УДК 629.78
DOI:10.62717/3083-7057-2026-1-039

Лапханов Е.О.,
Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України
ORCID 0000-0003-3821-9254
E-mail: ericksaavedralim@gmail.com

РОЗРОБКА МЕТОДИЧНИХ ЗАСАД ДЛЯ АПРІОРНОГО АНАЛІЗУ СТІЙКОСТІ РОЗПОДІЛЕНОЇ КОСМІЧНОЇ ОРБІТАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ПОТОКУ СОНЯЧНОЇ РАДІАЦІЇ НА ПОВЕРХНЮ ЗЕМЛІ

Анотація. Запропоновано комплексну математичну модель для апріорного аналізу стійкості розподіленої орбітальної системи, призначеної для зменшення потоку сонячної радіації на поверхню Землі. Модель поєднує моделювання орбітального руху угруповання елементів системи, вейвлет-аналіз часової стійкості орбітальних кластерів, що формуються набором елементів на одній орбіті (кільце), а також кластерний аналіз просторово розвинених хмарних структур, сформованих сукупністю орбітальних кілець, розподілених за нахиленнями. Просторову узгодженість таких кластерів оцінюють із використанням гаусового ядра (Gaussian kernel).
Ключові слова: зменшення потоку сонячної радіації на поверхню Землі, комплексна математична модель, вейвлет аналіз, стійкість системи.

E. Lapkhanov,
Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine
ORCID 0000-0003-3821-9254
E-mail: ericksaavedralim@gmail.com

DEVELOPMENT OF METHODOLOGICAL FOUNDATIONS FOR THE A PRIORI STABILITY ANALYSIS OF A DISTRIBUTED ORBITAL SPACE SYSTEM FOR REDUCING THE SOLAR RADIATION FLUX REACHING THE EARTH'S SURFACE

Abstract. A comprehensive mathematical model is proposed for the a priori stability analysis of a distributed orbital system intended to reduce the solar radiation flux reaching the Earth's surface. The model integrates orbital motion modeling of a constellation of system elements, wavelet analysis of the temporal stability of orbital clusters formed by sets of elements on a single orbit (ring), and cluster analysis of spatially extended cloud-like structures composed of multiple orbital rings distributed across different inclinations. The spatial coherence of such clusters is evaluated using a Gaussian kernel.

Keywords: reduction of solar radiation flux to the Earth's surface, comprehensive mathematical model, wavelet analysis, system stability.

Стан проблеми. Інтерес до досліджень проблеми розробки і створення космічних засобів для зменшення потоку сонячної радіації бере початок з середини 70-х, 80-х років минулого століття. Однак сформульованою повно ця ідея стала лише після публікації Джеймса Ірлі в 1989 році [1]. Так, в цій роботі вперше було висунуто ідею щодо розгортання гігантського захисного екрану від потоку сонячної радіації у космічному середовищі в околиці точки рівноваги Лагранжа L1. Згідно розрахунків [1], цей гігантський екран з характерним розміром до 2000 км, мав зменшити потік сонячної радіації на 1-2%. В одних із пізніх робіт щодо розміщення систем зменшення потоку сонячної радіації в L1 [2, 3] також говориться про співставні з [1] масштаби таких систем, застосування яких має дозволити зупинити «парниковий ефект».

Перевагою розгортання систем для зменшення потоку сонячної радіації в точці Лагранжа L1 є гравітаційна рівновага, стабільне положення відносно Землі, а також зменшення витрат енергії на підтримання цієї рівноваги шляхом компенсації збурень сонячного тиску. Проте складним аспектом є технічна реалізація надійної масової доставки таких систем в досить віддалену точку космічного простору. З огляду на це, альтернативним підходом розгортання систем зменшення потоку сонячної радіації на поверхню Землі є навколоземні орбіти [4, 5]. Виведення і розгортання таких систем в навколоземному просторі є більш зрозумілою і технічно можливою задачею на сьогодні, проте, не зважаючи на це, має ряд своїх проблемних аспектів серед яких:

1) аналіз імовірностей зіткнень елементів космічної системи для зменшення потоку сонячної радіації на поверхню Землі та вибір раціональних орбіт дислокації для забезпечення довготривалої стійкості системи;

2) збільшення кількості елементів космічної системи для зменшення потоку сонячної радіації на поверхню Землі за рахунок особливостей періодичності орбітального руху на навколоземних орбітах, що робить періодичним виконання функцій блокування потоку сонячного випромінювання кожним елементом системи.

В попередніх дослідженнях було визначено, що відсоток траєкторії на якому елемент системи виконує блокування потоку сонячної радіації складає 30–40% від повного замкненого витка на низьких навколоземних орбітах в діапазоні висот до 1200 км. Проте, одним із невирішених аспектів в цій задачі залишився аналіз стійкості кластерів орбітальних угруповань системи для зменшення потоку сонячної радіації на поверхню Землі при впливі довгоперіодичних і вікових збурень нелінійності гравітаційного потенціалу Землі, гравітаційних збурень з боку Місяця і Сонця, аеродинамічного впливу та впливу сонячного тиску.

Варіант рішення проблеми. З огляду на це було запропоновано розробити математичну модель для апріорного аналізу стійкості розподіленої космічної орбітальної системи для зменшення потоку сонячної радіації на поверхню Землі. Модель поєднує моделювання орбітального руху угруповання елементів

системи, вейвлет-аналіз часової стійкості орбітальних кластерів, що формуються набором елементів на одній орбіті (кільце), а також кластерний аналіз просторово розвинених хмарних структур, сформованих сукупністю орбітальних кілець, розподілених за нахиленнями. Відстеження внутрішніх перерозподілів у хмарних структурах системи затемнення дало змогу прогнозувати локальну поверхневу густину розподіленої космічної орбітальної системи, особливо в ділянках, де необхідне оперативне послаблення потоку сонячного випромінювання. Крім того, кластерний аналіз на базі гаусового ядра (Gaussian kernel) і методу k-середніх дає змогу інтегрально оцінити ефективністі функціонування всіх хмарних структур системи, дозволяючи аналізувати просторову узгодженість та ефективність зменшення потоку сонячної радіації по всій системі. Отже, запропонована модель апріорного аналізу дозволяє зробити комплексну оцінку ефективності системи зменшення потоку сонячної радіації на поверхню Землі, охоплюючи як довгострокову стабільність окремих орбітальних кластерів, так і структурну узгодженість глобальної хмари системи. Це є актуальним для проведення оцінок стійкості такої системи на початкових фазах її проєктування і концептуальному аналізі доцільності розгортання на навколоземних орбітах.

Бібліографічні посилання

1. Early J. T. Space-based solar shield to offset greenhouse effect. Journal of the British Interplanetary Society. 1989. Vol. 42. P. 567–569.
2. Fuglesang C., Miciano M. Realistic sunshade system at L1 for global temperature control. Acta Astronautica. 2021. No. 186. P. 269–279. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.04.035
3. Badescu V., Cathcart R. B. Space-based sunshade systems for global warming mitigation. Acta Astronautica. 2023. Vol. 203. P. 250–263. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.12.006
4. Pearson J., Oldson J., Levin E. Earth rings for planetary environment control. Acta Astronautica. 2006. Vol. 58. Iss. 1. P. 44–57. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2005.03.071
5. Лапханов Е. О. Основні проблеми створення космічних систем для зменшення потоку сонячної радіації на поверхню Землі. Технічна механіка. 2025. №1. С. 52–62. https://doi.org/10.15407/itm2025.01.052