

УДК 629.76.028.24

Канд. техн. наук А.В. Голубек, канд. техн. наук А.Д. Шептун, И.М. Филиппенко

МЕТОДИКА ПРЕДПУСКОВОГО АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ РАСЧЕТНОЙ ТРАЕКТОРИИ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ОБ ОТДЕЛЕНИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ

Сформулирована постановка задачи и рассмотрена разработанная авторами методика предпускового определения схемы отделения космических аппаратов от ракеты-носителя после выявления аварийной ситуации с обеспечением отсутствия столкновений на первых витках автономного полета.

Сформульовано поставлення завдання й розглянуто розроблену авторами методику передпускового визначення схеми відокремлення космічних апаратів від ракети-носія після виявлення аварійної ситуації із забезпеченням відсутності зіткнень на перших витках автономного польоту.

The paper describes an objective and an authors-developed procedure for prelaunch determination of a sequence of spacecraft separation from a launch vehicle after identification of an emergency and for avoidance of collision in the first orbits of a free flight.

При возникновении на борту ракеты-носителя (РН) аварийной ситуации (АС) и выдаче системой управления (СУ) команд на прекращение полета общепринятым является отделение полезной нагрузки, состоящей из одного или нескольких космических аппаратов (КА). Это позволяет в отдельных случаях обеспечить их полет по нештатным орбитам с частичной реализацией задач выведения.

Классическим примером развития такой ситуации был запуск Украиной в 2004 г. на РН "Циклон-3" двух КА: "Сич-1М" и "Микроспутник". На участке полета третьей ступени после возникновения АС и выключения двигательной установки КА были отделены от РН. При этом они частично обеспечивали выполнение задач запуска на протяжении нескольких месяцев движения по нештатным орбитам. Полученные в результате научных исследований данные КА "Сич-1М" оказались настолько важными, что по результатам их обработки и публикации коллективу авторов была присуждена Государственная премия Украины.

В дальнейшем концепция была уточнена: отделение КА осуществляется в случае достижения в момент АС РН определенной замкнутой орбиты. Такая схема реализована на РН "Зенит" в рамках программ "Морской старт" и "Наземный старт".

При установке на борту РН большего количества КА (такая тенденция развития запусков обсуждается в [1]) задача отделения значительно усложняется. Контролируемая АС сопровождается обязательным отключением двигательной установки, что часто приводит к нерасчетному угловому движению РН относительно центра масс. При этом после отделения

РН и КА могут полететь по орбитам с близкими оскулирующими периодами обращения, что может привести к столкновениям на первых витках автономного полета [1]. В то же время согласно конвенции [2] необходимо выполнять меры по предотвращению орбитальных столкновений.

С учетом вышесказанного в процессе предпусковой подготовки возникает необходимость решения задачи по определению возможности отделения всех или части установленных КА в условиях развития АС на борту РН с обеспечением дальнейшего безударного полета.

Сформулируем задачу.

Даны:

- компоновочная схема блока полезной нагрузки РН;
- весовые и центровочные характеристики РН и КА;
- номинальные и возмущенные векторы приращения скорости КА за счет отделения в связанной с РН системе координат;
- трубка траекторий РН;
- момент времени, соответствующий формированию функционала на разрешение отделения КА после выявления АС;
- предельно допустимые расстояние сближения РН и КА и вероятность их столкновения;
- временное окно отделения КА в аварийной циклограмме СУ;
- законы распределения момента времени выявления АС, погрешностей кинематических параметров движения и ориентации РН в момент выявления АС, а также возмущений процесса отделения, угловой скорости вращения РН.

Требуется в процессе предпусковой подготовки определить:

- максимальное количество КА, автономный полет которых не приведет к столкновениям между собой или с РН;
- временную последовательность отделения КА в границах соответствующего участка аварийной циклограммы СУ.

Введем предположения:

- РН и КА – твердые тела;
- вращение КА вокруг центра масс не влияет на его текущее положение и скорость;
- после выявления АС угловые ускорения РН равны нулю.

Рассмотрим участок полета РН от момента формирования функционала на разрешение отделения в АС до штатного отделения КА. Параметры орбиты РН и ее ориентация на этом участке могут изменяться в достаточно широких пределах, что приводит к существенным отличиям в обеспечивающих безударный автономный полет схемах отделения КА. То есть существуют участки траектории, на которых нельзя отделять ни одного КА, а есть те, на которых можно отделять все. Следовательно, результатом поиска оптимальной схемы для всего множества времен АС от момента формирования функционала до штатного отделения может быть итоговый запрет на отделение всех КА. При этом на некоторых участках отделение будет допускаться.

С учетом вышесказанного для решения данной проблемы представим траекторию РН на участке разрешения отделения в АС в виде набора N участков, разделенных по времени с помощью вектора узловых значений

$$\bar{T}_A = [t_{A_0} \quad t_{A_1} \quad \dots \quad t_{A_N}]^T,$$

где t_{A_k} – моменты времени переключения интервалов; k – номер интервала. И для каждого интервала $T_{A_k} = [t_{A_{k-1}}, t_{A_k}]$ определим свое максимальное количество КА и их последовательность отделения.

На практике в аварийной циклограмме работы СУ предусмотрен временной интервал, в течение которого допускается отделение КА, $T_O = [\tau_H, \tau_K]$ (τ_H и τ_K – моменты времени начала и окончания участка отделения, задаваемые от момента выявления АС). Введем вектор времен отделения КА $\bar{\tau} = [\tau_1 \quad \dots \quad \tau_{N_{KA}}]^T$, $\bar{\tau} \in T_O$, где N_{KA} – суммарное количество КА.

Под столкновением в момент времени t будем понимать сближение двух объектов (КА друг с другом или с РН) на расстояние менее предельно допустимого значения в интервале времени совместного движения КА $T_C = [t_{AC}, t_K]$ ($t_{AC} \in T_{A_k}$ – момент времени выявления АС; t_K – момент расхождения объектов на значительные расстояния). Данному событию соответствует условие

$$\Delta R(t, \tau_i, \tau_j) \leq \Delta R_{\min}, \quad (1)$$

$t \in T_C, \bar{\tau} \in T_O$

где ΔR – относительное расстояние между двумя объектами; ΔR_{\min} – предельно допустимое расстояние сближения; i и j – порядковые номера объектов. При $i = 0$ рассматривается пара объектов: РН и j -тый КА. Для определенности будем считать, что $\tau_0 = \tau_j$.

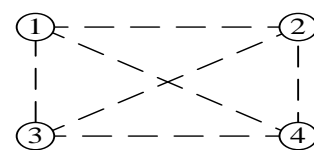
При этом вероятность столкновения двух объектов P_C в интервале времени совместного движения будет представлять собою вероятность выполнения неравенства (1)

$$P_C(\tau_i, \tau_j) = P[\Delta R(t, \tau_i, \tau_j) \leq \Delta R_{\min}] \quad (2)$$

$t \in T_C, \bar{\tau} \in T_O$

Представим последовательность отделения КА в виде неориентированного графа, состоящего из N_{KA} вершин и $(N_{KA} - 1)!$ ребер. Для этого рассмотрим, например, компоновочную схему блока полезной нагрузки с четырьмя КА (рисунок).

Определим на графе схему отделения S , состоящую из последовательности ребер графа. Следует обратить внимание на тот факт, что после выявления АС могут отделяться не все КА, что значительно увеличивает количество возможных схем отделения в сравнении с простым обходом вершин и относит рассматриваемую задачу к классу так называемых NP-полных. В общем случае это число определяется выражением $N_{KA}^3 - 2N_{KA}^2 + 2N_{KA} + 1$. Так, например, для четырех КА (рисунок) существует 41 схема отделения при аварийном полете (вместо 24 при штатном).



Граф отделения КА

В соответствии с выбранной схемой отделения составим матрицу смежности $\mathbf{C}(\bar{\tau})$ [3, 4] размером $N_{КА} \times N_{КА}$, весовые коэффициенты которой c_{ij} зависят как от вероятности столкновения пары КА, так и от вероятности столкновения КА с РН, и определяются выражением

$$c_{ij} = \begin{cases} [P_C(\tau_0, \tau_i) \leq P_{\max}] [P_C(\tau_0, \tau_j) \leq P_{\max}] \times \\ \times [P_C(\tau_i, \tau_j) \leq P_{\max}], & (i, j) \in S, \\ 0, & (i, j) \notin S, \end{cases} \quad (3)$$

где P_{\max} – предельно допустимая вероятность столкновения КА друг с другом или с РН.

Например, матрица для схемы отделения $1 \Rightarrow 4 \Rightarrow 3$ на рисунке имеет вид:

$$\mathbf{C}(\bar{\tau}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13} & c_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_{31} & 0 & 0 & c_{34} \\ c_{41} & 0 & c_{43} & 0 \end{bmatrix}.$$

Получаемая матрица, состоящая из нулей и единиц и зависящая от момента отделения каждого КА и вероятности столкновения между КА и РН, вместе с вектором времен отделения однозначно определяет последовательность отделения КА после выявления АС.

В то же время задача определения максимального количества КА, отделяемых после выявления АС, сводится к определению максимального значения ранга матрицы $\mathbf{C}(\bar{\tau})$, то есть к решению функционала

$$\Phi = \max_{\bar{\tau} \in T_0} \text{rang}[\mathbf{C}(\bar{\tau})]. \quad (4)$$

При этом вектор времен отделения наибольшего количества КА $\bar{\tau}_0$ определяется выражением

$$\bar{\tau}_0 = \arg\{\Phi\}. \quad (5)$$

Для определения вероятностей столкновения объектов, входящих в (3), рассмотрим совместное движение РН и отделенных КА, которое описывается системой из $(N_{КА}^2 + N_{КА})/2$ алгебраических и $6N_{КА} + 9$ дифференциальных уравнений такого вида:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \bar{\mathbf{R}}_{ij} &= \bar{\mathbf{R}}_i - \bar{\mathbf{R}}_j; \\ \bar{\mathbf{V}}_{i \vee j} &= (\bar{\mathbf{F}}_{G_{i \vee j}} + \bar{\mathbf{F}}_{A_{i \vee j}}) / m_{i \vee j}; \\ \bar{\mathbf{R}}_{i \vee j} &= \bar{\mathbf{V}}_{i \vee j}; \\ \bar{\boldsymbol{\omega}}_0 &= \bar{\boldsymbol{\omega}}_0; \\ t &\in T_C; \quad i \in (0 \vee S); \quad j \in S; \quad i \neq j, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $\Delta \bar{\mathbf{R}}_{ij}$ – вектор относительного расстояния между двумя объектами; $\bar{\mathbf{V}}_{i \vee j}$ – вектор скорости объекта в инерциальной системе координат; $\bar{\mathbf{R}}_{i \vee j}$ – вектор текущего положения объекта в инерциальной системе координат; $\bar{\mathbf{F}}_{G_{i \vee j}}$ – вектор силы притяжения Земли; $\bar{\mathbf{F}}_{A_{i \vee j}}$ – вектор силы аэродинамического сопротивления атмосферы; $m_{i \vee j}$ – масса объекта; $\bar{\boldsymbol{\omega}}_0$ – вектор ориентации РН в инерциальном пространстве; $\bar{\boldsymbol{\omega}}_0$ – вектор угловой скорости вращения РН.

Начальные условия движения:

1. В момент времени выявления АС t_{AC} векторы кинематических параметров движения РН $\bar{\mathbf{R}}_0$, $\bar{\mathbf{V}}_0$, ее угловой скорости $\bar{\boldsymbol{\omega}}_0$ и ориентации в инерциальной системе координат $\bar{\boldsymbol{\varphi}}_0$ определяются выражениями

$$\left. \begin{aligned} \bar{\mathbf{R}}_0 &= \bar{\mathbf{R}}_0(t_{AC}) + \delta \bar{\mathbf{R}}_0(t_{AC}); \\ \bar{\mathbf{V}}_0 &= \bar{\mathbf{V}}_0(t_{AC}) + \delta \bar{\mathbf{V}}_0(t_{AC}); \\ \bar{\boldsymbol{\omega}}_0 &= \delta \bar{\boldsymbol{\omega}}_0(t_{AC}); \\ \bar{\boldsymbol{\varphi}}_0 &= \bar{\boldsymbol{\varphi}}_0(t_{AC}) + \delta \bar{\boldsymbol{\varphi}}_0(t_{AC}) \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где $\bar{\mathbf{R}}_0$, $\bar{\mathbf{V}}_0$ и $\bar{\boldsymbol{\varphi}}_0$ – номинальные векторы кинематических параметров движения и ориентации РН; $\delta \bar{\mathbf{R}}_0$, $\delta \bar{\mathbf{V}}_0$ и $\delta \bar{\boldsymbol{\varphi}}_0$ – векторы случайных возмущений кинематических параметров движения и ориентации РН, определяемых трубкой траекторий; $\delta \bar{\boldsymbol{\omega}}_0$ – случайный вектор угловой скорости РН.

2. В момент после отделения КА τ_j его векторы кинематических параметров движения $\bar{\mathbf{R}}_j$ и $\bar{\mathbf{V}}_j$ определяются выражениями

$$\left. \begin{aligned} \bar{\mathbf{R}}_j &= \bar{\mathbf{R}}_0(\tau_j) + \Delta\bar{\mathbf{R}}_j; \\ \bar{\mathbf{V}}_j &= \bar{\mathbf{V}}_0(\tau_j) + \Delta\bar{\mathbf{V}}_j + \bar{\omega}_0(\tau_j) \times \Delta\bar{\mathbf{R}}_j; \\ \Delta\bar{\mathbf{V}}_j &= \bar{\mathbf{W}}_j[\bar{\varphi}_0(\tau_j)] + \delta\bar{\mathbf{W}}_j[\bar{\varphi}_0(\tau_j)] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где $\Delta\bar{\mathbf{R}}_j$ – положение центра масс отделяемого КА относительно центра масс РН; $\bar{\mathbf{W}}_j$ – вектор номинальной относительной скорости отделения КА; $\delta\bar{\mathbf{W}}_j$ – вектор случайных возмущений относительной скорости отделения КА.

3. В момент после отделения КА τ_j векторы скорости и угловой скорости РН, а также ее масса и тензор инерции определяются выражениями

$$\left. \begin{aligned} \bar{\mathbf{V}}_0(\tau_j) &= \bar{\mathbf{V}}_0(\tau_j) - \frac{m_j}{m_0 - m_j} \times \\ &\times [\Delta\bar{\mathbf{V}}_j + \bar{\omega}_0(\tau_j) \times \Delta\bar{\mathbf{R}}_j]; \\ m_0 &= m_0 - m_j; \\ \bar{\omega}_0(\tau_j) &= \bar{\omega}_0(\tau_j) - (J_0 - J_j)^{-1} J_j \times \\ &\times \frac{\Delta\bar{\mathbf{R}}_j \times \Delta\bar{\mathbf{V}}_j}{|\Delta\bar{\mathbf{R}}_j|^2}; \\ J_0 &= J_0 - J_j \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где m_0 и m_j – массы РН до отделения и отделяемого КА; J_0 и J_j – тензоры инерции РН до отделения и отделяемого КА относительно центра масс РН.

Как видно, математическая модель движения (6) с учетом начальных условий (7) – (9) представляет собой стохастическую нелинейную модель. Учитывая, что законы распределения момента выявления АС, кинематических параметров движения угловой скорости и ориентации РН, приращений скорости КА за счет процесса отделения известны, вероятность столкновения объектов можно определить с использованием метода статистического моделирования.

Для каждой из реализаций начальных условий моделирования в соответствии с заданным законом распределения определим момент выявления АС на борту РН. После чего в соответствии с (6) – (9) проведем расчет траекторий РН и КА, представив его результат в виде временных рядов с заданным шагом. Если хотя бы в одной из точек траекторий выполняется неравенство (1), принимается решение о столкновении объектов, и счетчик количества реализаций начальных условий моделирования, для которых выявлено столкновение $M(\tau_i, \tau_j)$, увели-

чивается на единицу. Поэтому вероятность столкновения объектов $P_C(\tau_i, \tau_j)$, входящая в (3), определяется выражением

$$P_C(\tau_i, \tau_j) = \frac{M(\tau_i, \tau_j)}{M_\Sigma}.$$

Необходимо обратить внимание на следующее. Изменение схемы отделения КА или момента времени выявления АС в соответствии с (7) – (9) приведет к реализации нового набора начальных условий и соответственно к изменению весовых коэффициентов матрицы отделения (3).

Таким образом, функционал (4) совместно с матрицей отделения (3) и функцией (5) позволяет определить максимальное количество КА и временную последовательность их отделения от РН после выявления АС для каждого из характерных участков полета. Само же решение задачи при этом сводится к решению асимметричной незамкнутой задачи коммивояжера с переменными весовыми коэффициентами.

По результатам проведенного исследования предложена методика, использование которой в процессе предпусковой подготовки позволяет определять схему отделения КА от РН, исходя из их несоударения на первом витке автономного полета.

Перспективами дальнейших исследований является учет приоритетности отделения КА, а также ряда других факторов, например скорости отделения от РН.

Список использованной литературы

1. Дегтярев А.В., Шептун А.Д. Проектно-баллистические решения по групповым запускам космических аппаратов в район нескольких базовых орбит // Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. – 2011. – С. 37 – 51.
2. IADC Space Debris Mitigation Guidelines. IADC-02-01 Revision 1, September 2007.
3. Левитин А.В. Алгоритмы: введение в разработку и анализ / Пер. с англ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. – 576 с.
4. Кормен Томас Х. и др. Алгоритмы: построение и анализ / Томас Х. Кормен, Чарльз И. Лейзерсон, Рональд Л. Ривест, Клиффорд Штайн; Пер. с англ. – 2-е изд. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2005. – 1296 с.

Статья поступила 03.01.2014