

УДК 608.2

Оптимизированный метод поиска опасных сближений на околоземных орбитах

05, май 2012

Каратунов М.О.

Студент,

кафедра «Динамика и управление полётом ракет и КА»

Научный руководитель: Баранов А.А.,
к.ф.-м.н., с.н.с. ИМП им. Келдыша М.В.

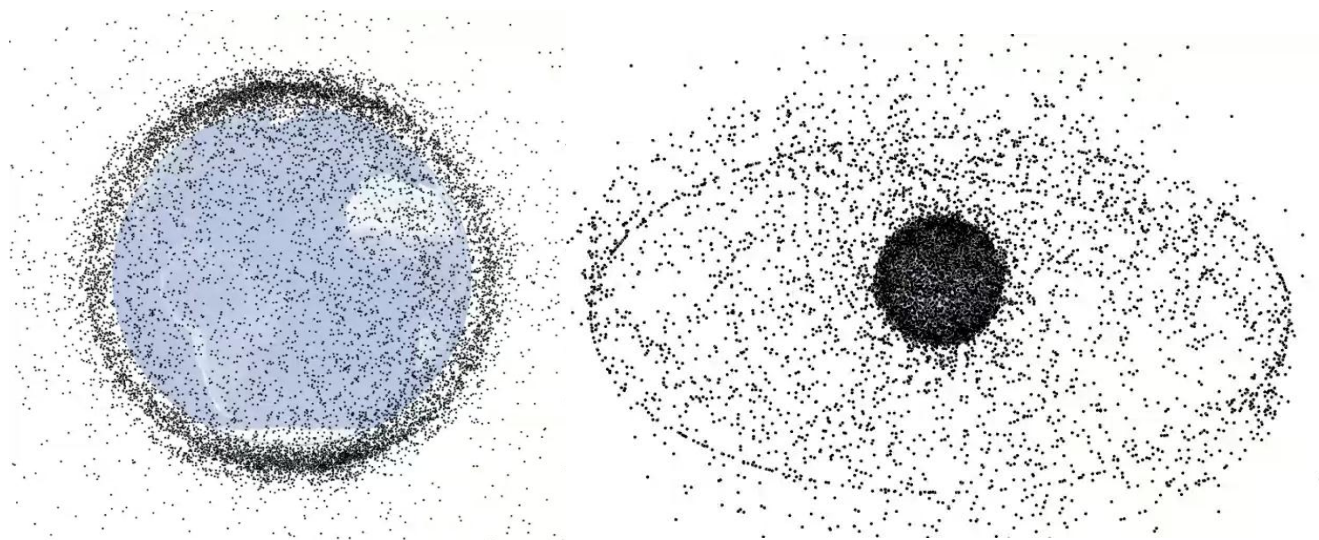
МГТУ им. Н.Э. Баумана
maksim_karatunov@mail.ru

Анализ текущей ситуации засоренности космического пространства

Космический объект (КО) – тело искусственного происхождения, находящееся в околоземном пространстве. (ГОСТ Р 25645.167-2005)

Каталогизированный космический объект – космический объект размером более 10-30 см, включенный в каталоги сопровождаемых объектов систем контроля космического пространства или других служб и организаций. (ГОСТ Р 25645.167-2005)

Траекторная информация для КО измеряется при помощи наземных радиолокационных и кванто-оптических средств. Примерный вид засорённости космического пространства представлен на рисунке 1.



а) Низкие околоземные орбиты
[100;1000] км

б) Высокие околоземные орбиты [100;36000] км

Рис.1. Общий вид засорённости околоземных орбит

Большинство КО находится в самых используемых высотных поясах, называемых LEO — низкая земная орбита (высота до 2000 км от земной поверхности) и GEO — геостационарная земная орбита (около 36 000 км). Максимальная плотность обломков (один объект размером больше 10 см на 100 млн. куб. км) наблюдается на высотах 850, 1000, 1500, 20 000 и 36 000 км. Несмотря на то, что плотность на всех орбитах приблизительно одинакова, поток мусора значительно больше на LEO, так как сама орбита значительно меньше и объекты на ней обладают большей скоростью. Полезное население высоких орбит составляют телекоммуникационные спутники связи, научные, военные и метеорологические спутники.

Каталоги сопровождаемых объектов включают в себя не только действующие КА, но и вышедшие из строя аппараты, плюс фрагменты последних ступеней ракетополетителей (РН), баки, разгонные блоки и т.п. Стоит отметить, что на данный момент существует несколько каталогов, которые поддерживаются космическими агентствами разных стран и союзов. К сожалению, эти каталоги не совпадают между собой и не охватывают весь спектр КО. Для решения этой проблемы была намечена тенденция к интеграции существующих каталогов и обмену информацией, касающейся опасности столкновения КО, между странами.

Актуальность проблемы

Средняя относительная скорость сближений КО ≈ 10 км/с, очевидно, что встреча на таких скоростях представляет серьёзную опасность для любого КА. Эффективных мер защиты от объектов космического мусора размером > 1 см на сегодняшний день не существует.

По данным Управления ООН по вопросам космического пространства, в настоящее время более 1000 спутников находятся под угрозой из-за мусора.

На саммите посвящённом проблеме космического мусора («Status of Activity of the Inter-Agency Space Debris Coordination Committee». Paris, February 7- 8, 2008) был представлен прогноз популяции КО при условии, что в 2005 году все запуски были прекращены. В результате этого такие составляющие популяции как фрагменты от взрывов баков разгонных блоков и отслужившие свой срок КА стремятся к нулю, с другой стороны фрагменты, образовавшиеся от столкновения обломков, продолжают расти. Даже такие кардинальные меры как прекращение запусков не помогут избавиться от проблемы космического мусора. Более того сейчас можно уверенно говорить о том, что человечество не откажется от освоения космоса в научных и коммерческих целях. А это означает, что количество мусора будет стремительно расти. Уже сегодня МКС регулярно приходится совершать маневры уклонения от мусора.

Таким образом, чрезвычайно важной является задача создания алгоритмов уклонения КА от космического мусора, которая включает алгоритмы оперативного прогноз опасных сближений и расчет траекторий оптимального уклонения.

Постановка задачи

На заданном интервале времени $[t_{begin}, t_{end}]$ из всего множества каталогизированных объектов необходимо найти все опасные для конкретного КА, которые могут подойти на расстояние меньшее заданного Δ (км), а также время входа в область безопасности КА и выхода из неё.

Общий подход к решению

Современные каталоги КО насчитывают около 17000 объектов, в свете этого общий подход к решению поставленной задачи нацелен на достижение

максимального быстродействия при требуемой точности и надёжности работы метода. Логично перед численным прогнозом движения каждого объекта, отсеять максимальное количество КО при помощи упрощённых зависимостей. С каждым шагом зависимости, описывающие минимальное расстояние между КА и КО, усложняются.

Последовательность решения

а) Отсев по высоте полёта КА

Данный отсев не учитывает ни положение плоскости орбиты, ни положение линии абсид, во внимание принимается только радиус апогея (r_a) и перигея (r_π) орбит КА и КО. Если выполнено одно из следующих условий: $r_{af} < r_{\pi 0} - \Delta$, $r_{\pi f} > r_{a0} + \Delta$, то при любом взаимном положении плоскостей орбит и линий абсид недопустимое сближение траекторий невозможно, объект отсеивается.

Здесь и далее параметры, обозначенные индексом «0» относятся к «защищаемому» КА.

б) Отсев по компланарным элементам орбиты

Для данного этапа примем предположение, что все орбиты лежат строго в одной плоскости. Рассмотрим только околокруговые орбиты и воспользуемся линеаризованными уравнениями движения (1) [1].

$$\frac{\Delta r}{r_0} = (2 - \cos \varphi) \cdot \frac{\Delta r_0}{r_0} + \sin \varphi \cdot \frac{\Delta V_{r0}}{V_0} + 2 \cdot (1 - \cos \varphi) \cdot \frac{\Delta V_{t0}}{V_0} \quad (1)$$

Относительное движение КА и КО с параметрами (e_{x0}, e_{y0}, a_0) и (e_{xf}, e_{yf}, a_f) формально эквивалентно относительному движению КА по круговой орбите радиуса r_0 и КО по эллиптической с параметрами $(\Delta e_x, \Delta e_y, a = r_0 + \Delta a)$, где $\Delta e_x = e_{xf} - e_{x0}$, $\Delta e_y = e_{yf} - e_{y0}$, $\Delta a = a_f - a_0$. В дальнейшем исследовании орбита с такими элементами будет называться *относительной*. Таким образом, для нахождения минимального расстояния между орбитами с учётом положения линий абсид достаточно найти r_π относительной орбиты

$$r_\pi = a \cdot (1 - \sqrt{(e_{x0} - e_{xf})^2 + (e_{y0} - e_{yf})^2}) , \text{ где } a = r_0 + \Delta a$$

Если $r_\pi - r_0$ больше чем Δ , то объект отсеивается и не попадает в дальнейшую обработку. Стоит отметить, что в случае $r_\pi - r_0 < 0$ орбиты КА и КО пересекаются.

в) Отсев по некомпланарным элементам орбиты в случае сильно отличающихся плоскостей орбит КА и КО;

Разобьём оставшиеся объекты на две группы:

- 1) Угол между плоскостями орбит составляет $> 7.5^\circ$;
- 2) Угол между плоскостями орбит составляет менее $< 7.5^\circ$;

Для группы (1) будем рассматривать проекции орбит на сферу с центром в центре масс Земли. Другими словами, в рамках данного критерия мы рассматриваем только взаимно расположение плоскостей орбит, считая, что точка максимального сближения лежит в малой окрестности точки пересечения проекций орбит на сфере.

Здесь следует сделать оговорку о том, что этот критерий некорректен в случае (2), т.к. при малых углах между орбитами точка максимального сближения может существенно отличаться от точки пересечений проекций.

Необходимо найти аргумент широты точки максимального сближения для КА и для мусора ($u_{0вст}$, $u_{fvст}$). Находим эти величины при помощи теоремы синусов и косинуса для сферических треугольников.

$$u_{0_{вст}} = \arctg \left(\frac{\cos \Delta \Omega \cdot \cos i_0 + \operatorname{ctg} i_f \cdot \sin i_0}{\sin \Delta \Omega} \right); u_{f_{вст}} = \arcsin \left(\frac{\sin u_{0_{вст}} \cdot \sin i_0}{\sin i_f} \right)$$

Вычисляя радиусы орбит в моменты $u_{0_{вст}}$, $u_{f_{вст}}$ и $u_{0_{вст}}+180^\circ$, $u_{f_{вст}}+180^\circ$ находим Δr в этих точках, если минимальное из них больше чем Δ , то объект в дальнейшую обработку не поступает.

з) *Отсев по фазе;*

Для группы 2 перед нахождением точки максимального сближения для КА и для мусора ($u_{0_{вст}}$, $u_{f_{вст}}$), будет эффективно провести отсев по фазе. Для этого разобьём объекты группы 2 на две подгруппы:

2.1) В первую группу входят объекты, движение которых по орбитам происходит в ту же сторону, что и движение КА (угол между векторами моментов количества движения меньше 90°).

2.2) Во вторую группу входят объекты, движущиеся навстречу КА.

Для объектов первой подгруппы отсев по взаимному расстоянию вдоль орбиты является весьма эффективным. При относительно небольшой разности периодов КА и КО основное время будут находиться на значительном расстоянии друг от друга. Можно приближенно найти момент времени $t_{вст}$, когда при движении КО проекция его радиус-вектора на плоскость орбиты КА попадет на луч, проходящий через КА

$$t_{вст} = \begin{cases} \frac{2\pi - \Delta u}{\omega_{КО} - \omega_{КА}}, & \text{если } \frac{\Delta u}{\omega_{КО} - \omega_{КА}} > 0 \\ \left| \frac{\Delta u}{\omega_{КО} - \omega_{КА}} \right|, & \text{если } \frac{\Delta u}{\omega_{КО} - \omega_{КА}} < 0 \end{cases}$$

где Δu – начальная разность фаз, $\omega_{КО}$ и $\omega_{КА}$ – *средние* угловые скорости КО и КА

$$\omega_{КО} = \frac{2\pi}{T_{КО}}, \omega_{КА} = \frac{2\pi}{T_{КА}}, T_{КО} \text{ и } T_{КА} - \text{периоды орбит КО и КА.}$$

Также можно найти момент входа в опасную зону t_b и момент выхода из нее t_e

$$t_b = t_{вст} - \frac{\Delta}{V_{КО} - V_{КА}}, t_e = t_{вст} + \frac{\Delta}{V_{КО} - V_{КА}},$$

где $V_{КО}$ и $V_{КА}$ – *средние* орбитальные скорости КО и КА

$$V_{КО} = \sqrt{\frac{\mu}{R_{КО}}}, V_{КА} = \sqrt{\frac{\mu}{R_{КА}}}, R_{КО}^3 = \frac{T_{КО}^2 \mu}{4\pi^2}, R_{КА}^3 = \frac{T_{КА}^2 \mu}{4\pi^2}.$$

Если интервалы $[t_{begin}, t_{end}]$ и $[t_b, t_e]$ не имеют общих точек, то объект можно отсеять.

Для объектов второй подгруппы отсев по взаимному расстоянию вдоль орбиты не столь эффективен, т.к. сближение происходит дважды на витке.

д) *Одновременный отсев по компланарным и по некомпланарным элементам орбиты;*

Данный отсев применяется для оставшихся объектов 2-ой группы. С помощью линеаризованных уравнений движения (1) и (2) находим зависимость минимального расстояния между орбитами $\Delta D(\varphi)$

$$\frac{z}{r_0} = \cos \varphi \frac{z_0}{r_0} + \sin \varphi \frac{V_{z0}}{V_0} \quad (2)$$

$$\Delta D(\varphi) = \sqrt{\Delta r^2(\varphi) + z^2(\varphi)} \quad (3)$$

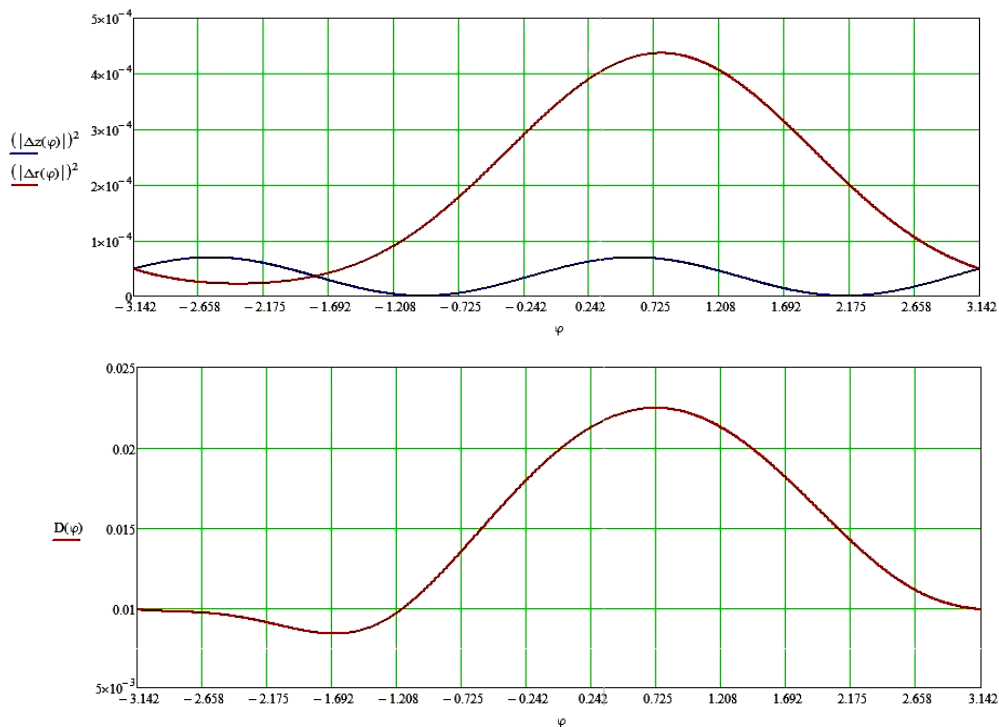


График 1. Расстояние между орбитами в плоскости, по боку и суммарное.

Из графика (1) видно, что влияние положения линии абсид достаточно велико, это доказывает то предположение, что точка максимального сближения не будет совпадать с точкой пересечения проекций орбит на сферу. Получается довольно значительная область, в которой взаимное расстояние отличается незначительно. Точка минимального расстояния находится между перицентром относительной орбиты и ближайшей узловой точкой, но заметно отстоит от них.

Зная зависимость (3) мы можем найти минимальное расстояние между орбитами $\Delta_{\min}$ и сравнить его с допустимым Δ . Так же мы определяем точку максимального сближения $t_{\text{вст}}$ и моменты начала $\Delta t_{\text{нач}}$ и конца возможного опасного сближения $\Delta t_{\text{конца}}$.

е) Одновременный учет всех элементов орбиты, включая фазу;

Если на интервале $[\Delta t_{\text{нач}}, \Delta t_{\text{конца}}]$ расстояние вдоль орбиты превышает величину $\Delta_f = \sqrt{\Delta^2 - \Delta_{\min}^2}$, то данный КО можно отсеять.

ж) Численное интегрирование с учётом возмущений не отсеянных КО с выходом на заданные моменты времени;

Данная методика до этапа численного интегрирования позволяет отсеять подавляющее большинство КО, которые заведомо не представляют опасность. Это значительно повышает эффективность поиска опасных сближений, т.к. основное время расчета занимает именно численные методы. В дальнейшем развитии работы планируется при прогнозе опасных сближений учитывать ошибки определения орбит КА и КО, а также рассчитывать манёвры уклонения от столкновения.

Список литературы

1. Эльязберг П.Е. Введение в теорию полёта искусственных спутников Земли. М.: Наука, 1965.— 540 с. ;
2. Белецкий В.В. Очерки о движении космических тел. — 2-ое изд.—М.: Наука, 1977.— 432с. ;
3. A.I. Nazarenko, N. Morozov. Influence of Russian Orbital Debris Mitigation Measures on the LEO Environment. Proceedings of the 18th Meeting of the Inter-Agency Space Debris Coordination Committee. Colorado Springs, CO, June 2000