
Миронов А.Н., Миронов Е.А., Харченко И.Н., Шестопалова О.Л. Прогнозирование качества орбит космических аппаратов в условиях неопределенности информации о допустимых пределах засоренности космическим мусором // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования, 2017. № 5(39).

УДК 004.023:[504.054+504.064.2]

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ОРБИТ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИНФОРМАЦИИ О ДОПУСТИМЫХ ПРЕДЕЛАХ ЗАСОРЕННОСТИ КОСМИЧЕСКИМ МУСОРОМ

Миронов А.Н., д.т.н., профессор, ФГОУ ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского».

Миронов Е.А., к.т.н., доцент, ФГОУ ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского».

Харченко И.Н., первый заместитель председателя коллегии Военно-промышленной комиссии Российской Федерации.

Шестопалова О.Л., к.т.н., доцент, декан филиала «Восход» ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» в г. Байконуре,

В статье предложен показатель качества орбит космических аппаратов, отражающий ухудшение их состояния из-за роста плотности космического мусора. Ввиду неопределенности информации о предельно допустимом значении плотности космического мусора, соответствующее пороговое значение предложено описывать нечетким множеством с треугольной функцией принадлежности. Представлена модель прогнозирования предельного срока использования засоренных орбит, учитывающая закон каскадного размножения космического мусора Кесслера и нечетко заданное пороговое значение плотности космического мусора. Описанный в статье подход может быть полезен при решении задач оценки и подтверждения соответствия орбитальных группировок космических аппаратов на стадиях проектирования и эксплуатации.

Ключевые слова: космический аппарат, космический мусор, качество орбиты, нечеткая информация.

UDC 004.023:[504.054+504.064.2]

SPACE VEHICLES ORBIT QUALITY PREDICTION IN CONDITIONS OF INFORMATIONAL UNCERTAINTY ABOUT THE ACCEPTABLE RANGE OF SPACE DEBRIS DENSITY

Mironov A.N. doctorate degree of technical sciences, professor, Mozhaisky

Military Space Academ.

Mironov E.A., candidate of technical sciences, associate professor, Mozhaisky Military Space Academy.

Kharchenko I.N., First Deputy Board Chairman of the Military industrial commission of the Russian Federation.

Shestopalova O.L., candidate of technical sciences, associate professor, the dean of a Branch «Voskhod» of the Moscow aviation institute (national research university) in Baikonur.

The article proposes an indicator of the quality of the orbits of spacecraft, reflecting the deterioration of their condition due to the increase of density of space debris. Because of the uncertainty information about maximum allowable value of the density of space debris, an appropriate threshold is proposed to describe the fuzzy set with triangular membership function. A predictive model to limit the use of clogged orbits is described. The model takes into account the law of propagation of cascading space debris Kessler and fuzzy threshold value of density of space debris. The described approach may be useful in solving problems assessment and confirmation of conformity of the orbital groups of space vehicles on design and operation stages.

Key words: spacecraft, space debris, orbit quality, fuzzy information.

В настоящее время становится все более заметной тенденция увеличения плотности космического мусора (КМ) в околоземном космическом пространстве (ОКП) [2]. Начавшись синхронно с первым запуском космического аппарата в 1957 году, процесс загрязнения ОКП постепенно увеличивал темпы, пока к концу XX века не стало очевидно, что дальнейшее развитие данного процесса представляет угрозу для использования космического пространства в интересах человечества. По мере роста плотности КМ из-за запусков новых КА, подключился дополнительный механизм образования космического мусора, связанный с дроблением космических объектов при их столкновении. Этот процесс при определенных условиях может начать развиваться лавинообразно. Впервые это в 1978 году отметил Д.Кесслер в работе [7], назвав его «эффектом каскадного размножения». Впоследствии в работах по космическому мусору

механизм каскадного размножения КМ стал называться «эффектом Кесслера».

Эффект Кесслера начинает проявляться, когда плотность КМ достигает некоторого критического порога, далее число фрагментов КМ начинает возрастать по экспоненциальному закону. Процесс каскадного размножения продолжается до тех пор, когда не останется делящихся при соударении фрагментов КМ, далее скорость роста плотности уменьшается до нуля.

В статье описана математическая модель, позволяющая спрогнозировать качество орбит космических аппаратов в условиях возрастающей засоренности ОКП космическим мусором. При этом учитывается неопределенность информации о допустимых пределах изменения плотности КМ. Кроме того, получены выражения для прогноза остаточного срока «жизни» орбиты в условиях прогрессирующей засоренности космическим мусором.

Можно выделить [3] следующие стадии развития процесса засоренности орбиты космическим мусором: I – стадия достижения плотностью КМ критического уровня, II- стадия действия эффекта Кесслера и III – стадия замедления роста плотности КМ. Пусть P_0 - значение плотности КМ в момент t_0 начала стадии I. Обозначим через $V_\rho(t)$ - скорость роста плотности КМ. Очевидно, что $V_\rho(t)$, по мере развития стадий процесса засоренности, сначала растет по экспоненте, затем снижается до нуля. Удельная же скорость $V_\rho^{y\delta}(t) = \frac{d\rho(t)}{dt} \times \frac{1}{\rho(t)}$ во времени уменьшается линейно от начального уровня r до 0 (при $\rho(t) = P$).

С учетом сказанного, можно записать дифференциальное уравнение:

$$V_\rho^{y\delta}(t) = r - \frac{r}{P} \rho(t). \quad (1)$$

Так как $V_\rho^{y\delta}(t) = \frac{d\rho(t)}{dt} \times \frac{1}{\rho(t)}$, то $\frac{d\rho(t)}{dt} \times \frac{1}{\rho(t)} = r - \frac{r}{P} \rho(t)$ или

$$\frac{d\rho(t)}{dt} = \rho(t)\left(r - \frac{r}{P}\rho(t)\right) \quad (2)$$

Решив (2), получим:

$$\rho(t) = \frac{P}{1 + \left(\frac{P}{P_0} - 1\right)e^{-r(t-t_0)}}. \quad (3)$$

Пусть $P_{Пред.}$ - предельно допустимое пороговое значение плотности КМ.

При $\rho(t) = P_{Пред.}$ околоземную орбиту становится невозможным использовать для запуска на нее КА, так как это либо опасно, либо нерентабельно по причине неприемлемости затрат на защиту КА от КМ.

Тогда можно ввести показатель качества орбиты в смысле степени ее незасоренности космическим мусором как

$$K_{Орб}(t) = \begin{cases} 1 - \frac{\rho(t)}{P_{Пред.}}, & \text{при } \rho(t) \leq P_{Пред.} \\ 0, & \text{при } \rho(t) > P_{Пред.} \end{cases} \quad (4)$$

Теперь можно ввести понятие $T_{С.ж.}$ - срока «жизни» орбиты как интервала времени от начала запусков на нее КА до момента времени достижения предельно допустимого уровня $P_{Пред.}$, который можно определить, решив уравнение:

$$P_{Пред.} = \frac{P}{1 + \left(\frac{P}{P_0} - 1\right)e^{-r(T_{С.ж.} - t_0)}} \quad (5)$$

Имеем

$$T_{С.ж.} = -\frac{1}{r} \times \ln\left(\frac{\frac{P}{P_{Пред.}} - 1}{\frac{P}{P_0} - 1}\right) + t_0 \quad (6)$$

На практике ввиду неопределенности информации о допустимых пределах засоренности космическим мусором трудно определить фиксированное детерминированное значение $P_{Пред.}$ [6].

Поэтому зададим уровень $P_{Пред.}$ в виде нечеткого числа как

$$\underline{P}_{Пред.} = \left\{ \left(P, \mu_{P_{Пред.}}(P) \right) \right\}, \quad (7)$$

где $\mu_{P_{Пред.}}(P)$ - функция принадлежности (ФП), определяемая как:

$$\mu_{P_{Пред.}}(P) = \begin{cases} 0, & P \leq P_{лев.} \\ \frac{P - P_{лев.}}{P_{Ср.} - P_{лев.}}, & P_{лев.} < P < P_{Ср.} \\ \frac{P_{Пр.} - P}{P_{Пр.} - P_{Ср.}}, & P_{Ср.} < P < P_{Пр.} \\ 0, & P \geq P_{Пр.} \end{cases} \quad (8)$$

Записав ФП (8) в виде тройки чисел [], НМ $\underline{P}_{Пред.}$ можно представить как:

$$\underline{P}_{Пред.} = \langle P_{лев.}, P_{Ср.}, P_{Пр.} \rangle. \quad (9)$$

Подставив (7) в (6), получим:

$$\underline{T}_{С.Ж.} = -\frac{1}{r} \times \ln\left(\frac{\frac{P}{P_{Пред.}} - 1}{\frac{P}{P_0} - 1}\right) + t_0 \quad (10)$$

Выражение (10) есть функция от нечетко заданного аргумента $\underline{P}_{Пред.}$.

Вследствие чего, имеем:

$$\underline{T}_{С.Ж.} = \left\{ \left(t, \mu_{T_{С.Ж.}}(t) \right) \right\}, \quad t = -\frac{1}{r} \times \ln\left(\frac{\frac{P}{P_{Пред.}} - 1}{\frac{P}{P_0} - 1}\right) + t_0, \quad \mu_{T_{С.Ж.}}(t) = \mu_{P_{Пред.}}(P). \quad (11)$$

В случае с ФП вида (8) имеем:

$$\underline{T}_{С.Ж.} = \langle T_{лев.}, T_{Ср.}, T_{Пр.} \rangle, \quad (12)$$

$$T_{лев.} = -\frac{1}{r} \times \ln\left(\frac{\frac{P_{лев.}}{P} - 1}{\frac{P}{P_0} - 1}\right) + t_0; \quad T_{Ср.} = -\frac{1}{r} \times \ln\left(\frac{\frac{P_{Ср.}}{P} - 1}{\frac{P}{P_0} - 1}\right) + t_0; \quad T_{Пр.} = -\frac{1}{r} \times \ln\left(\frac{\frac{P_{Пр.}}{P} - 1}{\frac{P}{P_0} - 1}\right) + t_0.$$

Изложенный метод прогнозирования срока «жизни» орбиты (как интервала времени от начала запусков на нее КА до момента времени достижения нечеткого предельно допустимого уровня $\underline{P}_{Пред.}$) показан на рис. 1.

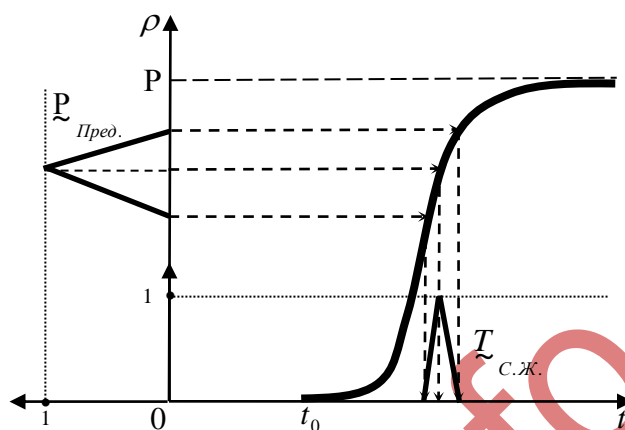


Рис. 1. Метод прогнозирования срока «жизни» орбиты в условиях неопределенности информации о допустимых пределах засоренности космическим мусором

Покажем, как преобразовать нечеткую оценку срока «жизни» околоземной орбиты к интервальной форме. Известно, что альфа – сечение A_α НМ $\underline{A} = \left\{ \left(a, \mu_{\underline{A}}(a) \right) \right\}$ есть четкое множество: $A_\alpha = \{ a \mid \mu_{\underline{A}}(a) \geq \alpha \}$, $\alpha \in [0;1]$. Способ определения альфа-сечения проиллюстрирован на рис. 2.

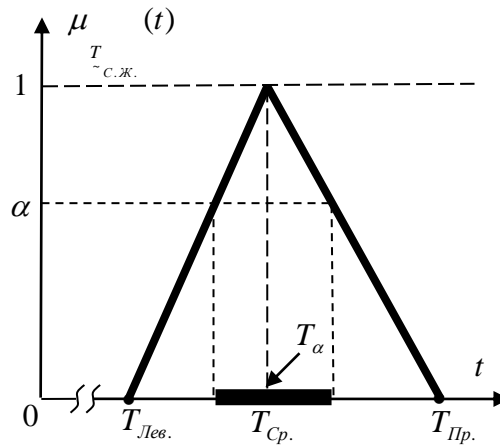


Рис. 2. Определение альфа-сечения T_α НМ срока «жизни» орбиты

Очевидно, что необходимо найти значение α^* , при котором множество T_{α^*} наиболее близко к НМ $T_{с.ж.}$. Можно доказать [3], что $\alpha^*=0,5$. Полученное при $\alpha^*=0,5$ четкое множество $T_{0,5}$ представляет собой интервальную оценку срока «жизни» $T_{с.ж.}$ орбиты.

Итак, в статье описаны аналитические выражения для прогнозирования срока «жизни» орбит КА в условиях загрязнения ОКП космическим мусором.

Срок «жизни» орбиты ограничивается моментом времени, когда плотность КМ достигает порогового предельно допустимого уровня. Сделано предположение, что величина данного уровня в условиях неопределенности может быть задана экспертно в виде некоторой нечеткой границы на оси значений плотности КМ. При данном допущении результат прогнозирования есть нечеткий временной интервал. Предложено его преобразовать в четкий интервал. Для этого предлагается воспользоваться способом оптимального вписывания в треугольную ФП нечеткого временного интервала прямоугольника, представляющего вырожденную ФП детерминированного временного интервала.

Описанный метод может быть использован для получения прогнозных оценок срока «жизни» орбит КА, в частности, для получения исходной информации для различных задач планирования развития космических систем и комплексов [1,4,5].

Список использованных источников и литературы

1. Басотин Е.В., Миронов А.Н., Казаков Р.Р., Сизяков Н.П., Шестопалова О.Л. Определение потребности в модернизации составных частей ракетно-космических комплексов //Современные наукоемкие технологии. № 12 (часть 3), 2016. С. 486-490.

2. Вениаминов С.С., Червонов А.М. Космический мусор — угроза человечеству / Под редакцией Р. Р. Назирова, О. Ю. Аксенова. - М.: ИКИ РАН, 2012. - 189 с.

3. Дарбузова К.О., Шестопалова О.Л., Шестопалов Р.П. Прогнозирование предельного срока «экологической жизни» околоземных орбит в условиях прогрессирующего размножения космического мусора // Фундаментальные исследования. 2015. № 11-3. С. 529-533. URL: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=39454>.

4. Дорохов А.Н., Миронов А.Н., Шестопалова О.Л. Определение потребности в модернизации средств технического обеспечения распределенной системы сбора и обработки информации // Информация и космос, №1, 2014. - С.9 – 12.

5. Миронов А.Н., Казаков Р.Р., Шестопалова О.Л., Харченко И.Н. Анализ влияния нестабильности обеспечения ресурсами на степень реализуемости программ развития системы средств выведения космических аппаратов // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования, 2017. №4 (38).

6. Севастьянов Д.А., Шестопалова О.Л. Пути и методы управления развитием системы информационного обеспечения эксплуатации космических средств // Информация и космос, № 3, 2013.- С. 73 – 76.

7. Kessler D., Cour-Palais B. Collisional Frequency of Artificial Satellites: The creation of a debris belt // J. Geophysical Research. 1978. V. 83. N. A6. 1978.

© Миронов А.Н.

© Миронов Е.А.

© Харченко И.Н.

© Шестопалова О.Л.