

УДК 629.783

Білобородов Олег Олександрович

Кандидат технічних наук, начальник науково-дослідної лабораторії
Військова частина А4566, Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ СТРУКТУРИ ОРБІТАЛЬНОГО УГРУПОВАННЯ ТА БЕЗПЕКИ ПОЛЬОТІВ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

***Анотація.** Увага провідних країн світу до забезпечення переваги в космічному просторі потребує здійснення постійного контролю безпеки функціонування національних космічних апаратів. Прогнозування орбітального руху дозволяє завчасно вживати заходи щодо зниження імовірності зіткнення космічних засобів. Формалізовано необхідну і достатню умови зіткнення космічних об'єктів на навколосемних орбітах. Для оцінки безпеки польотів окремих класів космічних апаратів проведено моделювання руху діючих космічних апаратів видової розвідки та дистанційного зондування Землі. Наведено результати дослідження довгострокових тенденцій взаємного розташування космічних апаратів на орбітах, а також обґрунтування і формалізація оптимізаційного завдання здійснення маневрів з метою уникнення небезпечних наближень космічних апаратів.*

***Ключові слова:** аналіз космічної обстановки; орбітальне угруповання; перехоплення; зіткнення*

Постановка проблеми

Ефективне функціонування національної системи контролю і аналізу космічної обстановки дозволяє вирішувати актуальні завдання забезпечення національної безпеки і оборони держави. Кількість космічних об'єктів на орбітах щороку збільшується на 5-10% і на середину 2015 року складала близько 17 тис., з них близько 3900 склали космічні апарати (КА). П'ята частина діючих апаратів належить до військового призначення. Спостерігається стійка тенденція до конкуренції можливостей орбітальних угруповань найбільш впливових країн та військово-політичних блоків. Погляди провідних країн світу на забезпечення переваги в космічному просторі вимагають здійснення постійного контролю безпеки функціонування національних космічних апаратів.

Прогнозування орбітального руху дозволяє завчасно здійснювати заходи щодо зниження імовірності зіткнення космічних засобів [1; 2]. Але навіть найсучасніші системи контролю космічного простору не забезпечують оперативне та надійне попередження про небезпеку зіткнення, що призводить до виведення КА з ладу [3; 4]. Плани щодо нарощування національного угруповання космічних апаратів [5] та постійне зростання кількості космічних об'єктів [6] вимагають вирішення актуального завдання дослідження довгострокових тенденцій взаємного розташування космічних апаратів різних країн для підвищення безпеки національних космічних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для вирішення завдань супроводження космічних об'єктів широко використовується аналітична модель оскулюючих елементів SGP [7], яка на відміну від чисельних методів дозволяє проводити швидко обчислення для великої кількості КА. Застосовуються статистичні методи уточнення орбітальних параметрів за моделлю SGP для підвищення точності прогнозу [3]. Досліджуються питання оцінки помилок прогнозування руху КА та визначення статистичних характеристик гравітаційних збурень [8]. У зв'язку із значним зростанням можливостей обчислювальних засобів в останні роки стали широко застосовувати високоточні числові методи прогнозу руху [4; 9]. Для оцінки ризику зіткнення використовуються імовірнісні моделі, що застосовуються для аналізу як окремих космічних об'єктів, так і груп КА [6]. При цьому дослідники відмічають стале зростання кількості небезпечних наближень та зниження безпеки функціонування КА на орбітах [9]. При цьому недостатньо дослідженим залишається питання аналізу довгострокових тенденцій взаємного розташування КА. Не достатньо повно висвітлено також питання визначення можливостей маневрування КА з метою уникнення небезпеки або навмисного перехоплення іншого апарата.

Мета статті

Мета статті – проведення аналізу взаємного розташування КА на орбітах та довгострокових тенденцій його змін, обґрунтування та формалізація завдання оптимізації маневру для забезпечення стійкості структури орбітального угруповання та забезпечення безпеки космічних апаратів. Об’єкт дослідження – орбітальний рух космічних апаратів. Предмет дослідження – взаємне розташування космічних апаратів у навколораземному космічному просторі.

Виклад основного матеріалу

Аналіз взаємного розташування двох довільних космічних апаратів свідчить про те, що перетин орбіт їх руху може статися у разі виконання умови:

$$((R_{a1} \geq R_{п2}) \cap (R_{п1} \leq R_{a2})) \cup ((R_{a1} \leq R_{a2}) \cap (R_{a1} \geq R_{п2})), \quad (1)$$

де R_a , $R_{п}$ – висоти апогею та перигею орбіт відповідних КА.

Вираз (1) є необхідною умовою зіткнення, яке може відбутися при одночасному перебуванні апаратів в точці перетину орбіт:

$$\vec{r}_1(t_3) = \vec{r}_2(t_3), \quad (2)$$

де $\vec{r}_1(t_3)$, $\vec{r}_2(t_3)$ – координати КА в момент зустрічі t_3 .

Відстань між КА змінюється за таким законом:

$$\Delta r(t) = \left| \vec{r}_1(t) - \vec{r}_2(t) \right| = \sqrt{(X_1(t) - X_2(t))^2 + (Y_1(t) - Y_2(t))^2 + (Z_1(t) - Z_2(t))^2}.$$

У загальному випадку в момент зустрічі КА матимуть швидкості різні як за величиною, так і за напрямком (рис. 1), що може призвести до їх фізичного руйнування або виведення. При спрямованому корегуванні орбітальних параметрів

одного з КА це буде означати виконання завдання перехоплення (кінетичної поразки) одного КА іншим.

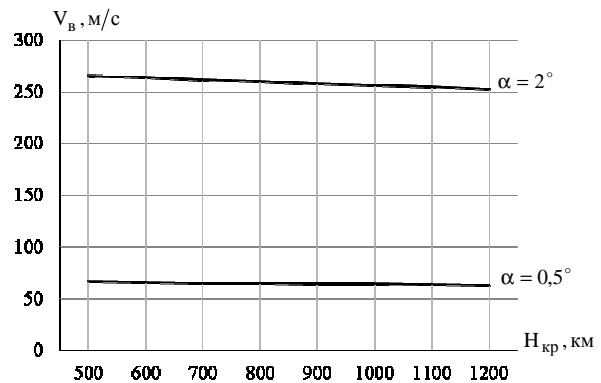


Рисунок 1 – Відносна швидкість двох КА на для різних висот кругових орбіт та кутів зустрічі α

Моделювання орбітального руху космічних апаратів показує, що відстань між двома КА буде змінюватись залежно від початкових умов та орбітальних параметрів їх руху (рис. 2).

З огляду на безпеку руху двох КА їх взаємне положення можна охарактеризувати такими показниками: T_L – період локальних мінімумів; T_G – період глобальних мінімумів; мінімальна відстань на інтервалі моделювання, час до найближчого входження в “зону” $\Delta r \leq \delta_{зад}$ тощо. При виконанні (1) визначені показники дозволяють прогнозувати інтервали небезпечного зближення КА, доцільні часові інтервали здійснення маневру з метою уникнення небезпеки зіткнення та найбільш імовірні часові інтервали здійснення маневру перехоплення.

Результати дослідження характеру поведінки взаємної відстані між КА підтверджують принципи вибору орбітальних параметрів, доцільних з точки зору сталого взаємного розташування, характеристик оперативності, періодичності тощо (рис. 3).

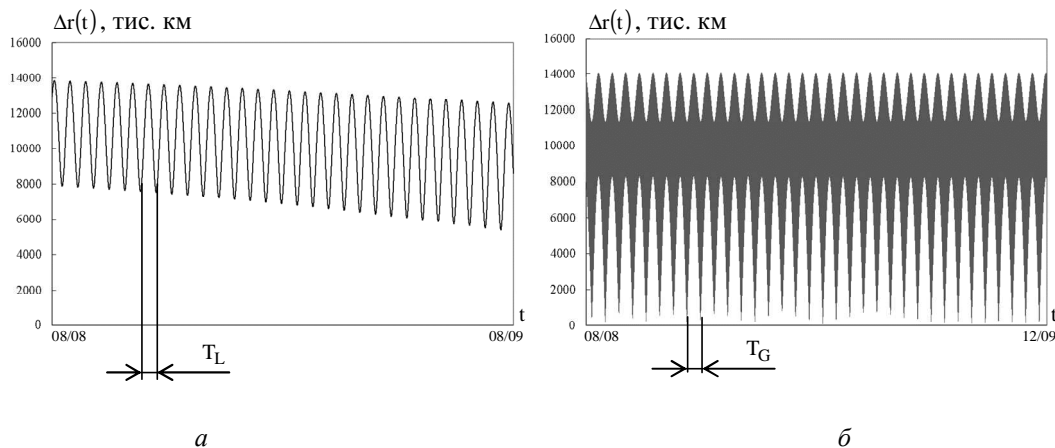


Рисунок 2 – Результати дослідження зміни відстані Δr між двома КА (HELIOS 1A та COSMO-SKYMED 1): а – на інтервалі 24 години; б – на інтервалі 5 місяців

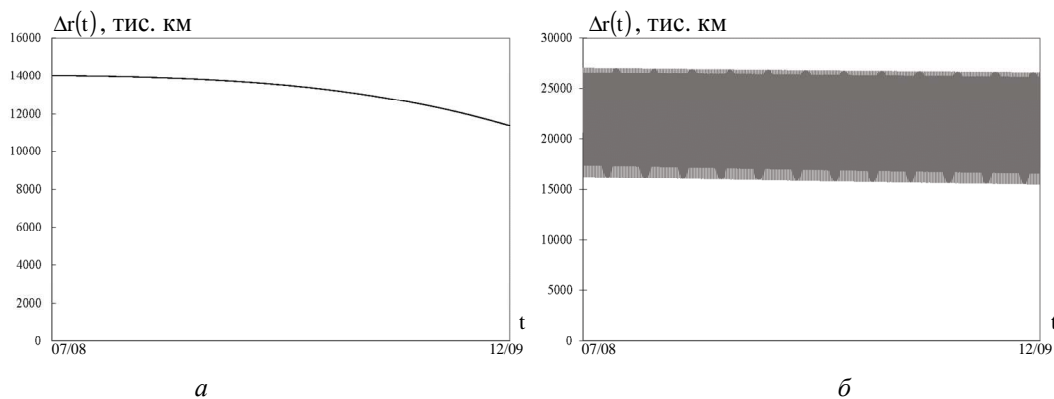


Рисунок 3 – Результати дослідження зміни відстані між КА на 5-місячному інтервалі: а – COSMO-SKYMED 1 та COSMO-SKYMED 2; б – NAVSTAR 50 (USA156) та NAVSTAR 60 (USA196)

Для космічних апаратів дистанційного зондування Землі системи COSMO-SKYMED (Італія) вибір орбітальних параметрів забезпечує сталі характеристики оперативності та періодичності (рис. 2, а). Для космічних апаратів системи GPS вибір орбітальних параметрів забезпечує цілісність навігаційного поля протягом часу існування системи (рис. 2, б).

Для оцінки безпеки польотів окремих класів КА в рамках дослідження було проведено моделювання руху діючих космічних апаратів видової розвідки та дистанційного зондування Землі. Для моделювання було обрано $N_{КА} = 114$ КА з відомими орбітальними параметрами [10]. Аналіз небезпечного зближення КА здійснювався попарно для кожного з обраних КА на тримісячному інтервалі. Пошук екстремумів здійснювався за допомогою методу Пауела [11]. Загальна кількість промодельованих сполучень складає $C_2^{N_{КА}} = N_{КА}! / [2!(N_{КА} - 2)!] = 6441$ варіантів.

Результати моделювання підтверджують високу імовірність небезпечного зближення КА (рис. 4).

Аналіз результатів моделювання дозволяє зробити висновки про достатньо високу щільність небезпечних наближень, що підтверджує актуальність дослідження завдань уникнення небезпечного наближення.

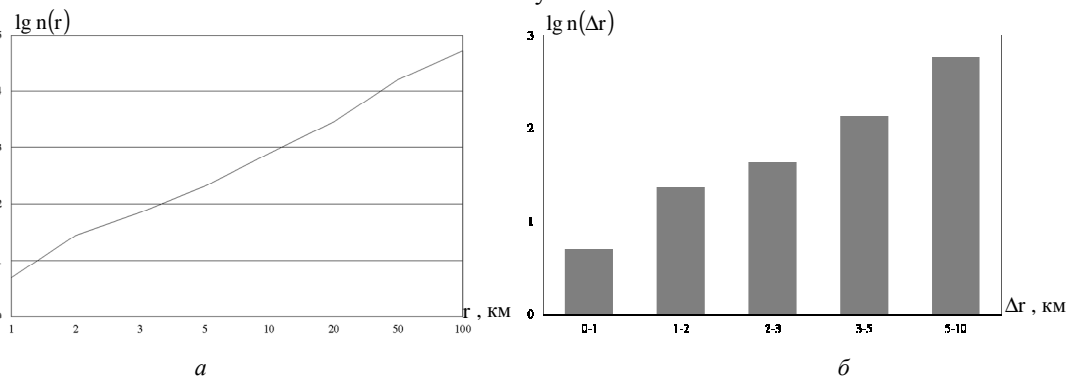


Рисунок 4 – Результати моделювання небезпечного зближення космічних апаратів дистанційного зондування Землі: а – залежність кількості наближень n від відстані r ; б – кількість небезпечних наближень в інтервалах Δr

Для більш детального аналізу безпеки польотів космічних апаратів доцільно розглядати також випадок спрямованої зміни орбітальних параметрів, що можуть призвести до зіткнення апаратів. Такий вплив фактично означає перехоплення одним КА іншого. Для спрямованої зміни орбітальних параметрів необхідний запас палива на борту КА. Просторово-часові можливості КА щодо перехоплення іншого апарата будуть визначатись їх взаємним розташуванням та величиною запасів характеристичної швидкості. З іншого боку запас характеристичної швидкості дозволяє здійснити маневр уникнення небезпечного наближення та підвищити безпеку функціонування КА на орбіті протягом його оперативного використання. Для дослідження можливостей цілеспрямованої зміни орбітальних параметрів з метою уникнення небезпечного наближення або перехоплення одним космічним апаратом іншого можна визначити такі напрямки оптимізації маневру:

1. За критерієм мінімуму витрат характеристичної швидкості при обмеженому часі – визначити такий маневр, що забезпечує:

а) уникнення небезпечного наближення космічних апаратів (переведення на небезпечну орбіту) на інтервалі часу $(t_0, t_0 + T)$ за мінімальної витрати характеристичної швидкості ΔV ;

б) перехоплення одним КА іншого за тих же умов.

Для уникнення небезпечного наближення формалізованій опис оптимізаційного завдання:

$$\Delta V^* = \min_i \min_j \Delta V_j(t_i) : \forall \tau \in (t_0, t_0 + T), \Delta r(\tau) > \delta r_{\min}.$$

Для перехоплення:

$$\Delta V^* = \min_i \min_j \Delta V_j(t_i) : \exists \tau \in (t_0, t_0 + T), \Delta r(\tau) < \delta r_{\min}.$$

2. При обмеженому запасі палива (характеристичної швидкості):

а) визначити маневр при обмеженому запасі характеристичної швидкості ΔV_{\min} , що забезпечує уникнення небезпечного наближення протягом максимального часу функціонування КА на орбіті:

$$t_k^* = \max_{\tau} [\Delta V(t_k) \leq \Delta V_{\min} : \Delta r(t_k + \tau) > \delta r_{\min}],$$

б) визначити найближчий маневр у момент t_k , що забезпечує перехоплення іншого КА на інтервалі часу $(t_0, t_0 + T)$:

$$t_k^* = \min_{\tau} \left[\begin{array}{l} \Delta V(t_k) \leq \Delta V_{\min} : \exists \Delta r(\tau) < \delta r_{\min}, \\ t \in (t_0, t_0 + T) \end{array} \right].$$

Висновки

Наведено результати дослідження довгострокових тенденцій взаємного розташування космічних апаратів на орбітах, формалізовано оптимізаційне завдання уникнення небезпечних наближень КА та спрямованої зміни орбітальних параметрів з метою перехоплення іншого КА. Напрямом подальших досліджень можна визначити дослідження класифікаційних ознак та типових параметрів небезпечних конфігурацій орбітальних угруповань, а також вирішення формалізованих в статті оптимізаційних завдань для вироблення висновків про потенційну небезпеку для національних КА. Для завдання аналізу можливостей перехоплення напрямом подальших досліджень можна визначити розробку моделей обчислення напрямку, величини та часу прикладення імпульсу характеристичної швидкості для такої зміни орбітальних параметрів КА, які б забезпечили виконання умови (1), перетин його орбіти з орбітою іншого заданого КА у визначеній точці, а також одночасне знаходження двох КА в точці перетину у визначений момент часу.

Список літератури

1. Макаренко Д., Потюпкин А. На орбитальных рубежах. – М.: АКАДЕМИА, 2008, – 276 с.
2. Гетьман М., Раскин А. Военный космос: без грифа «секретно». / Фонд содействия авиации «Русские Витязи», – 2008. – 461с.
3. Барабошкин О.И., Трусов С.В., Романов А.А. Определение баллистических параметров в формате TLE в системе радиотомографии ионосферы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2012. – Т.9. – № 3. – С. 151-155.
4. Кудрявцев С.М. Высокоточные разложения важнейших функций небесной механики в аналитические ряды и их приложения. Специальность 01.03.01 Астрометрия и небесная механика Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук Москва 2006, 16 с.
5. Загальнодержавна цільова науково-технічна космічна програма України на 2013-2017 роки (із змінами). Затверджена Законом України від 5 вересня 2013 року № 439-VII.
6. Khutorovsky Z.N., Boikov V.F. and Kamensky S.Yu. Direct Method for the Analysis of Collision Probabilities of Artificial Space Objects in LEO: Techniques, Results and Application. Proc. of the First European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany, April 1993, pp. 491-508.
7. Чагина В. А. Расчёт движения космического аппарата на околокруговой орбите по данным TLE по упрощённой модели SGP / Чагина В. А., Гришко Д. А., Майорова В. И. Наука и Образование // МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн., 2016. – № 01. – С. 52–66, DOI: 10.7463/0116.0830533
8. Назаренко А.И. Погрешности прогнозирования движения спутников в гравитационном поле Земли / Под ред. Р.Р. Назирова. – М.: Ротапринт ИКИ РАН, 2010. – 226 с.
9. Хуторовский З.Н. Риск столкновения на низких высотах с учетом некаталогизированных объектов. Околоземная астрономия (космический мусор). Сборник научных трудов, РАН, Институт астрономии, 1998. – С. 17-33.
10. NORAD Two-Line Element Set Format // Электр. ресурс. Реж. доступу: <https://www.celestrak.com/NORAD/elements/>
11. Методы оптимизации в примерах и задачах: Учеб. пособие/ А.В. Пантелеев, Т.А. Летова. – 2-е изд., исправл. – М.: Высш. шк., 2005. – 544 с.

Стаття надійшла до редколегії 15.07.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.С. Довгополий, військова частина А4566, Київ.

Белобородов Олег Александрович

Кандидат технических наук, начальник научно-исследовательской лаборатории Военная часть А4566, Киев

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СТРУКТУРЫ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ И БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЁТОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Аннотация. Внимание ведущих стран мира на обеспечение преимущества в космическом пространстве требует осуществления постоянного контроля безопасности функционирования национальных космических аппаратов. Прогнозирование орбитального движения позволяет заблаговременно принимать меры по снижению вероятности

столкновения космических средств. Планы по наращиванию национальной группировки космических аппаратов и постоянный рост количества космических объектов требуют решения актуальной задачи исследования долгосрочных тенденций взаимного расположения космических аппаратов для повышения безопасности их полета. Цель статьи – проведение анализа взаимного расположения космических аппаратов на орбитах и долгосрочные тенденции его изменений, постановка задачи оптимизации маневра для обеспечения устойчивости структуры орбитальной группировки и обеспечения безопасности космических аппаратов. Формализованы необходимое и достаточное условия столкновения космических объектов на околоземных орбитах. Для оценки безопасности полетов отдельных классов космических аппаратов проведено моделирование движения действующих космических аппаратов видовой разведки и дистанционного зондирования Земли. Приведены результаты исследования долгосрочных тенденций взаимного расположения космических аппаратов на орбитах, а также обоснование и формализация оптимизационной задачи осуществления маневров с целью избежания опасных сближений космических аппаратов.

Ключевые слова: анализ космической обстановки; орбитальная группировка; перехват; столкновение

Biloborodov Oleg

PhD, Head of scientific research library

Military Unit A4566, Kyiv

STABILITY OF ORBITAL CONSTELLATION STRUCTURE, AND SPACECRAFT FLIGHT SAFETY

Abstract. The views of the leading countries in the world to provide benefits in space requires continuous monitoring of the functioning of the national security spacecraft. Prediction of the orbital motion allows advance to take measures to reduce the likelihood of collision of space vehicles. Plans to build a national grouping of spacecraft and the constant increase in the number of space objects require solving the actual problem of the study of long-term trends in the mutual arrangement of space vehicles to improve the safety of their flight. The purpose of the article was put to analyze the mutual disposition of spacecraft in orbit and long-term trends of its changes, statement of the problem of optimization maneuvers to stabilize the structure of the constellation and the safety of spacecraft. It formalized the necessary and sufficient conditions of the collision of space objects in Earth orbit. To assess the safety of individual classes of spacecraft have been used to simulate the movement of existing spacecraft imagery intelligence and remote sensing. The article presents the results of a study of long-term trends in the mutual arrangement of satellites in orbit, as well as the rationale and formalization optimization problem of the maneuvers to avoid dangerous encounters of spacecraft.

Keywords: analysis of the space situation; orbital grouping; interception; collision

References

1. Makarenko, D., Potupkin, A. (2008). On the orbital borders. Moscow: AKADEMIA, 98–112.
2. Getman, M., Raskin, A. (2008). Military space: without the "classified". Aviation Assistance Fund "Russian Knights", 327–352.
3. Baraboshkin, O., Trusov, S., Romanov, A. (2012). Determination of ballistic parameters in TLE format in the ionospheric tomography system. Modern problems of remote sensing of the Earth from space, Vol. 9, 3, 151-155.
4. Kudriavtsev, S. (2016). Precision expansion the most important functions of celestial mechanics in analytical series and their applications. Abstract of dissertation for the degree of Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Moscow, 9-14.
5. The targeted scientific and technical space program of Ukraine for 2013-2017 years. The Law of Ukraine, 2013/09/05 № 439-VII.
6. Khutorovskiy, Z., Boikov, V., Kamensky S. (1993). Direct Method for the Analysis of Collision Probabilities of Artificial Space Objects in LEO: Techniques, Results and Application. Proc. of the First European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany, 491-508.
7. Chagina, V., Grishko, D., Maiorova, V. (2016). Satellite's Trajectory Propagation At Near-Circular Orbits Using TLE Files In The Simplified SGP Model. Science and Education of the Bauman MSTU, 16(01), 52–66. DOI: 10.7463/0116.0830533
8. Nazarenko, A. (2010). Errors Satellites predict movements in the Earth's gravitational field. Moscow: Rotaprint, SRI Russian Academy of Sciences, 75-112.
9. Hutorovskii, Z. (1998). The risk of collisions at low altitudes based uncataloged objects. Near-Earth Astronomy (space debris). Collection of scientific works, Russian Academy of Sciences, Institute of Astronomy, 17-33.
10. NORAD Two-Line Element Set Format [electronic source]. <https://www.celestrak.com/NORAD/elements/>
11. Pantelev, A., Letova, T. (2005). Optimization methods in examples and problems: Textbook. Moscow: High school, 348-366.

Посилання на публікацію

- APA Biloborodov, O. (2016). Stability of orbital constellation structure, and spacecraft flight safety. Management of Development of Complex Systems, Issue 26, 00 - 00. [in Ukrainian]
- ГОСТ Білобородов, О. О. Дослідження стійкості структури орбітального угруповання та безпеки польотів космічних апаратів / О.О. Білобородов // Управління розвитком складних систем. – 2016. – № 27. – С. 101 – 105.