

УДК 629.78

В. В. Авдєєв

Дніпропетровський національний університет

Побудова групи із двох супутників без використання рушійної установки

Надійшла до редакції 22.01.01

Досліджена залежність від проектних параметрів тривалості побудови групи із основного і відокремлюваного від нього допоміжного супутників Землі в околі однієї орбіти та інтервалу часу до першої корекції відстані між ними.

У порівнянні з одиночним космічним апаратом (КА) взаємоузгоджений рух основного й допоміжного супутників (ОС, ДС) надає ряд переваг, зокрема у розширенні виміральної бази та зони покриття, а також у появі можливості автономним шляхом визначити параметри руху КА [2, 4]. Побудова групи із ОС і ДС і підтримання протягом періоду експлуатації їхнього заданого відносного положення вимагають такого вибору проектних параметрів із урахуванням їхніх можливих відхилень від номінальних значень і непостійності збурювальних факторів, при якому ймовірність зіткнення КА не перевищить заданого значення, а також мінімізації бортової енергії для періодичних корекцій орбіти.

Одним із варіантів побудови групи із ОС і ДС є його відокремлення від ОС пружинним або пневматичним механізмом. Вплив параметрів відокремлення (величини приросту швидкості ДС V_s та її напрямку) на ймовірність зіткнення КА шляхом моделювання руху групи визначається в роботі [5]. Плоский відносний рух двох КА, відстань між якими обмежується невагомою нерозтяжною ниткою, із урахуванням опору атмосфери досліджується у [3]. Для різних значень співвідношення між гравітаційними і аеродинамічними силами отримано кінцеві аналітичні вирази координат вектора відносного положення КА й умови переходу до зв'язаного руху. Аналогічний за характером залежності відстані між КА від поточного часу (але без коливань складових) наближений вираз отримано в роботі [1]. Визначено початкове відносне

положення ДС, що забезпечує найбільшу тривалість інтервалу до чергової корекції його орбіти.

Побудову групи будемо вважати закінченою, коли ДС входить до діапазону робочої відстані (ДРВ) між КА (l_1, l_2). Тривалості входження ДС до ДРВ і перебування у ньому до першої корекції відстані між КА будемо визначати числом витків ОС у незбуреному русі n_f та n_c відповідно. У даній роботі поставлена задача провести аналіз залежностей n_f та n_c від типу групи (ОС—ДС, ДС—ОС), параметрів КА, висоти орбіти, ДРВ, величини додаткової абсолютної швидкості V_s , що надається ДС механізмом його відокремлення від ОС, та її напрямку, який визначається кутом β між вектором V_s і трансверсаллю в момент відокремлення t_s (рис. 1). Середня висота майже кругових орбіт складає 400 ... 2600 км, відстань між КА — 50...2000 км, відношення маси ДС до маси ОС $k < 0.2$ і балістичних коефіцієнтів $b_d/b_o > 1$. Швидкість V_s надається у площині орбіти ОС, її величина не перевищує 5 м/с; КА розглядаються як матеріальні точки.

Для прийнятих припущень з похибкою не більше кількох процентів відстань між КА в залежності від числа витків ОС у незбуреному русі n [1]:

$$l(n) = 2\pi nr_0 [1 - \sqrt{x^3 - 3\rho r_0 (b_d x^2 - b_o)n}], \quad (1)$$

де r_0 — середній радіус орбіти ОС на витку відокремлення ДС, ρ — щільність атмосфери, x — відношення початкових середніх радіусів орбіт після

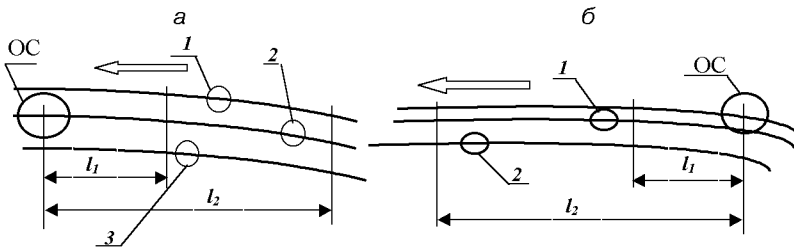


Рис. 1. Зміна відстані між КА при перебуванні ДС у ДРВ: а — група ОС—ДС ($-\pi/2 < \beta < \pi/2$); б — група ДС—ОС ($\pi/2 < \beta < 3\pi/2$); 1, 2, 3 — послідовні положення ДС

відокремлення, $x = r_0^0(V_s, \beta) / r_0^a(V_s, \beta)$.

Перший доданок в (1) визначає вплив на відстань між КА різниці початкових періодів обертання, що утворилася в результаті відокремлення ДС від ОС, другий — вплив аеродинамічного опору. Якщо прийняти до уваги, що додаткова швидкість V_s суттєво менша за швидкість КА $V(t_s)$, то залежність функції x від параметрів відокремлення V_s і β шляхом нескладних перетворень (інтеграл площ, вектор Лапласа, піввісь еліптичної орбіти) можна привести до вигляду

$$x(V_s, \beta) = 1 - 2(1 + k)\sqrt{r_0/\mu} V_s \cos\beta, \quad (2)$$

де μ — гравітаційний параметр Землі. Як видно з (2), для прийнятих припущень $|x - 1| < 0.001$, тому шляхом представлення виразу (1) в околі $x = 1$ двома членами ряду Тейлора оцінка відстані ОС—ДС з додатковою похибкою не більше 0.5 % може бути виражена через параметри відокремлення таким чином:

$$l(n) = 3\pi n r_0 [(1 - x)(1 + 4\pi n r_0 b_p \rho) - 2\pi n r_0 \Delta b \rho] = 6\pi n \sqrt{r_0^3} \left[\frac{1 + k}{\sqrt{\mu}} V_s \cos\beta - \pi \rho \sqrt{r_0} \Delta b n \right], \quad (3)$$

де $\Delta b = b_n - b_0$. У виразі (3) другий доданок множника при $1 - x$ не враховується, тому що він на кілька порядків менший за одиницю, навіть якщо інтервал між корекціями відстані ОС—ДС досягає п'яти років (обмеження n).

Поведінка функції (3) при наявності аеродинамічного опору ($\rho \neq 0$) визначається взаємним розташуванням КА. Якщо ОС рухається попереду ДС ($\cos\beta > 0$, отже: $x < 1$, $l(n) > 0$), то напрям дії факторів різниці початкових періодів обертання і аеродинамічного опору протилежний (група ОС—ДС), у протилежному разі ($\cos\beta < 0$, отже: $x > 1$, $l(n) < 0$) напрям дії цих факторів буде однаковим (група ДС—ОС). Розглянемо ці групи окремо.

При побудові групи ОС—ДС обмеження низу величини додаткової швидкості V_s , що надається ДС механізмом відокремлення, отримуємо шляхом визначення максимуму функції (3), який, очевидно, не може бути меншим за відстань l_1 від ОС до

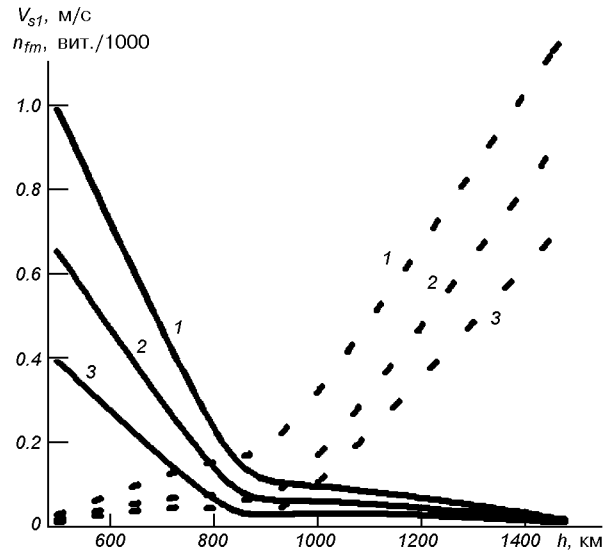


Рис. 2. Обмеження низу додаткової швидкості V_{s1} ДС при відокремленні і найбільша тривалість n_{fm} побудови групи ОС—ДС при наявності аеродинамічного опору; $F_0 = 200$, $k = 0.1$, $\Delta b = 0.071 \text{ м}^2/\text{кг}$, $l_1 = 100 \text{ км}$, $\beta = 0$; 1, 2, 3 — для ρ_{min} , ρ і ρ_{max} відповідно

початку ДРВ (рис. 1):

$$V_{s1} = \frac{0.82}{(1 + k)|\cos\beta|} \sqrt{\mu l_1 \rho \Delta b / r_0}. \quad (4)$$

Результату (4) відповідає максимальне значення вираженої числом витків тривалості побудови групи

$$n_{im} = \frac{0.41}{\pi r_0} \sqrt{l_1 / (\rho \Delta b)}. \quad (5)$$

Як видно із виразів (4), (5), при збільшенні висоти орбіти h обмеження V_{s1} додаткової швидкості ДС зменшується, а найбільше значення тривалості побудови групи n_{im} збільшується (рис. 2). У подальшому величини (4), (5) будуть використані для отримання залежностей вибраних характеристик побудови групи КА n_t та n_c від додаткової швидкості V_s .

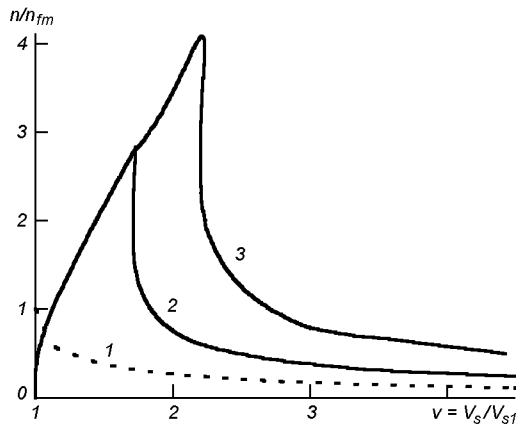


Рис. 3. Відносні тривалості n_i/n_{fm} (крива 1) входження ДС до ДРВ й перебування у ньому до першої корекції відстані (n_c/n_{fm}) для групи ОС—ДС при наявності аеродинамічного опору: 2 — $l_1/l_2 = 3$, 3 — $l_1/l_2 = 5$

Згідно з (3)—(5) тривалість побудови групи ОС—ДС при $V_s > V_{s1}$ становить

$$n_i = n_{fm}(v - \sqrt{v^2 - 1}), \quad v > 1, \quad (6)$$

де $v = V_s/V_{s1}$.

Характер залежності інтервалу часу до першої корекції відстані між КА від відношення швидкостей v визначається тим, через яке обмеження ДРВ (l_1 чи l_2) ДС виходить із нього (3)—(5):

$$n_c = \begin{cases} 2n_{fm}\sqrt{v^2 - 1} & \text{при } v \leq V_{s2}/V_{s1}, \\ n_{fm}(\sqrt{v^2 - 1} - \sqrt{v^2 - l_2/l_1}) & \text{при } v > V_{s2}/V_{s1}, \end{cases} \quad (7)$$

де V_{s2} — значення V_s , при якому максимум відстані між КА дорівнює l_2 ,

$$V_{s2} = \frac{0.82}{(1+k)\cos\beta} \sqrt{\mu l_2 \rho \Delta b / r_0}. \quad (8)$$

Як видно із (7), (8), при переході швидкості V_s через значення V_{s2} тривалість перебування ДС у ДРВ до першої корекції відстані між КА зменшується у два рази, $V_{s2}/V_{s1} = \sqrt{l_2/l_1}$ (4), (8), (рис. 3). Таким чином при збільшенні додаткової швидкості ДС, що надана йому при відокремленні від ОС, від V_{s1} до V_{s2} має місце зменшення тривалості побудови групи і збільшення інтервалу часу до першої корекції відстані між КА. Отже, швидкість V_{s2} можна прийняти за оптимальну з точки зору вибраних критеріїв (мінімум n_i , максимум n_c):

$$n_i(V_{s2}) = n_{fm} \left(\sqrt{\frac{l_2}{l_1}} - \sqrt{\frac{l_2}{l_1} - 1} \right),$$

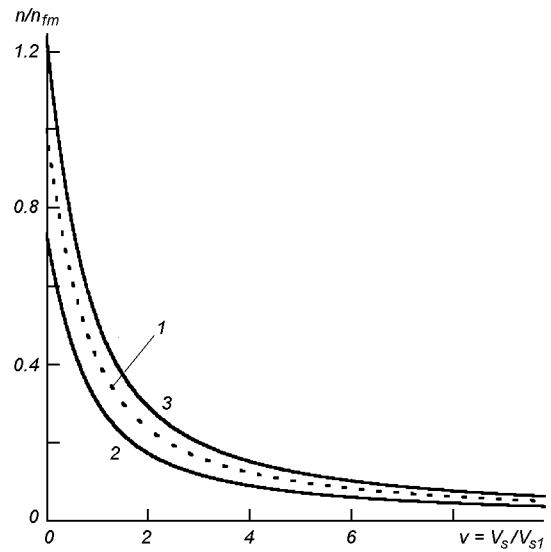


Рис. 4. Відносні тривалості n_i/n_{fm} (крива 1) входження ДС до ДРВ й перебування у ньому до першої корекції відстані n_c/n_{fm} для групи ДС—ОС при наявності аеродинамічного опору: 2 — $l_2/l_1 = 3$, 3 — $l_2/l_1 = 5$

$$n_c(V_{s2}) = 2n_{fm} \sqrt{\frac{l_2}{l_1} - 1}. \quad (9)$$

При побудові групи ДС—ОС ($\cos\beta < 0$), як було зазначено вище, напрям дії факторів різниці початкових періодів обертання і аеродинамічного опору однаковий, в результаті чого знак відносної швидкості ДС не змінюється, тому його вхід до ДРВ можливий, на відміну від групи ОС—ДС, при довільно малих значеннях приросту швидкості V_s . Незважаючи на це, величини (4), (5) також можуть бути використані для отримання функцій $n_i(v)$ та $n_c(v)$:

$$\begin{aligned} n_i(v) &= n_{fm}(\sqrt{v^2 + 1} - v), \\ n_c(v) &= n_i(v) \left(\sqrt{\frac{l_2}{l_1}} - 1 \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Як видно із (10), для групи цього типу тривалості побудови групи і перебування ДС у ДРВ до першої корекції однакові (рис. 4) з точністю до постійного множника, який залежить від розташування і розмірів ДРВ (l_1, l_2).

При відсутності аеродинамічного опору ($\rho = 0$), незалежно від типу групи згідно з виразом (3):

$$\begin{aligned} n_i(V_s) &= \sqrt{\frac{\mu}{r_0^3}} \frac{l_1}{6\pi(1+k)V_s |\cos\beta|}, \\ n_c(V_s) &= n_i(V_s) \left(\frac{l_2}{l_1} - 1 \right), \end{aligned}$$

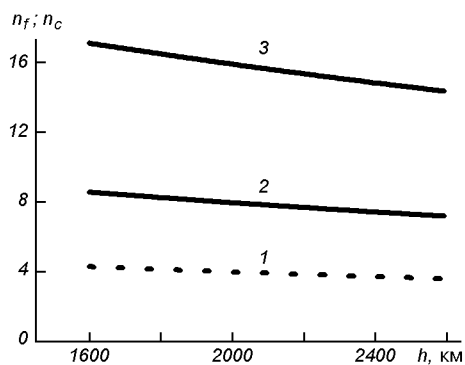


Рис. 5. Тривалості n_f (крива 1) входження ДС до ДРВ й перебування у ньому до першої корекції відстані n_c при відсутності аеродинамічного опору: 2 — $l_2/l_1 = 3$, 3 — $l_2/l_1 = 5$; $k = 0.1$, $V_s = 1$ м/с, $l_1 = 100$ км, $\beta = 0$

тобто, як і для групи ДС—ОС при $\rho \neq 0$, вибрані характеристики процесу, однакові (рис. 5) з точністю до постійного множника, що також визначається величинами l_1, l_2 .

Проведений аналіз дає можливість визначити особливості впливу проектних параметрів ($r_0, \Delta b, k, l_1, l_2, V_s, \beta$) і щільності атмосфери ρ на тривалість n_f побудови групи та інтервал часу n_c перебування у ДРВ ДС до першої корекції його орбіти. При наявності аеродинамічного опору у випадку групи типу ОС—ДС оптимальне (мінімум n_f , максимум n_c) значення додаткової абсолютної швидкості V_s , що отримує ДС при відокремленні

від ОС, дає вираз (8), при цьому величини n_f та n_c розраховуються згідно з (9). При відсутності аеродинамічного опору для груп обох типів, а також для групи ДС—ОС незалежно від аеродинамічного опору оптимальне значення V_s досягається на її верхньому обмеженні, якщо пріоритет має характеристика процесу побудови групи n_f , і на нижньому — якщо n_c .

1. Авдеев В. В. Оцінка деформації структури супутник-субсупутник під впливом опору атмосфери // Космічна наука і технологія.—1997.—3, № 5/6.—С. 30—33.
2. Грош К. Б., Лиллестрэнд Р. Л. Автономная навигация спутника, основанная на выбрасывании искусственного зонда // Механика: Сб. переводов иностр. статей. — М.: Мир, 1968.—№ 1.—С. 20—36.
3. Докучаев Л. В., Ефименко Г. Г. Влияние атмосферы на относительное движение связи двух тел на орбите // Космич. исследования.—1972.—10, вып. 1.—С. 57—65.
4. Порфирьев Л. Ф., Смирнов В. В., Кузнецов В. И. Аналитические оценки автономных методов определения орбит. — М.: Машиностроение, 1987.—280 с.
5. Kompaniez E., Smetanin J. Group injection of spacecrafts // 46th Intern. astronomical congress. — Oslo, Norway, 1995.— P. 119.

BUILDING A GROUP OF TWO SATELLITES WITHOUT USING AN ON-BOARD THRUSTER

V. V. Avdeev

We investigate the dependence on the design parameters of the time it takes to form a group consisting of the main satellite and the auxiliary one separated from it which both move in almost the same orbit as well as the time interval before the first correction of the distance between the satellites.