

УДК 629.78+531.133.1

Анализ методов предварительного поиска опасных сближений между каталогизированными объектами

Храмов Егор Сергеевич^(*)

Egor.Khramov@phystech.edu

SPIN-код: 8499-6909

Белый Глеб Юрьевич

belyi.giu@phystech.edu

SPIN-код: 8488-8370

ФКИ МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Аннотация. В работе исследуются методы префилтрации для эффективного мониторинга опасных сближений космических объектов. Цель — минимизировать вычислительные затраты при анализе пар траекторий, обеспечивая вероятность пропуска опасных событий меньше заданного порога. На выборке ~2 млн пар эфемерид протестированы различные префильтры и их комбинации. Найденные комбинации префильтров позволяют сократить время расчетов на 1–5 порядков по сравнению с точными алгоритмами без увеличения ошибок 2-го рода.

Ключевые слова: мониторинг космических объектов, анализ сближений, предотвращение столкновений, космический мусор, низкоорбитальные спутники

Введение. Задача предотвращения столкновений между каталогизированными космическими объектами (ККО) требует оперативного анализа их движения с высокой точностью. Так как число ККО по данным каталога NORAD достигает порядка 10^4 [1], точный расчет минимальных расстояний между траекториями для каждой пары объектов, крайне неэффективен с точки зрения вычислительных затрат, поэтому общий подход к решению должен быть нацелен на достижение максимального быстродействия при отсутствии пропусков опасных сближений. Большая часть массива данных о траекториях объектов может быть исключена из рассмотрения на предварительном этапе при помощи простых математических критериев — так называемых префильтров. Цель настоящей работы заключается в определении конфигурации префильтров, обеспечивающую наибольшую эффективность исключения из детального рассмотрения участков пар траекторий, не представляющих угрозы, при вероятности пропуска опасного сближения меньше заданного порога.

Методы и материалы; результаты. В настоящей работе были рассмотрены такие префильтры как: апогейно-перигейный префильтр [2], оперирующий исключительно приближенными параметрами эллиптической орбиты объектов и префильтры семейства “smart sieve” [3]. В качестве входных данные о движении ККО, исследуемых в настоящей работе, брались эфемериды, содержащие информацию о положениях и скоростях объектов в различные моменты времени.

Ключевые характеристики префильтра, на которых может быть построена метрика эффективности — отношение времени префилтрации одного вре-

менного интервала ко времени последовательного детального анализа участка траектории, число ложных классификаций событий как опасных (далее ошибки 1-го рода) и число пропусков опасных сближений (далее ошибки 2-го рода).

Для оценки данных характеристик, присущих перечисленным префильтрам и их комбинациям, примерно 2 млн пар эфемерид были подвергнуты обработке, описываемой диаграммой на рисунке.



Диаграмма обработки данных в ходе исследования характеристик префильтров

В результате исследований было показано, что апогейно-перигейный префильтр вследствие невозможности учета маневров допускает ошибки 2-го рода с вероятностью более 10^{-5} . Все фильтры семейства «smart sieve» на рассматриваемом множестве эфемерид не допустили ни одного пропуска опасного события.

По результатам исследований комбинаций префильтров было установлено, что наиболее эффективной конфигурацией для поиска сближений типа спутник-спутник, защищаемая область которых сферична, является «вторичный R2-префильтр» + «префильтр минимального сближения» [3], которая сокращает вычислительное время примерно на порядок по сравнению с алгоритмом уточнения параметров опасных сближений A-N [4].

Для поиска опасных сближений типа спутник-орбитальная станция, были выполнены модификации префильтров семейства «smart sieve», которые учитывают несферичность защищаемой области орбитальной станции. Наиболее эффективной комбинацией префильтров для данного типа сближения является «вторичный R2-префильтр» + «префильтр минимального сближения», которая снижает время расчетов на 5 порядков по сравнению с анализом с помощью адаптированного нами к сближениям с орбитальными станциями алгоритму A-N.

Заключение. На выборке из ~2 млн пар эфемерид спутников и орбитальных станций ($\sim 7,7 \cdot 10^9$ временных интервалов) получена статистика ошибок

1-го и 2-го рода для различных префильтров, а также их комбинаций. Проведено сравнение времен анализа каталога космических объектов при использовании префильтров и при последовательным расчете без префильтрации. Были адаптированы алгоритмы семейства “smart sieve” и алгоритм фильтрации A–N для поиска опасных сближений с орбитальными станциями. Для сближений объектов типа спутник – спутник и спутник – орбитальная станция выбраны комбинации префильтров, обеспечивающие наибольшие показатели эффективности на рассматриваемой выборке с долей ошибок 2-го рода $<10^{-5}$.

Список источников

- [1] *Spaceflight Intelligence Exchange*. URL: <https://www.satcat.com/> (accessed 28.11.2025).
- [2] Hoots F.R., Crawford L.L., Roehrich R.L. An Analytic Method to Determine Future Close Approaches Between Satellites. *Celestial Mechanics*, 1984, vol. 33, pp. 143–158. <https://doi.org/10.1007/BF01234152>
- [3] Alarcón Rodríguez J.R., Martínez Fadrique F., Klinkrad H. Collision Risk Assessment with a “Smart Sieve” Method. *Joint ESA-NASA Space-Flight Safety Conference*, 2002, vol. 486, pp. 159–164.
- [4] Alfano S., Negron D. Determining satellite close approaches. *Journal of the Astronautical Sciences*, 1993, vol. 41, pp. 217–225.