

## Облик перспективного вычислительного комплекса космического базирования с гибкой архитектурой для обработки сигналов

В.Ю.Гришин<sup>1</sup>, А.В.Ракитин<sup>2</sup>, В.В.Костров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ОАО «НИИ «Субмикрон», 124460, г. Зеленоград, Южнаяпромзона, пр-д 4806, д. 4, стр. 2

<sup>2</sup> МИ (филиал) ВлГУ, 602264, г. Муром, Владимирской обл., ул. Орловская, д. 23. ФРЭКС, каф. РТ. E-mail: vvk@mit.ru

*Рассматривается концепция построения бортового вычислительного комплекса для малых космических аппаратов, который обеспечивает цифровую обработку сигналов и формирование радиолокационных изображений. Для создания коммуникационной среды предлагается использовать стандарт SpaceWire/SpaceFibre. Показано, что предлагаемый метод построения вычислительной среды придает системе модульность, унификацию, возможность реконфигурации и преемственность в технических решениях.*

*The concept of construction of the onboard computer complex for small space vehicles is considered. The complex provides digital signals processing and formation of the radar images. For creation of communication environment it is offered to use the standard SpaceWire/SpaceFibre. It is shown, that the offered method of computer complex construction gives to system multi functions, unification, opportunity reconfiguration and continuity in the technical decisions.*

В процессе функционирования бортовая аппаратура обработки сигналов и изображений (БАОСИ) должна обеспечивать решение следующих задач:

- приём потоков данных от приёмо-передающего устройства бортового радиолокационного комплекса (БРЛК);
- обработку принятых сигналов в соответствии с алгоритмами работы и параметрами режимов съемки;
- формирование и передачу результатов обработки с необходимой служебной информацией в бортовую аппаратуру радиолинии Космос-Земля;
- начальное конфигурирование составных частей БАОСИ по командам устройства бортового комплекса управления (БКУ);
- детальное тестирование аппаратной и программной части по командам БКУ.

В рамках существующей технологии разработка аппаратуры космических аппаратов традиционно строится по принципу декомпозиции целевой задачи на отдельные функции. Каждая функция реализуется в виде конструктивно законченного блока, желательного с гальванически развязанными строго фиксированными внешними связями, и с набором телеметрических параметров, характеризующих его работоспособность. Это касается реализации не только крупных задач, но и отдельных элементов обработки в рамках одной задачи. Такой подход сложился исторически за десятилетия развития отрасли, поэтому он обладает определёнными достоинствами в виде относительной простоты разработки, отладки и диагностики блоков и системы в целом, разделения сферы ответственности разработчиков, наличия у производителей различных уже готовых отлаженных решений в виде функциональных блоков. Но существует и большое число недостатков, свойственных этому подходу, вызванных главным образом отсутствием на ранних этапах его развития современных представлений и возможностей по построению цифровых вычислительных систем и сетей передачи данных с коммутацией пакетов. Применение большого числа блоков приводит к появлению на борту КА сложной разнородной системы межблочной передачи данных, сигналов синхронизации и команд управления, что ведёт к повышению сложности аппаратуры, увеличению её массы и энергопотребления; снижается надёжность, которая в этом случае обеспечивается троированием блоков и

линий передачи данных целиком; практически полностью отсутствуют возможности реконфигурирования аппаратуры и изменения маршрута движения данных; отсутствуют унификация и взаимозаменяемость отдельных узлов [1].

Формирование структуры и облика перспективной БАОСИ КА должно выполняться с учётом указанных недостатков традиционной методологии построения систем и обозначенных выше реализационных особенностей, а также с использованием современных методов построения вычислительных систем. Кроме того, необходимо учитывать, что БОАСИ реализуется и функционирует не как законченное самостоятельное устройство, а находится в составе комплекса бортовой аппаратуры КА. В связи с этим для решения задачи определения состава и облика перспективной БАОСИ высоконадёжных космических аппаратов с длительными САС необходимо определить общие принципы построения бортовой аппаратуры КА. С учётом современных тактических, технических и производственных требований к аппаратуре КА принципы построения бортовой аппаратуры включают в себя учёт и реализацию следующих характеристик и свойств: модульность, унификация, модернизируемость, масштабируемость, многофункциональность, конфигурируемость, преемственность.

Следует отметить, что предлагаемые принципы создания многофункциональной управляющей системы и вычислительной платформы, составляющих основу бортовой аппаратуры КА, соответствуют современному мировому уровню разработки средств вычислительной техники, используемой в бортовых и встраиваемых системах обработки потоков данных. Предлагается выполненная с учётом этих принципов архитектура обобщённой бортовой распределённой вычислительной среды КА с функциональным резервированием. Архитектура бортовой вычислительной среды КА приведена на рис. 1.

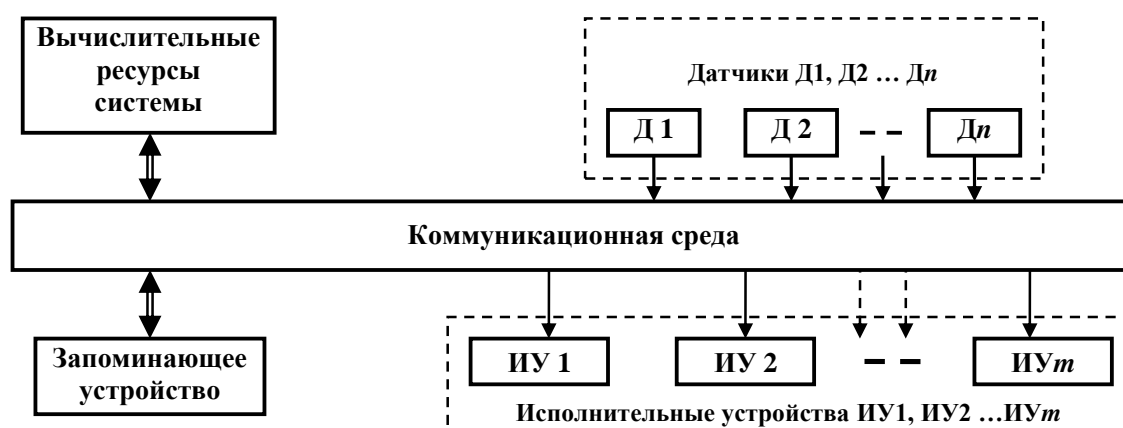


Рис.1. Архитектура бортовой вычислительной среды КА.

В предлагаемой архитектуре в качестве основного центрального элемента выступает коммуникационная среда, технически реализованная в виде коммутатора единой сети с коммутацией пакетов, к которому на равных правах подключаются узлы распределённой вычислительной среды КА: вычислительные модули центральные и периферийные, модули обработки сигналов, модули накопителей запоминающих устройств, датчики, исполнительные устройства и другая бортовая аппаратура. Применение единой сети для передачи всех типов данных между различными бортовыми устройствами КА принципиально отличает предлагаемую архитектуру от вариантов, представленных в [1–4], которые традиционно содержат несколько разнородных систем передачи данных для транспортировки данных разного типа. Так, в [1,2] предлагается совместное использование RS-232/422, RS-485 и собственного параллельного внутреннего программируемого интерфейса, совместно с независимыми

каналами синхронизации, прерывания и разовых команд. Решение в [3] предполагает совместное применение однопроводного интерфейса, шины CAN и последовательного порта RS-232. В [5] рассматриваются варианты применения VMEbus и CompactPCI в качестве межмодульных магистралей, ГОСТ 26765.52-87 и ГОСТ Р 50832-95 в качестве межсистемных интерфейсов, различные варианты RS в качестве технологических интерфейсов. Огромное разнообразие вычислительных средств и сетевых интерфейсов используется для построения бортовой сети передачи данных на Международной космической станции: RS-232, RS-422, RS-485, IEEE 802.3, IEEE802.11, USB, а в качестве магистрального канала традиционно используется МКО (MIL-STD-1553B) [4,6,7].

Как уже отмечалось выше, предлагаемый подход в виде применения единой сети передачи данных позволяет сократить массу, габариты и энергопотребление, как сетевой инфраструктуры, так и отдельных устройств, а также значительно упростить решение задач унификации, масштабирования ресурсов и резервирования. Однако на начальном этапе с учётом требований преемственности предлагаемую архитектуру следует рассматривать как идеализированную, к построению которой необходимо стремиться. Это объясняется тем, что сегодня аппаратура КА представляется в виде нескольких разнородных функциональных узлов, выполняющих общую задачу, оптимизированную с точки зрения распределения функций между ними. Каждый функциональный узел определяется набором выполняемых функций, под который выбирается свой процессорный элемент и соответствующие ему интерфейсы. Таким образом, в настоящее время имеющаяся неоднородная структура интерфейсов датчиков, исполнительных механизмов, вычислителей и иной бортовой аппаратуры в настоящий момент накладывает серьёзные ограничения на реализационные возможности единой коммуникационной среды. Для их преодоления необходимы модули, позволяющие интегрировать все разнородные бортовые устройства КА в рамках единой коммуникационной среды передачи данных за счёт преобразования процедуры передачи данных к единым протоколам как минимум физического и канального, а в отдельных случаях и всех уровней модели OSI. В качестве такой единой среды ранее было предложено использовать комплект будущих отраслевых стандартов SpaceWire/SpaceFibre.

На основе предлагаемой архитектуры была синтезирована упрощённая структурная схема бортовой вычислительной среды КА, которая представлена на рис.2. В состав бортовой аппаратуры входят: Центральный бортовой компьютер (ЦБК), Бортовая аппаратура обработки сигналов и изображений (БАОСИ), Бортовая аппаратура командно-измерительной системы (БА КИС), Система трансляции команд и распределения питания (СТКРП), Бортовое синхронизирующее координатно-временное устройство (БСКВУ), Система спутниковой навигации (СН), Система управления движением (СУД), Бортовая система телеметрических измерений (БСТИ).

В предлагаемой структуре для высокоскоростного обмена информацией между вычислительными средствами используется интерфейс SpaceWire/SpaceFibre, который также применяется и для сопряжения с аппаратурой БКУ при его наличии в конкретной аппаратуре. Для временного обеспечения совместимости с имеющимся бортовым оборудованием обмен может традиционно осуществляться и по мультиплексному каналу обмена (МКО). Тем самым, предлагаемая структура однородной распределённой коммутационной среды с передачей команд и данных в КА обеспечивает преемственность с уже имеющимися бортовыми вычислительными системами и аппаратурой. Создаваемые вновь бортовые устройства должны содержать интерфейс SpaceWire/SpaceFibre, а поддержка МКО должна постепенно исключаться из применения.

Предлагаемые современные решения для бортовых вычислителей КА [8–10] представляют собой традиционные одноплатные однопроцессорные компьютеры, выполненные на радиационно-стойкой элементной базе. Все они содержат некоторый набор интерфейсов для сопряжения с датчиками и другими системами КА, а для масштабирования и построения мультипроцессорной системы обработки во всех случаях используется шина CompactPCI. Решение [11] представляет собой двухпроцессорную машину MPP-структуры, в которой внутренние и внешние связи между отдельными вычислительными модулями в составе платы и между платами также выполнены с помощью шины CompactPCI. Применение PCI в значительной степени «локализует» и ограничивает MPP-решения, выполненные на их основе, в плане масштабируемости за счёт введения в структуру вычислителя единой синхронной мультиплексируемой по времени шины межмодульной передачи данных.

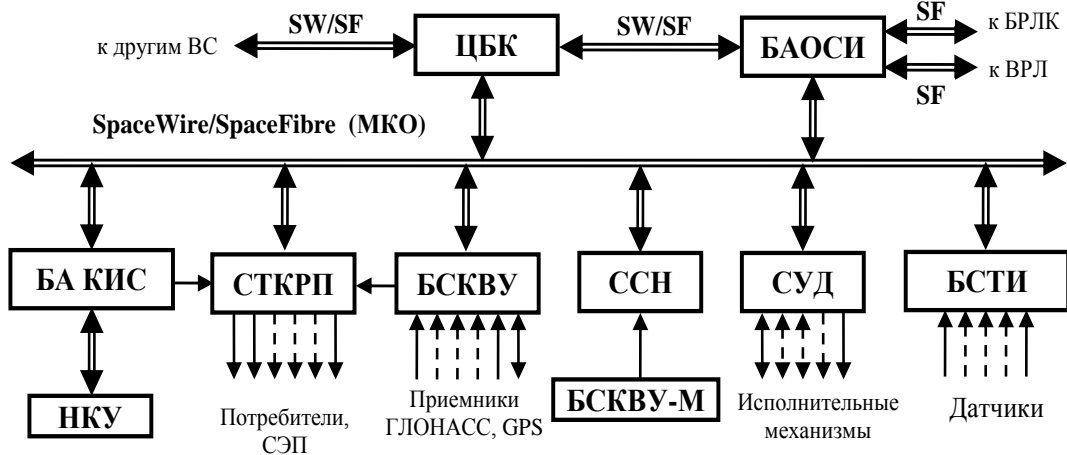


Рис. 2. Упрощённая структурная схема бортовой вычислительной среды КА.

Учитывая структуру и технологию построения бортовой вычислительной среды КА, указанные выше основные принципы построения вычислителя, а также недостатки существующих решений, была разработана структура перспективной БАОСИ, представленная на рис. 3

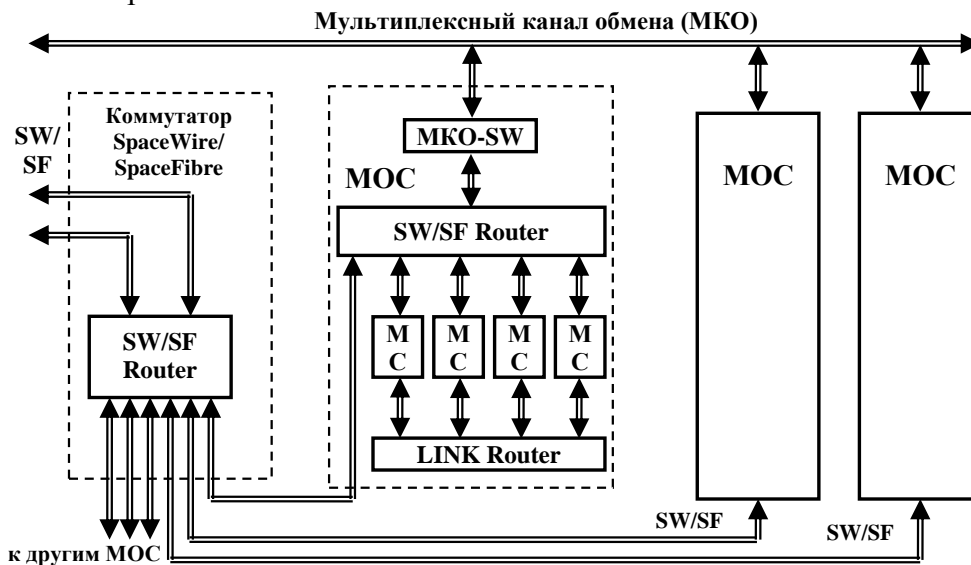


Рис.3. Структурная схема перспективной БАОСИ.

Ключевую роль в организации вычислительной среды БАОСИ играет общесистемный SpaceWire/SpaceFibre коммутатор, к которому подключаются

однотипные унифицированные модули обработки сигналов (МОС). Модуль обработки сигналов представляет собой фрагмент распределённой сети, состоящий из локального коммутатора SpaceWire/SpaceFibre, локального коммутатора LINK и подключённых к нему независимых и равноправных микроконтроллеров (МС), снабжённых каждый своим ОЗУ и ПЗУ. Фактически каждый МОС в отдельности и БАОСИ в целом представляют собой MPP-систему со свойственной ей практически неограниченной возможностью масштабирования (до тысяч процессоров и более) [12]. Такая архитектура позволяет легко создать требуемую конфигурацию вычислительных средств обладающей заданными производительностью и стоимостью за счёт подключения к коммутатору необходимого количества модулей. При этом количество самих модулей МОС, а также число микроконтроллеров в каждом МОС сверху ограничивается лишь конструктивными соображениями. Наличие коммутатора параллельного интерфейса LINK позволяет организовать высокоскоростной обмен данными между отдельными микроконтроллерами в составе МОС, не загружая коммутатор SpaceWire/SpaceFibre. Кроме того, на сегодняшний день интерфейс LINK обладает почти вдвое большей пропускной способностью, чем SpaceWire.

Стандартизация внутренних и внешних интерфейсов МОС даёт широкие возможности по модернизации системы. Так, в случае выпуска более производительного процессора ЦОС, необходимо будет единожды модернизировать лишь ту часть модуля МОС, которая содержит процессорные элементы, что осуществимо значительно быстрее и дешевле, чем модернизация всей БАОСИ. Благодаря модульному подходу и стандартизации интерфейсов возможно одновременное применение в пределах комплекса БАОСИ различных модулей МОС, выполненных на иных вычислителях или построенных по другой внутренней архитектуре, если такое решение является более подходящим для решения конкретной задачи. Это обстоятельство даёт широкие возможности в плане обеспечения многофункциональности БАОСИ в целом. В предлагаемой структуре функциональность каждого модуля определяется лишь его программным обеспечением и может быть изменена в любой момент времени по команде БКУ. Состав и конфигурация программного обеспечения каждого микроконтроллера в составе МОС определяются БКУ и загружаются им по интерфейсу SpaceWire.

Отдельный интерес представляет вопрос управления потоками данных и всей БАОСИ. С одной стороны, все функции по управлению традиционно могут осуществляться одним БКУ, выполняющим загрузку исполняемых кодов программ в микроконтроллеры, таблиц маршрутизации в коммутаторы, а также генерирующим все необходимые управляющие сигналы в соответствии с заданным режимом работы. В другом случае, функция управления может быть распределена между БКУ и коммутаторами SpaceWire/SpaceFibre при условии введения в их состав дополнительного ядра управляющего CPU. В последнем случае появляется возможность организации в рамках БАОСИ функционально законченных самоуправляющихся узлов, синхронизирующихся по потоку данных, что может значительно упростить механизмы управления процессом вычислений. Кроме того, в ряде задач может значительно упроститься процесс управления потоком данных. Например, запуск процедуры обработки может инициироваться не командой БКУ, а исключением, сформированным по приёму определённого количества данных; изменение маршрута в коммутаторе может осуществляться им самим по количеству переданных пакетов в случае реализации передачи «один источник – много приёмников» и так далее.

Введение в состав БАОСИ дополнительных модулей МОС позволяет относительно легко решить проблему резервирования аппаратуры. Дополнительные модули могут

находиться в холодном или горячем резерве и подключаться по командам БКУ по мере необходимости при обнаружении неисправности. При этом появляется возможность резервирования не только МОС целиком, но и отдельных микроконтроллеров в его составе. В последнем случае неисправный микроконтроллер исключается из процесса вычислений путём перенаправления потока данных на исправный контроллер из состава резервного МОС за счёт изменения таблиц маршрутизации. В отдельных случаях становится возможным реализовать режимы обработки, требующие повышенной производительности, за счёт кратковременного подключения резервных МОС и динамического перераспределения потоков данных для их выполнения.

Таким образом, предложенные унифицированные решения для построения бортовой вычислительной среды КА в целом и БАОСИ, как отдельного её компонента принципиально отличаются от применяемых в настоящее время структур. Основным отличием синтезированных структур является использование для построения вычислительной среды КА распределённого вычислителя с MPP-архитектурой с использованием в качестве транспорта сети SpaceWire/SpaceFibre с коммутацией высокоскоростных информационных потоков и резервированием функциональности, а также ориентация на отечественную элементную базу. Предложенные решения обеспечивают полную преемственность существующей аппаратуры КА, значительное расширение возможностей БАОСИ по организации различных видов обработки сигналов на борту КА, гибкое масштабирование БАОСИ и широкие возможности по её последующей модернизации.

### **Литература**

1. Гобчанский О. Проблемы создания бортовых вычислительных комплексов малых космических аппаратов // Современные технологии автоматизации. 2001. №4. С.28-34.
2. Гобчанский О. Унифицированные средства бортовых вычислительных комплексов космических аппаратов // Современные технологии автоматизации. 1998. №1. С.72-76.
3. Куимов Д.А., Дорожкин С.В., Толчельников Д.С. Адаптация индустриальной Микро-ЭВМ для использования в составе малого космического аппарата негерметичного исполнения // Вопросы электромеханики. 2009. Т.108. №1.
4. Российский сегмент МКС. Справочник пользователя. // Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королева.
5. Павлов А.М. Принципы организации бортовых вычислительных систем перспективных летательных аппаратов // Мир компьютерной автоматизации. 2001. № 4.
6. Operations Local Area Network (OPS LAN) Interface Control Document. International Space Station Program. // NASA International Space Station Johnson Space Center Houston, Texas. Baseline.JSC 36381.March 30, 2000.
7. Бумагин А. Компьютеры особого назначения // Компьютерра. №33 (701). 09.2007.
8. Попович А. Бортовые компьютеры космических аппаратов из компонентов BAESystems // Компоненты и технологии. 2010. №3. С.72-74.
9. S950 3U cPCI Radiation Tolerant PowerPC SBC // Datasheet S950T0806R17. Aitech Defense Systems Inc. 2009.
10. Penne B., Tobehn C., Rathje R., Michalik H., Kassebom M., Wieser M., Hennepe F. Flexible On-Board Data Handling for High Resolution Earth Observation Spacecraft // 7<sup>th</sup> IAA Symposium on Small Satellites for Earth Observation. May 4-8, 2009. Berlin. Germany.
11. RadHard DSP Module DSP32130S With Virtex 5 // Delphi Engineering Group, Inc. ADC32130S Brochure Ver. 1.1 10/23/2008.
12. Цилькер Б.Я., Орлов С.А. Организация ЭВМ и систем: Учебник для ВУЗов. – СПб.: Питер, 2004 – 668 с.