

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

СЕТЕВАЯ АРХИТЕКТУРА СОПРЯЖЕНИЯ КОМПЛЕКСОВ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Описывается сетевая архитектура, предназначенная для сопряжения комплексов бортового оборудования космического аппарата, а также текущие результаты работ по созданию ее прототипа. Целью разработки данной архитектуры является получение таких преимуществ, как повышенная надежность с приемлемыми затратами, хорошая масштабируемость, малое количество кабельных соединений, упрощение обслуживания.

Ключевые слова: сетевая архитектура, комплексы бортового оборудования, космические аппараты.

Традиционные подходы к организации информационно-логического взаимодействия комплексов бортового оборудования (КБО) космического аппарата (КА) в настоящее время не могут коренным образом повлиять на решение основных задач космического приборостроения:

- добиться высокой надежности при приемлемом уровне затрат аппаратного резервирования;
- выдержать жесткие требования к массогабаритным показателям и потребляемой мощности;
- добиться унификации интерфейсов и каналов передачи данных.

Возможным решением могла бы стать сетевая архитектура, широко применяемая в системах управления не космического назначения. Однако сетевая архитектура не нашла широкого распространения. Сдерживающим фактором являлось отсутствие современной сетевой «космической» технологии.

Долгие годы и даже десятилетия основным интерфейсом на борту КА оставался магистральный последовательный интерфейс в соответствии со стандартом MIL-STD-1533 (отечественные аналоги ГОСТ 26765.52–87, ГОСТ Р 52070–2003) [1]. К моменту своего появления (1973 г.) сетевые технологии еще только проходили стадию своего появления, поэтому, конечно же, он не отвечает современным требованиям. Он имеет не высокую скорость, только ма-

гистральную топологию, низкую масштабируемость, централизованное управление; для него отсутствуют высокоразвитые протоколы верхних уровней.

Понимание необходимости современной сетевой технологии сложилось уже давно, поэтому в 2000 годах по инициативе Европейского космического агентства (ESA) был разработан стандарт SpaceWire [2]. С его появлением у разработчиков космических систем стало возможным реализовать сетевую архитектуру на борту КА.

Особенностью сетевой архитектуры является создание инфраструктуры передачи данных, позволяющей легко дублировать основные и инфраструктурные компоненты, иметь несколько альтернативных путей передачи данных, масштабировать или модифицировать сеть под имеющееся оборудование на борту КА.

В качестве базовой топологии могут быть использованы различные модификации соединения типа «звезда» с быстродействующим коммутатором (маршрутизирующим коммутатором в случае технологии SpaceWire) в качестве центрального узла [3].

Наиболее вероятными кандидатами представляются топологии «двойная звезда», «двойная-двойная звезда» и «тройная звезда» (рис. 1–3), представляющие различные варианты архитектурной надежности.

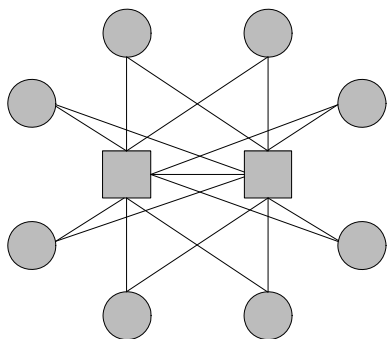


Рис. 1. Архитектура «двойная звезда»

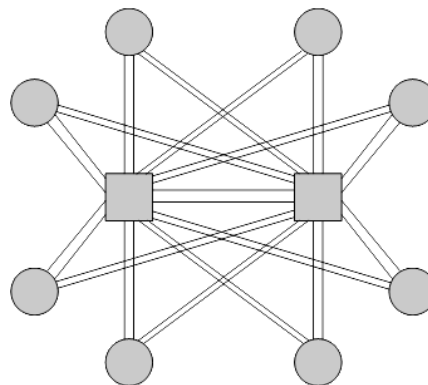


Рис. 2. Архитектура «двойная-двойная звезда»

* Работа выполнена в рамках реализации конкурса научно-технических исследований, разработок, инновационных программ и проектов для обеспечения конкурентных преимуществ экономики Красноярского края (Дополнительное соглашение от 05.07.2012 г. № 03/12 к Соглашению № 5 от 06.08.2009 г.).

Квадратными блоками изображаются маршрутизирующие коммутаторы (далее – маршрутизаторы), являющиеся основой сетевой архитектуры, круглыми – узлы сети (КБО).

Архитектура «двойная звезда» состоит из двух связанных между собой маршрутизаторов и узлов, имеющих связи с каждым маршрутизатором. В архитектуре «двойная-двойная звезда» связи образуются двумя физическими каналами. В архитектуре «тройная звезда» используются три маршрутизатора, каждый из которых связан с каждым узлом сети. Очевидно, что каждый вариант топологии от первого к третьему повышает надежность информационного взаимодействия КБО, конкретный вариант определяется исходными данными на КА.

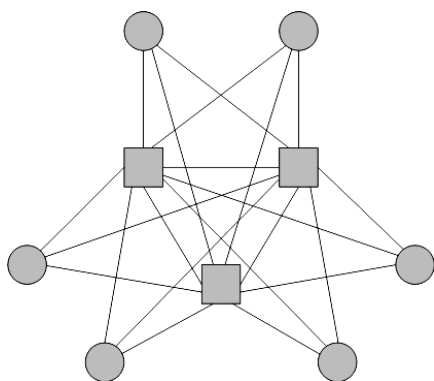


Рис. 3. Архитектура «тройная звезда»

Рассмотрим несколько практических примеров реализации сетевой архитектуры на основе технологии SpaceWire (далее – SpW).

Архитектура для малого КА (рис. 4) характеризуется непродолжительным временем активного существования, поэтому требования к архитектурной надежности не высокие.

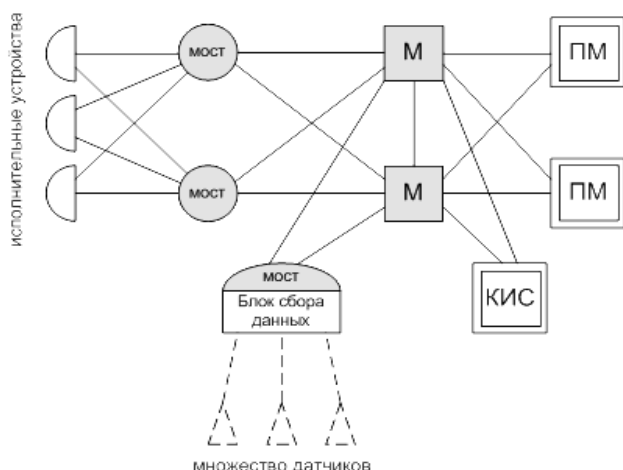


Рис. 4. Сетевая архитектура для малого КА

Системообразующими устройствами являются два маршрутизатора (М). Передача данных по сети инициируется только интеллектуальными блоками – процессорным модулем (ПМ) или контрольно-

измерительной системой (КИС). Они посылают запросы другим устройствам и получают ответы на них.

Стандарт SpW поддерживает возможность применения избыточных линий связи для резервирования путей доставки данных. Резервировать пути доставки данных можно двумя способами:

Способ 1. Каждый мост (устройство, преобразующее данные и интерфейсы передачи данных к виду для подключения к SpW) при доставке данных до маршрутизатора (ов) выбирает рабочий незанятый линк (канал SpW). Если их несколько, то используются приоритеты.

Способ 2. Если устройство не получает ответ на запрос, то оно посылает повторный запрос по другому пути.

Таким образом, технология SpW позволяет устройствам сети отслеживать состояния линков, доставляя тем самым данные по работоспособным каналам связи. Это же свойство позволяет легко организовать мониторинг состояния сети, что облегчает ее удаленное обслуживание.

Для малых КА отмеченные выше преимущества сетевой архитектуры не дают существенного эффекта, например, снижения количества кабельных соединений. Поэтому использование на малых КА сети SpW является экспериментальной отработкой технологий сетевого информационно-управляющего взаимодействия КБО для дальнейшего использования на КА средних и больших классов.

Сетевая архитектура КА, повторяющая в целом, но на новой технологической основе традиционный подход к резервированию, является вариантом топологии «двойной звезды» с дублированным составом оборудования (рис. 5). Она состоит из двух полукомплектов. Один полукомплект является активным, другой находится в резерве (холодном или горячем). При отказе одного устройства из активного полукомплекта нет необходимости полностью переключаться на резервный полукомплект. Достаточно из резервного полукомплекта активизировать устройство, отказавшее в первом полукомплекте.

Наличие резервных модулей, объединенных сетью SpW, позволяет легко реализовать важную функцию обеспечения надежности функционирования КБО – их поочередное переключение в холодный резерв для сброса накопленной дозы радиации [4].

С целью демонстрации возможностей сетевой архитектуры на базе технологии SpW был реализован демонстрационный пример (рис. 6).

Пример состоит из двух частей: модели наземной КИС и модели бортового комплекса управления (БКУ), модели бортовой КИС, модели исполнительных устройств.

Модель наземной КИС включает ноутбук, оборудованный каналом WiFi. Канал WiFi имитирует радиоканал телеметрии и телекоманд. Программное обеспечение, установленное на ноутбуке, позволяет отображать принимаемую через WiFi-канал телеметрию и задавать команды телеуправления для БКУ и исполнительных устройств.

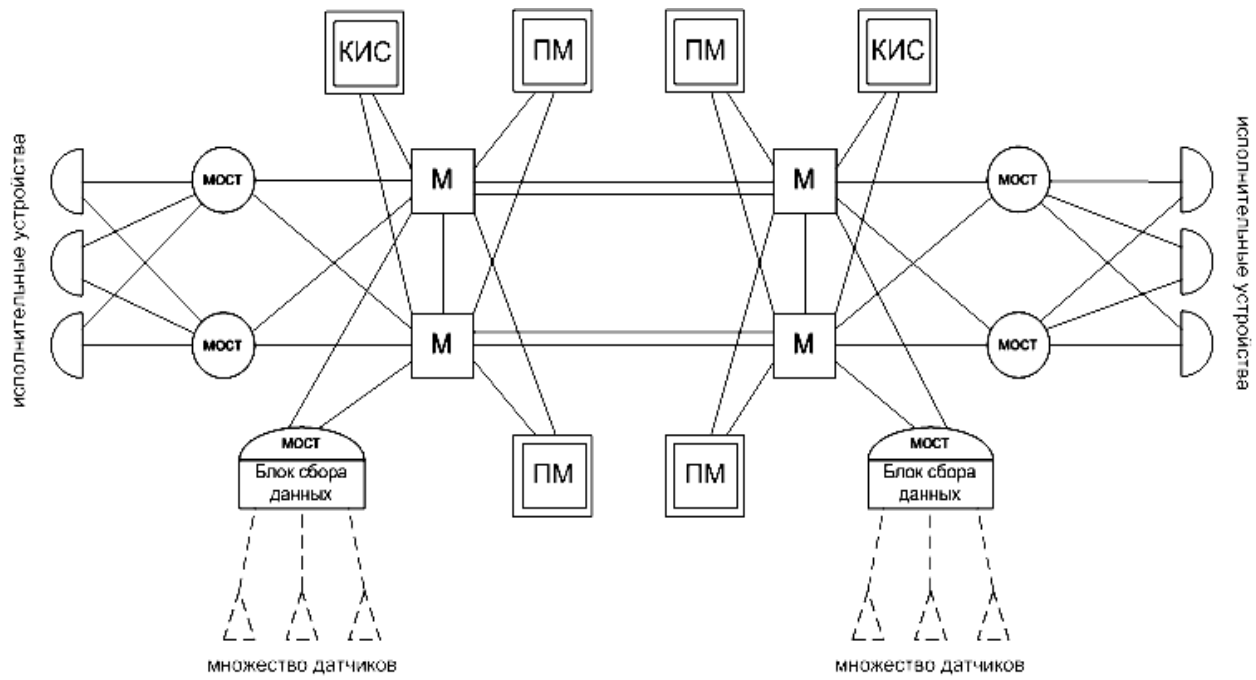


Рис. 5. Вариант сетевой архитектуры на базе SpW

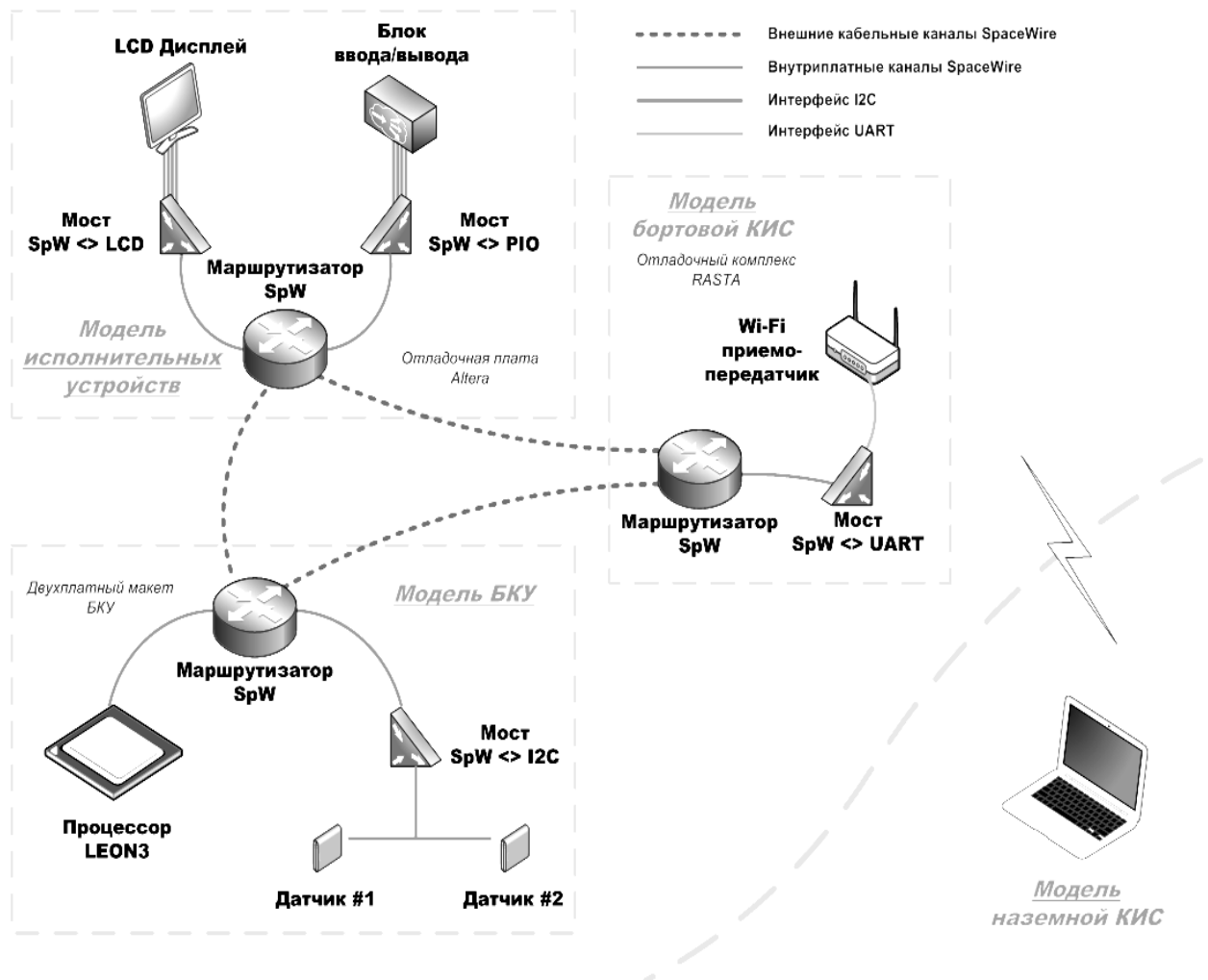


Рис. 6. Демонстрационный пример сетевой архитектуры на базе SpW

Макет бортового КИС состоит из приемопередатчика WiFi и реализованных на оборудовании RASTA маршрутизатора SpW на 4 порта и моста SpW $\leftrightarrow$ UART.

Модель исполнительных устройств выполнена на отладочной плате Altera Terasic v.1.2. Плата представляет собой устройство для разработки систем на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). В данном варианте на базе данной платы выполнены маршрутизатор SpW на 4 порта, мосты SpW $\leftrightarrow$ PIO и SpW $\leftrightarrow$ LCD. Параллельный интерфейс PIO присоединен к блоку светодиодов. Включение/выключение светодиодов сигнализирует о фактах прохождения команд, посылаемых с ноутбука модели наземной КИС.

LCD служит для отображения телеметрии, принимаемой с модели БКУ. Параллельно телеметрия через модель бортовой КИС и WiFi пересылается на модель наземной КИС и отображается на экране ноутбука.

Двухплатный макет БКУ состоит из 4-х портового маршрутизатора и БК на базе процессора LEON3. Каждая плата имеет датчик напряжения, датчик тока, датчик температуры, которые как данные телеметрии через мост SpW $\leftrightarrow$ I2C и маршрутизатор пересылаются бортовым компьютером на модель наземной КИС для отображения на экране ноутбука.

Бортовой компьютер работает под управлением операционной системы RTEMS. Передача данных осуществляется с помощью протокола RMAP сети SpW [5].

Для работы демонстрационного примера произведены следующие работы:

- адаптирован под спецификацию демонстрационного примера IP-блок кода SpW Light;
- разработан 4-портовый маршрутизатор SpW, существующий как в виде IP-блока, так и законченного устройства;
- разработан аппаратный мост SpW $\leftrightarrow$ I2C;
- разработан аппаратный мост SpW $\leftrightarrow$ PIO;
- разработан аппаратный кодек RMAP Target;
- написан программный драйвер RMAP Initiator;
- написан драйвер кода SpW Light для операционной системы RTEMS.

Разработанный пример демонстрирует:

- сетевую архитектуру построения информационной платформы КА. Данный вариант соответствует топологии «тройная звезда» Кроме того, демонстрируется передача данных с помощью как внутриплат-

ных и межплатных каналов, так и внешних кабельных соединений SpW;

- резервирование маршрутов передачи данных. Данное свойство экспериментально проверяется «горячим» отключением любого одного линка SpW, при этом работоспособность системы сохранялась: команды с модели наземной КИС принимались бортовым сегментом, а телеметрическая информация отображалась на экране ноутбука;

- работу устройств в одной сети с разными скоростями. В рассмотренном примере два маршрутизатора обеспечивали на своих портах скорость, равную 30 Мбит/с, а один – скорость, составляющую 25 Мбит/с. В полном соответствии с [2] сеть оставалась в работоспособном состоянии;

- сбор телеметрической информации по сети SpW;
- передачу команд управления и получение квитанций об их выполнении в соответствии с протоколом RMAP;

- взаимодействие между моделями бортовой и наземной КИС по радиоканалу.

Таким образом, в результате проведенных работ определены наиболее вероятные архитектуры сопряжения КБО, рассмотрены варианты сети КА, создан демонстрационный пример сетевой архитектуры на базе SpW, экспериментами показаны важные достоинства как сетевой архитектуры, так и стандарта SpW.

Библиографические ссылки

1. MIL-STD-1553B : Interface Standard for Digital Time Division Command / Response Multiplex Data Bus. Department of Defense, 1975.
2. ECSSE-ST-50-12C SpaceWire – Links, nodes, routers and networks. European Cooperation for Space Standardization (ECSS), 2008.
3. Сетевая архитектура бортового комплекса управления / Д. А. Никитин, В. Х. Ханов, М. Ю. Вергазов, С. А. Чекмарев // Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения (УКИ-12) : тр. рос. конф. М. : ИПУ РАН, 2012. С. 1539–1546.
4. Гобчанский О. П., Попов В. Д., Николаев Ю. М. Повышение радиационной стойкости промышленных средств автоматики в составе бортовой аппаратуры // Современные технологии автоматизации. 2001. № 4. С. 36–40.
5. ECSSE-ST-50-52C SpaceWire – Remote memory access protocol. European Cooperation for Space Standardization (ECSS), 2010.

A. V. Shahmatov, M. Yu. Vergazov, S. A. Chekmaryov, V. Kh. Khanov

NETWORK ARCHITECTURE OF SPACECRAFT ON-BOARD EQUIPMENT MATING

This paper describes network architecture of spacecraft on-board equipment mating, as well as shows current results of its prototyping. The aim of the development of this architecture is to obtain following advantages: improved reliability at acceptable cost, good scalability, fewer quantity of cable links, simplified service.

Keywords: network architecture, on-board equipment complex, spacecrafts