

УДК 681.3:629.7

В.Х. Ханов

Сетевые технологии для бортовых систем космического аппарата: опыт разработки

Дан обзор проведенных разработок в области реализации сетевых технологий для бортовых систем космического аппарата. Приведены сведения по основным проведенным разработкам. Представлены результаты разработки резервируемой сетевой архитектуры бортового комплекса управления, маршрутизирующего коммутатора SpaceWire, аппаратного контроллера протокола RMAP. Определены варианты создания сетевой архитектуры и направления дальнейших исследований и разработок.

Ключевые слова: SpaceWire, сетевая архитектура, малые космические аппараты.

Сетевые технологии для использования в космической аппаратуре. Сетевые технологии, получившие повсеместное распространение во всех сферах жизни человечества, тем не менее, довольно трудно внедряются в космическое приборостроение. Оказалось, что «земные» сетевые технологии, отличающиеся полнотой областей применения, не отвечают требованиям космического электронного приборостроения к простоте реализации, надежности, низкому энергопотреблению. Специализированные интерфейсы, несколько десятков лет назад специально разработанные для авиакосмического применения, например MIL-STD-1533 [1], не позволяют создать сложноструктурированные сети и к тому же отличаются невысокой скоростью. Ситуация начала изменяться с появлением сетевой технологии SpaceWire, специально разработанной для космического применения под руководством Европейского космического агентства (ESA). На сегодняшний день технология SpaceWire (SpW) отвечает всем требованиям для эксплуатации в составе бортовых космических систем, поэтому она быстро получила распространение в зарубежной космической практике.

В России также проводятся активные работы по внедрению SpW. И хотя космических миссий с применением SpW пока нет, большинство ведущих отечественных разработчиков бортовых космических систем включают SpW в свои разработки. В данной статье приведен обзор некоторых проведенных исследований и разработок в области SpW в лаборатории космического электронного приборостроения СибГАУ.

Постановка задачи. Сетевая идеология построения космических систем уже давно развивается за рубежом. Координатором этого процесса является Международный консультативный комитет по космическим информационным системам (CCSDS). Он рассматривает все информационные процессы взаимодействия наземных и бортовых систем как интеграцию сетевых уровней, подобно модели OSI. ESA, следуя руководящим документам CCSDS, разработало в начале 2000-х годов стандарт SpaceWire ECSS-E-ST-50-12C [2] для построения бортовой сети космического аппарата (КА). В настоящее время стандарт SpaceWire используют не только предприятия ESA, но и США (NASA), Японии (JASA), Китая. В мире насчитывается более 20 успешных космических миссий, в которых использовался SpW.

В Роскосмосе создана рабочая группа по внедрению стандарта SpW. Уже несколько лет ожидается первая версия российского SpW стандарта. Однако до сих пор в России нет ни одного КА, ни полномасштабных прототипов космических систем с применением SpW. Объясняется это высокой консервативностью отечественной аэрокосмической отрасли при внедрении данной технологии. К основным причинам этой ситуации можно отнести:

– существенные отличия технологии SpW от применяемых в настоящее время на КА централизованных, аппаратно-резервируемых структур со сложной системой связей на базе нескольких информационных интерфейсов. Количество требуемых изменений настолько велико, что связанные с внедрением сетевой технологией высокие технические риски выступают в качестве главного сдерживающего фактора;

– отсутствие положительных примеров апробирования технологии SpW в отечественных космических системах. В настоящее время трудно ожидать, что в России технология SpW сразу будет

использована на большом КА. Скорее всего, отечественные разработки в области SpW впервые будут использованы на малых КА (МКА);

– отставание в создании отечественной электронной компонентной базы (ЭКБ) SpW. Номенклатура отечественной ЭКБ весьма ограничена. Нет сообщений об ее апробировании в космических миссиях.

Учитывая приведенные обстоятельства, общая задача исследований в области SpW сформулирована следующим образом: на примере МКА отработать и продемонстрировать на практике основные технические решения по созданию бортовых систем космического аппарата с использованием SpW, в том числе резервируемую сетевую архитектуру бортового комплекса управления (БКУ), варианты создания сетевой архитектуры, маршрутизирующий коммутатор SpW, аппаратный контроллер протокола RMAP. В качестве элементной базы реализации использовать перепрограммируемые FPGA ПЛИС, применяемые СФ-блоки должны быть открытыми.

Сетевая резервируемая архитектура бортового комплекса управления. Особенностью сетевой архитектуры является создание инфраструктуры передачи данных, позволяющей легко дублировать основные и инфраструктурные компоненты сети, иметь несколько альтернативных путей передачи данных, масштабировать или модифицировать сеть под имеющееся оборудование на борту КА [3].

За основу в качестве базовой взята топология типа «звезда» с быстродействующим коммутатором (маршрутизирующим коммутатором в случае технологии SpW) в качестве центрального узла. Как наиболее вероятный кандидат на сетевую архитектуру БКУ для МКА определена топология «двойная звезда», представленная на рис. 1.

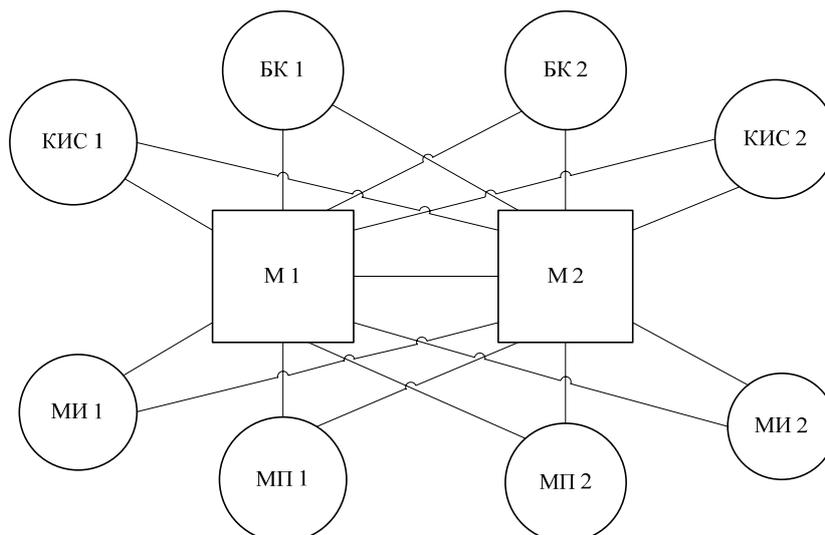


Рис. 1. Сетевая резервируемая архитектура БКУ

Сетевая архитектура предполагает использование в качестве инфраструктурных компонентов «связку» двух маршрутизаторов (М), один из которых является активным, другой находится в «холодном» резерве. Маршрутизаторы связаны отдельным физическим линком. Для повышения надежности связь маршрутизаторов может обеспечиваться 2 физическими линками. К каждому маршрутизатору подключается свой полукомплект устройств, составляющих БКУ. Кроме того, каждое устройство из одного полукомплекта подключается к маршрутизатору другого полукомплекта. В текущий момент времени один полукомплект находится в активном режиме, другой – в «холодном» резерве. При отказе устройства из одного полукомплекта автоматически включается аналогичное устройство из другого полукомплекта.

Рассмотренная архитектура отличается простотой реализации механизмов резервирования и отвечает современным тенденциям в развитии космического приборостроения. Последние исследования показали, что аппаратура, находящаяся в «горячем» резерве, в большей степени подвержена отказам по накопленной дозе радиации, чем находящаяся в «холодном» резерве. Поэтому в настоящее время производители КА, учитывая современный уровень надежности ЭКБ, в большей степени отдают предпочтение «холодному» резерву относительного «горячего».

Рассмотренную сетевую архитектуру можно определить как наиболее оптимальную для МКА, имеющего небольшие значения для срока активного существования (САС) КА (от 2 до 5 лет). Он обеспечивает достаточную для МКА надежность при приемлемом уровне аппаратного резервирования. Для аппаратов со сроком САС более 5 лет представленная архитектура хорошо масштабируется до более высоких значений кратности резервирования: 2 или 3. Для аппаратов с совсем малым САС (1–2 года) и малым бюджетом разработки от второго маршрутизатора и резервного полуконспекта можно отказаться.

Маршрутизирующий коммутатор SpaceWire. Для построения разветвленных сетей SpaceWire используются маршрутизирующие коммутаторы. В настоящее время существует несколько различных реализаций коммутаторов SpW, выполненных в виде законченных микросхем или конфигурируемых СФ-блоков. Но применение этих решений в небольшом проекте затруднено из-за их высокой стоимости, к тому же не все реализации поддерживают такие функции, как адаптивная маршрутизация и широковещательные пакеты. Поэтому было решено создать свою реализацию СФ-блока коммутатора SpW.

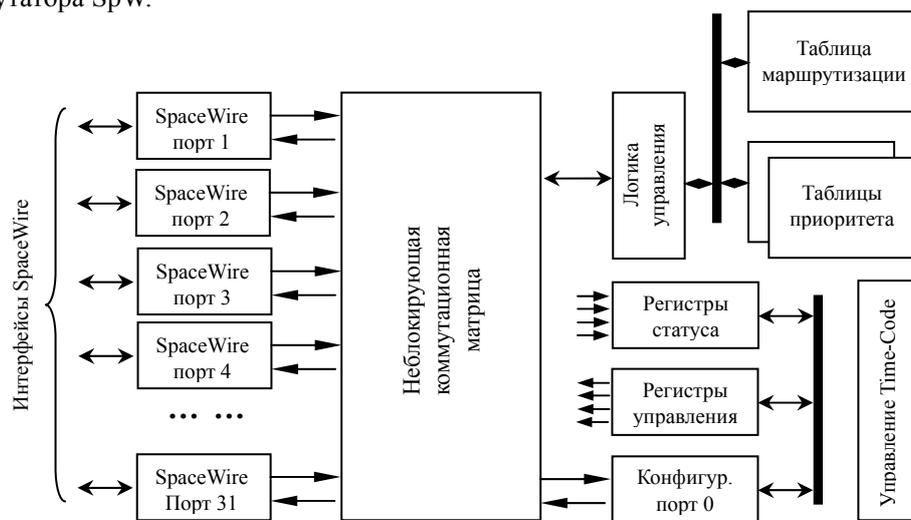


Рис. 2. Структурная схема маршрутизирующего коммутатора SpaceWire

На рис. 2 представлена структурная схема коммутатора с настраиваемым количеством портов SpW от 2 до 31. Все порты соединяются друг с другом с помощью неблокирующей коммутационной матрицы, которая позволяет установить прямой канал между ними. Причем уже установленные соединения не препятствуют созданию новых, если коммутируемые порты свободны.

Для коммутации пакетов с логической адресацией используется таблица маршрутизации и две таблицы приоритетов, доступ к которым производится последовательно с учетом приоритета запрашивающего порта (чем меньше номер порта, тем выше его приоритет). Это позволяет иметь только одну копию таблицы маршрутизации, но поскольку на определение адреса порта уходит всего 3 системных такта, то на производительность это существенно не влияет. Две таблицы приоритетов позволяют реализовать 3 уровня приоритета для каждого порта, что используется при адаптивной маршрутизации.

Реализованный алгоритм адаптивной маршрутизации имеет установку, разрешающую или запрещающую использовать порты с наименьшим приоритетом в случае, если имеются активные занятые порты с высоким приоритетом. В общем случае из таблицы маршрутизации будет выбран активный незанятый порт с наивысшим приоритетом (при нескольких свободных портах одного приоритета будет выбран с наименьшим номером). Использование регионально-логической адресации предусматривает необходимость удаления первого байта пересылаемого пакета. Для этого используется регистр, в котором устанавливаются номера региональных портов.

Дополнительно SpW-коммутатор поддерживает функцию широковещательного распространения пакета по сети. Эта функция может быть установлена для одного или нескольких логических адресов. При приходе пакета он будет отправлен на все порты, указанные в таблице маршрутизации для данного логического адреса.

Для конфигурирования используется внутренний нулевой порт, который поддерживает протокол RMAP в соответствии со стандартом ECSS-E-ST-50-52C [4]. RMAP позволяет читать и записывать данные непосредственно в регистры коммутатора.

Коммутатор позволяет собирать статусную информацию о количестве ошибок, связанных с ошибками маршрутизации пакета, превышением времени ожидания порта, разрывами SpW соединения. Кроме того, каждый порт имеет свой статусный регистр, в котором отражается более детальная информация о его состоянии.

Разработанный СФ-блок маршрутизирующего коммутатора SpW был использован в нескольких проектах, демонстрирующих разные варианты реализации сетевой архитектуры для МКА.

Аппаратный контроллер протокола RMAP. Протокол RMAP является протоколом для передачи служебных и информационных пакетов для конфигурации и взаимодействия сетевых устройств в сети SpW. Аппаратный в виде СФ-блока контроллер протокола RMAP позволяет упростить процедуры взаимодействия по данному протоколу узлов сети SpaceWire – бортовых систем КА.

RMAP-контроллер спроектирован как СФ-блок для включения в проекты типа система на кристалле с помощью внутрисистемной шины AMBA 2.0. Структура RMAP-контроллера показана на рис. 3.

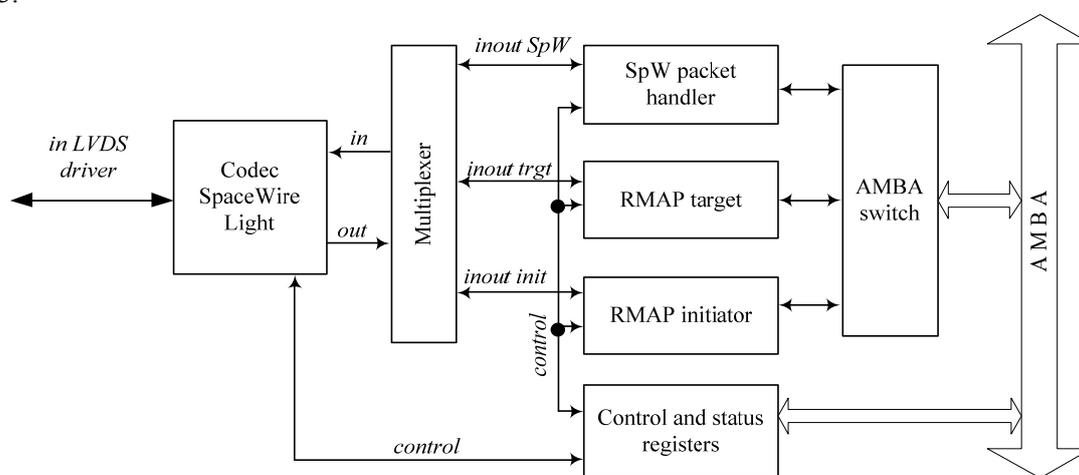


Рис. 3. Структура RMAP-контроллера

Входные и выходные сигналы присоединяются к драйверу LVDS физического уровня сети SpW. В качестве кодека сети SpaceWire использован открытый свободно распространяемый СФ-блок SpW Light [5]. RMAP-контроллер предназначен не только для обработки RMAP-пакетов, но и обычных пакетов сети SpW с помощью блока обработчика SpW-пакетов. Обработчик RMAP-пакетов состоит из блока приемника RMAP-target и блока передатчика RMAP-initiator. Переключение данных, поступающих из кодека SpW Light или в кодек SpW Light, осуществляется с помощью блока мультиплексора. Управление работой RMAP-контроллера осуществляется с помощью блока управляющих и статусных регистров.

По завершении верификационных испытаний СФ-блок контроллера RMAP будет использован в нескольких устройствах бортовой аппаратуры для малых и полноразмерных КА.

Варианты реализации сетевой архитектуры для малых космических аппаратов. Практические исследования заключались в реализации двух вариантов исполнения сетевой архитектуры для МКА, имеющих условные названия – сосредоточенная и распределенная.

В распределенной архитектуре устройства сети связаны традиционным способом – посредством кабельной сети. Сосредоточенная архитектура представляет собой моноблок, в котором взаимодействие составляющих устройств осуществляется не с помощью кабельной сети, а посредством межплатных разъемов. Обе архитектуры могут представлять интерес для разных групп заказчиков, тяготеющих к различным принципам построения бортовых систем. На рис. 4–5 представлен пример сосредоточенной сетевой архитектуры; на рис. 6 – пример распределенной архитектуры.

Первый пример является полнофункциональным бортовым комплексом управления (БКУ) для малого космического аппарата с резервируемой сетевой архитектурой, соответствующей схеме на рис. 1.

БКУ состоит из двух полукомплектов. Устройствами, входящими в каждый полукомплект, являются:

- модуль бортового компьютера, реализующий основные вычислительные и управляющие действия на борту МКА; в качестве процессора использован софт-процессор LEON 3, встраиваемый в ПЛИС типа flash-FPGA Actel;

- модуль низкочастотной части командно-измерительной системы, предназначенный, с одной стороны, для сбора телеметрических данных от систем КА, преобразования их в телеметрические пакеты и передачи пакетов в высокочастотную часть командно-измерительной системы (ВЧ КИС) для их передачи по радиоканалу; с другой стороны, для приема от ВЧ КИС телекоманд управления, их дешифрации и передачи по адресуемым системам КА, в основном в БК;

- модуль преобразования интерфейсов имеет чисто технологическую функцию; он предназначен для преобразования некоторого множества интерфейсов (RS232, CAN и др.), используемых системами космического аппарата, к интерфейсу SpW; кроме того, он может принимать аналоговые сигналы с датчиков и передавать сигналы на исполнительные устройства (ИУ);

- модуль питания предназначен для стабилизации напряжения, поступающего в БКУ от внешней бортовой питающей сети.

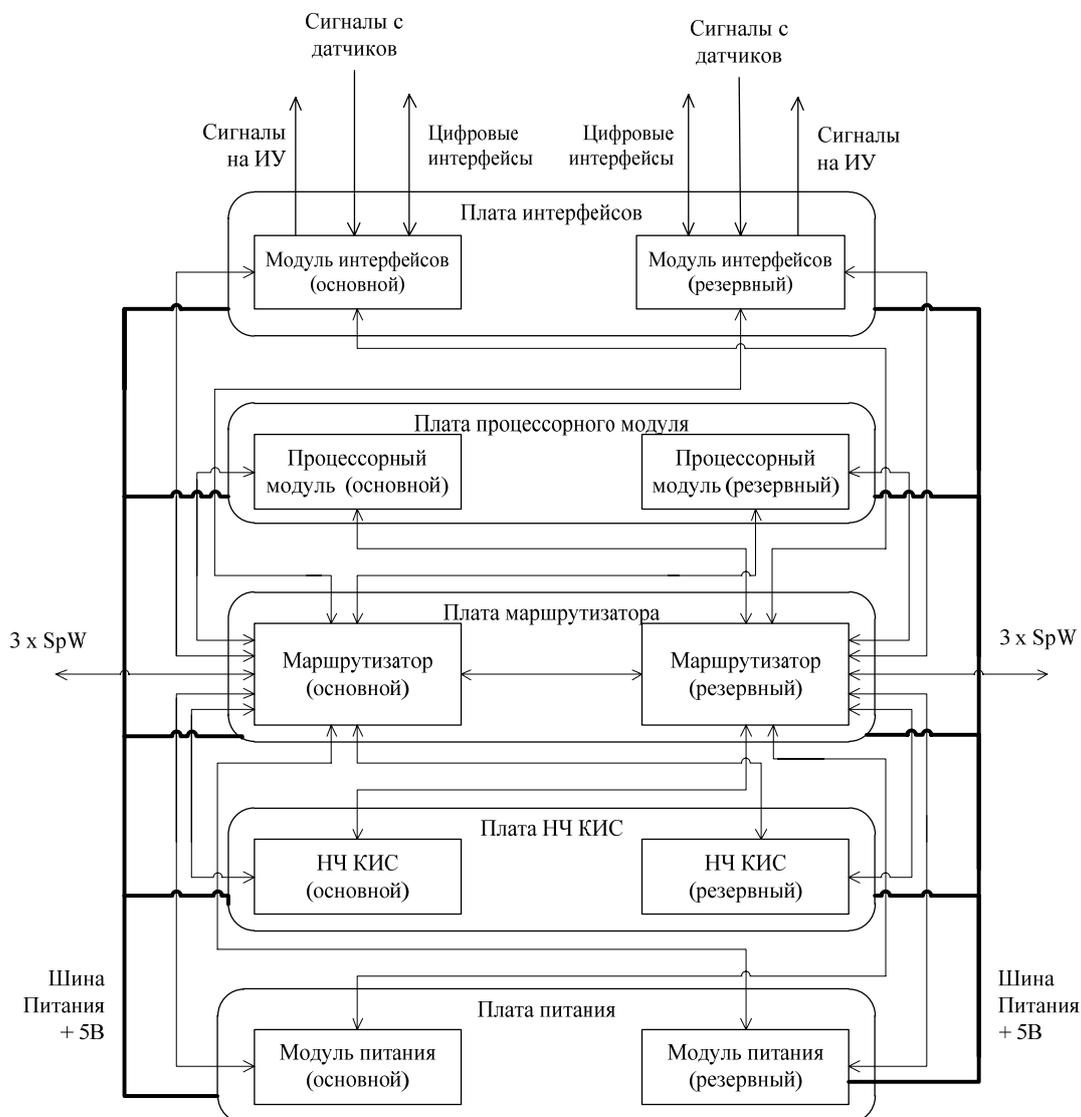


Рис. 4. Пример сосредоточенной сетевой архитектуры: структурная схема

Пример, представленный на рис. 6, является аппаратурой информационного обмена (АИО) для создания бортовых систем, распределенных по пространству МКА. АИО предназначена для создания сетевой инфраструктуры для различных подсистем МКА как служебных, так и подсистем по-

лезной нагрузки. Таким образом, АИО позволяет создавать структурированную по подсистемам (U-блокам) МКА бортовую сеть. АИО состоит из следующих устройств:

- маршрутизирующего коммутатора SpW на 4 внешних порта с функцией коммутации питания подключаемых к коммутатору устройств;
- однокристалльного процессорного модуля (бортового компьютера), состоящего из процессора Leon 3, встроенного коммутатора SpW с 4 внешними портами, интерфейсами CAN и Ethernet в одной ПЛИС;
- модуля расширения интерфейсов (многофункционального моста), SpW \leftrightarrow CAN, SpW \leftrightarrow SPI, SpW \leftrightarrow I2C.

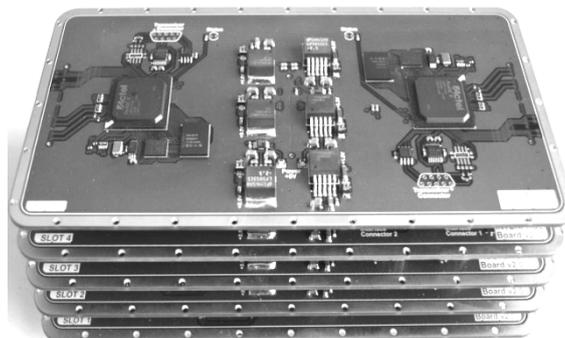


Рис. 5. Пример сосредоточенной сетевой архитектуры: внешний вид

АИО предназначена для МКА, не рассчитанных на длительные сроки активного существования. Поэтому резервирование устройств, составляющих АИО, не предусмотрено. Чтобы устройства АИО имели экстремально низкие размеры, часть устройств имеет мезонинную конструкцию.

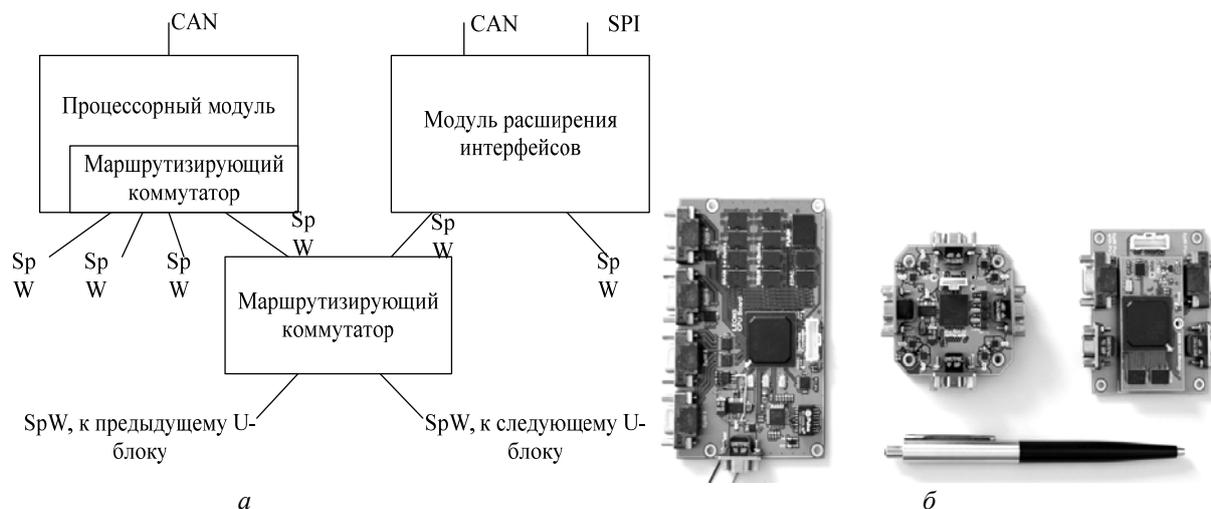


Рис. 6. Пример распределенной сетевой архитектуры: *а* – структурная схема; *б* – внешний вид устройств

Рассмотренные примеры исполнения сетевой архитектуры на основе SpW были реализованы в виде опытных образцов; работы по верификации проектов продолжаются. АИО к настоящему времени имеет летную реализацию для одного из отечественных МКА.

Направления дальнейших исследований и разработок. Дальнейшие работы в области сетевых космических технологий можно разделить на две группы: ближнесрочные и дальнесрочные. В ближнесрочной перспективе, учитывая накопленный опыт и переход разработок к практическому применению, требуется провести реинжиниринг разработанных СФ-блоков, а также продолжить работы по созданию комплексной системы функциональной верификации. В частности, уже сейчас начаты работы по созданию анализатора трафика (сниффера) сети SpW. Сниффер сети SpW, помимо других возможностей, будет внедрять одиночные ошибки в передаваемые по сети пакеты, что позволит отработать сбоеустойчивость устройств сети SpW к потерям данных вследствие неблагоприятных факторов космического пространства (ионизирующее излучение).

В отдаленной перспективе планируется разработка транспортного протокола передачи данных для структурированных сетей SpW. Система стандартов SpW не определяет транспортный уровень, поэтому разработчики космических систем вынуждены сами заниматься разработкой этого протокола. Известны несколько открытых спецификаций на протокол транспортного уровня, разработчиками которых являются известные зарубежные компании, занимающиеся сетью SpW. В России подобные работы также проводятся. Хотя сеть МКА имеет малый масштаб относительно полноразмерных КА, накопленный опыт показывает, что и для МКА простой и надежный протокол транспортного уровня необходим.

Заключение. В результате проведенных работ проведены исследования и разработки по созданию инфраструктурных устройств для сетевой резервируемой архитектуры взаимодействия бортовой аппаратуры малого космического аппарата на основе сетевой технологии SpaceWire.

Литература

1. MIL-STD-1533. Tutorial [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.aim-online.com/pdf/OVW1553.PDF>, свободный (дата обращения: 24.05.2014).
2. ECSSE-ST-50-12C SpaceWire – Links, nodes, routers and networks. – European Cooperation for Space Standardization (ECSS), 2008 – 129 с.
3. Сетевая архитектура сопряжения комплексов бортового оборудования космического аппарата / В.Х. Ханов, А.В. Шахматов, М.Ю. Вергазов, С.А. Чекмарев // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. – 2012. – № 4 (44). – С. 148–151.
4. ECSSE-ST-50-52C SpaceWire – Remote memory access protocol. – European Cooperation for Space Standardization (ECSS), 2010. – 109 с.
5. Joris van Rantwijk, SpaceWire Light v20110709 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://opencores.org/project,spacewire_light, свободный (дата обращения: 24.05.2014).

Ханов Владислав Ханифович

Доцент каф. безопасности информационных технологий

Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М.Ф. Решетнёва, Красноярск

Тел.: 8 (391) 2-62-18-47

Эл. почта: khvkh@sibsau.ru

Khanov V.Kh.

Network technologies for on-board systems spacecraft: development experience

A review conducted by developments in the implementation of network technologies for on-board systems of the spacecraft. Provides information on key developments conducted. Presents the results of a redundant network architecture onboard control complex, routing switch SpaceWire, RMAP controller. Identified options for creating network architecture and directions for further research and development.

Keywords: paceWire, network architecture, micro-spacecraft.