Программный комплекс обработки и хранения информации с приборов звёздной ориентации

Р. В. Бессонов, Е. В. Белинская, А. Н. Куркина, Н. А. Строилов, Б. А. Юматов

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

E-mail: bumatov@gmail.com

В статье рассматриваются основные принципы проектирования программного комплекса хранения и обработки наземной и телеметрической информации приборов звёздной ориентации типа БОКЗ. Анализируются этапы жизненного цикла приборов с точки зрения генерируемых на каждом из них данных, типы получаемой информации и принципы её формирования. Приводятся схемы моделей данных, используемых для эффективного хранения информации, получаемой как во время наземной отработки, так и с борта космического аппарата. В заключении приведены примеры практического применения программного комплекса для целей анализа внештатных ситуаций, апробации новых версий программно-математического обеспечения, планирования жизненного цикла приборов и управления производством. В качестве примеров внештатных ситуаций рассматриваются аномальное изменение углового расстояния между оптическими осями двух приборов, установленных на одном космическом аппарате, и появление дефектных пикселей на фотоматрице прибора вследствие воздействия радиации. Примером апробации программно-математического обеспечения служит анализ повышения быстродействия новой версии алгоритма распознавания звёзд без априорной информации.

Ключевые слова: телеметрия, звёздный датчик, структура данных, анализ данных, отработка ПМО

Одобрена к печати: 08.11.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-145-153

Введение

Оценка объёмов данных, поступающих с приборов звёздной ориентации в ходе изготовления на Земле и эксплуатации на борту космического аппарата, и попытка их обработки стандартными средствами привели к выводу, что для максимально эффективного и быстрого их анализа необходимы специальные инструменты.

В качестве примера приведём цифры. На одном из функционирующих в данный момент космических аппаратов установлено три прибора типа БОКЗ (Блок определения координат звёзд). Тактовая частота их работы составляет 4 Гц. Объём той части информации, которая генерируется прибором на каждом такте работы, составляет 512 байт. Это соответствует 70 Гбайт информации в год. Нетрудно понять, что обработка и анализ такого объёма данных невозможны без специальных инструментов, предоставляющих быстрый доступ к ним по любым заданным условиям.

Разработанный для решения вышеперечисленных проблем программный комплекс (ПК) учёта и хранения наземной и телеметрической информации предоставляет собой инструментарий, позволяющий максимально автоматизировать и систематизировать процессы, проходящие на всех этапах жизненного цикла астродатчиков на Земле, и каталогизировать информацию, поступающую из космоса, а также обеспечивает необходимый функционал для быстрого и эффективного анализа хранимых данных.

Происхождение данных

На протяжении всего жизненного цикла звёздный датчик и связанное с ним оборудование генерируют значительное количество информации в самых различных форматах. На *рис. 1* представлена обобщённая схема жизненного цикла прибора, выделяющая его основные этапы и виды генерируемой информации.

Рис. 1. Схема жизненного цикла

Рис. 2. Состав и принцип формирования телеметрии

Рис. 3. Состав формата IKI

Рассматривая представленные выше схемы, можно заметить, что состав наземной информации достаточно разнообразен и может быть привязан к большому числу процессов, в то время как в ходе лётных испытаний информация представляется лишь в виде массивов телеметрических данных и требует привязки только к КА и номеру прибора. Однако объём информации, генерируемой на борту, как уже упоминалось выше, существенен, а также требует быстрого доступа. Все эти факты и различия необходимо учитывать при составлении моделей данных для наземной и телеметрической информации.

В качестве ядра, из которого в дальнейшем формируется телеметрия прибора, выступают видеоданные. Схемы, иллюстрирующие принцип формирования телеметрической информации, а также основной её состав представлены на *рис. 2* (см. с. 147).

Говоря о наземных данных, нельзя не рассмотреть IKI-формат, который на текущий момент активно используется в области отработки ПМО, а в перспективе должен прийти на смену протоколам с КИА как формат, наиболее удобный и приспособленный для анализа и поиска проблем. Первое достоинство IKI-формата заключается в том, что он сочетает в себе бинарную и текстовую информацию, что даёт возможность легко и быстро посмотреть, к примеру, список локализованных объектов на кадре, просто открыв файл в текстовом редакторе, а в случае более серьёзного анализа — извлечь исходный кадр. Второе достоинство — это то, что он был разработан специально для работы со звёздными датчиками и поэтому позволяет структурированно хранить в себе всю необходимую информацию. Обобщённая схема этого формата представлена на *рис. 3* (см. с. 147).

Структура данных

В зависимости от типа информации есть два принципа хранения получаемых данных. Первый используется для хранения телеметрии и представляет собой организацию модели данных на основе объектно-ориентированного принципа с использованием технологии секционирования по диапазонам значений (PostgreSQL 9.6 Documentation, <https://www.postgresql.org/docs/9.6/static/index.html>). Общая структура телеметрических данных показана на *рис. 4*.

Рис. 4. Модель данных телеметрической информации

Информация о телеметрии с каждого КА представляет собой отдельную схему данных, организованную по вышеописанному принципу. Каждая таблица схемы может иметь дочерние таблицы, данные в которых распределяются на основании заданных условий. В этом случае родительская таблица фактически является перенаправляющей и не содержит информации.

Такая организация хранения данных обеспечивает наиболее быстрый доступ к информации подобного вида, так как в случае запроса какого-либо сегмента данных его поиск происходит в ограниченной области. В этом случае осуществляется двухуровневое секционирование: по номерам установленных на КА приборов и по временным интервалам поступающей телеметрии.

Принцип хранения информации, получаемой на Земле, базируется на классической реляционной модели данных. В отличие от телеметрической информации, для этих данных недостаточно лишь привязки к космическому аппарату и номеру прибора. Это объясняется двумя причинами. Во-первых, несмотря на то что, по сути, в подавляющей массе данные аналогичны телеметрическим, они имеют различные оболочки (протоколы с КИА, протоколы со стантов, файлы в формате ИКИ), а также зачастую в них присутствует информация другого рода. Во-вторых, хранение наземной информации предусматривает привязку к наземному жизненному циклу, а значит — к той или иной операции, которая проводилась с прибором (например, протоколы с КИА во время климатических испытаний) и проверяемыми свойствами, включёнными в эту операцию (работоспособность прибора при минусовой температуре, работа прибора при плюсовой температуре). Для этих целей была разработана кардинально иная схема данных, представленная на *рис. 5*.

Рис. 5. Модель данных наземной информации

Эта схема, во-первых, является универсальной, предоставляя возможность хранить в себе информацию о любых сущностях, начиная с самих приборов и заканчивая самыми мелкими подборками, а также сущностями иного рода (например, ПМО), и во-вторых, позволяет организовывать планирование производства приборов.

Примеры практического применения

На *рис. 6* (см. с. 150) представлен интерфейс ПК для работы с наземной информацией, визуализирующий основную часть рассмотренной выше модели данных, а именно жизненный цикл экземпляра изделия. На изображении показан фрагмент древовидной диаграммы Гантта, на котором в качестве примера продемонстрирована информация об оптической головке, в частности состав её жизненного цикла и используемые подборки.

Рис. 6. Фрагмент интерфейса модуля наземной информации

Ниже отображены свойства изделия. С помощью данного интерфейса, как уже упоминалось выше, возможно планирование жизненного цикла, а также привязка информации, полученной на каждом из его этапов.

Разработанный ПК позволяет осуществлять синхронизацию с программно-математическим обеспечением (ПМО) звёздного датчика и проводить его апробацию на всём объёме хранимой информации. Такая апробация даёт возможность получения обширной статистики о корректности работы математического обеспечения на самых различных участках полёта при всех возможных условиях и, кроме того, является наиболее эффективным видом регрессионного теста. Всё это позволяет в кратчайшие сроки вводить в эксплуатацию новые виды ПМО и устранять ошибки в модернизированных версиях существующего. Далее будут рассмотрены несколько примеров использования данного функционала.

Для целей уточнения измерений приборов звёздной ориентации осуществляется потоковая наземная обработка входящей телеметрии. Так как массивы поступающей с КА информации зачастую содержат пропуски, а порой и повреждения в данных, программное обеспечение потоковой обработки должно корректно выполнять свою функцию во всех подобных ситуациях. Синхронизируя программное обеспечение с ПК, можно легко и быстро проверить его функционирование при всех возможных случаях нехватки информации.

С помощью ПК производится выборка массивов штатной информации (МШИ), дополнительной телеметрической информации (ДТМИ), координат, скоростей и времени (КСВ), которые затем подаются на вход модуля потоковой обработки. Полученный результат, представляющий собой значения скорректированных кватернионов, записывается в базу данных, а затем производится его визуализация и подсчёт статистик. Пример коррекции измерений для одного из КА на интервале с 30.12.2017 по 31.12.2017 представлен на рис. 7. На сгенерированном ПК графике показано изменение углового расстояния между осями *OZ* приборной системы координат (ПСК) пары датчиков звёздной ориентации с течением времени. Синим цветом отображены «сырые» измерения, зелёным — скорректированные.

Ещё одним примером использования ПК может служить апробация модернизированного алгоритма распознавания звёзд в режиме начальной ориентации. Для этих целей с помощью ПК осуществляется выборка информации о локализованных объектах из массивов ДМТИ и значениях кватернионов из массивов МШИ.

Рис. 7. Угловое расстояние между осями OZ ПСК пары приборов

Данные о локализованных объектах подаются на вход алгоритма, а затем производится сравнение полученных значений ориентации. Проведённая проверка помогла выявить такие случаи некорректной работы алгоритма, которые было бы невозможно заметить при тестировании на смоделированной выборке или на данных небольших объёмов. Также была получена оценка повышения общей эффективности работы алгоритма. В таблице приведено сравнение скорости работы двух алгоритмов.

Сравнение скорости работы алгоритмов

Показатели, нс	Алгоритм	
	Исходный	Модернизированный
Среднее	1 176 322	320 416
Минимум	203 277	121 475
Максимум	3 139 208	1 058 100

В заключение стоит рассмотреть ещё один пример применения ПК для целей анализа внештатных ситуаций.

При анализе телеметрии на матрицах приборов были обнаружены дефектные пиксели. Это пиксели, у которых значение выходного сигнала имеет неверную зависимость от входного или выходной сигнал в наибольшей степени зависит от иных факторов (температура).

С помощью ПК была произведена выборка дефектных пикселей с нескольких приборов и рассмотрено изменение их состояния с течением времени. Для нахождения дефектных пикселей было выполнено сканирование всей хранимой телеметрии и выборка массивов локализованных объектов лишь из тех кадров, которые сформировались в режимах начальной и текущей ориентации, так как в этих режимах локализация проводится по полному кадру, а не по предсказанным фрагментам изображения. Из полученной выборки были извлечены предполагаемые «битые пиксели», т. е. те объекты, координаты которых оказались статичны во всех массивах в пределах погрешности $\pm 0,5$ пикселя. Далее была проверена статичность интегральных яркостей и количества элементов в оставшихся объектах. Для полученного с помощью вышеперечисленной процедуры списка объектов была произведена повторная их выборка, но уже с большими допусками на координаты, чтобы учесть возможность «склеивания» групп дефектных пикселей с объектами, которые действительно представляют собой звёзды.

На рис. 8 (см. с. 152) представлен график, характеризующий поведение группы дефектных пикселей, наблюдаемой в одной и той же точке матрицы в разные моменты времени. Ось OY характеризует величину интегральной яркости, ось OX — моменты наблюдения в хронологическом порядке. Цвет столбца гистограммы описывает число элементов в группе. Из графика можно видеть, что количество элементов в группе практически не изменяется с течением времени и её интегральная яркость остаётся стабильной, не превышая 1500 градаций.

Рис. 8. Пиксель 89,55×184,5. График значений интегральной яркости

Рис. 9. Пиксель 37,71×199,5. График значений интегральной яркости и числа объектов

Рис. 10. Пиксель 459,54×140,5. График значений интегральной яркости и числа объектов

Однако на одном из наблюдений присутствует выброс по числу объектов и значению интегральной яркости. Объяснить это можно тем, что группа дефектных пикселей сцепилась с кластером, являющимся звездой, что исказило его координаты и, скорее всего, не позволило распознать как звезду.

На *рис. 9* (см. с. 152) наблюдается группа дефектных пикселей с центром в точке $37,71 \times 199,5$. Группа имеет практически постоянное число элементов на всем периоде наблюдения, однако её интегральная яркость скачкообразно изменяется.

Третья наблюдаемая группа дефектных пикселей имеет центр в точке $459,54 \times 140,5$. Число элементов остаётся постоянным на всём участке наблюдения (2–3 пикселя), однако величина интегральной яркости явно имеет положительный тренд. График, относящийся к данной группе, представлен на *рис. 10* (см. с. 152).

Подводя итог, необходимо заметить, что рассмотренные выше группы дефектных пикселей наблюдались примерно на одном и том же временном интервале, однако их поведение существенно различается. Это не позволяет однозначно интерпретировать причины поведения каждой из групп и даёт почву для исследований в данном направлении.

Заключение

Разработанный ПК значительно ускоряет работу с большими объёмами телеметрической информации, получаемыми с КА, структурирует хранение информации, генерируемой на Земле, а также позволяет осуществлять планирование и вести контроль производства. Предоставляемые для синхронизации средства дают возможность проводить тестирование ПМО с высокой степенью покрытия, благодаря чему удаётся обнаружить большую часть ошибок, а также получить обширную статистику об эффективности его работы. Возможность сканирования данных по любому набору условий позволяет получить выборки любого вида без дополнительной постобработки, что упрощает проведение исследований. ПК обладает широким потенциалом и может быть использован для исследований не только в областях анализа внештатных ситуаций и отработки ПМО, что было показано на примере рассмотрения поведения дефектных пикселей.

Software system for processing and storing information, obtained from the star trackers

R. V. Bessonov, E. V. Belinskaya, A. N. Kurkina, N. A. Stroilov, B. A. Yumatov

*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: bumatov@iki.rssi.ru*

The basic principles of designing software for the storing and processing of ground-based and telemetry information obtained from BOKZ star trackers are discussed. The stages of the trackers' life cycle are analyzed from the point of view of the data generated at each of them, the types of information received and the principles of its formation. The schemes of data models used for efficient storage of information obtained both during ground testing and from the spacecraft are given. In conclusion, there are examples of software package practical application for the purposes of analyzing emergency situations, testing new versions of software, planning the trackers' life cycle and production management. As examples of emergency situations, an anomalous change in the angular distance between the optical axes of two instruments installed on the same spacecraft and the appearance of defective pixels on the photometric matrix of the instrument due to radiation are considered. The analysis of the performance improvement of the new version of the star recognition algorithm without a priori information is an example of testing software.

Keywords: telemetry, star tracker, data structure, data analysis, software testing

Accepted: 08.11.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-145-153