

ХАРАКТЕР ВЫВЕДЕНИЯ ПРИВЯЗНОГО ОБЪЕКТА В РАСЧЕТНУЮ ТОЧКУ ВСТРЕЧИ ИЗ РАВНОВЕСНОГО СТАЦИОНАРНОГО РЕЖИМА ДВИЖЕНИЯ СВЯЗКИ

Алиев Әділхан Оралбекұлы

ktit130201@gmail.com

Студент 2-го курса кафедры Космическая техника и технологии,
 ЕНУ им. Л. Н. Гумилева, Нур - Султан, Казахстан.
 Научный руководитель – Жумабаева А.С.

Введение

Для достижения поставленных целей ключевое значение имеет повышение конкурентоспособности РКТ. Важнейшим элементом этого процесса является внедрение перспективных технологий, к которым относится орбитальные тросовые системы.

Сближение с КА, движущимся по круговой орбите

Начнем с рассмотрения задачи сближения между круговыми орбитами. При этом возможны два случая. В первом случае движение связанных объектов происходит на высотах меньших высоты круговой орбиты КА, с которым решается задачи встречи (Рис. 1). Для этого случая $r_A > D + r_0$ (r_A - радиус орбиты КА, r_0 - радиус орбиты базового объекта связи, D - длина соединительного троса).

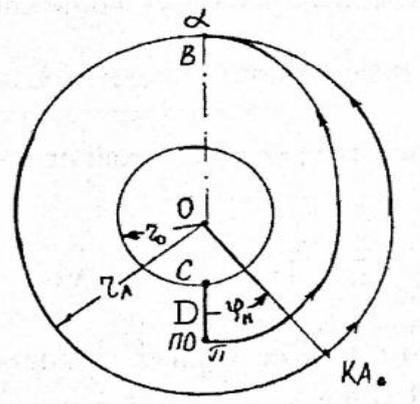


Рисунок 1

Во втором случае орбита КА располагается ниже орбит связанных объектов (Рис. 2). В этом случае $r_A < r_0 - D$.

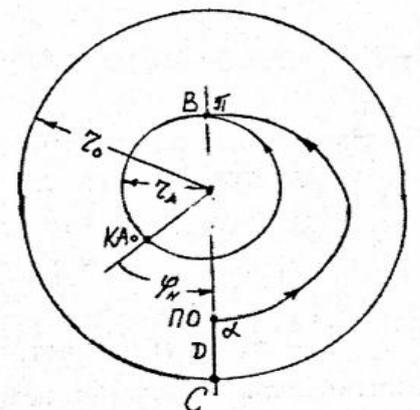


Рисунок 2

А) Случай $r_A > D + r_0$

Известно, что при переходе между круговыми орбитами оптимальным по энергетике является переход по эллипсу, который в апсидальных точках касается двух рассматриваемых орбит. При использовании связи нужно выбрать такую длину троса, чтобы после расщепления связи ПО перешел на эллиптическую траекторию встречи с КА. В этом случае точка расщепления соответствует перигею эллиптической траектории (т. π на Рис. 1), а точка встречи В с КА — апогею эллипса (т. α). Радиусы круговой орбиты КА r_A и орбиты базового объекта связи (орбитальной станции) r_0 считаем заданными.

В таблице 1 приведены результаты расчетов характеристик сближения КА из режима равновесного стационарного движения связи при $r_0 = 6671$ км ($h_0 = 300$ км) для значений \bar{r}_A от 1 до 2, что соответствует увеличению радиуса r_A от 6671 до 13342 км. Требуемая длина троса D_2 возрастает от 0 до 602 км. Если принять за предельное значение длины троса $D = 90$ км, то сближение ПО с КА может быть реализовано при радиусах $r_A \leq 7340$ км. Для более высоких орбит КА потребуется чрезмерно большая длина троса (до значения $D_2 = 602$ км при $r_A = 13340$ км).

Таблица 1. Характеристики сближения из режима равновесного стационарного режима движения связи $r_A > D + r_0$ при $r_0 = 6671$ км

\bar{r}_A	1,0	1,05	1,10	1,25	1,50	2,00
r_A , км	6 671,0	7 004,55	7 338,10	8 338,75	10 006,5	13 342,0
\bar{D}_1	0	0,006993	0,013699	0,032258	0,058824	0,1
D_1 , км	0	46,650	91,383	215,194	392,412	667,100
\bar{D}_2	0	0,006932	0,013468	0,031531	0,055076	0,090230
D_2 , км	0	46,240	89,842	210,341	367,415	601,926
$\bar{V}_{отн}$	0	0,010525	0,020686	0,049082	0,091228	0,160001
$V_{отн}$, м/с	0	79,392	152,457	339,347	575,777	874,543
$\Delta\bar{V}$	0	0,010379	0,020131	0,046063	0,081364	0,131896
ΔV , м/с	0	80,228	155,611	356,060	628,933	1019,540
t_B , мин	0	47,130	49,087	55,057	65,249	86,788
φ_B , град	0	5,509	10,515	23,072	38,520	57,773

Величина импульса ΔV оказывается весьма близкой к значению относительной скорости ПО и КА в момент встречи. Так, для длин троса, $D_2 \leq 90$ км разница между ΔV и $V_{отн}$ оказывается менее 2%.

Время полета ПО до расчетной точки встречи с КА с увеличением радиуса орбиты r_A возрастает. Для $r_A = 7005$ км $t_B = 477$ мин, а для $r_A = 13340$ км уже 87 мин. При $r_A \leq 7340$ км t_B не превышает 49 мин.

При $r_A \leq 7340$ км значение φ_B не превосходят 10° , а при $r_A = 13340$ км уже достигает значение 58° .

Б) Случай $r_A < r_0 - D$.

В данном случае точка расщепления связки соответствует апогею эллипса, по которому ПО осуществляет переход в расчетную точку встречи с КА (Рис. 2). Тогда необходимая для реализации встречи длина троса D определяется из условия равенства абсолютной скорости ПО ($V_{\text{ПО}}$) и скорости в апогее переходного эллипса V_{α} .

Импульс скорости ΔV , определяющий выигрыш в энергетике за счет применения связки для решения задачи вывода ПО в расчетную точку встречи с КА, будем рассчитывать как величину необходимого изменения скорости КА для перехода с круговой орбиты радиуса $r = r_0 - D$ на эллиптическую орбиту с радиусом апогея $r_{\alpha} = r_0 - D$ и радиусом перигея $r_{\pi} = r_A$. Переход осуществляется в апогейной точке.

В таблице 2 представлены характеристики процесса сближения ПО и КА из режима равновесного стационарного движения связки в случае $r_A < r_0 - D$, т.е. когда орбита КА располагается внутри орбиты тросовой системы. Расчеты производились для значений безразмерного радиуса орбиты КА $\tilde{r}_A = r_A/r_0$ от 1 до 0,5.

Таблица 2. Характеристики сближения из режима равновесного стационарного движения связки $r_A < r_0 - D$ при $r_0 = 13200$ км

\tilde{r}_A	1,0	0,98	0,95	0,90	0,80	0,50
r_A , км	13200	12936	12540	11880	10560	6600
\tilde{D}_1	0	0,002882	0,007299	0,01493	0,03125	0,09091
D_1 , км	0	38,040	96,350	197,015	412,500	1200,000
\tilde{D}_2	0	0,002900	0,007416	0,01543	0,03358	0,11708
D_2 , км	0	38,277	97,892	203,625	443,190	1545,417
$\tilde{V}_{\text{отн}}$	0	0,043153	0,010901	0,022192	0,046048	0,129997
$V_{\text{отн}}$, м/с	0	239,54	61,460	128,546	282,907	1010,255
$\Delta\tilde{V}$	0	0,004340	0,011063	0,022873	0,049104	0,159256
ΔV , м/с	0	23,850	60,790	125,692	269,837	875,142
t_B , мин	0	123,620	120,397	115,044	104,396	72,317
φ_H , град	0	-2,360	-6,085	-12,834	-28,799	-112,730

Размерные значения характеристик сближения приведены для радиуса орбиты базового объекта связки $r_0 = 13200$ км. Видно, что с уменьшением безразмерного радиуса \tilde{r}_A абсолютные значения всех рассматриваемых характеристик возрастают. В предыдущем случае $r_A > D + r_0$ эти характеристики возрастали с ростом величины \tilde{r}_A . Но в том и другом случае увеличение D , $V_{\text{отн}}$, ΔV , t_B , $|\varphi_H|$ происходит с увеличением разницы между радиусами орбит КА и базового объекта связки.

Полученные отрицательные значения угла начального рассогласования φ_H означают, что для обеспечения встречи ПО с КА в момент расщепления связки КА должен находиться сзади тросовой системы (Рис. 2). При уменьшении радиуса r_A от 12940 до 6600 км угол φ_H изменяется от -2,36 градусов до -112,7 градусов. Для длин троса $D \leq 100$ км начальное угловое рассогласование по величине не превышает 6 градусов.

Таблица 3. Характеристики процесса сближения с КА, движущимся по эллиптической орбите с радиусом перигея $\tilde{r}_{Ап} = 1,02$ и радиусом апогея $\tilde{r}_{Аа} = 1,10$ при $r_0 = 6671$ км
($r_{Ап} = 6804,42$ км; $r_{Аа} = 7338,10$ км)

v_B , град	0	30	60	90	120	150	180
\bar{D}_1	0,00283	0,00353	0,005464	0,00815	0,01090	0,01094	0,01370
D_1 , км	18,898	23,566	36,454	54,378	72,684	86,334	91,384
\bar{D}_2	0,00282	0,00352	0,005428	0,00807	0,010748	0,012735	0,013468
D_2 , км	18,830	23,461	36,202	53,823	71,701	84,955	89,842
$r_{п}$, км	6689,83	6694,46	6707,20	6724,82	6742,70	3775,95	6760,84
$r_{а}$, км	6804,42	6837,73	6930,43	7061,19	7196,98	7299,75	7338,10
$V_{отн}$, м/с	352,359	359,124	364,220	339,283	250,925	143,551	12,059
ΔV , м/с	32,705	40,741	62,836	93,357	124,279	147,175	366,294
t_B , мин	45,963	46,157	46,157	47,462	48,257	48,861	49,087
v_0 , град	-168,649	-143,270	-118,037	-91,881	-61,273	-32,813	0,897
φ_H , град	11,351	6,730	1,963	-1,881	-1,273	-2,813	0,897

Для рассмотренных вариантов при изменении угла v_B от 0° до 180° необходимая для встречи с КА длина троса изменялась от 18 до 90 км. При этом отличие результатов расчетов по схемам первого и второго приближений составляла от 0,36% до 1,7%. Увеличение радиуса перигея эллиптической траектории сближения происходит от 6690 до 6760 км, а радиуса апогея от 6800 до 7340 км.

Для одновременного прихода в расчетную точку встречи ПО и КА в зависимости от выбираемой точки встречи КА должен находиться в момент расцепления связки либо впереди тросовой системы ($\varphi_H > 0$), либо немного сзади ($\varphi_H < 0$). При этом перемещение точки встречи от перигея к апогею орбиты КА приводит к изменению требуемого начального положения аппарата от $v_0 = -168,6^\circ$ до $v_0 = 0,9^\circ$, т.е. сдвиг начального положения КА по отношению к точке встречи в большинстве случаев достаточно близок к 180° .

Б) Случай расположения орбиты КА внутри орбиты связки (Рис. 4)

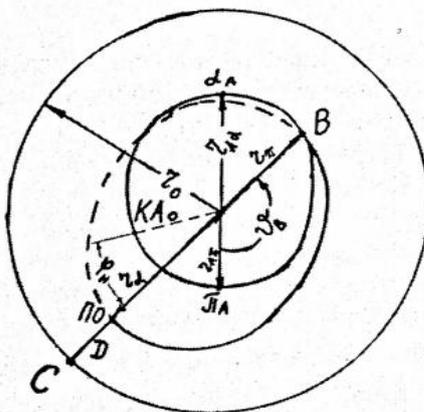


Рисунок 4.

Точка встречи ПО и КА (т. B) задана, как и в предыдущем случае, на орбите КА углом истинной аномалии v_B , а переход ПО в точку встречи осуществляется по эллиптической траектории с радиусом перигея r_π и радиусом апогея r_α . Точка расщепления связки соответствует апогею переходного эллипса $r_\alpha = r_0 - D$.

Результаты расчетов характеристик процесса сближения для рассматриваемого случая приведены в таблице 4. Для рассмотренных вариантов при перемещении точки встречи от перигея ($v_B=0^\circ$) до апогея ($v_B=180^\circ$) орбиты КА требуемая длина троса D уменьшается от 187 ям до 29 км. Радиусы перигея r_π и апогея r_α траектории сближения возрастают соответственно от 6800 до 7800 ям и от 7812 до 7971 км.

Таблица 4. Характеристики процесса сближения с КА, движущимся по эллиптической орбите с радиусом перигея $r_\pi = 6800$ км, радиусом апогея $r_\alpha = 7800$ км при $r_0 = 8000$ км

v_B , град	0	30	60	90	120	150	180
\bar{D}_1	0,02290	0,02170	0,01837	0,01365	0,00873	0,00500	0,00311
D_1 , км	183,206	173,641	146,936	109,192	69,869	40,033	28,881
\bar{D}_2	0,02342	0,02236	0,01883	0,01390	0,00835	0,00504	0,00363
D_2 , км	187,369	178,857	150,627	111,192	66,764	49,295	29,017
r_π , км	6800	6858,91	7025,14	7265,75	7523,40	7723,91	7800
r_α , км	7812,14	7812,14	7849,37	7888,81	7933,24	7959,70	7970,98
$V_{отн}$, м/с	2,981	254,701	446,213	529,230	492,062	370,545	287,805
ΔV , м/с	251,936	237,934	200,244	147,656	94,604	53,398	38,438
t_B , мин	51,794	52,153	53,192	54,702	56,345	57,591	58,073
v_0 , град	-180,203	-156,829	-134,638	-11,949	-87,029	-57,831	-23,636
φ_H , град	-0,203	-6,829	-14,638	-21,949	-27,029	-27,831	-23,636

С увеличением угла v_B относительная скорость в расчетный момент встречи ПО и КА возрастает от значения $V_{отн} = 2,98$ м/с при $v_B = 0^\circ$ до $V_{отн} = 287,9$ м/с при $v_B = 180^\circ$. Следовательно, для реализации встречи с минимальными значениями относительной скорости она должна происходить в районе перигея орбиты КА. Для таких траекторий встречи оказывается максимальным выигрыш в энергетике за счет осуществления сближения с КА с применением связки. Выигрыш в энергетике, определяемый импульсом ΔV , при изменении v_B от 0° до 180° уменьшается от 251,9 до 38,4 м/с; продолжительность полета ПО до расчетной точки встречи возрастает от $t_B = 51,8$, мин до $t_B = 58,1$, мин

Требуемое значение начального положения КА в момент расщепления связки изменяется от $v_0 = -180,2^\circ$ до $v_0 = -23,6^\circ$. Начальное угловое рассогласование положений КА и тросовой системы находится в пределах от $\varphi_H = -0,2^\circ$ до $-27,8^\circ$. Таким образом, в момент расщепления связки КА должен находиться сзади тросовой системы.

Список использованных источников

1. Белецкий В. В., Левин Е. М. Динамика космических тросовых систем. - М.: Наука, 1990, 336 с.
2. Беляев М. Ю., Осипов В. Г., Шошунов Н. Л. Проект экспериментальной тросовой системы с атмосферным зондом. // Тезисы докладов Пятого Международного Аэрокосмического конгресса IAC'06. – М., 2006, с. 320.
3. Иванов В. А. Тросовые системы в космосе. // Авиация и космонавтика. 1984, №5, с. 43-44.
4. Пономарев В. М. Теория управления движением космических аппаратов. – М.: Наука, 1965, 456 с.