

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

УДК 531.36+ 629.7

ДИНАМИКА ЗАХВАТА СЕТЬЮ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА — КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

Юдинцев В.В.

*Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева,
Московское шоссе, 34, Самара, 443086, Россия
e-mail: yudintsev@gmail.com*

Рассматривается задача захвата космического мусора при помощи сети. Представлена дискретная математическая модель движения сети как системы упруго взаимодействующих материальных точек — узлов сети, а также взаимодействия этих узлов с поверхностью космического мусора. Работа математической модели проиллюстрирована при помощи нескольких расчётных случаев, различающихся угловой скоростью движения космического мусора и скоростью движения центра масс сети относительно космического мусора.

Ключевые слова: космический мусор, космический буксир, захват, сеть.

Введение

Нефункциональные космические аппараты и орбитальные блоки ракет-носителей, находящиеся на орбитах выше 700 км, являются потенциальными источниками космического мусора. В результате столкновения этих объектов с более мелкими объектами возможен лавинообразный рост количества мусора (эффект Кesslera), что может привести к практической недоступности некоторых орбит [1]. Исследования показывают, что для снижения этого риска необходимо ежегодное удаление с орбит нескольких крупных объектов [2].

К настоящему времени разработано множество способов захвата и увода с орбиты крупных объектов [3—8]. Для захвата могут использоваться манипуляторы [9], гарпуны [10], специальные стыковоч-

ные устройства, для орбитальной транспортировки — тросовые системы [7], а также физические явления — силы Кулона [11], потоки частиц.

Один из перспективных способов захвата крупногабаритных объектов предполагает использование сети, отделяемой от космического буксира на тросовой связи [12—15]. В результате попадания объекта космического мусора в сеть происходит его нежёсткая фиксация внутри сети, что позволяет провести орбитальную транспортировку захваченного объекта космического мусора на тросовой связи с контролем воздействия этого объекта на космический буксир. Надёжность фиксации объекта космического мусора сетью обеспечивается её конструкцией, распределением масс по её элементам, структурой, свойствами материала и скоростью движе-

ния по отношению к захватываемому объекту. Преимущество использования сети заключается в возможности захвата вращающихся объектов, захват которых при помощи манипуляторов или других механизмов может привести к значительным ударным нагрузкам при контакте устройства захвата с объектом.

В представленной статье рассматривается процесс захвата вращающегося объекта космического мусора при помощи развёрнутой сети на траектории его движения. Описываются способы развёртывания сети и захвата космического мусора; представлена математическая модель движения сети как системы материальных точек — узлов сети — и взаимодействия этих узлов с поверхностью космического мусора; рассмотрено несколько расчётных случаев, иллюстрирующих взаимодействие узлов сети с объектом — космическим мусором при различных сочетаниях угловой скорости движения космического мусора и начальной скорости движения центра масс сети относительно космического мусора.

1. Постановка задачи

Захват объекта при помощи сети может производиться путём отделения сети с некоторой относительной скоростью (по отношению к буксиру и космическому мусору) или путём развёртывания сети на траектории движения космического мусора по отношению к космическому буксиру. В первом случае на космический буксир должно быть установлено устройство, которое обеспечивает отделение сети с заданной относительной скоростью. Устройство отделения должно обеспечить развёртывание уложенной на борту буксира сети и при-

дание ей заданной формы к моменту её контакта с объектом — космическим мусором [16].

Более простым представляется второй способ развёртывания сети без необходимости её отделения с заданной относительной скоростью и необходимости выполнения жёстких требований к времени её развёртывания. Скорость сети относительно космического мусора может быть определена в процессе формирования орбиты космического буксира на этапе ближнего наведения. В этом случае космический буксир выводится на орбиту захвата, которая пересекается с орбитой космического мусора, обеспечивая движение космического мусора относительно буксира с сетью с заданной скоростью. Сеть после отделения от буксира может быть развёрнута при помощи центробежных сил или при помощи электростатических сил взаимодействия между элементами сети [17].

В первом и во втором случае сеть должна соединяться с космическим буксиром при помощи троса, который позволит после захвата объекта выполнить его орбитальную транспортировку (рис. 1). Выбор точек соединения троса с сетью определяется относительным положением и относительным движением сети, буксира и объекта космического мусора.

При «выбросе» сети при помощи устройства отделения может быть использована одноточечная схема соединения троса с сетью (рис. 1, а). В этом случае между космическим буксиром и мусором поддерживается постоянное расстояние, а сеть выбрасывается в сторону космического мусора. На рис. 1, а вектор V_0 обозначает скорость центра масс сети относительно космического мусора до момента её контакта с космическим мусором.

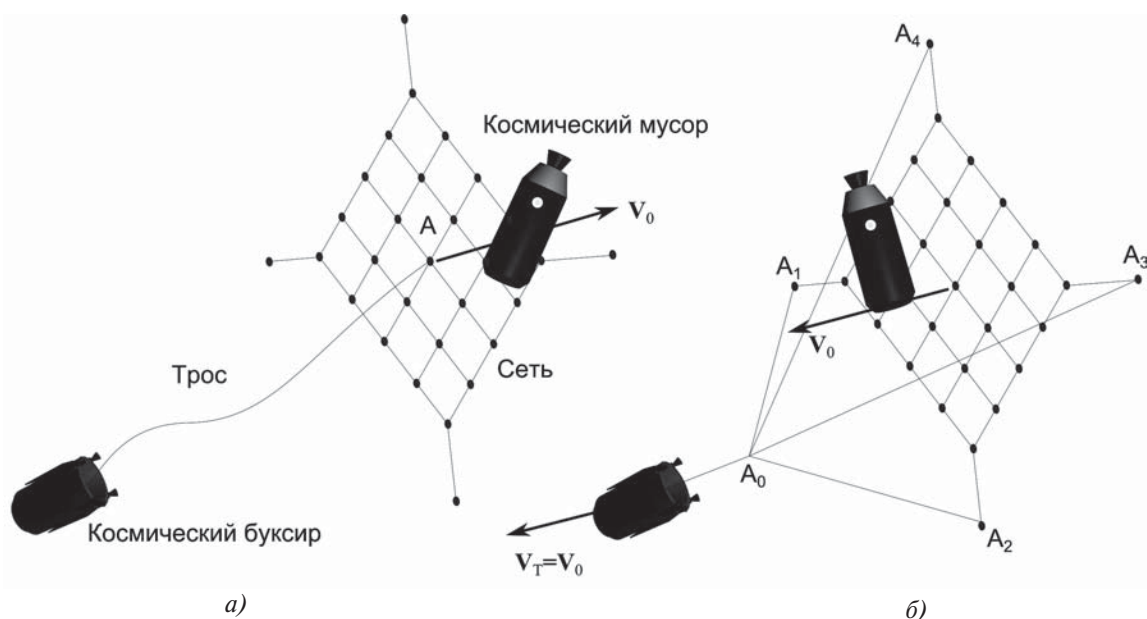


Рис. 1. Способы закрепления сети и троса

При развёртывании сети на траектории движения космического мусора целесообразно использовать многоточечную схему крепления (рис. 1,б), которая обеспечивает надёжный захват объекта. В этом случае и космический буксир, и сеть движутся относительно космического мусора с заданной скоростью V_0 .

Ниже рассматривается только взаимодействие элементов сети с космическим мусором без учёта влияния троса, соединяющего сеть и буксир, на движение самой сети, включая тросы A_0A_1 , A_0A_2 , A_0A_3 , A_0A_4 (рис. 1,б).

2. Модель движения сети

Рассматривается движение механической системы, состоящей из космического мусора — твёрдого тела — и сети. Для моделирования движения сети и её взаимодействия с поверхностью космического мусора используется известное представление сети в виде системы материальных точек, связан-

ных упругими безмассовыми элементами [15]. Материальные точки располагаются в основных узлах сети (точках пересечения её нитей), а также равномерно между узлами для более точного моделирования взаимодействия сети с поверхностью космического мусора (рис. 2).

Системы координат

Движение сети и космического мусора рассматривается относительно орбитальной подвижной системы координат $OXYZ$, начало которой расположено в центре масс системы, движущейся по круговой орбите. Ось OX направлена по направлению радиус-вектора центра масс системы относительно центра Земли, ось OY лежит в плоскости орбиты и направлена в сторону орбитальной скорости, ось OZ дополняет систему до правой. Учитывая небольшую продолжительность процесса захвата сетью, которая не превышает нескольких секунд, систему координат $OXYZ$ можно считать инерциальной: не учитывается влияние на движение центра масс системы, движение сети и космического мусора внешних сил, включая гравитационных сил. С центром масс сети (точка C) свяжем кёнигову систему координат $Cxyz$, оси которой параллельны соответствующим осям системы координат $OXYZ$. С объектом космического мусора связаны главная центральная система координат $Dx_d y_d z_d$ и базовая система координат $Bx_b y_b z_b$, относительно которой задаётся положение системы координат $Dx_d y_d z_d$ (рис. 3).

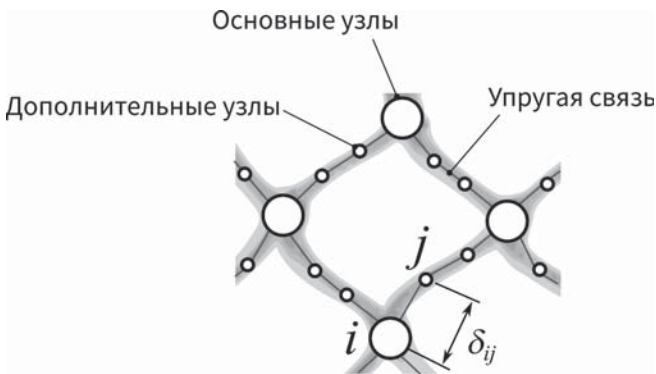


Рис. 2. Узлы сети

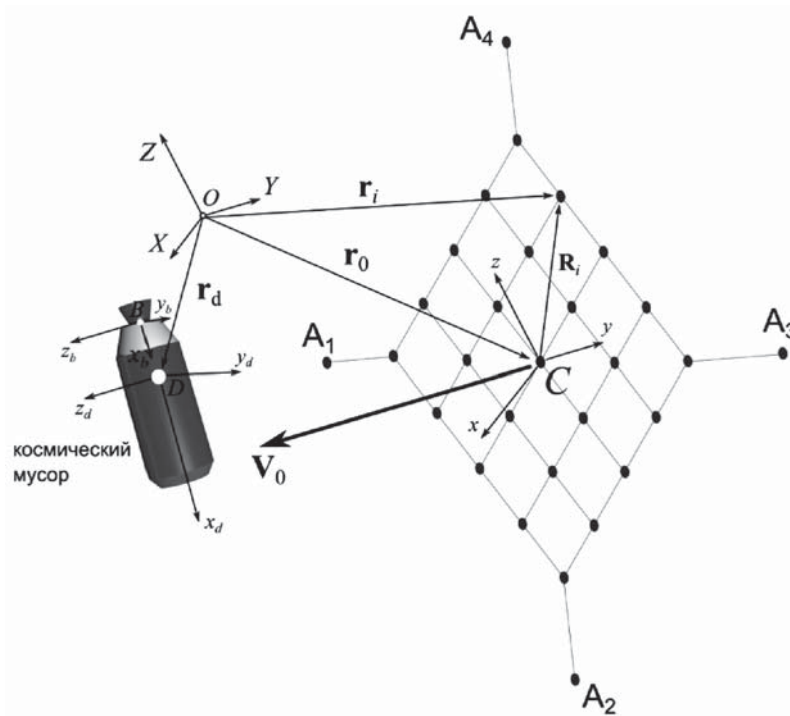


Рис. 3. Используемые системы координат

Структура соединения узлов сети

Структура соединения узлов сети задаётся ориентированным графом: множеством вершин (узлов) и дуг (связей), соединяющих эти вершины. Структура графа описывается матрицей инцидентности S с элементами $S_{i\alpha}$ [18]. Количество строк матрицы S равно количеству узлов сети, а количество столбцов — количеству соединений между узлами. Элемент матрицы инцидентности $S_{i\alpha}$ равен «+1», если дуга α выходит из вершины i , «-1», если дуга входит в вершину i , и равен 0, если дуга не инцидентна вершине i . При записи уравнений движения также используются функции $i^+(\alpha)$ и $i^-(\alpha)$: функция $i^+(\alpha)$ равна индексу вершины, из которой дуга α выходит, $i^-(\alpha)$ равна индексу вершины, в которую дуга α входит [18]. Для примера на рис. 4 представлена схема простейшей сети, состоящей из четырёх узлов, которые связаны четырьмя связями. Матрица инцидентности для рассматриваемой системы будет иметь вид:

$$S = \begin{pmatrix} +1 & 0 & 0 & +1 \\ -1 & +1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & +1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 \end{pmatrix}$$

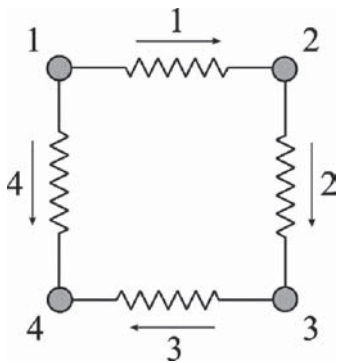


Рис. 4. Простейшая сеть, состоящая из четырёх узлов и четырёх связей

Уравнения движения сети

Рассмотрим сеть, состоящую из n узлов, соединённых n_α упругими связями. Движение сети может быть представлено как движение её центра масс относительно системы координат $OXYZ$, которое описывается матричным уравнением

$$M \ddot{r}_0 = Q \tag{1}$$

и уравнениями движения узлов сети относительно центра масс (в системе координат $Sxyz$)

$$m_i \ddot{r}_i = \sum_{\alpha=1}^{n_\alpha} S_{i\alpha} F_\alpha + N_i + T_i - m_i \ddot{r}_0, \quad i=1, \dots, n, \tag{2}$$

где M — масса сети; r_0 — координатный столбец центра масс сети относительно точки O ; Q — главный вектор внешних сил, действующих на сеть, который определяется суммой сил, действующих на элементы сети со стороны объекта космического мусора:

$$Q = \sum_{i=1}^n (N_i + T_i); \tag{3}$$

$r_i = r_0 + R_i$ (см. рис. 3); F_α — сила, действующая на узел со стороны смежного узла, соединённого с узлом i связью α ; m_i — масса узла i ; N_i — нормальная сила, действующая со стороны поверхности объекта (космического мусора) на узел i сети; T_i — сила, действующая по касательной к поверхности объекта (космического мусора) (сила трения) на i -й узел сети; координатные столбцы сил N_i и T_i определены в системе координат $OXYZ$.

Уравнения системы (2) можно записать в виде одного матричного уравнения [18]

$$m \ddot{R}_i = SF + N + T - (m \cdot 1_n) \ddot{r}_0, \tag{4}$$

где $m = \text{diag}(m_1, m_2, m_3, m_4)$ — диагональная матрица масс системы; 1_n — столбец единиц ($n \times 1$); F — блочная матрица-столбец размерности $n_\alpha \times 1$ сил взаимодействия между узлами сети:

$$F = [F_1, F_2, F_3, F_4]^T, \tag{5}$$

N, T — столбцы векторов нормальных и касательных сил, действующих на узлы сети в результате их контакта с поверхностью космического мусора:

$$N = [N_1, N_2, N_3, N_4]^T, \quad T = [T_1, T_2, T_3, T_4]^T. \tag{6}$$

Определение этих сил рассматривается в следующем подразделе.

Взаимодействие узлов сети

Рассмотрим два узла сети, соединённые упругим элементом α и взаимодействующие с силами $F_{i^+(\alpha)}$ и $F_{i^-(\alpha)}$, которые определяются их относительным положением и относительной скоростью

(рис. 5). Положения узлов $C_{i^+(\alpha)}$, $C_{i^-(\alpha)}$ относительно системы координат C_{xyz} определяются радиус-векторами $R_{i^+(\alpha)}$ и $R_{i^-(\alpha)}$ соответственно. Сила F_α приложена как к узлу с индексом $i^+(\alpha)$, так и к узлу

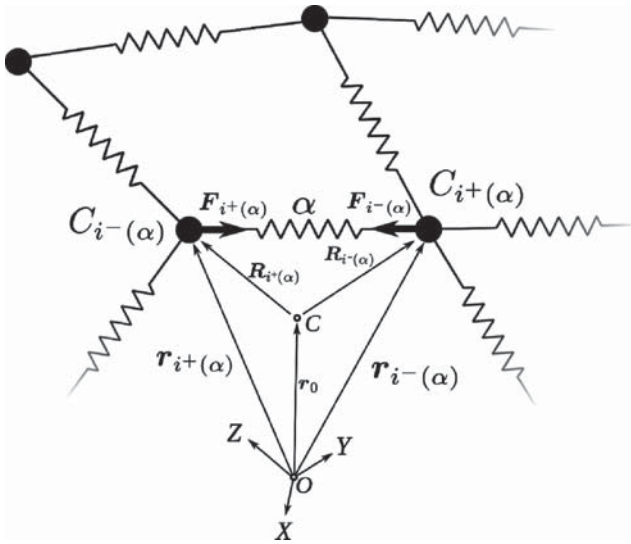


Рис. 5. Два элемента сети

с индексом $i^-(\alpha)$, знак элементов матрицы инцидентности в столбце α и строках $i^+(\alpha)$ и $i^-(\alpha)$ позволят учесть направление приложения силы к этим узлам.

Координатный столбец силы F_α в системе координат $OXYZ$ (и C_{xyz}) определяется выражением

$$F_\alpha = \begin{cases} e_\alpha F_\alpha, & \rho_\alpha > l_{0\alpha}; \\ 0, & \rho_\alpha \leq l_{0\alpha}, \end{cases} \quad (7)$$

где e_α — единичный вектор, направленный от узла $i^+(\alpha)$ к узлу $i^-(\alpha)$:

$$e_\alpha = \frac{\rho_\alpha}{|\rho_\alpha|}, \quad (8)$$

ρ_α — координатный столбец вектора, соединяющего два узла, инцидентных дуге α :

$$\rho_\alpha = -F_{i^+(\alpha)} + F_{i^-(\alpha)} = -\sum_{i=1}^n S_{i\alpha} R_i, \quad (9)$$

$\rho_\alpha = |\rho_\alpha|$ — расстояние между узлами $i^+(\alpha)$ и $i^-(\alpha)$. Модуль силы F_α определяется по модели Кельвина—Фойгта:

$$F_\alpha = \begin{cases} (\rho_\alpha - l_{0\alpha})c_\alpha + \dot{\rho}_\alpha d_\alpha, & \rho_\alpha > l_{0\alpha}; \\ 0, & \rho_\alpha \leq l_{0\alpha}, \end{cases} \quad (10)$$

$l_{0\alpha}$ — свободная длина упругого элемента α , соединяющего два узла; c_α — коэффициент жёсткости связи между двумя узлами; $\dot{\rho}_\alpha$ — относительная скорость двух узлов сети:

$$\dot{\rho}_\alpha = -\sum_{i=1}^n S_{i\alpha} \dot{R}_i; \quad (11)$$

d_α — коэффициент демпфирования связи между двумя узлами.

Взаимодействие узлов сети с поверхностью космического мусора

В настоящей статье форма космического мусора представлена упрощённо — в виде цилиндра с известной длиной L_d и радиусом R_d (рис. 6).

Как было отмечено выше, поскольку сеть представлена как система материальных точек, то и взаимодействие сети с поверхностью космического мусора описывается взаимодействием материальных точек — узлов сети — с космическим мусором. Рассмотрим взаимодействие i -го узла сети с поверхностью цилиндра. Узел сети может взаимодействовать с боковой поверхностью цилиндра или с плоскими поверхностями его двух оснований. Для определения силы взаимодействия поверхности космического мусора с узлом сети используется «ме-

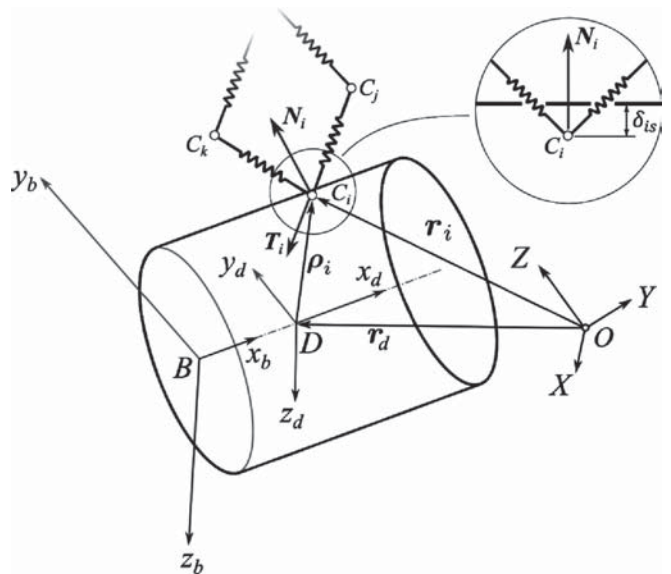


Рис. 6. Взаимодействие узла сети с объектом космического мусора

тод штрафов». В процессе интегрирования уравнений движения сети как системы материальных точек и движения космического мусора (цилиндра) определяется расстояние от узла до боковой поверхности цилиндра. Если это расстояние больше радиуса цилиндра, то сила взаимодействия узла сети с поверхностью равна нулю. В противном случае вычисляется нормальная к поверхности цилиндра сила, зависящая от расстояния от узла до продольной оси цилиндра и скорости движения узла относительно поверхности. Для известного положения центра масс r_d космического мусора и положения i -го узла сети r_i расстояние от узла до основания цилиндрической поверхности будет определяться выражением

$$\delta_{ib} = \begin{cases} x_{bi} - L_d, & x_{bi} > L_d / 2; \\ -x_{bi}, & x_{bi} \leq L_d / 2, \end{cases} \quad (12)$$

где $x_{bi} = (\rho_i + A_0 \rho_c) \cdot (A_0 e_x)$; $\rho_i = r_i - r_d$ — радиус-вектор положения i -го узла сети относительно центра масс космического мусора; ρ_c — координатный столбец радиус-вектора положения центра масс космического мусора относительно точки B , записанный в системе $Bx_b y_b z_b$ (рис. 6); A_0 — матрица преобразования координат из базиса $Dx_d y_d z_d$ в базис $OXYZ$; e_x — координатный столбец единичного вектора продольной оси цилиндра в базисе $Dx_d y_d z_d$. В инерциальном базисе $OXYZ$ координатный столбец вектора e_x определяется выражением $A_0 e_x$.

Если значение δ_{ib} принадлежит интервалу от 0 до L_d , то i -й узел сети может находиться в контакте с поверхностью космического мусора: или с боковой поверхностью, или с основаниями. Далее определяется расстояние δ_{is} от узла i до боковой поверхности цилиндра:

$$\delta_{is} = |\rho_i - (\rho_i \cdot A_0 e_x)(A_0 e_x)| - R_d. \quad (13)$$

Если $\delta_{is} \leq 0$ (расстояние от продольной оси цилиндра до узла сети меньше радиуса цилиндра) и $0 \leq \delta_{ib} \leq L_d$, то узел i находится в контакте с поверхностью цилиндра.

Для определения модуля и направления силы N_i , действующей на i -й узел сети, определяется расстояние δ_i :

$$\delta_i = \begin{cases} \max(\delta_{is}, \delta_{ib}), & \delta_{is} < 0, \delta_{ib} < 0; \\ \delta_{is}, & \delta_{is} < 0, \delta_{ib} > 0; \\ \delta_{ib}, & \delta_{is} > 0, \delta_{ib} < 0; \\ 0, & \delta_{is} > 0, \delta_{ib} > 0. \end{cases} \quad (14)$$

Если $\delta_i = \delta_{is} < 0$, то нормальная сила направлена перпендикулярно продольной оси цилиндра (контакт узла сети с боковой поверхностью цилиндра), и в этом случае единичный вектор n_i , определяющий направление силы N_i , будет найден следующим образом (в системе координат $OXYZ$):

$$n_i = \frac{\rho_i - (\rho_i \cdot A_0 e_x)(A_0 e_x)}{|\rho_i - (\rho_i \cdot A_0 e_x)(A_0 e_x)|}. \quad (15)$$

Если $\delta_i = \delta_{ib}$, то

$$n_i = A_0 e_x \text{ при } x_{bi} > \frac{L_d}{2}, \quad n_i = -e_x \text{ при } x_{bi} < \frac{L_d}{2}. \quad (16)$$

Координатный столбец нормальной силы (в системах координат $OXYZ$ и $Cxyz$) также определяется при помощи модели Кельвина—Фойгта:

$$N_i = -n_i [c_n \delta_i + v_{ni} d_n], \quad (17)$$

где c_n, d_n — коэффициенты жёсткости и демпфирования взаимодействия узла сети с поверхностью космического мусора; v_{ni} — проекция относительной скорости узла на направление нормали n_i к поверхности:

$$v_{ni} = (v_i - v_d - (A_0 \omega_d) \times \rho_i) n_i, \quad (18)$$

где v_i — координатный столбец скорости i -го узла сети в системе координат $OXYZ$; ω_d — координатный столбец вектора угловой скорости вращения космического мусора в системе координат $Dx_d y_d z_d$; v_d — вектор скорости центра масс космического мусора в системе координат $OXYZ$. Выражение $(v_i - v_d - (A_0 \omega_d) \times \rho_i)$ представляет собой скорость i -го узла сети относительно точки поверхности цилиндра, ближайшей к узлу i .

Сила T_i , касательная к поверхности космического мусора, обусловлена работой сил трения в точке контакта узла с поверхностью, ее направление противоположно направлению проекции относи-

тельной скорости узла на касательную плоскость контакта:

$$v_{\tau i} = v_i - v_d - (A_0 \omega_d) \times \rho_i - v_{ni} n_i. \quad (19)$$

Координатный столбец силы T_i в системе координат S_{xyz} определяется выражением

$$T_i = -\frac{v_{\tau i}}{|v_{\tau i}|} |N_i| f, |v_{\tau i}| > 0, \quad (20)$$

где f — коэффициент трения скольжения узла по поверхности космического мусора.

Полагая, что масса сети мала в сравнении с массой космического мусора, её влияние на движение космического мусора не учитываем. Это позволяет упростить математическую модель рассматриваемой механической системы, считая, что центр масс космического мусора неподвижен в системе координат $OXYZ$, а его угловое движение вокруг центра масс (вокруг неподвижной точки) определяется только начальными условиями и описывается известным уравнением:

$$J_d \dot{\omega}_d + \omega_d \times (J_d \cdot \omega_d) = 0, \quad (21)$$

где J_d — матрица тензора инерции космического мусора, записанная в главном центральной системе координат $Dx_d y_d z_d$. Ориентация связанной системы координат $Dx_d y_d z_d$ космического мусора по отношению к системе координат $OXYZ$ определяется матрицей направляющих косинусов A_0 , для определения которой уравнение (21) интегрируется с кинематическими уравнениями:

$$\frac{dA_0}{dt} = \tilde{\omega}_d \cdot A_0, \quad (22)$$

где $\tilde{\omega}_d$ — кососимметричная матрица, составленная из проекций угловой скорости космического мусора на его связанные оси:

$$\tilde{\omega}_d = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_{dz} & \omega_{dy} \\ \omega_{dz} & 0 & -\omega_{dx} \\ -\omega_{dy} & \omega_{dx} & 0 \end{pmatrix}. \quad (23)$$

Таким образом, движение сети как системы материальных точек при взаимодействии с космическим мусором описывается следующей системой уравнений:

а) два матричных дифференциальных уравнения, описывающие движения центра масс сети и движения узлов сети по отношению к центру масс:

$$M \ddot{r}_0 = F, \quad (24)$$

$$m \ddot{R}_i = S \cdot D + N + T - (m \cdot 1_n) \ddot{r}_0; \quad (25)$$

б) динамические и кинематические уравнения движения космического мусора:

$$J_d \dot{\omega}_d + \omega_d \times (J_d \cdot \omega_d) = 0, \quad (26)$$

$$\frac{dA_0}{dt} = \tilde{\omega}_d \cdot A_0. \quad (27)$$

Столбцы сил

$$F = [F_1, F_2, \dots, F_{n_\alpha}]^T,$$

$$N = [N_1, N_2, \dots, N_n]^T,$$

$$T = [T_1, T_2, \dots, T_n]^T$$

определяются при помощи выражений (7), (17) и (20). Начальными условиями для интегрирования уравнений (24)–(27) являются положение и скорость центра масс сети в системе координат $OXYZ$, положения и скорости узлов сети относительно системы координат S_{xyz} , начальная угловая скорость космического мусора и начальные значения элементов матрицы поворота A_0 , определяющие начальное угловое положение космического мусора.

3. Численный анализ

В разделе иллюстрируется работа построенной модели и проанализирована возможность захвата сетью космического мусора, вращающегося с большой угловой скоростью (до 30 °/с) при движении сети по отношению к космическому мусору со скоростью 5 и 10 м/с.

Исходные данные

Космический мусор представлен цилиндром длиной $L_d = 7$ м и диаметром $2R_d = 4$ м. Структура сети показана на рис. 7. Сеть имеет форму квадрата и состоит из 11 ячеек по каждой стороне, размер ячейки $l_{0\alpha} = 0,5$ м. Каждая сторона ячейки разбита на три части двумя дополнительными узлами для более точного моделирования взаимодействия сети с поверхностью космического мусора. Масса узла сети составляет 10 г. К четырём углам сети прикреплены дополнительные элементы — тросы длиной 5 м с пятью узлами. На конце каждого троса размещены грузы — точечные массы по 0,2 кг каждая. Тросы предназначены для повышения надёжности захвата мусора сетью.

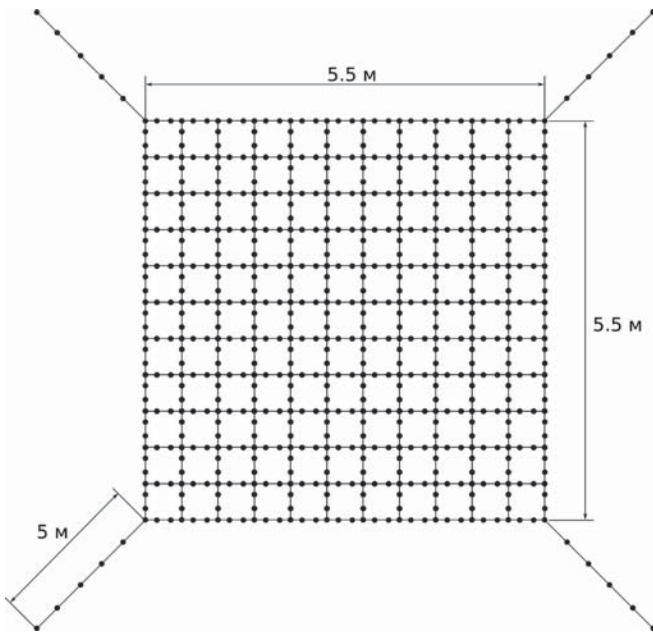


Рис. 7. Структура и размеры сети

Жёсткость материала сети $c_\alpha = 10^5$ Н/м ($\alpha = 1, \dots, n_\alpha$), коэффициент демпфирования $d_\alpha = 100$ Н·с/м ($\alpha = 1, \dots, n_\alpha$). Всего в рассматриваемой модели 692 узла и 812 связей. Таким образом, уравнение движения сети, представленной системой материальных точек, описывается 2079 дифференциальными уравнениями второго порядка (24) и (25).

В начальный момент времени все узлы сети находятся в плоскости OXY . Центр масс сети совпадает с началом системы координат OXY . Все узлы сети имеют одинаковую линейную скорость

$$v_i = V_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ V_0 \end{bmatrix}, i = 1, \dots, n,$$

направленную вдоль оси OZ в сторону объекта космического мусора. Расстояние между инцидентными узлами сети равно $l_{0\alpha}$, поэтому до начала взаимодействия узлов с поверхностью космического мусора силы взаимодействия между ними равны нулю и вся сеть как система материальных точек движется равномерно и прямолинейно вдоль оси OZ . Центр масс космического мусора в начальный момент времени находится на расстоянии 2,5 м от плоскости $OXYZ$:

$$r_d = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2,5 \text{ м} \end{bmatrix}.$$

Центр масс лежит на продольной оси цилиндра на расстоянии $L_d/2$ от основания. Оси связанной системы координат $Dx_d y_d z_d$ в начальный момент времени совпадают с соответствующими осями системы координат $OXYZ$.

Захват медленновращающегося объекта

В первом расчётном случае рассматривается процесс захвата космического мусора, вращающегося вокруг поперечной оси Dy_d со скоростью $\omega_{dy} = 5$ °/с. Сеть движется относительно мусора со скоростью $V_0 = 5$ м/с (вдоль оси OZ). Результаты расчётов представлены на рис. 8. На рисунке показано положение узлов сети относительно космического мусора на интервале 4 с. Через 2 с сеть касается оснований цилиндрического тела и к четвертой секунде полностью охватывает объект, что считается признаком успешного захвата.

Захват быстро вращающегося объекта

На рис. 9 показана картина относительного движения узлов сети и космического мусора при вращении космического мусора с угловой скоростью $\omega_{dy} = 5$ °/с вокруг поперечной оси Dy_d . Как и в первом расчётном случае, центр масс сети (и все её узлы) относительно объекта движется со скоростью $V_0 = 5$ м/с. В рассматриваемом случае при контакте узлов с поверхностью космического мусора ни один из узлов не касается основания 1 (рис. 9) вследствие вращения объекта с большой угловой скоростью, и к четвертой секунде не происходит полного охвата объекта сетью. Для надёжного захвата объекта необходимо увеличение линейной скорости сети V_0 .

На рис. 10 приведена картина относительного движения узлов сети и объекта космического мусора при захвате сетью, движущейся относительно мусора со скоростью $V_0 = 10$ м/с. Результаты моделирования показывают, что через 1,5 с после контакта узлы сети касаются основания объекта и через 3,5 с сеть полностью охватывает объект.

Выводы

Рассмотрен способ захвата крупногабаритного космического мусора при помощи сети, отделяемой от космического буксира или разворачиваемой на траектории движения космического мусора относительно буксира. Представлена модель процесса захвата космического мусора сетью, при помощи которой продемонстрирована возможность захвата быстро вращающихся объектов. Показана возможность захвата цилиндрического объекта типа «орби-

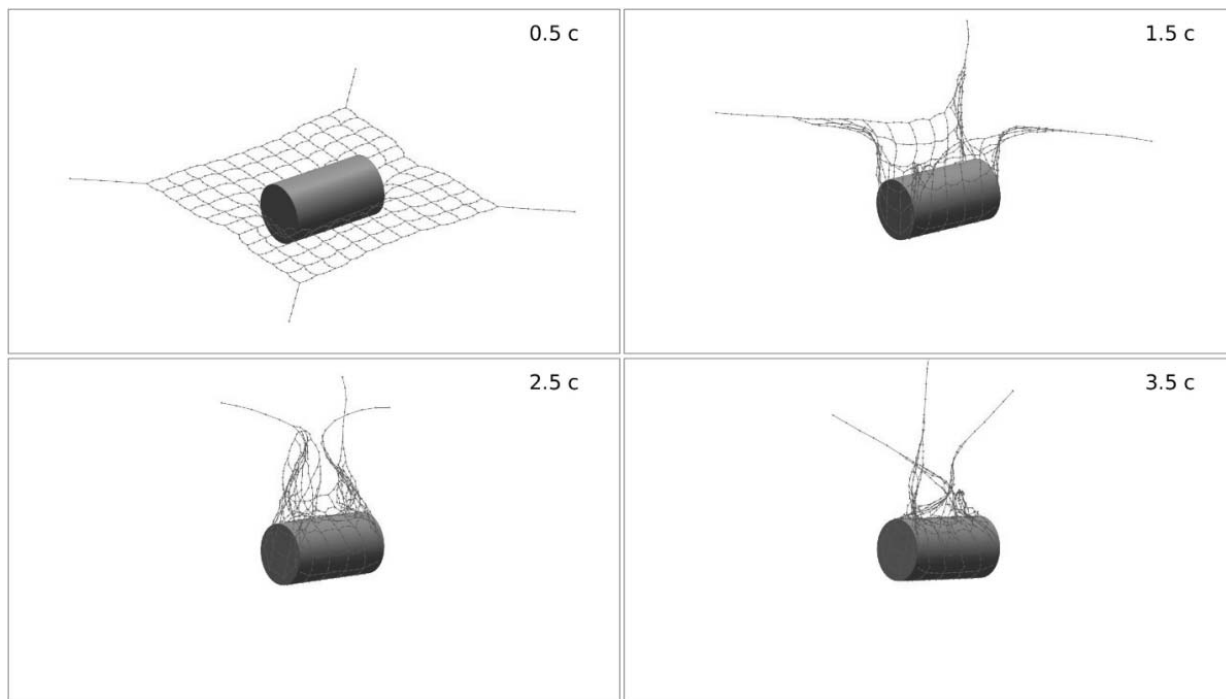


Рис. 8. Захват объекта, вращающегося с угловой скоростью $5^\circ/\text{с}$, сетью, движущейся со скоростью 5 м/с

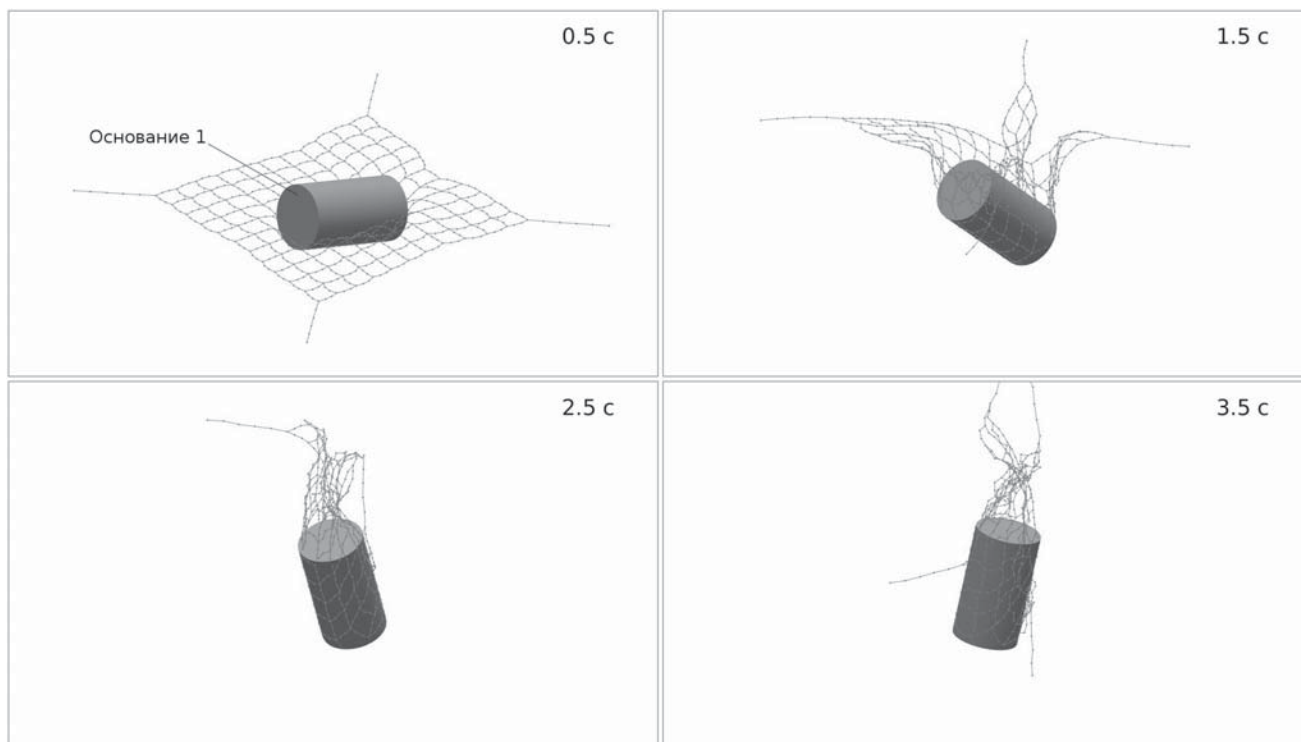


Рис. 9. Захват объекта, вращающегося с угловой скоростью $30^\circ/\text{с}$, сетью, движущейся со скоростью 5 м/с

тальная ступень», вращающегося с угловой скоростью до $30^\circ/\text{с}$. Определено, что для надёжного захвата такого объекта скорость сети должна быть не менее 10 м/с.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-10158).

Библиографический список

1. *Усовик И.В., Дарных В.В., Малышев В.В.* Методика оценки эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит с учётом взаимных столкновений и активного удаления космического мусора // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 3. С. 54-62.

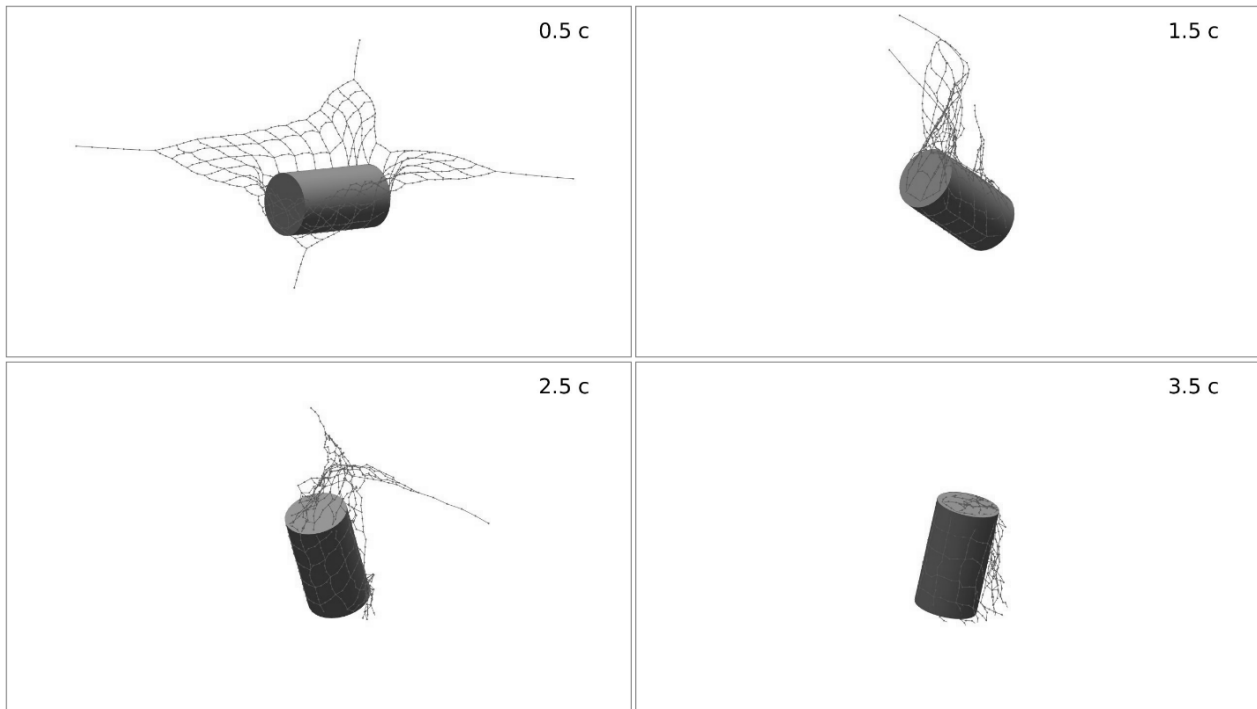


Рис. 10. Захват объекта, вращающегося с угловой скоростью $30^\circ/\text{с}$, сетью, движущейся со скоростью 10 м/с

2. *Liou J.C., Johnson N.L., Hill N.M.* Controlling the growth of future LEO debris populations with active debris removal // *Acta Astronautica*. 2010. Vol. 66. No. 5-6, pp. 648-653. DOI: 10.1016/j.actaastro.2009.08.005
3. *Ашурбейли И.Р., Лаговнер А.И., Игнатьев А.Б., Назаренко А.В.* Возможности использования авиационной лазерной системы для борьбы с космическим мусором и поддержания орбит космического аппарата // *Труды МАИ*. 2011. № 43. URI: <http://trudymai.ru/published.php?ID=24856>
4. *Трушляков В.И., Юткин Е.А.* Обзор средств стыковки и захвата объектов крупногабаритного космического мусора // *Омский научный вестник*. 2013. № 2(120). С. 56-61.
5. *Авдеев А.В.* К вопросу борьбы с космическим мусором с помощью лазерной космической установки на основе HF-НХЛ // *Труды МАИ*. 2012. № 61. URI: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35496>
6. *Асланов В.С., Алексеев А.В., Ледков А.С.* Определение параметров оснащенной гарпуном тросовой системы для буксировки космического мусора // *Труды МАИ*. 2016. № 90. URI: <http://trudymai.ru/published.php?ID=74644>
7. *Aslanov V.S., Yudinsev V. V.* Dynamics of Large Debris Connected to Space Tug by a Tether // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 2013. Vol. 36. No. 6, pp. 1654-1660. DOI: 10.2514/1.60976
8. *Асланов В.С., Юдинцев В.В.* Выбор параметров системы увода космического мусора с упругими элементами посредством тросовой буксировки // *Вестник Московского авиационного института*. 2018. Т. 25. № 1. С. 7-17.
9. *Gilardi G., Kawamoto S., Kibe S.* Capture of a Non-Cooperative Object Using a Two-Arm Manipulator // 55th International Astronautical Congress 2004. Vancouver, Canada. DOI: 10.2514/6.IAC-04-A.5.06
10. *Dudziak R., Tuttle S., Barraclough S.* Harpoon technology development for the active removal of space debris // *Advances in Space Research*. 2015. Vol. 56. No. 3, pp. 509-527. DOI: 10.1016/j.asr.2015.04.012
11. *Schaub H., Sternovsky Z.* Active space debris charging for contactless electrostatic disposal maneuvers // *Advances in Space Research*. 2014. Vol. 53. No. 1, pp. 110-118. DOI: 10.1016/j.asr.2013.10.003
12. *Benvenuto R., Lavagna M.* Flexible Capture Devices for Medium To Large Debris Active Removal: Simulations Results To Drive Experiments // 12th Symposium on Advanced Space Technologies in Automation and Robotics, 2013, Noordwijk, The Netherlands. URI: http://robotics.estec.esa.int/ASTRA/Astra2013/Papers/Lavagna_2824514.pdf
13. *Guang Z., Jing-rui Z.* Space tether net system for debris capture and removal // 4th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics. 2012. DOI: 10.1109/IHMSC.2012.71
14. *Lavagna M., Armellin R., Bombelli A. and Benvenuto R.* Debris Removal Mechanism Based on Tethered Nets // International Symposium on Artificial Intelligence Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS) 2012. Torino, Italy. URI: <http://epubs.surrey.ac.uk/id/eprint/813354>
15. *Botta E.M., Sharf I., Misra A.K.* Contact dynamics modeling and simulation of tether nets for space-debris capture // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 2017. Vol. 40. No. 1, pp. 110-123. DOI: 10.2514/1.G000677
16. *Cercós L., Stefanescu R., Medina A., Benvenuto R., Lavagna M., González I., Rodríguez N., Wormnes K.*

- Validation of a Net Active Debris Removal simulator within parabolic flight experiment // 12th International Symposium on Artificial Intelligence Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS). 2014. URI: <https://core.ac.uk/download/pdf/55248523.pdf>
17. Stiles L., Schaub H., Maute K., Moorer D. Electrostatic Inflation of Membrane Space Structures // AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, Guidance, Navigation, and Control and Co-located Conferences. 2010, Toronto, Ontario, Canada. DOI: 10.2514/6.2010-8134
 18. Barcelo B., Sobel E. Space Tethers: Applications and Implementations. - An Interactive Qualifying Project Report submitted to the Faculty of the Worcester Polytechnic Institute in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Bachelor of Science, 2007, 49 p.
 19. Van der Heide E.J., Kruijff M. Tethers and debris mitigation // *Acta Astronautica*. 2001. Vol. 48. No. 5-12, pp. 503–516. DOI: 10.1016/S0094-5765(01)00074-1
 20. Дон Ч. Анализ динамики и управление движением низкоорбитальной космической тросовой системы // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 1. С. 84–91.
 21. Кульков В.М. Анализ проектных параметров и исследование режимов управления орбитальным движением электродинамической тросовой системы // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т. 18. № 2. С. 41–46.
 22. Виттенбург Й. Динамика систем твердых тел: Монография. — М.: Мир, 1980. — 294 с.

ROTATING SPACE DEBRIS OBJECTS NET CAPTURE DYNAMICS

Yudintsev V.V.

*Samara National Research University named after academician S.P. Korolev,
34, Moscovskoe shosse, Samara, 443086, Russia
e-mail: yudintsev@gmail.com*

Abstract

By now, several methods for near Earth orbits active cleaning from large-size space debris were suggested. The most difficult stage of such mission is the stage of space debris capture. Capturing method selection and subsequent orbital transportation of space debris depends on its type and angular motion. Rockets' orbital stages may rotate with high angular velocity, which aggravates their capture by manipulators and other means. One of prospective techniques of such object capture is application of a net connected with the space tug by a tether. The object capture by a net can be performed by the net separation with a certain relative speed in relation to the space tug and space debris, or by the net unrolling on the trajectory of the space debris object relative to the space tug. Elastic properties of the net and tether allow reduce the load acting on the space tug while an object capturing process and control the value of this impact.

The paper presents discrete mathematical model of the net movement as a system of material points' elastic interaction, as well as these components interaction with the space debris surface. The possibility of capturing an orbiter type object, rotating with significant angular velocity was demonstrated through this model. The article demonstrates that capturing the object, rotating with angular speed of 5 degrees per second, requires the speed of the net relative to the space debris from 2 to

5 m/s. To capture an object, rotating with angular speed of 30 degrees per second, the net speed should be no less than 10 m/s.

Keywords: space debris, space tug, capture, net.

References

1. Usovik I.V., Darnopykh V.V., Malyshev V.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2015, vol. 22, no. 3, pp. 54–62.
2. Liou J.C., Johnson N.L., Hill N.M. Controlling the growth of future LEO debris populations with active debris removal. *Acta Astronautica*, 2010, vol. 66, no. 5–6, pp. 648–653. DOI: 10.1016/j.actaastro.2009.08.005
3. Ashurbeili I.R., Lagovier A.I., Ignat'ev A.B., Nazarenko A.V. *Trudy MAI*, 2011, no. 43, available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=24856>
4. Trushlyakov V.I., Yutkin E.A. *Omskii nauchnyi vestnik*, 2013, no. 2(120), pp. 56–61.
5. Avdeev A.V. *Trudy MAI*, 2012, no. 61, available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35496>
6. Aslanov V.S., Alekseev A.V., Ledkov A.S. *Trudy MAI*, 2016, no. 90, available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=74644>
7. Aslanov V.S., Yudintsev V.V. Dynamics of Large Debris Connected to Space Tug by a Tether. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2013, vol. 36, no. 6, pp. 1654–1660. DOI: 10.2514/1.60976
8. Aslanov V.S., Yudintsev V.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2018, vol. 25, no. 1, pp. 7–17.

9. Gilardi G., Kawamoto S., Kibe S. Capture of a Non-Cooperative Object Using a Two-Arm Manipulator. *55th International Astronautical Congress*, 2004, Vancouver, Canada. DOI: 10.2514/6.IAC-04-A.5.06
10. Dudziak R., Tuttle S., Barraclough S. Harpoon technology development for the active removal of space debris. *Advances in Space Research*. 2015, vol. 56, no. 3, pp. 509–527. DOI: 10.1016/j.asr.2015.04.012
11. Schaub H., Sternovsky Z. Active space debris charging for contactless electrostatic disposal maneuvers. *Advances in Space Research*, 2014, vol. 53, no. 1, pp. 110–118. DOI: 10.1016/j.asr.2013.10.003
12. Benvenuto R., Lavagna M. Flexible Capture Devices for Medium to Large Debris Active Removal: Simulations Results to Drive Experiments. *12th Symposium on Advanced Space Technologies in Automation and Robotics*, 2013, Noordwijk, The Netherlands. URI: http://robotics.estec.esa.int/ASTRA/Astra2013/Papers/Lavagna_2824514.pdf
13. Guang Z., Jing-rui Z. Space tether net system for debris capture and removal. *4th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*, 2012. DOI: 10.1109/IHMSC.2012.71
14. Lavagna M., Armellin R., Bombelli A. and Benvenuto R. Debris Removal Mechanism Based on Tethered Nets. *International Symposium on Artificial Intelligence Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS)*, 2012, Torino, Italy. URI: <http://epubs.surrey.ac.uk/id/eprint/813354>
15. Botta E.M., Sharf I., Misra A.K. Contact dynamics modeling and simulation of tether nets for space-debris capture. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2017, vol. 40, no. 1, pp. 110–123. DOI: 10.2514/1.G000677
16. Cercós L., Stefanescu R., Medina A., Benvenuto R., Lavagna M., González I., Rodríguez N., Wormnes K. Validation of a Net Active Debris Removal simulator within parabolic flight experiment. *12th International Symposium on Artificial Intelligence Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS)*, 2014. URI: <https://core.ac.uk/download/pdf/55248523.pdf>
17. Stiles L., Schaub H., Maute K., Moorer D. Electrostatic Inflation of Membrane Space Structures. *AIAA/AAS Astrodynamic Specialist Conference, Guidance, Navigation, and Control and Co-located Conferences*, 2010, Toronto, Ontario, Canada. DOI: 10.2514/6.2010-8134
18. Barcelo B., Sobel E. *Space Tethers: Applications and Implementations*. An Interactive Qualifying Project Report submitted to the Faculty of the Worcester Polytechnic Institute in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Bachelor of Science, 2007, 49 p.
19. Van der Heide E.J., Kruijff M. Tethers and debris mitigation. *Acta Astronautica*, 2001, vol. 48, no. 5–12, pp. 503–516. DOI: 10.1016/S0094-5765(01)00074-1
20. Don Ch. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2018, vol. 25, no. 1, pp. 84–91.
21. Kul'kov V.M. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2011, vol. 18, no. 2, pp. 41–46.
22. Wittenburg J. *Dynamics of Systems of Rigid Bodies*. B.G. Teubner Stuttgart, 1977, 224 p.