

УДК 629.783

С.В. Козелков<sup>1</sup>, Е.И. Махонин<sup>2</sup>, А.А. Моргун<sup>3</sup>, Е.С. Козелкова<sup>4</sup>,  
В.А. Ямницкий<sup>5</sup>, С.С. Москаленко<sup>5</sup><sup>1</sup>Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка, Полтава<sup>2</sup>Государственное космическое агентство Украины, Киев<sup>3</sup>Европейский университет, Киев<sup>4</sup>Национальный университет обороны Украины, Киев<sup>5</sup>Национальный центр управления и испытаний космических средств ГКАУ, Евпатория

## МЕТОД «ТРЕТИЧНОЙ» ОБРАБОТКИ КАТАЛОГОВ КООРДИНАТНОЙ ИНФОРМАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В статье представлен метод «третичной» обработки каталогов координатной информации космических объектов, который предназначен для решения задач расчета опасных сближений и прогноза времени и районов падения космических объектов при минимальном количестве измерительной информации.

**Ключевые слова:** космический аппарат, координатная, измерительная информация, «третичная» обработка, опасные сближения, метод наименьших квадратов.

### Введение

За последние несколько лет в космосе произошли значительные по своему масштабу события, такие как столкновения на орбите, применение противоспутникового оружия и сходы с орбиты массивных аварийных космических аппаратов. Они заставили общественность задуматься об угрозе, исходящей из космоса.

Государства, обладающие собственными космическими группировками и высокотехнологическими средствами контроля космического пространства, не имеют права не сообщать о параметрах орбит своих космических объектов и группировок, но требования к качеству выдаваемой координатной информации никто не предъявляет.

Поэтому, проанализировав и набрав достаточную статистику, можно сделать вывод, что в открытых источниках координатной информации публикуются заведомо «загрубленные» данные, а по многим космическим объектам, выполняющим военные и научные миссии, отсутствуют вовсе.

По результатам анализа последних происшествий в космосе путем сравнения данных Центра контроля космической обстановки (ЦККП) Украины и данных, поступающих из средств массовой информации, выяснилось, что информация о последствиях столкновений на орбите, времени и районах падения аварийных космических объектов, выдаваемая службами контроля космического пространства таких государств, зачастую имеют сомнительный характер.

Причины такой дезинформации могут быть разными, начиная с секретности установленного на борту оборудования, политической составляющей и возможности нанесения ущерба территории госу-

дарств, на которые могут упасть обломки аварийных космических аппаратов.

Поэтому, государствам, имеющим системы контроля и анализа космической обстановки (СКАКО), для подобных расчетов и прогнозов просто необходимо обладать достоверными данными о параметрах движения космических объектов. Реализовать подобное можно только с помощью национальных измерительных средств.

**Постановка проблемы.** На данный момент в ЦККП Украины отсутствует возможность получения измерительной информации с национальных радиотехнических средств.

Измерительная информация, получаемая национальными оптическими средствами наблюдения, является высокоточной и надежной, но ее получение напрямую зависит от погодных условий.

При таких условиях нет возможности оперативно получать необходимую для расчетов координатную информацию. Основной координатной информацией на данный момент являются данные, предоставляемые стратегическим командованием США United States Space Command (USSPACECOM).

Поэтому в настоящее время вопрос предупреждения столкновений и прогноза времени и районов падения аварийных космических аппаратов напрямую зависит от качественных начальных условий движения космических объектов. В связи с этим разработка методов получения достоверных начальных условий движения КО без учета собственной измерительной информации приобретает все большую и большую актуальность.

В статье представлен метод «третичной» обработки, который позволяет при отсутствии измерительной информации национальных измерительных средств, используя данные открытых источников

координатной информации, выйти на достаточную точность расчетов опасных сближений и прогноза времени и районов падения космических объектов, что в свою очередь позволит своевременно и оперативно оповещать руководство Государственного космического агентства Украины (ГКАУ), командование Вооруженных сил Украины, Министерства по чрезвычайным ситуациям о реальной космической обстановке.

### Раздел основного материала

С 1995 года шли разработки различных проектов СКАКО под эгидой ГКАУ.

В то же время, начиная с 1997 года, разработан ряд методов, позволяющих существенно повысить точность определения орбит на основании данных USSPACECOM без привлечения какой-либо дополнительной информации.

Сущность данного метода заключается в т.н. «третичной» обработке каталогов космических объектов.

В рамках СКАКО «первичной» обработкой обычно называют процесс усреднения первичных измерений координат, производимый непосредственно на средствах контроля космического пространства [1 – 4]. В результате получают т.н. «усредненные» измерения.

«Вторичной» обработкой обычно называют процесс получения уточненных орбит на основании последовательности «усредненных» измерений [1 – 4]. Эта обработка производится уже в рамках СКАКО, ее обычно реализуют ЦККП. Результаты «вторичной» обработки включаются в состав каталогов космических объектов, в частности, именно так формируются каталоги USSPACECOM.

В литературе также встречаются упоминания о «третичной» обработке каталогов космических объектов, заключающейся в том, что производится в некотором смысле «сглаживание» ряда последовательных каталогов, в результате чего увеличивается точность прогноза движения космического аппарата [1, 3]. Конкретных публикаций об алгоритмах и применимости «третичной» обработки не имеется.

Для реализации метода «третичной» обработки в инициативном порядке разработан и апробирован ряд специальных программ, которые реализуют указанное «сглаживание».

Каталоги USSPACECOM обновляются, по меньшей мере, 2 раза в сутки, однако, на сайте <http://www.space-track.org/> доступны также и «промежуточные» данные – до 5 уточненных начальных условий, которые не включены в состав каталогов, но могут быть использованы при проведении «третичной» обработки.

Их использование позволяет значительно увеличить точность прогноза движения космических

аппаратов, уточнить вычисление минимального сближения космических аппаратов подготавливать начальные условия с согласованным баллистическим коэффициентом для расчета времени и районов падения космических объектов.

Метод «третичной» обработки неоднократно успешно использовался, например:

- в 1997 г. для уточнения опасного сближения «Сич-1» с ее ракетой-носителем;
- в 2001 году для прогнозирования падения станции «Мир»;
- в 2005...2006 г.г. для прогноза падения компонент запуска «Сич-1М»;
- в 2009 г. для анализа столкновения COSMOS-2251 и IRIDIUM-33 и в ряде других случаев.

Метод «третичной» обработки каталогов основан на использовании для уточнения траектории современного метода наименьших квадратов (МНК), заимствованного из аппарата экспериментальной физики, и развитой системы представления данных о наблюдении космических аппаратов различными средствами контроля космического пространства [1].

При использовании МНК производится минимизация невязок наблюдаемых параметров непосредственно в том координатном пространстве, в каком производилось измерение.

В качестве одного из наблюдательных средств контроля космического пространства в программы заложены результаты наблюдения координат объектов непосредственно в пространстве Гринвичской подвижной системы координат (ГПСК) с помощью «бортовых» средств GPS-навигации.

Данные каталогов USSPACECOM не сложно преобразовать в координаты ГПСК объекта, и в дальнейшем их можно рассматривать как некоторые «псевдоизмерения», применив к ним аппарат МНК для уточнения начальных условий движения объекта.

Полученные уточненные начальные условия (УНУ) повторно используются для решения задачи расчета «трубки» опасных сближений и прогноза районов падения космических объектов [1, 2].

В связи с резким ростом количества космического «мусора» и повышением вероятности аварий в космосе, вопрос применимости «третичной» обработки приобрел новую остроту, и за последний месяц проведена дополнительная его апробация.

Аттестация показала, что применение «третичной» обработки позволило увеличить точность прогноза движения аппарата в 3...10 раз.

Таким образом, можно существенно повысить надежность определения «опасных» сближений и точность прогноза времени и районов падения КО без привлечения новой информации, базируясь только на существующей.

Это может представить интерес как для Украины, так и для стран «космического клуба».

Для аттестации метода «третичной» обработки использовались наблюдения астрономической обсерватории г. Львова по объекту NOAA-12, проведенные 03.02.2010 г., получено 8 измерений.

Данные представлены в виде гистограмм невязок оптических измерений и прогнозов.

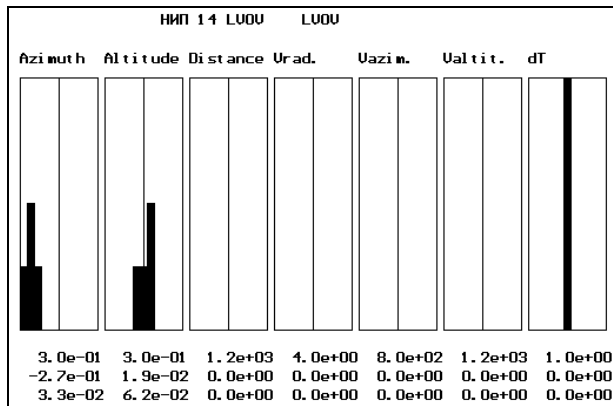


Рис. 1. Гистограммы невязок NOAA-12 при прогнозе от каталога USSPACECOM на оптические измерения Львовской АО

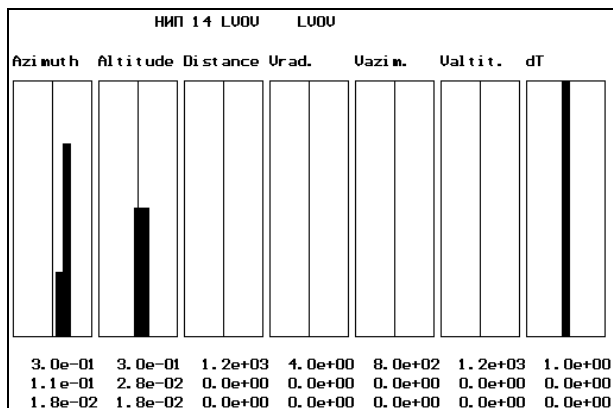


Рис. 2. Гистограммы невязок NOAA-12 при прогнозе от результатов «третичной» обработки каталогов USSPACECOM на оптические измерения Львовской АО

На гистограммах (рис. 1, 2) приведены невязки оптических измерений и прогнозов по азимуту (часовому углу) и углу места (склонению). Каждая гистограмма имеет 10 столбцов, по 5 столбцов для положительной и отрицательной невязок.

В нижней части каждой гистограммы приведены три строки:

- первая строка – это полуширина гистограммы в градусах (в данном случае для азимута и угла места – 0.3 градуса или 18 угловых минут);
- вторая строка – это математическое ожидание невязок в градусах;
- третья строка среднеквадратический разброс невязок в градусах.

Исходя из приведенных гистограмм, можно сделать вывод о том, что использование «третичной» обработки последовательности каталогов USSPACECOM дает невязки оптических наблюдений

приблизительно в 3 раза меньшие, чем при непосредственном использовании последнего каталога USSPACECOM.

Так же, для аттестации метода «третичной» обработки был использован факт столкновения объектов Космос-2251 и IRIDIUM-33. Столкновение произошло 10.02.2009 в 16:55:59 UTC над полуостровом Таймыр.

При этом, использовалась модель геопотенциала Земли 4x4, шаг интегрирования 50 с.

Предварительно в качестве начальных условий были использованы данные USSPACECOM от 2009 г. формата TLE. В этом каталоге были приведены данные по КА Космос-2251 по состоянию на 09.02.2009, 11:57:36 UTC, а данные по КА IRIDIUM-33 на 09.02.2009, 18:49:39 UTC.

Решение задачи опасного сближения по этим данным на интервале времени с 10.02.2009 по 12.02.2009 (1.5 суток) показало одно сближение Космос-2251 и IRIDIUM-33, 10.02.2009, 16:56:01.0303 UTC с критическим радиусом 7283 м.

«Третичная» обработка каталогов была произведена на интервале времени 02.02.2009 по 09.02.2009, причем для Космос-2251 обработано 15 каталогов, а для IRIDIUM-33 обработано 16 каталогов. При расчете с помощью метода «третичной» обработки был выдан следующий результат: 10.02.2009, 16:55:59 UTC, критический радиус  $594 \pm 464$  м.

При расчете использовалась модель Земли PZ-90 (геопотенциал 16x16) и шаг интегрирования 25 с. Как и следовало ожидать, использование «третичной» обработки привело к более точному (более чем в 10 раз) определению точки столкновения.

По результатам «третичной» обработки дополнительно было спрогнозировано опасное сближение при проведении маневра «расхождения». Реализация маневра «расхождения» заключалась в коррекции продольной (трансверсальной) скорости объекта на некоторую небольшую величину. При увеличении трансверсальной скорости объекта на +0.01 м/с критическое расстояние возросло до 3611 м, а при уменьшении трансверсальной скорости объекта на -0.01 м/с критическое расстояние возросло до 2520 м. Это подтверждает, что в указанное время действительно найдено критическое сближение космических аппаратов.

Таким образом, использование «третичной» обработки каталогов позволяет значительно (в 10 раз) уточнить величину критического расстояния и, соответственно, уточнить момент сближения.

Расчет сближения с маневрирующими космическими аппаратами представляет более сложную задачу, т.к. параметры маневра, как правило, не известны [2 – 4].

Использование аппарата «третичной обработки каталогов» предоставляет косвенную возможность выявления и анализа маневра аппарата [1].

В качестве примера на нижеследующем рисунке (рис. 3.) приведен график невязок времени прогноза и наблюдения по данным в пространстве орбитальной системы координат (ОСК) после проведения «третичной» обработки.

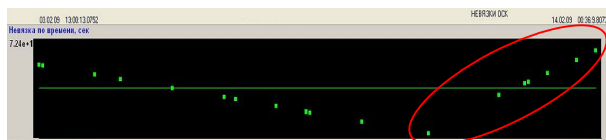


Рис. 3. График невязок времени прогноза и наблюдения по данным USSPACECOM

Четко прослеживается излом графика, свидетельствующий о проведенном маневре аппарата.

Если маневр обнаружен, то для расчетов сближения должны использоваться только данные USSPACECOM после момента маневра.

Сравнение прогнозов каталогов с результатами высокоточных оптических измерений показало, что среднеквадратическая ошибка (СКО) прогноза каталогов USSPACECOM превышает 3000 м и более (в пространстве ГПСК – Гринвичской подвижной системы координат).

Оценка погрешностей «третичной» обработки каталогов производилась путем расчета корреляционной матрицы ошибок прогноза также в пространстве ГПСК [1 – 4]. Расчет производился на момент приема последнего каталога USSPACECOM при проведении процесса «сглаживания» ряда последовательных каталогов.

При этом СКО прогноза на 2-х суточном интервале времени обычно составляет 500...1000 м, в редких случаях – до 2000 м, что в 3...5 раз лучше, чем при непосредственном использовании каталогов USSPACECOM (СКО прогноза 5500 м и более).

Полученные результаты показывают, что погрешность результата вычисления сближения находится в тех же пределах.

Если воспользоваться правилом «3σ», то следует признать «опасными» сближения с прогнозируемым расстоянием 3000...4000 м.

#### МЕТОД «ТРЕТИННОЇ» ОБРОБКИ КАТАЛОГІВ КООРДИНАТНОЇ ІНФОРМАЦІЇ КОСМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

С.В. Козелков, Є.І. Махонін, О.А. Моргун, К.С. Козелкова, В.А. Ямницький, С.С. Москаленко

У статті представлений метод «третичної» обробки каталогів координатної інформації космічних об'єктів, який призначений для вирішення завдань розрахунку небезпечних зближень і прогнозу часу і районів падіння космічних об'єктів при мінімальній кількості вимірювальної інформації.

**Ключові слова:** космічний апарат, координатна, вимірювальна інформація, «третична» обробка, небезпечні зближення, метод найменших квадратів.

#### METHOD OF «TERTIARY» TREATMENT OF CATALOGUES OF CO-ORDINATE INFORMATION OF OBJECTS OF SPACES

S.V. Kozelkov, E.I. Makhonin, A.A. Morgun, K.S. Kozelkova, V.A. Yamnitskiy, S.S. Moskalenko

The method of «tertiary» treatment of catalogues of co-ordinate information of objects of spaces is presented in the article, which is intended for the decision of tasks of calculation of dangerous rapprochements and prognosis of time and districts of falling of objects of spaces at the least of measuring information.

**Keywords:** space vehicle, co-ordinate, measuring information, «tertiary» treatment, dangerous rapprochements, least-squares method.

## Выводы

Длительное и успешное использование «третичной» обработки каталогов космических объектов, а также проведенная аттестация, позволяет рекомендовать данный метод для использования в программных комплексах ЦККП Украины для решения задач по расчетам безопасных сближений национального космического аппарата Сич-2 с другими космическими объектами, находящимися в составе Главного каталога космических объектов. Данный метод так же прошел аттестацию при прогнозе времени и района падения космической станции «Мир» и космического аппарата «Фобос-Грунт». Получены достоверные результаты. Поэтому данный метод так же рекомендуется использовать в программных комплексах ЦККП Украины для решения задач прогноза и районов падения космических объектов прекращающих свое существование.

Использование данного метода рационально и может быть рекомендовано для использования так же и в странах космического «клуба».

При этом следует отметить, что все алгоритмы и необходимые программы уже разработаны и аттестованы, и готовы к практическому использованию.

В отличие от других методов, «третичная» обработка каталогов космических объектов при своем внедрении не требует значительных капитальных затрат, и может быть реализована в кратчайшие сроки.

## Список литературы

1. Силин И.Н. Стандартная программа для решения задач методом наименьших квадратов / И.Н. Силин. – Д.: Препринт ОИЯИ, 1967. – № 11-33-62. – 45 с.
2. Дубошин Г.Н. Небесная механика, Аналитические и качественные методы / Г.Н. Дубошин. – М.: Наука, 1964. – 455 с.
3. Дубошин Г.Н. Небесная механика, основные задачи и методы / Г.Н. Дубошин. – М.: Наука, 1968. – 793 с.
4. Чеботарев Г.А. Аналитические и численные методы небесной механики / Г.А. Чеботарев. – М.: Наука, 1965. – 350 с.

Поступила в редколлегию 22.02.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.