

МЕХАНИЗМ УПРАВЛЯЕМОЙ ТЕЛЕМЕТРИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА*

Обосновывается запросный механизм получения телеметрической информации с борта космического аппарата, анализируются преимущества данного подхода, для его технического обеспечения рассматривается возможность создания аппаратного хранилища телеметрии.

Ключевые слова: космические аппараты, телеметрия, космические командно-измерительные системы, аппаратное хранилище телеметрии.

В настоящее время к информативности канала передачи телеметрической информации (ТМИ) с борта космического аппарата (КА) предъявляются все более и более серьезные требования. Данное обстоятельство обуславливается возрастающей сложностью процессов управления и жизнеобеспечения на борту КА, необходимостью их детального контроля. Объем передаваемых данных по телеметрическому каналу должен быть большим, в информации должна отсутствовать избыточность.

Технические решения по повышению информативности канала ТМИ могут быть различными.

Первым очевидным решением является увеличение физической скорости канала телеметрии. Действительно, с одной стороны, применяемые в настоящее время скорости передачи в служебном канале телеметрии системы управления КА (2, 4, 8 кбит/с) можно считать не вполне удовлетворительными. Увеличение физической скорости передачи данных потребует перехода на повышенный частотный диапазон радиоканала ТМИ и связанные в связи с этим высокие технические затраты.

Другим очевидным решением является сжатие ТМИ перед посылкой в канал передачи. Сжатие может существенно увеличить объем передаваемых данных, но если данные избыточные, имеются их повторы, то применение сжатия не позволит кардинально повысить информативность канала ТМИ.

Природа избыточности данных может быть разной: нерациональный подбор измеряемых параметров, погрешности измерения, нерациональная структура передаваемых сообщений (транспортных кадров, сегментов передачи) и т. д. Но основным источником избыточности может оказаться общий механизм формирования и посылки телеметрии.

До настоящего времени основным остается механизм, имеющий непрерывный характер выдачи ТМИ в канал передачи данных. Данные телеметрии передаются в транспортных кадрах, имеющих определенную структуру. Так как источников данных много и они имеют в общем случае разную структуру данных, то для передачи ТМИ о текущем состоянии бортовых систем КА используется несколько транспортных

кадров (N). Таким образом, последовательность из N транспортных кадров передает полную ТМИ о состоянии КА в текущий момент времени t . В дальнейшем для передачи ТМИ в момент $t + 1$ используется новая последовательность из N транспортных кадров. Заполнение данных об источниках в наборе телеметрических кадров выполняется в соответствии с определенным форматом, в котором определяется, сколько источников данных размещаются в каждом кадре и какова разрядность выделенного для каждого источника поля. Поэтому данный механизм формирования и передачи ТМИ в дальнейшем будем называть форматным.

В наземном комплексе управления (НКУ) происходит выделение информации из транспортных кадров в соответствии с их форматами и вся последующая обработка, связанная с анализом полученной информации: выделение нормально работающих источников, у которых отклонения информации находятся в допустимых границах; выделение источников с отклонениями информации за допустимые границы; анализ динамики изменения информации от источников; диагностирование работы бортовых систем; принятие решений по устранению выявленных проблем.

Рассмотренный форматный механизм формирования и передачи телеметрии имеет высокую избыточность: для бортовых систем находящихся в нормальном работоспособном состоянии изменения ТМИ во времени незначительны или вообще отсутствуют. Тем не менее канал ТМИ полностью загружен этими избыточными малоинформативными данными.

Происходящий в настоящее время переход на пакетный механизм в соответствии с рекомендациями CCSDS не решает проблему избыточности информации. Сущность концепции пакетной телеметрии состоит в том, что данные различных процессов бортовых систем КА объединяются в пакеты данных, соответствующие источникам, которые затем передаются по каналу передачи так, чтобы принимающие средства с высокой надежностью могли восстановить их [1]. Модель телеметрических служб CCSDS, построенная по образцу модели OSI представлена на рис. 1.

*Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14.В37.21.0451 «Исследование и разработка сетевой архитектуры бортового комплекса управления малого космического аппарата».



Рис. 1. Иерархическая модель телеметрических служб

Рекомендации комитета CCSDS адресованы только пяти нижним уровням этой модели. И если системный уровень модели, отвечающий за преобразование физических величин в наборы телеметрических данных, будет построен по принципам рассмотренной ранее форматной телеметрии, высокая избыточность информации сохранится. Принимаемые НКУ пакеты будут по большей части иметь повторяющуюся информацию.

Для снижения избыточности ТМИ предлагается дополнить пакетную телеметрию запросным механизмом ее формирования и передачи (режим управляемой телеметрии). Сущность управляемой телеметрии состоит в следующем: ТМИ передается только по запросным командам поступающим в телеметрическую систему КА (командно-измерительная система, КИС) с НКУ.

При отсутствии передачи полезной ТМИ из бортовой КИС в телеметрический канал поступают неинформативные данные, необходимые для поддержания синхронизации процессов на передающей и приемной

стороне. При высокой надежности передающих устройств при отсутствии полезной ТМИ телеметрический канал может вообще отключаться.

Передача полезной ТМИ инициализируется поступлением в бортовой КИС запросной команды. Запросные команды могут быть нескольких типов: разовый запрос на выборку текущих данных от нескольких источников; запрос на выполнение определенного сценария выборки данных от нескольких источников; отложенный запрос на выполнение определенного сценария при наступлении какого-либо события; запрос на выборку с предобработкой данных (суммирование, усреднение, отклонение от среднего и т. д.) и другие.

Разовый запрос позволяет получить немедленную выборку данных. Скорее всего, данный вид запроса потребует при устранении нештатных ситуаций на борту КА, когда потребуются «ручное» управление потоком телеметрических данных.

В штатном режиме эксплуатации вероятнее всего будут выполняться запросы на выполнение предпри-

деленных сценариев выборки. Сценарий выборки определяет последовательность и формат представления данных для опроса нескольких источников. Отложенные запросы на выполнение сценария выборки могут выполняться либо периодически через определенные интервалы времени, либо при наступлении какого-либо события, например, изменении данных от какого-либо источника выше критического порога. Запрос на выборку с предобработкой необходим для каких-либо операции по анализу данных.

Запросный механизм, осуществляя управляемую выдачу ТМИ, существенно разгружает канал передачи данных и дает возможность расширить количество источников ТМИ. Одним из таких источников могла бы стать система журналирования, фиксирующая управляющие воздействия бортового компьютера, процедуры взаимодействия бортовой аппаратуры, отказы оборудования и исключительные ситуации информационных процессов на борту КА. Появление полноценной системы журналирования поднимет на новый качественный уровень диагностику КА.

Важнейшим практическим вопросом является реализуемость предложенного механизма управляемой выдачи телеметрии. Понятно, что прямое соединение источников данных с телеметрической системой КИС не позволит реализовать запросный механизм. Необходимо аппаратное хранилище накапливаемых данных для их последующей передачи в канал телеметрии.

Для реализации запросного механизма наилучшим видом организации аппаратного хранилища является база данных (БД). БД позволяет эффективно реализовать хранение, запись, поиск, выборку данных. Логи-

ческая и физическая организация БД не является предметом рассмотрения данной статьи. Отметим лишь, что БД должна располагаться в электрически перепрограммируемой энергонезависимой памяти и представлять собой набор файлов: таблиц и индексов, связанных между собой.

БД должна располагаться в КИС, тем самым бортовой компьютер освобождается от нагрузки, связанной с управлением БД. Система управления БД (СУБД) должна представлять из себя некий контроллер, реализующий по командному запросу следующие функции:

- запись данных из соответствующих источников в соответствующие таблицы БД;
- выборка данных из БД для ее передачи в телеметрическую систему КИС;
- хранение соответствующих командному запросу данных до получения подтверждения о доставке данных на НСУ;
- предоставление данных для других систем КА, в том числе и для бортового компьютера.

Работу запросной телеметрии можно упрощенно описать следующим образом. Командная система КИС идентифицирует поступившую команду как запросную и передает ее на исполнение телеметрической системе. Телеметрическая система определяет источники данных и производит обращение в соответствующие таблицы БД. Телеметрическая система КИС путем периодического опроса постоянно выполняет актуализацию данных в БД, но, если в настоящий момент в БД не хранятся актуальные данные от указанных источников, обращается к ним.

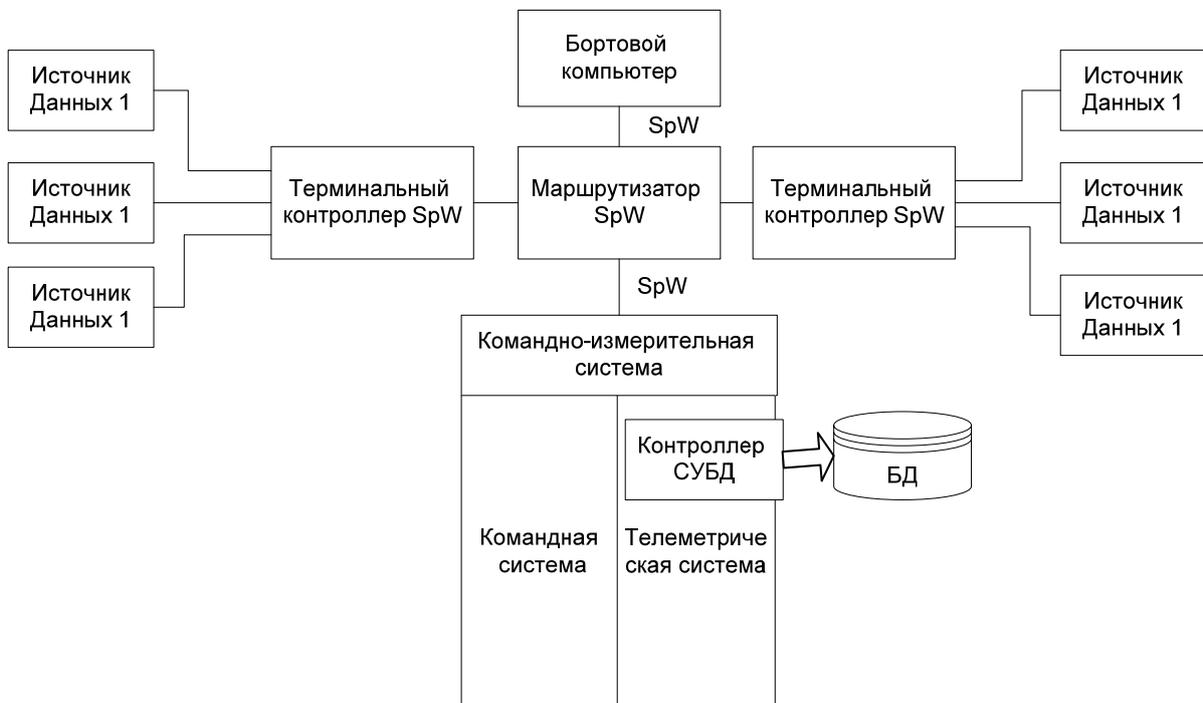


Рис. 2. Телеметрическая система в составе сетевой архитектуры БКУ

Получение данных от источников просто реализуется при сетевой архитектуре бортового комплекса управления (БКУ) [2], представленной на рис. 2. Источники данных физически подключены к удаленному контроллеру сети. КИС, как активное устройство, обращается к удаленному контроллеру, используя сервисы сети. Поступившие данные от источников сохраняются СУБД в соответствующих таблицах БД (оператор *INSERT*).

Затем СУБД организует выборку данных из БД, используя операторы типа *SELECT* и *WHERE*, и передает на уровень пакетирования телеметрической системы. Данные передаются по каналу передачи.

При успешном приеме данных НКУ формирует положительную квитанцию. Признак положительной квитанции от командной системы КИС передается на телеметрическую систему, тем самым завершая транзакцию БД.

Запросный способ выдачи телеметрической информации потенциально может сам быть причиной внесения избыточности, но несколько иного рода. В формируемом сообщении порядок передачи данных от источников в общем виде может быть произвольным, определяется видом запроса. Это предполагает адресный способ идентификации источников данных в передаваемом сообщении: <идентификатор 1><данные источника 1><идентификатор 2><данные источника 2>...<идентификатор n><данные источника n>. Если источников много, например 1 000, то поле <адрес источника i> может занимать 10 разрядов. Данная проблема имеет множество вариантов решения, например, для случая предопределенных запросов, когда заранее известен формат принимаемого сообщения и количество источников данных, можно существенно уменьшить длину идентификатора. Но в любом случае такой вариант избыточности заведомо менее значимый, чем при форматном механизме непрерывной выдачи ТМИ.

БД и СУБД телеметрической системы, по сути, промежуточные звенья от источников данных до телеметрической системы для обеспечения высокой скорости выдачи телеметрии в ответ на запросную команду должны иметь высокую производительность.

Для обеспечения высокой производительности при выборе проектных решений необходимо учитывать следующие обстоятельства. Первое обстоятельство касается собственно БД, которое физически располагается в энергонезависимой памяти (флеш-память, фазоинверсная энергонезависимая память и др.). Энергонезависимая память имеет низкую скорость доступа. Кроме того, энергонезависимая память имеет ряд ограничений на эксплуатационный ресурс в условиях космоса [3]; этот ресурс необходимо использо-

вать оптимально. Для этого с помощью внешней оперативной памяти организуется так называемое «отсоединенное хранилище данных», которое является образом БД в энергонезависимой памяти. Все операции выполняются над отсоединенным хранилищем, а его синхронизация с БД в энергонезависимой памяти осуществляется по специальному алгоритму.

Второе обстоятельство относится к СУБД, а конкретно – к вариантам реализации контроллера СУБД. Для обеспечения высокой производительности предлагается выполнить аппаратную реализацию контроллера на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС). Алгоритмы работы всех входящих в состав СУБД блоков известны, достаточно жестко определены, не требуют высокой вариативности и гибкости, поэтому хорошо реализуемы на ПЛИС. Конечный автомат аппаратного контроллера СУБД напрямую работает с данными, что является заведомо более быстродействующим вариантом относительно варианта на микропроцессоре (микроконтроллере). Решение, основанное на аппаратных блоках, является весьма предсказуемым в плане времени исполнения. Расчет таймингов работы блоков с линейным быстродействием не составляет труда, чего не скажешь о решениях, основанных на связке [микропроцессор + микропрограмма], где производительность является зависимой от микропрограммы, а значит, плавающей и трудно прогнозируемой. Кроме того, предварительный анализ показывает, что ресурсы современных ПЛИС достаточны для того, чтобы на одном кристалле полностью реализовать КИС, включая командную и телеметрическую систему, вместе с СУБД.

Таким образом, в результате проведенных исследований обоснован механизм управляемого получения телеметрической информации с борта космического аппарата, проведен анализ достоинств данного подхода, рассмотрены варианты создания аппаратного хранилища телеметрии. В настоящее время проведен этап концептуального проектирования аппаратных блоков СУБД.

Библиографические ссылки

1. Современная телеметрия в теории и на практике : учебный курс. СПб. : Наука и техника, 2007.
2. Сетевая архитектура бортового комплекса управления / Д. А. Никитин [и др.] // Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения : тр. конф. М. : ИПУ РАН, 2012. С. 1539–1546.
3. Шурыгина В. Энергонезависимая память. Кто победит в гонке? Ч. 2 // Электроника: наука, технология, бизнес. 2008. № 6. С. 36–47.

F. A. Lukin, A. V. Shakhmatov, K. V. Mushovets, P. V. Zelenkov

MECHANISM OF OPERATED TELEMETRY FOR A SPACECRAFT

This article presents query-oriented method of receiving telemetry information from the board of a spacecraft, analyses advantages of this method. For implementing this method, the possibility of creation of hardware database is considered.

Keywords: spacecrafts, telemetry, space CCU (command and control units), telemetry hardware storage.

© Лукин Ф. А., Шахматов А. В., Мушовец К. В., Зеленков П. В., 2012

УДК 681.3:629.7

В. Х. Ханов, А. В. Шахматов, С. А. Чекмарев, М. Ю. Вергазов, Ф. А. Лукин

КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ*

Описываются основные технические решения, принятые при проектировании бортового комплекса управления для малых космических аппаратов. Определены открытые технологии и продукты, используемые в проекте. Представлены сетевая архитектура и конструкция бортового комплекса управления. Приведены результаты разработки экспериментального макета.

Ключевые слова: малые космические аппараты, бортовой комплекс управления, сетевая архитектура, конструкция бортового комплекса управления, экспериментальный макет бортового комплекса управления.

Проектирование малых космических аппаратов (МКА) является новейшим быстроразвивающимся направлением мировой космонавтики. Применение МКА открывает новые возможности для исследования космического пространства, проведения эффективных научных экспериментов, отработки новых перспективных технологий.

Исходные данные для проектирования подобных аппаратов задают жесткие требования к массогабаритным показателям, энергопотреблению, параметрам надежности при приемлемом уровне аппаратных задач, стоимости как в целом МКА, так и ко всем составляющим узлам и блокам, в том числе и к бортовому комплексу управления (БКУ). Стремление к удовлетворению этих требований обуславливает необходимость применения новых подходов и технологий проектирования.

Целью проекта является разработка бортового комплекса управления (БКУ) для малых космических аппаратов на основе применения ряда новых технологий, позволяющих достичь высоких технических и эксплуатационных характеристик БКУ.

Большинство реализуемых в проекте новшеств можно отнести к категории так называемых COTS-решений, COTS-продуктов (Commercial Off-The-Shelf – коммерческие, готовые к использованию) [1]. COTS-подход заключается в использовании при разработке систем военного или космического назначения

открытых технологий, многократно использованных в коммерческих приложениях, а поэтому надежных и дешевых.

При инициализации проекта было принято решение использовать только открытые продукты и технологии. Это касается и аппаратных решений и программного обеспечения. К числу основных открытых решений, принятых в проекте, следует отнести:

- использование только стандартизированных интерфейсов и сетей: SpaceWire, AMBA;
- использование только открытых сложнофункциональных блоков (IP-блоков): LEON 3, SpaceWireLight;
- использование только открытых операционных систем: RTEMS;
- использование открытых стандартов телеуправления/ телеметрии: соответствующие стандарты Европейского космического агентства Packet Telecommand Standard ESA PSS-04-107 и Telecommand Decoder Specification ESA PSS-04-151 [2; 3].

Основной элементной базой реализации основных устройств проекта были определены программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС). Данное решение приводит к снижению габаритов, массы и энергопотреблению устройств. Часть устройств, требующих повышенной функциональной гибкости, принято реализовать в виде «систем-на-кристалле» [4].

*Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» № П1032 от 27.05.2010.