

# СЕТЕВАЯ АРХИТЕКТУРА БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ

Никитин Д.А., Ханов В.Х., Вергазов М.Ю., Чекмарёв С.А.

Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М.Ф. Решетнёва,  
г. Красноярск

nikitin.bit@gmail.com, khvkh@mail.ru, wintel@bk.ru, factor259@rambler.ru

*Описывается сетевая архитектура, предлагаемая для использования при создании бортового комплекса управления малыми космическими аппаратами. Рассматриваются механизмы отказоустойчивости, связанные с использованием сетевой архитектуры. В конце приводятся текущие результаты работ по созданию прототипа БКУ, основанного на предлагаемой архитектуре.*

Ключевые слова: сетевая архитектура, бортовой комплекс управления, малые космические аппараты, ПЛИС, SpaceWire, LEON3.

## Введение

В статье описывается сетевая архитектура, предлагаемая для использования при создании бортового комплекса управления (БКУ) малыми космическими аппаратами (МКА), а также текущие результаты работ по созданию её прототипа.

Целью разработки данной архитектуры является получение БКУ со следующими преимуществами: повышенная надёжность с приемлемыми затратами, хорошая масштабируемость, малое количество кабельных соединений, упрощение обслуживания, современная элементная база.

## 1. Описание сетевой архитектуры

### 1.1. Основные принципы

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

В качестве базовой топологии могут быть использованы различные модификации соединения типа «звезда» с быстродействующим коммутатором в качестве центрального узла. Наиболее вероятными кандидатами представляются топологии «двойная звезда», «двойная-двойная звезда» и «тройная звезда» (см. рис. 1-3).

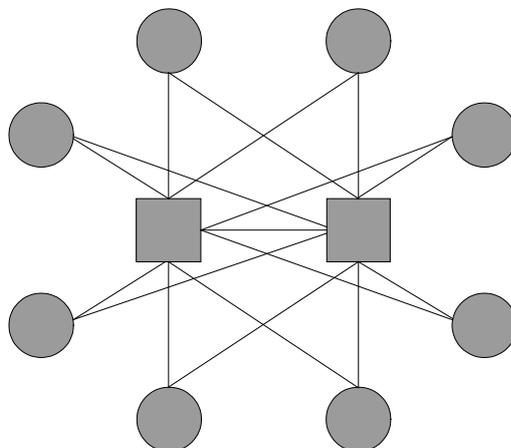
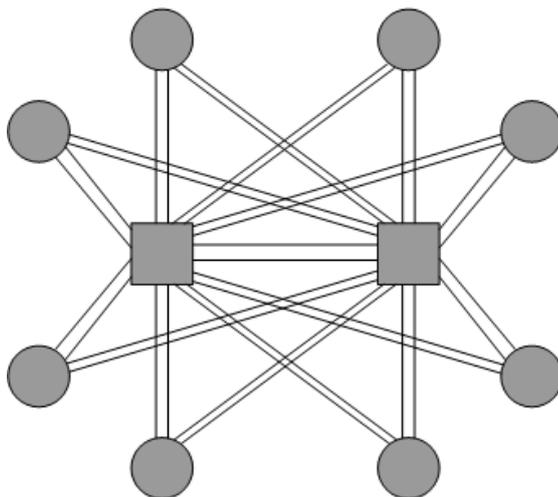
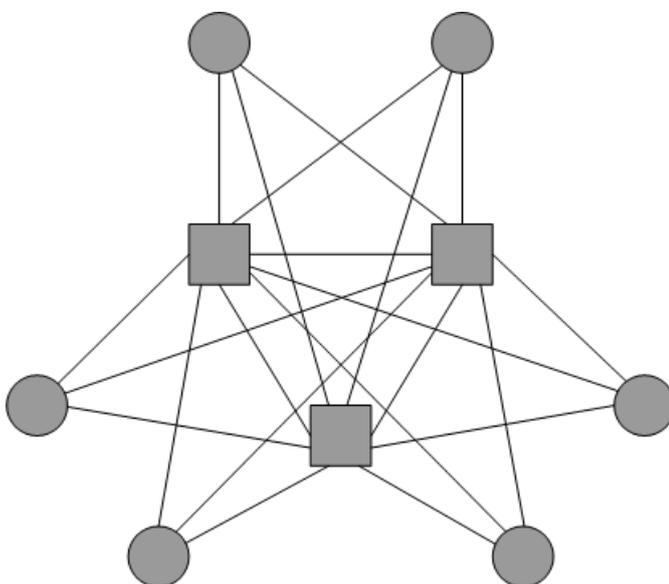


Рис. 1. Архитектура «двойная звезда»



*Рис. 2. Архитектура «двойная-двойная звезда»*



*Рис. 3. Архитектура «тройная звезда»*

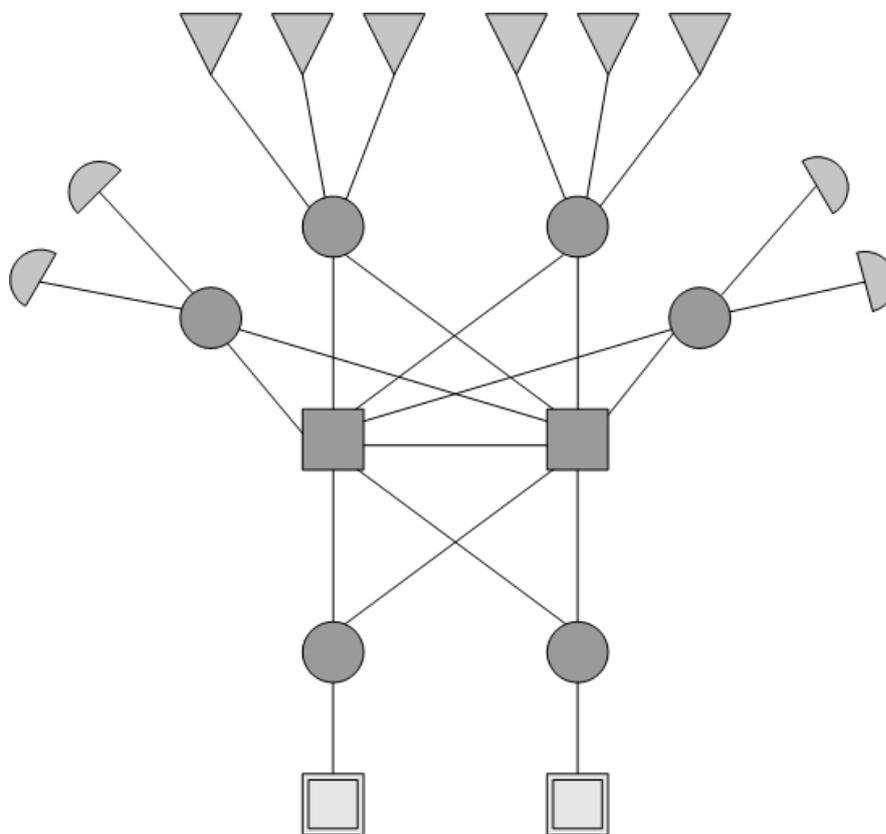
Квадратными блоками изображаются маршрутизаторы, являющиеся основой сетевой архитектуры. Основным транспортом внутри БКУ выбрана технология SpaceWire и маршрутизаторы имеют только такие интерфейсы. SpaceWire разработана с учётом применения в космосе и обладает рядом особенностей повышающих её надёжность и надёжность систем, построенных с её помощью. Опишем подробнее принцип построения самой бортовой сети.

Круглые блоки на схеме также имеют интерфейсы SpaceWire со стороны подключения к маршрутизаторам. Остальные интерфейсы могут отличаться. Данные блоки также как и маршрутизаторы играют роль передаточных звеньев в построении бортовой сети, но не выполняют интеллектуальной маршрутизации. Будем называть данные блоки коммутаторами. Каждый такой блок подключен к каждому маршрутизатору (по интерфейсу SpaceWire). Далее к ним подключаются все остальные блоки системы управления МКА. Все такие блоки можно разделить на три группы:

- 1) Блоки, которые только передают сигналы другим блокам. Это, как правило, разнообразные датчики. Назовем их блоками I типа и будем отображать на схемах блоками треугольной формы.

- 2) Блоки, которые только принимают сигналы от других блоков. Это различные исполнительные устройства: нагреватели, рулевые двигатели, устройства управления положением камер, антенн и др. Назовем их блоками II типа и будем отображать на схемах в виде блоков полукруглой формы.
- 3) Блоки, которые и принимают и передают сигналы. К ним можно отнести центральные вычислительные блоки, содержащие процессоры, выполняющие основные вычисления, а также блок для организации связи с Землей (передача телеметрии и других данных, прием команд и других данных). Назовем их блоками III типа и будем отображать на схемах блоками квадратной формы с двойными границами. Блок связи также может быть выполнен как совокупность блоков I и II типа. Кроме того, если есть отдельные блоки, выполняющие задачу хранения данных, то они также относятся к блокам III типа.

К каждому коммутатору подключаются только блоки одного типа. Подобрать оптимальное расположение и количество коммутаторов можно добиться высокой отказоустойчивости без значительного увеличения массы. А за счёт того, что основные соединительные блоки (маршрутизаторы и коммутаторы) реализуются на ПЛИС и выполняются в одноплатном виде, вес может даже уменьшиться. Таким образом, вся система аппаратуры МКА может быть изображена в виде следующей схемы.



*Рис. 4. Общая структура бортовой сети*

Рассмотрим по отдельности характер взаимодействия системы управления МКА с блоками различных типов.

Данные от блоков I типа, поступающие на коммутаторы просто дублируются ими на все свои выходы, то есть на все маршрутизаторы. Если сигналы от блока поступают не по соединению SpaceWire, коммутатором выполняется их конвертация в пакеты SpaceWire. Данные от таких блоков, скорее всего, будут передаваться каким-то блокам III типа. Для этого в пакете указывается соответствующий адрес.

Коммутаторы, к которым подключаются блоки II типа, отслеживают активность всех своих соединений ко всем маршрутизаторам. Когда по какому-то из них поступает пакет данных, коммутатор по адресу определяет, какому из блоков он предназначен и передает его дальше. При необходимости осуществляется конвертация сигналов в необходимый вид.

Блоки III типа – самые быстродействующие блоки в БКУ, поэтому они обязательно имеют интерфейсы SpaceWire. Данные блоки соединены только с коммутаторами SpaceWire и осуществляют обмен данными только с ними. По информации в поступившем пакете, они определяют, от какого из блоков он поступил. Для передачи сигнала управления какому-то из блоков II типа или передачи данных другому блоку III типа в передаваемом пакете указывается соответствующий адрес.

Стоит отдельно описать центральные вычислительные блоки. Данные блоки будут выполнены в виде интегральных схем, основным компонентом которых является современная ПЛИС с прошитым на ней процессором (окончательный выбор ПЛИС может быть сделан после формирования полных требований к БКУ).

Использование данного процессора позволяет запускать на нём полноценную UNIX-подобную операционную систему реального времени. Это упростит и удешевит написание программного обеспечения для БКУ.

### *1.2. Резервирование маршрутизаторов*

Центральные маршрутизаторы (2 или 3 штуки) дублируют друг друга. Один из них является активным и выполняет все функции маршрутизации. Другие маршрутизаторы могут в это время находиться в горячем или холодном резерве. Остальные блоки (в том числе и коммутаторы) не знают и ничего не должны знать о том, какой из маршрутизаторов в данный момент является активным. Все пакеты, которые коммутатор должен передать через маршрутизатор другому блоку, дублируются им на все маршрутизаторы. Активный маршрутизатор обрабатывает все поступающие пакеты. Пассивные маршрутизаторы игнорируют все пакеты, кроме служебных, необходимых для контроля целостности всей системы БКУ (об этом говорится ниже). Таким образом, передача данных будет осуществляться, даже если откажут все маршрутизаторы, кроме одного. Обработка маршрутизатором входящих пакетов заключается в том, что он определяет, какому устройству он предназначен, затем определяет, к какому коммутатору оно подключено и передает его дальше, при необходимости внося в него изменения.

Маршрутизаторы постоянно отслеживают доступность друг друга. Поясним это на примере двух маршрутизаторов. При запуске каждый из них пытается установить связь со вторым. После установления соединения оба маршрутизатора по очереди друг другу шлют служебные пакеты, которые позволяют отслеживать время отклика. Когда один из маршрутизаторов обнаруживает отсутствие ответа по данному соединению, это является признаком отказа или выключения второго маршрутизатора.

Если маршрутизатор, обнаруживший отказ второго, является основным, его режим работы остается прежним, но он начинает совершать периодические попытки восстановления соединения. Если маршрутизатор, обнаруживший отказ второго, является резервным, то через установленное время он пытается один раз установить с ним соединение. Если этого сделать не удалось, он берет на себя роль основного маршрутизатора (начинает обрабатывать и маршрутизировать входящие пакеты).

Смена роли маршрутизатора с резервного на основной и обратно может быть сопряжена с рядом необходимых действий (например, смена правил маршрутизации). Все эти действия прописываются в ПЗУ каждого маршрутизатора. Список действий модифицируется под конкретную систему.

Для надежности передачи пакетов, даже при внезапном отказе активного маршрутизатора, используются транзакции. Для этого перед обработкой каждого пакета маршрутизатор создает в списке транзакций соответствующую запись, а после завершения обработки запись удаляется. Данный список содержится в оперативной памяти. При переключении на другой маршрутизатор данный список должен быть обработан, а все незавершенные транзакции завершены. Для того чтобы второй маршрутизатор при выходе из резерва имел такой же актуальный список

даже в случае внезапного отказа основного сервера, содержимое аналогичного списка в резервном маршрутизаторе постоянно синхронизируется с рабочим списком (это производится, только если резервный маршрутизатор находится в горячем резерве). При штатном выключении маршрутизатора данная таблица сохраняется в энергонезависимой памяти, откуда считывается при включении. Это необходимо для корректной работы, когда остался всего один рабочий маршрутизатор.

Опыт использования космических аппаратов показывает, что полезно периодически на некоторое время выключать узлы БКУ, содержащие цифровую схемотехнику. Это увеличивает время наработки на отказ. Имея 2 или 3 маршрутизатора несложно организовать периодическую смену их режимов работы с активного на пассивный и обратно.

Если маршрутизаторов два, то маршрутизатор, находящийся в горячем резерве, может отключаться на время (при этом он считается находящимся в холодном резерве). Если маршрутизаторов три, то можно периодически менять их режимы работы, проводя через последовательность режимов: активный – в холодном резерве (выключенный) – в горячем резерве. При этом, выходя из холодного резерва в горячий, маршрутизатор, просто синхронизирует свою копию списка транзакций и остается в резерве.

### *1.3. Дублирование и слежение за целостностью путей передачи данных*

Дополнительно в данной архитектуре может отслеживаться не только работоспособность каждого из маршрутизаторов, но и целостность используемого в данный момент пути, по которому передаются сигналы (пакеты). Рассмотрим, как это может быть организовано. Структура БКУ фиксирована, и заранее известно от каких блоков к каким могут передаваться данные. Поэтому рассмотрим организацию данного механизма на паре блоков, которые должны обмениваться данными (рис. 5). Пусть верхний блок II типа должен передавать данные нижнему блоку I типа.

Коммутатор, к которому подключен блок II типа, соединяется дополнительным интерфейсом SpaceWire (линия 5) с другим (желательно ближайшим) коммутатором. При помощи специального протокола отслеживается целостность кольца 5-6-11-12-9. Пока целостность не нарушена по линии 5 передаются только служебные пакеты. Если обнаруживается нарушение целостности (неважно, в каком месте кольца), все пакеты от коммутатора 1 вместо маршрутизаторов начинают пересылаться на соседний коммутатор по линии 5, а далее – по обычным правилам. Например, путь 1-6-11-13 будет заменён на 1-5-8-11-13, 1-7-12-13 на 1-5-9-12-13, 3-8-11-13 на 3-5-6-11-13, 3-9-12-13 на 3-5-7-12-13. Как видно, при этом изменяется весь путь прохождения трафика между коммутаторами.

Если пакеты могут передаваться в обоих направлениях (то есть нижний блок – III типа), то можно и нижний коммутатор соединить дополнительным интерфейсом со вторым коммутатором. Остальные возможные варианты представлены на рис. 9. Так как данное резервирование путей увеличивает количество соединительных линий, интерфейсов и передаваемых служебных пакетов, можно таким образом зарезервировать только пути передачи трафика между важнейшими блоками.

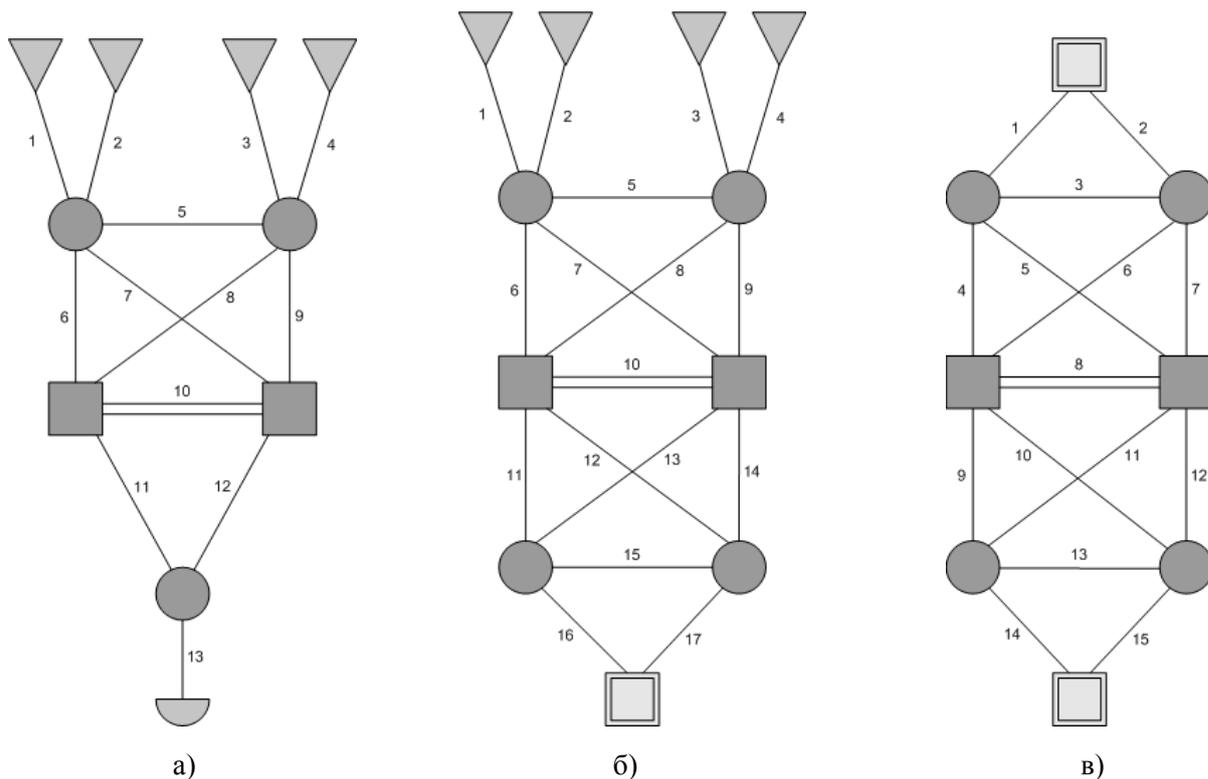


Рис. 5. Структура для дублирования каналов связи между блоками  
 а) I и II типа (отслеживается целостность кольца 5-6-11-12-9),  
 б) I и III типа (отслеживается целостность кольца 5-6-11-15-14-9),  
 в) III и III типа (отслеживается целостность кольца 3-4-9-13-12-7).

## 2. Достигнутые результаты

С начала работ по данному проекту были решены следующие задачи:

1. Определены основные требования к БКУ со стороны потребителей таких систем.
2. Выбраны основные технологии для создания БКУ: SpaceWire, ПЛИС, процессор LEON3.
3. Выбрана структурная организация БКУ со следующими параметрами:
  - основной элементной базой реализации БКУ МКА являются ПЛИС;
  - БКУ состоит из двух устройств: процессорного модуля (ПМ) и низкочастотной командно-измерительной системы (НЧ КИС);
  - ПМ является единым узлом, состоящим из блоков, реализованных в виде отдельных печатных плат: блока питания, блока процессора, блока маршрутизатора, блока сбора информации;
  - НЧ КИС является единым узлом, состоящим из блоков, реализованных в виде отдельных печатных плат: блок питания, блок НЧ КИС;
  - для обеспечения надежности предусмотрено внутриблочное двукратное резервирование.
4. Произведён анализ и выбор IP-ядер контроллеров интерфейса SpaceWire.
5. Отработана процедура тестировки ПО и устройств SpaceWire.
6. Для разработки блока процессора выбран открытый IP-блок процессора LEON3, который будет доработан до отказоустойчивой архитектуры.
7. Разработан блок НЧ КИС, предназначенный для связи с землёй. В качестве базового выбран формат кадровой телеметрии европейского стандарта ESA.

8. Разработаны эскизные образцы ПМ без использования интеллектуальной маршрутизации.
9. Реализована основная часть управляющей программы (драйвера) SpaceWire для ОС RTEMS.
10. Выбрана структура маршрутизатора SpaceWire и начаты работы по разработке и отладке его VHDL-кода. На настоящий момент реализована маршрутизация по физическим адресам (по портам).
11. Определена структура IP-ядра реализации протокола обмена данными/управления RMAP и начата его разработка.

Ниже приведена текущая структурная схема процессорного модуля БКУ. В текущей реализации все платы, располагаются одна над другой и интерфейсы между ними являются штыревыми, что значительно снижает количество кабельных соединений, и увеличивает компактность конструкции.

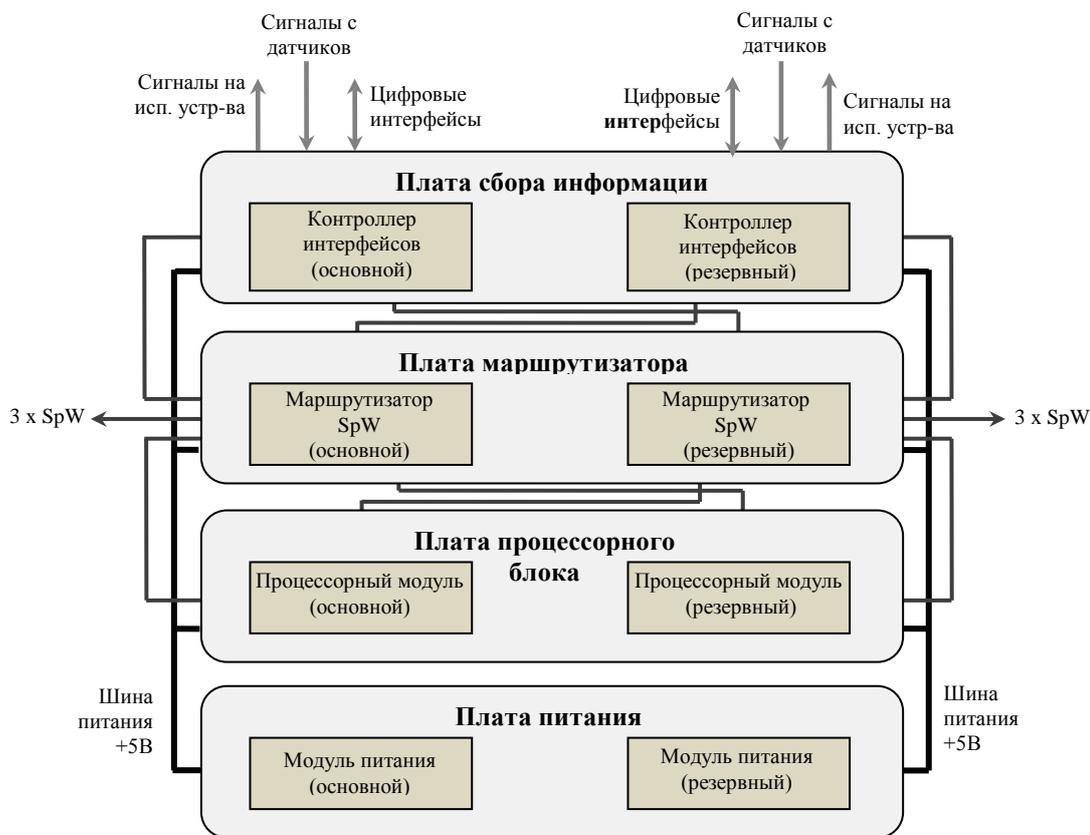


Рис. 6. Структурная схема процессорного модуля БКУ.

Процессор LEON3 архитектуры SPARC v8 был выбран для использования в БКУ, так как он был разработан специально для космических применений и распространяется в виде открытого VHDL-кода. Кроме процессора на плате ПМ может присутствовать дополнительная память (с соответствующим контроллером), контроллер и интерфейсы SpaceWire и другая необходимая схемотехника. Также возможно реализовать возможность перепрошивки данной платы.

В текущем исполнении БКУ МКА имеет следующие эксплуатационные характеристики.

Электрические характеристики питания:

- напряжение питания: 27 В;
- пульсации тока потребления; менее 0,5 А;
- собственное потребление БКУ: менее 15 Вт;
- отсутствие гальванической связи с корпусом БКУ;

- работоспособность и правильное функционирование после плавного снижения и последующего восстановления напряжения питания;
- отсутствие гальванической связи между цепями первичного и вторичного питания;
- гальваническая развязка сигнальных и телеметрических цепей;
- готовность к работе после подачи напряжения питания менее 8 сек.

Конструктивные характеристики:

- модульная стековая структура;
- габаритные размеры 184x135x72;
- масса приборов БКУ в сборе, без кабельной сети: менее 3,5 кг;
- корпус обеспечивает электрогерметичность прибора;
- рабочий диапазон температур: –20 +40С;

Характеристики используемой цифровой схемотехники:

- частота процессорного ядра до 40 МГц;
- занимаемая емкость ПЛИС – 10000 ячеек;
- внешнее ПЗУ 8 Мбайт;
- внешнее ОЗУ 8 Мбайт;
- скорость передачи данных по SpaceWire – не менее 50 Мбит/с.

Количество внешних интерфейсов SpaceWire может наращиваться. В качестве внешних интерфейсов блока сбора информации кроме SpaceWire присутствует UART (RS-422), а при необходимости могут быть добавлены Mil-Std-1553B и USB. Это позволяет напрямую подключать к БКУ большое количество разнообразных устройств.

### **Литература**

1. *Никитин Д.А., Лукин Ф.А., Чекмарёв С.А., Вергазов М.Ю.* Применение помехоустойчивого кодирования и сетевой архитектуры для разработки отказоустойчивой бортовой аппаратуры // Материалы научно-технической конференции молодых специалистов ОАО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнёва, посвящённой 50-летию полёта в космос Ю.А. Гагарина. – Железногорск, 2011 г., С. 187 – 189.
2. *Чекмарёв С.А., Вергазов М.Ю., Лукин Ф.А., Ханов В.Х., Шахматов А.В.* Моделирование бортового компьютера на базе открытых IP-блоков для малых и сверхмалых космических аппаратов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. – Красноярск: 2011, Вып. 2 (35), С. 141 – 146.
3. *Шейнин Ю., Солохина Т., Петричкович Я.* Технология SpaceWire для параллельных систем и бортовых распределённых комплексов. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2006, № 5, С.64–75.
4. ECSS-E-50-12C. SpaceWire – Links, nodes, routers and networks. – European Cooperation for Space Standardization (ECSS), 2008.
5. Packet Telecommand Standard ESA PSS-04-107. – ESA, 1992. – P. 166.