

электронный журнал

МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

Издатель ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»

УДК 629.78

Оптимизированный метод поиска опасных сближений на околоземных орбитах

Баранов Андрей Анатольевич, Каратунов Максим Олегович.

МГТУ им. Н.Э.Баумана

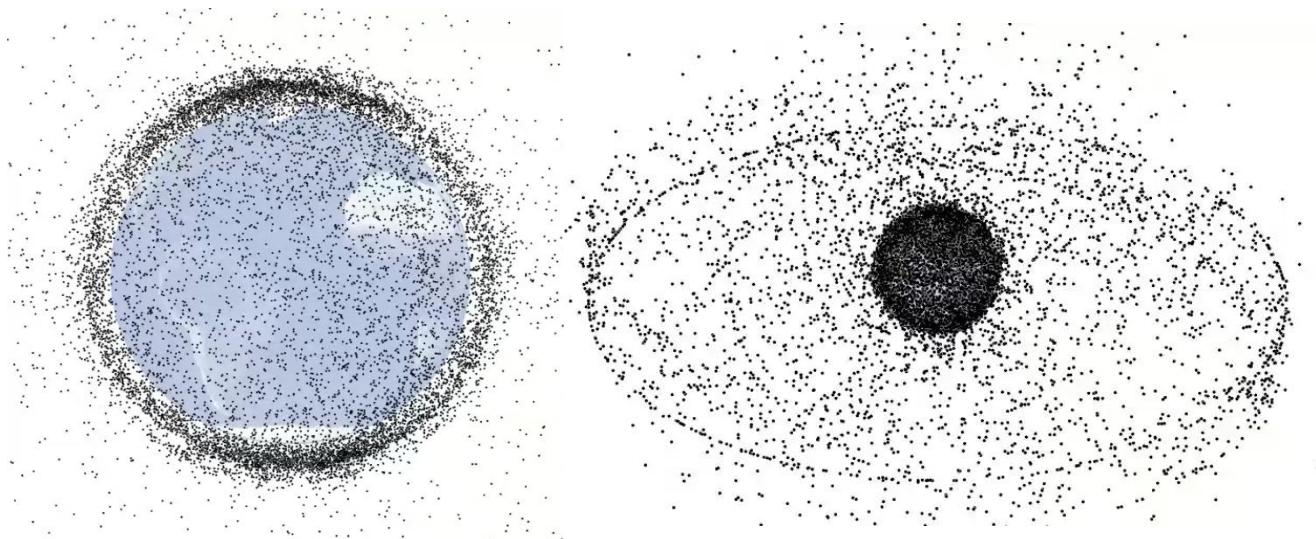
maksim_karatunov@mail.ru

Введение

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. [1]

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.[2] 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 [3].

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 [2], 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.

На графике 1 представлен прогноз популяции космического мусора при условии, что в 2005 году все запуски КА были прекращены. Из графика видно, что в результате прекращения запусков 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.

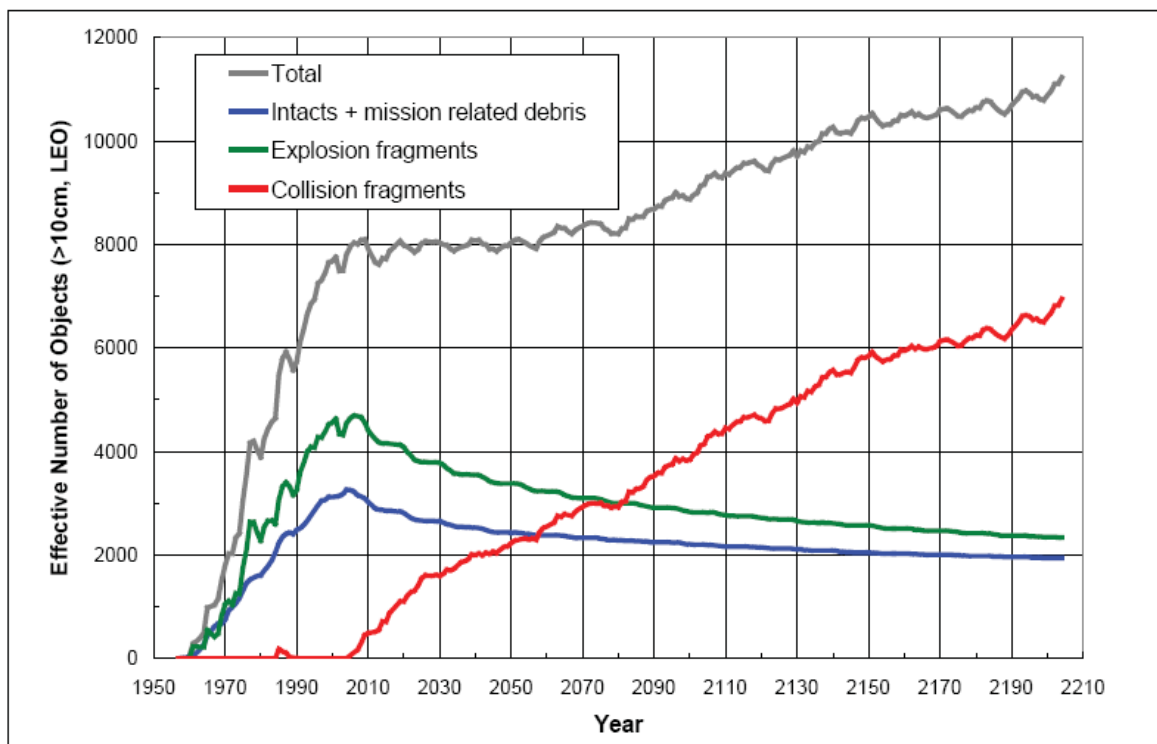


График 1 – Прогноз популяции космического мусора [4]

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

Цель работы

Создание программы прогнозирования опасных сближений КА с каталогизированными объектами (КО), при наличии актуального каталога космических объектов.

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.

1. Алгоритм поиска опасных сближений

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 меньше заданного Δ (км), а также время входа-выхода КА из опасной области.

Описание отсевов

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) [5].

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

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 $\Delta e_x = e_{xf} - e_{x0}$, $\Delta e_y = e_{yf} - e_{y0}$, $\Delta a = a_f - a_0$ (Рис.2) 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

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

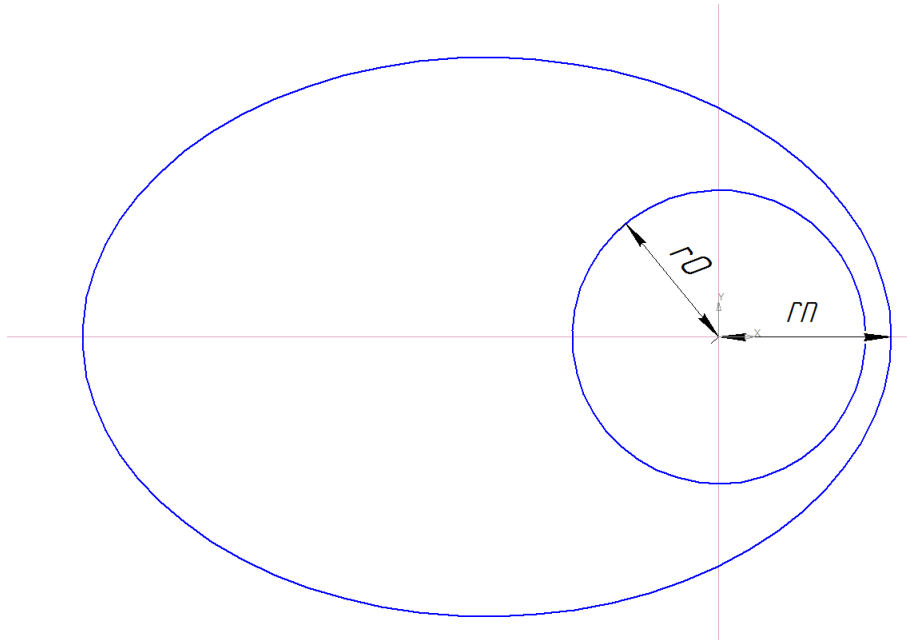


Рис.2. Отсев по компланарным элементам орбиты.

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 фазе;

В данном отсеве также будут рассмотрены только околокруговые орбиты. В случае, когда плоскости КА и КО отличаются не сильно перед нахождением точки максимального сближения для КА и КО ($u_{0\text{вст}}$, $u_{f\text{вст}}$), будет эффективно провести отсев по фазе. Для этого разобьём объекты на две группы:

– 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°).

– 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 $t_{\text{вст}}$, (3) когда при движении КО проекция его радиус-вектора на плоскость орбиты КА попадет на луч, проходящий через КА

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

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

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

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

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

Изменение угловой скорости из-за ненулевого угла между плоскостями можно учесть, если к защищаемой области добавить следующий допуск:

$$\Delta U_{\max} = \text{artg} \sqrt{\frac{1}{\cos \gamma}} - \text{artg} \sqrt{\cos \gamma}$$

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 эффективен, т.к. сближение происходит дважды на витке.

г) Отсев при помощи совместного учёта компланарных и некомпланарных элементов орбит;

Проанализируем положение точки максимального сближения орбит. Предположим, что угол между плоскостями орбит КА и КО мал. Тогда с помощью линеаризованных уравнений движения и находим зависимость минимального расстояния между орбитами $\Delta D(\varphi)$

$$\frac{\Delta r}{r_0} = (2 - \cos \varphi) \cdot \frac{\Delta r_0}{r_0} + \sin \varphi \cdot \frac{\Delta V_{r0}}{V_0} + 2 \cdot (1 - \cos \varphi) \cdot \frac{\Delta V_{t0}}{V_0} \quad (3)$$

$$\frac{z}{r_0} = \cos \varphi \frac{z_0}{r_0} + \sin \varphi \frac{V_{z0}}{V_0} \quad (4)$$

$$\Delta D(\varphi) = \sqrt{\Delta r^2(\varphi) + z^2(\varphi)} \quad (5)$$

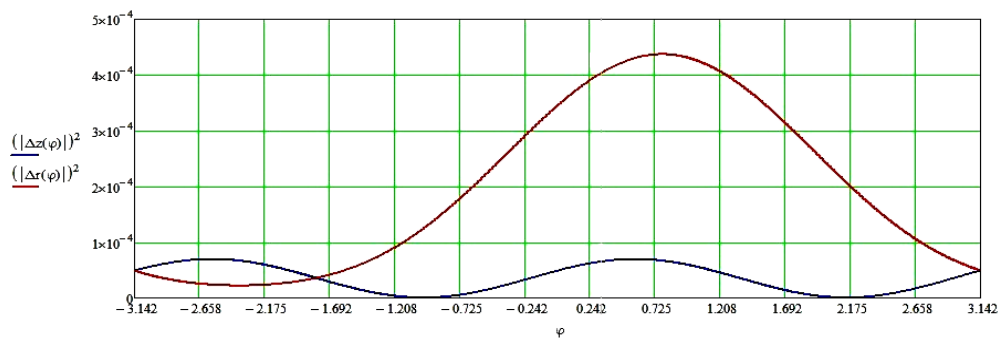


График 2. Расстояние между орбитами в плоскости(Δr) и по боку(Δz)

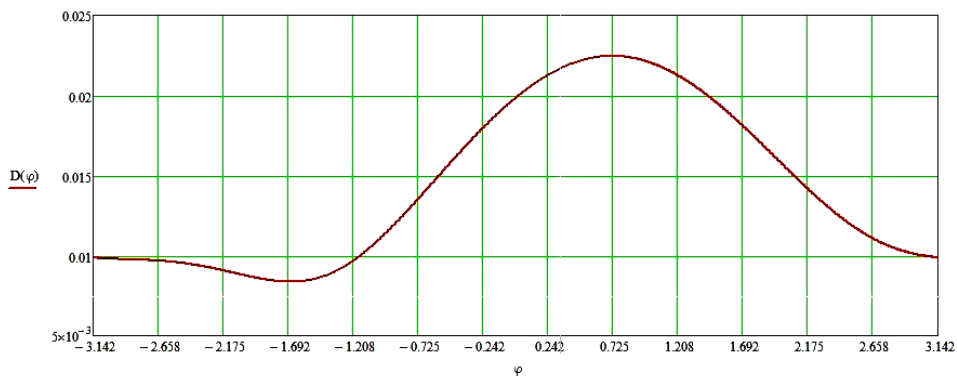


График 3. Суммарное расстояние между орбитами

На первый взгляд может показаться, что точка максимального сближения будет находиться в узловой точке, но из графика (3) видно, что влияние положения линии абсид достаточно велико, это приводит к смещению данной точки в сторону перигея относительной орбиты.

Зная зависимость (5) мы можем найти минимальное расстояние между орбитами $\Delta_{\min}$ и сравнить его с допустимым Δ . Так же мы определяем точку максимального сближения $t_{0\text{вст}}$ и моменты начала $\Delta t_{0\text{нач}}$ и конца возможного опасного сближения $\Delta t_{0\text{конца}}$. Данный подход является корректным только для околокруговых орбит с малым углом между плоскостями движения.

д) Отсев по расстоянию между плоскостями орбит КА и КО в области их пересечения;

Используя формулу (6) сферической геометрии, найдём угол между орбитами (Рис. 3)

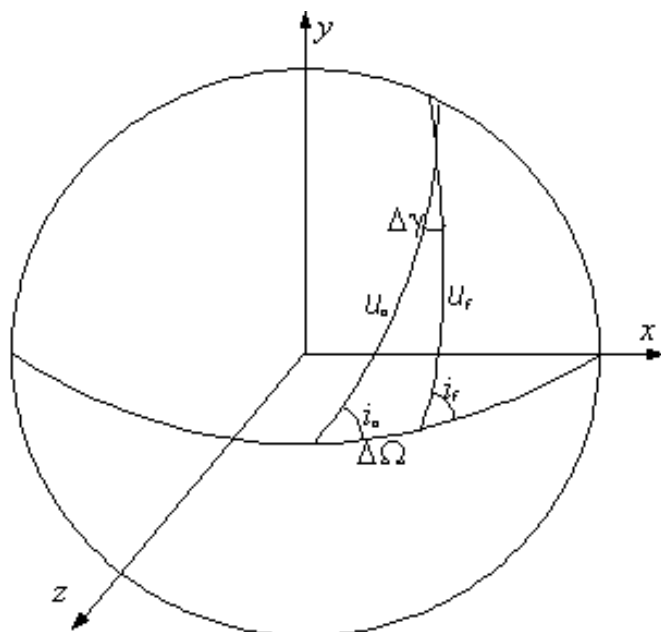


Рис.3. Проекция орбит КА и КО на сферу

$$\gamma = \arccos(-\cos(i_{KO}) \cdot \cos(i_{KA}) + \sin(i_{KO}) \cdot \sin(i_{KA}) \cdot \cos(\Delta\Omega)) \quad (6)$$

Затем по формулам (7,8,9,10) определяем зоны возможных сближений. Для этого находим области (Рис.4.), где отклонение по боку (расстояние между плоскостями орбит) меньше защищаемой области (Δ), тогда мы можем утверждать, что во всех остальных точках орбиты суммарное расстояние между орбитами будет больше чем Δ , т.к. в это расстояние включает в себя отклонение по боку как составную часть.

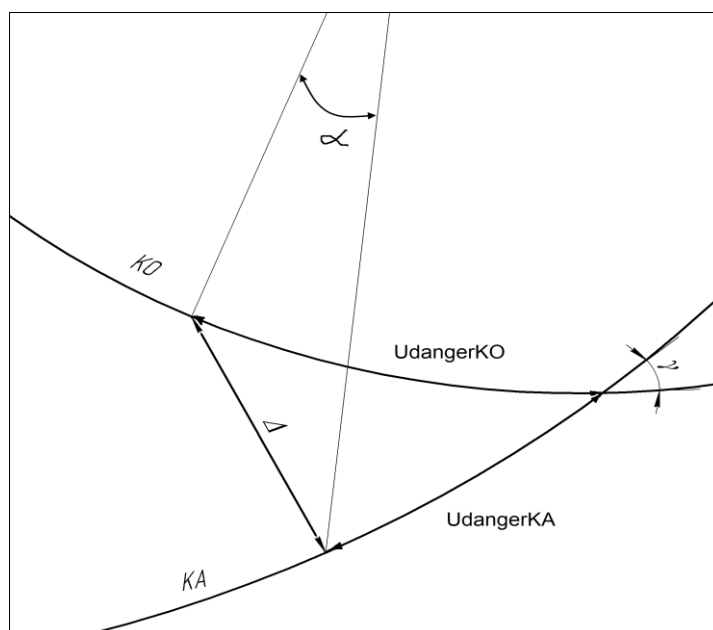


Рис.4. Нахождение зон возможных сближений

$$\alpha = \arctan\left(\frac{k \cdot \Delta}{r_{pKA}}\right) \quad (7)$$

$$U_{dangerKO} = ar \cos\left(\frac{\cos(i_{KA}) + \cos(i_{KO}) \cdot \cos(\gamma)}{\sin(i_{KO}) \cdot \sin(\gamma)}\right) \quad (8)$$

$$U_{dangerKA} = ar \cos\left(\frac{\cos(i_{KO}) + \cos(i_{KA}) \cdot \cos(\gamma)}{\sin(i_{KA}) \cdot \sin(\gamma)}\right) \quad (9)$$

$$dU_{dangerKA} = \frac{tg(\alpha)}{tg(\gamma)} \quad (10)$$

После этого, применяя формулы невозмущённого движения, находим минимальное расстояние в области возможных сближений, если это расстояние меньше чем защищаемая область (Δ), то объект считается безопасным и в дальнейшую обработку не поступает.

Численное интегрирование

На данном этапе производится учёт возмущений, определяются времена входа и выхода из зоны сближения (Δ), а также минимальное расстояние между КА и КО. Подход к численному интегрированию уравнений движений при поиске опасных сближений описан в работе З.Н. Хуторовского [6]

Результаты

Данная методика была реализована на языке программирования C++ и протестирована на реальном каталоге космических объектов. В качестве «защищаемых объектов» выбирались по пять объектов из каждого класса орбит (низких, средних и геостационарных). Оказалось, что для разных классов объектов с целью повышения эффективности можно применять разную последовательность отсевов. Для геостационарных спутников наиболее предпочтительной является последовательность: в,д,а,б,г (согласно принятым выше обозначениям). Для низких и средних орбит: д,а,в,б,г.

В среднем время отсева составило 3-4 секунды, за которое было отсеивается приблизительно 99% всех каталогизированных объектов. Но, не смотря на это, основную часть времени поиска заняло численное интегрирование уравнений движения с учётом возмущений.

На графике 4 и 5 показан поэтапный процесс отсева. По оси абсцисс отложено время в процентах от суммарного времени выполнения задачи. По оси

ординат отложено количество объектов в каталоге, также в процентах от общего числа КО.

График 4 отражает прямую последовательность отсевов (т.е. а,б,в,г,д), а график 5 отражает оптимизированную для ГСО последовательность (т.е. в,д,а,б,г). Из графиков видно, что применение другой последовательности отсевов позволяет значительно ускорить процесс решения задачи в целом.



График 4. Процесс прямой последовательности отсева



График 5. Процесс оптимизированной последовательности отсева

Заключение

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. Результаты могут быть использованы для оперативного прогноза опасных сближений на интервале до трёх суток.

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. Агапов В.М. «Работы по проблеме космического мусора. Сбор, хранение и анализ измерительной информации по объектам техногенного происхождения» Доклад на расширенном заседании ученого совета Института прикладной математики им. М.В. Келдыша, посвященном 80-летию заместителя директора Института члена-корреспондента РАН Эфраима Лазаревича Акима ИПМ им. М.В.Келдыша 17 марта 2009 г.

2.ГОСТ Р 25645.167-2005 «Модель пространственно-временного распределения плотности потоков техногенного вещества в космическом пространстве»

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

4. «Status of Activity of the Inter-Agency Space Debris Coordination Committee». Paris, February 7- 8, 2008

5. Эльязберг П.Е. Введение в теорию полёта искусственных спутников Земли. М.: Наука, 1965.— 540 с. ;

6. Хуторовский З.Н. Метод оценки риска столкновения при поддержании каталога КО в ЦККП. М. 2009