.1. Pp. 1–17.
20. *Swet C. J.* Method for deployment and stabilizing orbiting structures//U.S. Patent Office N 3532298, Oct. 6, 1970, Int. Cl. B 64 G 1/00, U.S. Cl. 244-1.
21. *Wang Changqing, Wang Panbing, Li Aijun.*Deployment of Tethered Satellites in Low-Eccentricity Orbits Using Adaptive Sliding Mode Control. Journal of Aerospace Engineering. 2017. V.30. No.6. Pp. 1–10. https://doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000793
22. *Wang Changqing, Zabolotnov Y. M.* Control of the deployment of a long-distance orbital tether system. Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering. 2017. V.16, No.2. Pp. 7–17. https://doi.org/10.18287/2541-7533-2017-16-2-7-17
23. *Zakrzhevskii A. E.* Method of Deployment of a Space Tethered System Aligned to the Local Vertical. J. of Astronaut Sci. 2016. V.63. Pp. 221–236. https://doi.org/10.1007/s40295-016-0087-z

Отримано 29.12.2024,
в остаточному варіанті 14.03.2024