

УДК 521.3+531.51

Ускоренный метод расчета вклада шумов гравитационных возмущений в ошибку прогноза траекторий околоземных космических объектов

Фукин Илья Игоревич

fukin.ii@mipt.ru

Кузнецов Александр Алексеевич

kuznetsov.aa@mipt.ru

Хрипунов Иван Владимирович

khripunov.iv@mipt.ru

МФТИ, Москва, Россия

Аннотация. В настоящей работе представлена аналитическая формула для оценки вклада шумов гравитационных возмущений в ковариационную матрицу ошибок вектора состояния космического объекта (КО). Получены приближенные аналитические выражения для компонент ковариационной матрицы с использованием аппроксимации корреляционной функции шума гравитационных возмущений. Показано, что предложенный метод обеспечивает ускорение вычислений на 6–7 порядков при прогнозах на сутки при сравнении с численным интегрированием. При этом для низких околокруговых неэкваториальных орбит (наклонение $10^\circ - 170^\circ$, высоты ≤ 500 км) ошибка применения аналитической формулы составляет не более 10 %.

Ключевые слова: прогнозирование погрешностей, ковариационная матрица, статистические характеристики, гравитационные возмущения Земли

Введение. Рост числа КО требует мониторинга околоземного космического пространства для актуализации данных о заселенности орбит, ведения каталога КО и оценки рисков столкновений. Основной характеристикой для работы алгоритмов определения орбит и прогноза опасных сближений является ковариационная матрица ошибок вектора состояния K_x [1–3]. В общей постановке K_x включает в себя двойной интеграл Q от нескольких матриц, описывающих эволюцию состояния КО и корреляционные характеристики шумов возмущений [1]. В случае гравитации корреляционная функция представлена суммой ряда, что делает численное интегрирование Q вычислительно затратной процедурой [4, 5]. Целью работы является разработка метода ускоренного расчета вклада шумов гравитационных возмущений в погрешность прогноза вектора состояния КО при сохранении приемлемой точности.

Методы и материалы; результаты. Разработанный метод основан на исследовании статистических характеристик шумов гравитационных возмущений и применении приближений, свойственных низким околокруговым орбитам. Для таких орбит естественно быстрое затухание корреляции радиальной компоненты шума, поэтому корреляционная функция была аппроксимирована дельта-функцией. В свою очередь, дисперсия шума интерполирована квадратичной функцией от средней долготы орбиты. Использование этих приближений в символьном интегрировании позволило получить аналитические формулы для компонент матрицы Q .

Сравнение с численным интегрированием показало сокращение временных затрат на 6–7 порядков при вычислениях на сутки. При этом отличие результатов применения аналитической формулы от численного расчета составило не более 10 % для околокруговых орбит с наклоном от 10° до 170° и высотой не более 500 км. При варьировании параметров орбиты типичная ошибка оказалась на уровне 20–40 %.

Заключение. Разработанный метод позволяет значительно сократить время вычисления вклада шумов гравитационных возмущений в ковариационную матрицу ошибки состояния околоземных космических объектов. Полученные аналитические формулы продемонстрировали приемлемую точность на широком диапазоне орбитальных параметров. Эффективность полученных формул создает возможность для бортовой реализации метода для оперативной оценки погрешностей вектора состояния.

Список источников

- [1] Назаренко А.И. *Задачи стохастической космодинамики. Математические методы и алгоритмы решения*. Москва, Ленанд, 2018, 347 с.
- [2] Vallado D.A. *Fundamentals of astrodynamics and applications*. New York, Springer, 2001, 682 с.
- [3] Khutorovsky Z.N., Boikov V.F., Kamensky S.Y. Direct method for the analysis of collision probability of artificial space objects in LEO-Techniques, results and applications. *Proceedings of the First European Conference on Space Debris*, Darmstadt, Germany, 1993, pp. 491–508.
- [4] Назаренко А.И. *Погрешности прогнозирования движения спутников в гравитационном поле Земли*. Москва, ИКИ РАН, 2010, 226 с.
- [5] Wright J.R. et al. Orbit gravity error covariance. *18th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting*, 2008, vol. 130, pp. 08–157.