

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ПАССИВНЫМ ВОЗВРАЩЕНИЕМ НА ЗЕМЛЮ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Андриенко А.Я.¹, Чадаев А.И.²

*(Учреждение Российской академии наук
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова
РАН, Москва)*

Применительно к задаче повышения безопасности орбитальных полётов анализируются принципы управления пассивным возвращением на Землю космических объектов (КО) – на основе терминального управления силой натяжения гибкой (тросовой) связкой.

Предложенный алгоритм управления связкой базируется на минимальной информации о текущем состоянии связки (от датчиков силы натяжения и длины смотанной с катушки части троса) и позволяет доставить КО на Землю при эксплуатационно приемлемых массе троса и продолжительности операции возвращения.

Ключевые слова: терминальное управление, безопасность орбитальных полётов, пассивное возвращение на Землю, тросовые соединения.

1. Введение

В околоземном пространстве в результате эксплуатации ракетно-космической техники (РКТ) скопилось около 25 тыс.

¹ Анатолий Яковлевич Андриенко, заведующий лабораторией, доктор технических наук, профессор (vladguc@ipu.rssi.ru).

² Александр Иванович Чадаев, старший научный сотрудник, кандидат технических наук (тел. (495) 334-88-71).

объектов и частиц космического «мусора»¹. Это отработавшие спутники, обломки от неудавшихся космических экспериментов, части последних ступеней носителей и разгонных блоков и т.д.

Особую опасность для полетов в космическом пространстве представляют объекты размером свыше 10см, на долю которых приходится 99,97% массы всего мусора (таких объектов сейчас около 3 тыс.). И дело не только в том, что столкновения эксплуатируемых космических аппаратов (КА) с этими объектами влекут катастрофические для КА последствия, но и в накоплении предпосылок для возникновения так называемого синдрома Кеслера: при некоторой критической массе космического мусора случайные столкновения в космосе порождают лавину вторичных соударений, в результате которых образуется пояс мелких космических частиц, на несколько столетий исключающих возможность каких-либо космических полетов. Большинство исследователей сходится к мнению, что при сохранении нынешних темпов загрязнения околоземного пространства такая ситуация может возникнуть через 20-30 лет. Но задолго до этого существенно возрастет реальная опасность для полетов в космическое пространство – потому, что космический мусор будет сосредотачиваться только в некоторых плоскостях (компланарных орбите МКС и др.).

Принципиально возможны два направления борьбы с загрязнением космоса: предотвращение загрязнения и ликвидация негативных его последствий. Предотвращение («профилактика») предполагает использование специальных устройств для самоудаления («самозахоронения») КО после завершения их эксплуатации; практика удаления с геостационарной орбиты отработавших КА – хороший прецедент такой профилактики. Ликвидация последствий загрязнения связывается с созданием автономно или дистанционно управляемого орбитального аппа-

¹ Данные о составе космического мусора, его распределении по высотам полета, размерам, массе и т.д. представлены в многочисленных публикациях, реферируемых журналом ВИНТИ «Исследование космического пространства» в разделе «Загрязнение окружающей среды в результате эксплуатации космической техники».

рата («космического мусорщика»), способного снимать с орбиты и доставлять на Землю элементы космического мусора.

Оба указанных направления не исключают одно другого: первое – заведомо экономичнее, второе – более универсальное, позволяющее подстраховываться на случай всевозможных аварий в космосе, в том числе на случай отказа устройств самозахоронения. Но стоимость операций по расчистке загрязненного космического пространства, исчисляемая тысячами долларов за килограмм убираемого мусора, делает второе направление нереалистичным – если исходить из традиционных представлений о способах возвращения космических объектов на Землю¹.

Поэтому возникает потребность в поиске альтернативных способов возвращения КО, обеспечивающих в потенциале резкое сокращение стоимости расчистки космического пространства. Пожалуй, наиболее обнадеживающим в этом смысле является пассивное возвращение с использованием тросовых соединений.

2. Принципы пассивного возвращения космических объектов на Землю

Пассивным называется возвращение с планетоцентрической орбиты, осуществляемое без использования реактивных двигателей², т.е. без выбрасывания рабочего тела в космическое пространство.

В качестве примера пассивного возвращения можно привести гравитетный принцип спуска с орбиты [2]: если тросовую связку двух космических тел – в данном случае космического мусорщика (КМ) и КО – мусора, полностью разворачивать в апогее планетоцентрической орбиты и свертывать («схлопы-

¹ Например, «мусорщик», подобный Шаттлу, загружает на орбите космические объекты в грузовой отсек и садится с ними на поверхность Земли.

² Это не исключает использования двигателей при выполнении других функций в операции расчистки (типа угловой стабилизации «мусорщика» и т.д.).

вать») в перигее, то траектория полета центра масс связки станет постепенно приближаться к поверхности планеты (даже при отсутствии у планеты атмосферы). Правда, этот эффектный принцип для нынешнего уровня развития космонавтики не имеет прикладного значения: например, при длине троса 10км операция спуска на Землю с первоначальной круговой орбиты высотой 400км займет почти 20 лет¹.

В представленном примере за счет управления длиной троса меняется энергия связки – суммарное количество движения обоих тел в связке уменьшается [2].

Существуют, однако, и такие управления гибкой связкой, при которых суммарное количество движения связки практически не меняется, но оно перераспределяется между телами, так что после обрыва связующего элемента (троса) одно тело (в данном случае КМ) переходит на более высокую орбиту (к другому КО), а второе тело (в данном случае КО) – на траекторию спуска к Земле. И в этом случае общая продолжительность операции возвращения может быть уменьшена до нескольких часов.

Имея в виду возможность использования одного и того же троса для возвращения на Землю каждого очередного КО, приходим к заключению, что описанный принцип пассивного возвращения позволяет реализовать расчистку космического пространства уже на нынешнем уровне развития космической техники.

3. Постановка задачи управления пассивным возвращением

Рассматривается этап расчистки от мусора космического пространства, начинающийся после завершения межорбитального перелета КМ в окрестность КО и «зависания» КМ на заданном расстоянии от КО. Это расстояние определено из условий необходимой безопасности сближения КМ и КО и требуемой надежности формирования тросовой связки КМ с

¹ Эта оценка получена без учета тормозящего действия атмосферы Земли.

КО. Считается, что на борту КМ имеется барабан (точнее, катушка) с тросом (нитью), конец которого присоединен к реактивному снаряду – гарпуну, способному при попадании в КО закрепиться в его корпусе, образуя тем самым гибкую связку КМ с КО. В момент загарпунивания космический объект получает приращение (импульс) скорости¹, с которого начинается процесс развертывания связки.

Необходимо так выбрать положение КМ относительно КО (на заданном расстоянии P_0) в момент образования связки (в момент загарпунивания) и так управлять силами натяжения нити (притормаживая вращение катушки при сматывании с нее нити), чтобы к некоторому конечному моменту времени T орбитальная скорость движения КО уменьшилась до величины, обеспечивающей после отделения² КО от связки в момент T вхождение КО в атмосферу Земли. И при этом следует стремиться к снижению максимального (в процессе управления) значения силы натяжения нити – для обеспечения нужного запаса прочности гибкого соединения КМ с КО.

Предполагается, что формирование управления силами натяжения производится с использованием располагаемой на борту КМ информации о длине смотанной с катушки нити.

Переходя к математической переформулировке задачи будем считать, что длина нити (не более десятков км) существенно меньше радиуса Земли, а ее масса на порядок меньше массы КМ и КО. Тогда объект управления – тросовая (ниточная) связка КМ с КО может быть описана во вращающейся (с угловой скоростью ω движения связки вокруг центра Земли) орбитальной системе координат с началом координат в центре связки уравнениями³

¹ Влияние начального вращения КО на управление развертыванием связки здесь не рассматривается.

² Это отделение может быть произведено подрывом пиропатрона в месте подсоединения нити к гарпуну.

³ Они могут быть получены, например, из уравнений, представленных в [3], §2.1, если пренебречь эксцентриситетом орбиты центра масс связки.

$$(1) \quad \begin{aligned} \ddot{n} + 2\omega\dot{r} &= -\frac{F}{m} \cos\varphi, \\ \ddot{r} - 2\omega\dot{n} - 3\omega^2 r &= -\frac{F}{m} \sin\varphi, \end{aligned}$$

где n, r – координаты центра масс КО в орбитальной системе (r – по местной вертикали, n – по горизонтали в направлении движения центра масс связки); F – модуль силы натяжения троса; m – масса КО; $t \in (0, T)$ – время управляемого полета (развертывания) связки; T – момент завершения развертывания тросовой связки; φ – угол между вектором (n, r) координат КО и местной горизонталью в плоскости движения.

$$(2) \quad \varphi = \arctg \frac{r}{n}.$$

В начальный момент времени $t = 0$ определены начальные условия $n(0) = n_0$, $r(0) = r_0$, причем

$$\sqrt{n_0^2 + r_0^2} = R_0 \frac{M}{M + m} \quad (M - \text{масса КМ}); \quad \dot{n}(0) = \dot{n}_0, \quad \dot{r}(0) = \dot{r}_0 -$$

приращение скорости КО, получаемое в результате загарпунивания КО.

Сила натяжения F определяется сигналом управления u тормозной муфтой по соотношению

$$(3) \quad F = \begin{cases} F_{c\theta} & \text{при } u = 0, \\ F_T & \text{при } u = 1. \end{cases}$$

Здесь $F_{c\theta}$ – сила натяжения в режиме свободного сматывания нити:

$$(4) \quad F_{c\theta} = \begin{cases} 0 & \text{при } V \leq 0, \\ b_{c\theta} V & \text{при } V > 0, \quad \ell = \ell_m; \end{cases}$$

F_T – сила натяжения нити в режиме торможения вращения катушки, определяемая соотношениями:

$$(5) \quad \begin{cases} \text{если } \ell = \ell_m, \text{ то} \\ \quad F_T = \begin{cases} 0 & \text{при } V < 0, \\ ma & \text{при } V = 0 \text{ и } ma \leq F_c, \\ F_0 & \text{при } V = 0 \text{ и } ma > F_0, \\ F_0 + b_T V & \text{при } V > 0; \end{cases} \\ \text{если } \ell < \ell_m, \text{ то } F_T = 0, \end{cases}$$

где $V = (\dot{n} \cos \alpha + \dot{r} \sin \alpha) \frac{M+m}{M}$ – скорость изменения рас-

стояния между КО и КМ; $\ell = \sqrt{n^2 + r^2} \frac{M+m}{M}$ – расстояние

между КО и КМ; $\ell_m = \ell_m(t) = \max_{\tau \in (0, t)} \ell(\tau)$ – длина нити, смотан-

ной с катушки к моменту времени t (считается, что при уменьшении расстояния ℓ нить обратно на катушку не наматывается);

$a = \sqrt{\ddot{n}^2 + \ddot{r}^2}$; F_0, b_{cv}, b_T – параметры муфты.

Считается заданной величина $\dot{n}_{зад} < 0$ приращения орбитальной скорости, необходимого для перевода КО на траекторию спуска к назначенной высоте¹ в атмосфере Земли.

Задача состоит в выборе таких значений $n_0, r_0, \dot{n}_0, \dot{r}_0$ и определении такой функции $u(t, \ell, F)$, при которых в системе (4) – (5) обеспечивается к некоторому моменту времени $t = T$ выполнение краевых условий $\dot{n}(T) = \dot{n}_{зад}$, $\dot{r}(T) = 0$ при минимальном значении силы F_m натяжения нити. Необходимо, кроме того, оценить минимальное значение T , при котором возможно решение задачи.

¹ Высота назначается из условия гарантированного «захвата» КО атмосферой при спуске его после отделения от связи.

4. Обсуждение задачи

Первые исследования в области управления тросовой связкой (как системой двух материальных точек, соединенных гибкой невесомой растяжимой нитью) были выполнены еще в 60-х годах в Институте прикладной математики АН СССР при анализе относительного движения космонавта и корабля, связанных фалом.

Интерес к подобному рода задачам резко возрос после публикации обзора [4], в котором были освещены широкие возможности применения тросовых соединений в космосе. С тех пор появилось практически необозримое число работ (библиографию см., например, в [3]), в основном математического характера, посвященных, в частности, задачам управления разворачиванием и свертыванием тросовых соединений в пространстве. Использование результатов этих работ применительно к рассматриваемому здесь приложению оказывается неэффективным по следующим причинам.

1. Предложенные алгоритмы управления основываются на довольно обширной информации о текущем состоянии тросового соединения, получение которой в условиях рассматриваемой задачи затруднительно.
2. Требуется также точное знание параметров связки, а в данном случае масса КО, а следовательно, и расстояние его от центра масс связки известны, вообще говоря, приблизительно.
3. Исследования касались в основном асимптотического поведения связки, в то время как техническое существо задачи требует терминального построения управления связкой.

В заключение отметим, что массы объектов космического мусора располагаются в широком диапазоне – от единиц килограмм до нескольких тонн. Поэтому на борту КМ должен находиться набор реактивных гарпунов различной мощности; в зависимости от предварительной оценки массы КО используется тот или иной гарпун.

Поскольку число типов гарпунов существенно ограничено, а множество масс КО практически непрерывно, то приращения скорости $\dot{n}_0, \dot{r}_0$ в момент загарпунивания будут иметь большой разброс (даже если бы оценки масс КО проводились точно).

Из изложенного следует необходимость разработки нового алгоритма управления связкой, адекватного условиям поставленной задачи.

5. Решение задачи. Алгоритм управления связкой

Решение задачи базируется на использовании некоторых свойств космической тросовой связки, выявленных в результате анализа уравнений (1)-(5) и моделирования на ЭВМ движения связки, возникающих после начального приращения $\dot{n}_0, \dot{r}_0$ скорости КО при управлении развертыванием связкой посредством натяжения нити.

Расчеты велись при рациональных в инженерном отношении параметрах тормозной муфты.

1. На участке управляемого движения связки, характеризуемого неизменностью длины $\ell_m = L$ натянутого троса, КО совершает незатухающие колебания относительно местной вертикали, проходящей через центр масс связки и вращающейся с угловой скоростью ω . Эти колебания происходят с частотой $\Omega = \sqrt{3} \omega$, независимой, в отличие от движения обычного маятника, от значения длины $L = \text{const}$ ¹.

2. Если $r < 0$ (КО находится ниже КМ), то сила натяжения троса при $L = \text{const}$ достигает максимального значения

$$F^* = 3\omega^2 L \frac{mM}{M+m} - 2\omega \dot{n} m$$

в момент t^* , когда трос проходит местную вертикаль в направлении, противоположном орбитальному движению ($\dot{i} < 0$). В этот момент скорость КО минимальна.

¹ В процессе изменения длины ℓ , частота колебаний троса, однако, становится другой.

3. Наименьшая из всех величин $\dot{n}(t^*) < 0$ образуется, если до перехода на движение с заданной L КО свободно (при $u = 0$, без натяжения троса) двигался по эллипсу Гомана¹ в точку

$$r(T^*) = 0, \quad n(T^*) = \frac{M}{M + m} L \quad (\text{где } T^* = 2\pi/\omega), \text{ с которой и начи-}$$

нается участок связанного движения с $L = \text{const}$. При этом обеспечиваются и наилучшие условия перехода (мягко, без рывков) к связанному движению с $L = \text{const}$: в момент, когда муфта срабатывает на торможение вращения катушки, т.е. на «удержание» КО ($u = 1$) тросом заданной длины L , скорость вращения катушки при свободном сматывании с нее троса практически равна нулю.

4. Если переход от свободного движения по эллипсу Гомана к связанному происходит в момент времени $t_{\text{неп}} \neq T^*$, по

$$\sqrt{r^2(t_{\text{неп}}) + n^2(t_{\text{неп}})} = \frac{M}{M + m} L,$$

то величина $n(t^*)$ все равно достигает наименьшего (для данного L) значения², но условия перехода ухудшаются: в момент срабатывания муфты «на удержание» КО удаляется от КМ со скоростью, тем большей, чем меньше $n(t_{\text{неп}}) < 0$. Для заданной длины L эти условия при $t_{\text{неп}} < T^*$ существенно хуже, чем при $t_{\text{неп}} > T^*$.

Отметим, кроме того, что при известном начальном приращении количества движения, сообщаемом гарпуном космическому объекту, основные параметры связки (масса КО, расстояние его от общего с КМ центра масс) могут быть оценены в результате анализа процесса свободного движения КО; при заданном соотношении между $\dot{n}_0, \dot{r}_0$ для этого достаточно одного измерения расстояния (длины вытянутой части нити) между КО и КМ.

¹ Т.е. по орбите, касательной орбите КМ.

² Для других типов свободного движения это свойство в общем случае не сохраняется.

Исходя из изложенного, представим последовательность действий, приводящую к решению поставленной задачи и включающую в себя алгоритм управления связкой.

1. Производится межорбитальный переход КМ на орбиту КО в точку, находящуюся впереди КО (по направлению полета КО) на расстоянии R_0 , т.е. обеспечивается

$$n_0 = -\frac{M}{M+m} R_0, \quad r_0 = 0.$$

2. По результатам предварительного оценивания m_{np} массы КО определяется приращение скорости КО

$$\dot{n}_0 = \frac{n(T) + n_0}{3T^*} \cdot \frac{M + m_{np}}{M},$$

необходимое для перевода КО по эллипсу Гомана в точку

$$n(T) = -K\dot{n}_k, \quad r(T) = 0,$$

где $K = 247с$ (по данным моделирования процессов пассивного возвращения КО с круговых орбит высотой от 150 до 600км). В дальнейшем считается известным предельное значение δm относительной погрешности оценивания m_{np} .

3. Определяется потребное приращение количества движения $Q_{нотр} = m_{np}\dot{n}_0$ и из имеющегося на борту КМ набора реактивных гарпунов подбирается ближайший по характеристикам $Q_{гарп} = m_{гарп} v_{гарп}$ ($v_{гарп}$ – запас характеристической скорости реактивного гарпуна; $m_{гарп}$ – его масса), так, что $Q \geq Q_{гарп} (1 + \delta m)$. Оценивается ожидаемое расстояние R_{np} между КМ и КО в момент времени $T^*/2$:

$$R_{np} = \sqrt{\left(\frac{3Q_{гарп} T^*}{2m_{np}} - R_0\right)^2 + \left(\frac{2Q_{гарп} T^*}{\pi m_{np}}\right)^2} \approx 1,63 \frac{Q_{гарп}}{m_{np}} T^*.$$

4. Отстреливается выбранный гарпун, в результате чего образуется гибкая связка КМ с КО, а горизонтальная составляющая скорости КО уменьшается (примерно на $Q_{гарп}/m$); начинается этап свободного ухода КО от КМ по эллипсу Гомана, обеспечиваемый стравливанием троса (нити) при минимальном его натяжении, т.е. при $u = 0$.

5. В момент времени $T^*/2$ свободного полета КО измеряется длина $\ell(T^*/2)$ вытянутой с катушки нити, определяется масса

$$m = \frac{R_{np}}{\ell(T^*/2)} m_{np} \quad \text{космического объекта и прогнозируется}$$

длина нити, с которой необходимо воспроизвести маятниковое движение связки (когда КМ и КО колеблются вокруг общего центра масс связки):

$$L = \frac{M + m}{M} K \dot{n}_k .$$

6. В момент времени, когда вытянутая с катушки длина нити становится равной L , формируется сигнал $u = 1$ на прекращение стравливания нити. В результате, в начале гасится скорость расхождения КО от КМ, а затем начинается связанное движение КО и КМ вокруг общего центра масс связки, в процессе которого сила натяжения нити постепенно возрастает (до некоторого максимального значения F_m), орбитальная скорость КМ увеличивается, а орбитальная скорость КО уменьшается.

7. В момент времени T , когда сила натяжения нити достигает величины

$$F_k = \omega n_{зад} m \left(3 \omega K \frac{M}{M + m} - 2 \right) ,$$

гарпун отделяется от нити, и КО (вместе с использованным гарпуном) переходит на траекторию свободного спуска к атмосфере Земли.

8. Освободившаяся нить сматывается обратно на катушку КМ для повторных использований в операциях спуска на Землю других КО космического мусора.

Минимальная продолжительность T_{min} процесса управления связкой (от момента отстрела гарпуна до момента отделения его от нити) достигается при $\delta m = 0$, $Q_{завн} = Q$. Она складывается из времени движения КО по эллипсу Гомана и четверти периода колебания связки в режиме космического маятника:

$$T_{min} \approx \frac{2\pi}{\omega} + \frac{\pi}{2\sqrt{3}\omega} .$$

6. Пример управления пассивным возвращением космического объекта

В качестве примера управления пассивным возвращением КО рассмотрим операцию спуска на Землю потерявшего управление грузового корабля «Прогресс» (массой 7,0т) с помощью гипотетического КМ (массой 20т), выведенного на орбиту ракетой-носителем «Протон».

Для спуска на Землю с круговой орбиты высотой 250км КО необходим, в соответствии с изложенными принципами управления, гибкий трос длиной $l = 20\text{км}$. Используемая в качестве такого троса кевларовая нить при десятикратном запасе прочности имеет диаметр 2,5мм и общую массу (вместе с катушкой) 150кг.

После отстрела (в сторону, противоположную направлению полета КМ) десятикилограммового самонаводящегося реактивного гарпуна – с попаданием и закреплением в корпусе КО – производится дожигание трехкилограммового порохового заряда, так что орбитальная скорость КО снижается на 1,0м/с. В результате КО удаляется от КМ при свободном стравливании нити с катушки и через 5361с «зависает» впереди КМ на расстоянии 20км. В этот момент стравливание нити прекращается и КО, все более натягивая нить, «проваливается» относительно КМ вниз (к Земле), постепенно теряя орбитальную скорость.

В момент времени $T = 6135\text{с}$, когда нить переходит положение местной вертикали, скорость КО оказывается меньше первоначальной на 60м/с; сила натяжения нити при этом достигает 1400Н. В этот момент подрывом пиропатрона гарпун освобождается от нити и КО сходит с орбиты, опускаясь к атмосфере (к условной высоте перигея 40км), где и завершается процесс возвращения КО (грузового корабля «Прогресс») на Землю.

7. Заключение

Исследования, результаты которых представлены в данной статье, лежат в общем русле работ (см. [1], статьи в ж. «Космонавтика и ракетостроение» и др.) по обеспечению безопасности объектов РКТ в их жизненном цикле. Эти результаты свидетельствуют о возможности создания (в перспективе развития ракетно-космической техники) универсальных средств пассивного возвращения к Земле аварийных спутников, отработавших компонент орбитальных станций и других элементов космического мусора.

Литература

1. АНДРИЕНКО А.Я., ИВАНОВ В.П., ПОРТНОВ-СОКОЛОВ Ю.П. *Концепция управления безопасностью объектов РКТ в их жизненном цикле*// Труды Института. Том III. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова. –1999. –С.14-38.
2. БЕЛЕЦКИЙ В.В. *Очерки о движении космических тел.* –М.: Наука, 1977. – 369с.
3. БЕЛЕЦКИЙ В.В., ЛЕВИН Е.М. *Динамика космических тросовых систем.*– М.: Наука, 1990.
4. BEKEY I. *Tethers open new space options* // Astronautics and Aeronautics. –1983. –v.21, №4. –Р. 32-40.

ESTIMATION OF POSSIBILITIES OF CONTROL BY PASSIVE RETURNING TO THE EARTH OF SPACE VEHICLES

Anatolii Andrienko, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Laboratory Head, Doctor of Science, professor (Moscow, Prof-soyuznaya st., 65, (495) 334-88-71, vladguc@ipu.rssi.ru).

Alexander Chadaev, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Cand. Sc., Senior scientific worker, (495) 334-88-71, vladguc@ipu.rssi.ru

Abstract: With reference to a problem of increase of safety of orbital flights control principles by passive returning to the Earth space objects - on the basis terminal control of a flexible (cable) sheaf are analyzed.

The offered algorithm of control of a sheaf is based on the minimum information on a current condition of a sheaf (from gauges of force of a tension and length of the part of a cable winded from the coil) and allows to deliver space object to the Earth at comprehensible to weight of a cable and duration of operation of returning.

Keywords: terminal control, safety of orbital flights, passive returning to the Earth, cable connections.