

ЗБІЛЬШЕННЯ РИЗИКУ ЗІТКНЕННЯ ШТУЧНИХ КОСМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ НА ГЕОСТАЦІОНАРНІЙ ОРБІТІ

В.І. Кудак

Кафедра оптики. Лабораторія космічних досліджень[†]

Досліджується зміна ймовірності зіткнення космічних об'єктів на геостаціонарній орбіті. Її збільшення за останні 10 років значно більше, ніж ріст кількості об'єктів на геосинхронних орбітах.

Ймовірність зіткнення на геостаціонарній орбіті невелика, але вона постійно збільшується з ростом кількості геосинхронних об'єктів.

Для оцінки зміни ризику зіткнення некерованих геосинхронних об'єктів (НГО) з активними геостаціонарними супутниками (ГС) в інтервалі 1996 – 2006 рр. нами використано каталог орбіт геостаціонарних супутників ІТА РАН на 1996 р. [1]. Він містить 595 геосинхронних об'єктів. З них 231 – активні геостаціонарні супутники. Для визначення ймовірності зіткнення застосували прямий метод [2]. В основі відповідної програми еволюції орбіт лежить аналітична теорія руху ГО, що враховує збуруючі ефекти гравітаційного походження: несферичність Землі, сили тяжіння Сонця і Місяця [3].

Для порівняння нами взято Каталог геосинхронних об'єктів ESOC ESA на кінець грудня 2005 р. [4]. Результати, представлені в цьому каталозі, отримані пасивними датчиками, тому точність їх обмежена, але є достатньою для ймовірносних досліджень. Він містить 1089 геосинхронних

[†] e-mail: space@univ.uzhgorod.ua

об'єктів, з них 344 – активні (контрольовані), 735 – некеро- вані та 10 – об'єкти, які неможливо класифікувати. Про- грама переведу каталога ESA у формат російського ката- лога включає обчислення елементів орбіт в площині Лап- ласа і визначення середньої аномалії M .

Використання двох каталогів дає можливість оцінити точність обчислення елементів орбіт за даними каталогів на великих інтервалах, перевірити відповідність переведу каталога ESA у формат каталога ІТА РАН і обчислення положення супутника за елементами орбіти, а також дати оцінку точності прогнозу положення супутника (географі- чних координат підсупутникової точки).

Для цього вибираємо НГО, що міститься в каталозі ESA, 2005 р., і в каталозі ІТА РАН, 1996 р. За елементами орбіти з каталога ІТА РАН на 1996 рік визначаємо елементи орбі- ти на 2005 рік, за ними – зміну положення супутника про- тягом 2005 рік. З іншого боку, за елементами орбіти ката- лога ESA на кінець 2005 року (переведеного у формат ка- талога ІТА РАН) за цією ж програмою обчислюємо елемен- ти орбіти на весь 2005 рік і, відповідно, такі ж положення супутника протягом 2005 року. Положення супутника ви- значаємо географічною довготою λ і широтою φ підсупутникової точки.

Для дослідження вибрали дрейфуючий супутник 74017F, його дрейф в 2005 р. змінювався в межах від $2,61^\circ$ до $2,65^\circ$ за добу.

На рис.1 і рис.2 приведено зміну географічної довготи і широти цього супутника протягом 2005 року за даними каталога ESA 2005 (суцільна крива) і за каталогом ІТА РАН 1996 (пунктирна крива). Елементи орбіти (і відповід- но положення НГО) обчислювались через інтервал поряд- ку 23 доби. Відповідні значення широт – це вершини ла- маной на рис.2.

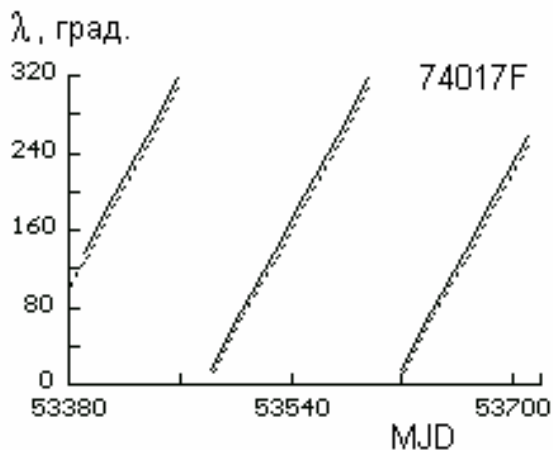


Рис.1. Зміна географічної довготи підсупутникової точки НГО 74017F протягом 2005 року за даними каталога ESA 2005 (суцільна крива) і за каталогом РАН 1996 (пунктирна крива).

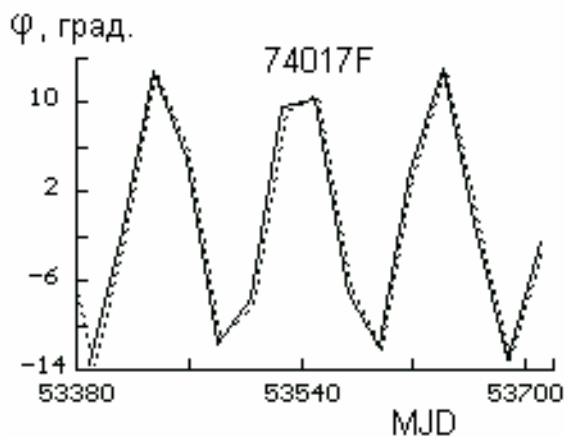


Рис.2. Зміна географічної широти підсупутникової точки НГО 74017F протягом 2005 року за даними каталога ESA 2005 (суцільна крива) і за каталогом РАН 1996 (пунктирна крива).

На рисунках положення кривих (рис.1 і 2) між собою відрізняються мало. Різниця довгот $\Delta\lambda$ в 2005 р., отриманих за двома різними каталогами, змінювалася в межах $9.5^\circ-10.8^\circ$, різниця широт $\Delta\varphi$ – в межах $0.3^\circ-2.1^\circ$.

Зближення некерованих геосинхронних об'єктів з активними ГС на відстань меншу 100 км вважають небезпечними зближеннями. Ця відстань знаходиться в межах похибки наших розрахунків. Тому можливі лише ймовірнісні оцінки зіткнення при таких зближеннях.

Для дослідження зміни ризику зіткнення на геостаціонарній орбіті за 10 років прослідкуємо всі небезпечні зближення некерованих ГО з активними супутниками за каталогом ІТА РАН (1996р.) протягом 1500 діб (з 12.07.1993 по 20.08.1997) і небезпечні зближення НГО з активними ГС за каталогом ESA (2005) протягом 1500 діб (з 1.04.2003 по 10.05.2007).

Для виявлення небезпечних зближень визначили з певним малим часовим інтервалом ($dt = 0.01$ доби) положення всіх каталожних НГО і їх відстані до кожного активного ГС. Вибрали небезпечні наближення – випадки, коли відстань між НГО і активним ГС менша 100 км. Визначили мінімальні зближення для цих випадків, порівнюючи положення двох супутників в попередній і наступний кроки.

Положення супутників визначали трьома координатами: географічною довготою λ підсупутникової точки, схиленням δ і геоцентричною відстанню r . Обчислили їх за елементами орбіт по складеній програмі. Відстань між супутниками знаходили за формулою:

$$D \approx \sqrt{[m(\lambda_2 - \lambda_1)]^2 + [m(\delta_2 - \delta_1)]^2 + (r_2 - r_1)^2}, \quad (1)$$

де індекси 1 і 2 означають, відповідно, активний і некерований супутники. Коефіцієнт

$$m = r \cdot \frac{\pi}{180} \approx 736 \text{ км/град.} \quad (2)$$

переводить величини λ і δ з градусної міри в лінійну (км), r – геоцентрична відстань ГО ($r = 42164$ км).

Всього за 1500 діб в 1993–1997 рр. (MJD 49180-50680) відбулося 292 небезпечних зближень НГО з активними супутниками, за 1500 діб в 2003–2007 рр. (MJD 52730-54230) – 1300 небезпечних зближень. Кількість їх за 10 років збільшилася в 4,45 разів. Це пояснюється збільшенням за цей час НГО (в 2,02 рази) і активних ГО (в 1,29 рази) в зоні геосинхронних об'єктів.

Найнебезпечнішим в 2003–2007 роках був НГО 92032А. Близько 20% всіх небезпечних зближень в цьому часовому інтервалі – це зближення з ним активних ГС.

Для побудови кривої густини розподілу відстані між двома супутниками при небезпечних зближеннях НГО з активним ГС інтервал відстані ($r = 100$ км) розіб'ємо на k однакових інтервалів Δr . Прийmemo $\Delta r = 5$ км, тоді $k = 20$. Для кожного інтевалу Δr , тобто для точок

$$r = (i - 1) \cdot \Delta r + \frac{\Delta r}{2}, \quad i = 1, 2, \dots, 20,$$

визначимо значення густини розподілу

$P(r) = \frac{m}{n \cdot \Delta r}$ в даній точці r , де $\frac{m}{n}$ – частота попадання в даний інтервал Δr .

При обчислененні значень $P(r)$ використали архіви небезпечних зближень на двох часових інтервалах довжиною по 1500 діб: з 12.07.1993 по 20.08.1997 і з 1.04.2003 по 10.05.2007.

Наближено функцію густини розподілу мінімальної відстані між супутниками при небезпечному зближенні НГО з активним ГС можна виразити поліномом, знайденим за значеннями $P(r)$ методом найменших квадратів:

$$P(r) = 0,952 \cdot 10^{-4} r + 1,630 \cdot 10^{-6} r^2.$$

Середній розмір геосинхронного супутника за каталогом [1] складає приблизно 8 м. Будемо вважати, що відбулося зіткнення двох супутників, якщо відстань між центрами супутників досягла величини 8м. Тоді ймовірність зіткнення активного ГО з НГО при небезпечному зближенні визначається, як інтеграл функції (3) від 0 до 0,008 км:

$$P_z = \int_0^{0,008} P(r)dr = 3,0 \cdot 10^{-9}, \quad (4)$$

Використовуючи цю ймовірність і кількість небезпечних зближень НГО k з активними ГО за добу, можна обчислити ймовірність зіткнення протягом доби: $P_d = k \cdot P_z$. Так як не кожного дня відбуваються небезпечні зближення, визначаємо середні значення цієї ймовірності. Знаходимо кількість небезпечних зближень k_{50} послідовно в кожні $\Delta t = 50$ діб. Тоді середня за 50 діб ймовірність зіткнення за добу $\bar{P}_d = \frac{k_{50}}{50} \cdot P_z$. Розбивши весь часовий проміжок 1500 діб на інтервали Δt , одержимо 30 точок кривої зміни ймовірності зіткнення за добу в цьому проміжку.

За знайденими точками \bar{P}_d були побудовані, відповідно, дві криві зміни ймовірності зіткнення за добу на інтервали 1500 діб (рис.3).

Далі, знаходимо середні за 1500 діб значення ймовірності і квадратичні відхилення: $P=0,058 \cdot 10^{-8} \pm 0,025 \cdot 10^{-8}$ в період 1993 – 1997 і $P = 0,261 \cdot 10^{-8} \pm 0,057 \cdot 10^{-8}$ в період 2003 – 2007. Маємо, що середнє значення ймовірності зіткнення за 10 років збільшилося в 4,5 раз.

Отже, за останні 10 років ризик зіткнення з активними ГС збільшився набагато сильніше, ніж кількість об'єктів на

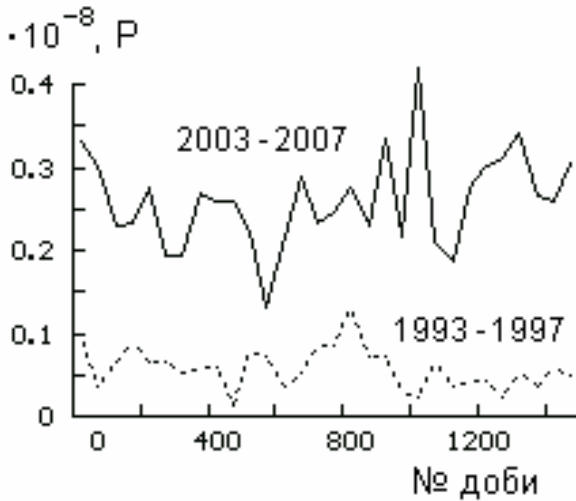


Рис.3. Зміна ймовірності зіткнення за добу НГО з активними ГС протягом 1500 діб: в 1993-1997рр. і в2003-2007рр

геосинхронних орбітах. Це частково пояснюється тим, що вклад в ризик зіткнення дають нові НГО, та збільшується кількість активних ГС. Збільшення кількості НГО в n раз і активних ГС в m рази статистично повинно вести до збільшення ризику зіткнення на геостаціонарній орбіті в $n \cdot m$ раз. Так як $n = 2,02$ і $m = 1,49$, то за останні 10 років збільшення ризику зіткнення значно перевищило цю величину: замість 3,01 – в 4,5 раз. Тобто є ще інші причини збільшення ризику зіткнення. Зокрема, поява в приєкваторіальній зоні небезпечних НГО, таких як згадуваний вище супутник 92032A.

Незважаючи на швидке збільшення ризику зіткнення на геостаціонарній орбіті, середня її ймовірність за рік протягом 2003 – 2007 років залишається ще дуже малою: $P = 0,95 \cdot 10^{-6} \pm 0,21 \cdot 10^{-6}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вершков А.Н. Электронная форма Каталога орбит геостационарных спутников. // Наблюдения естественных и искусственных объектов. Тезисы. С.-Петербург, ИТА РАН, 1996.
2. Хуторовский З.Н., Каменский С.Ю., Бойков В.Ф., Смелов В.Л. Риск столкновения космических объектов на низких высотах. // Столкновения в околоземном пространстве (космический мусор). – М., Космосинформ, 1995. – С.19-90.
3. Сочилина А.С., Киладзе Р.И., Григорьев К.В., Вершков А.Н. Каталог орбит геостационарных спутников. – С.-Петербург: ИТА РАН, 1996. – 103с.
4. Hernandez C., Jehn R.. Classification of geosynchronous objects. – Issue 8. – Darmstadt: ESA ESOC, jan. 2006. – 119p.