

V. B. Betelin, Director, e-mail: betelin@niisi.msk.ru,  
V. A. Galatenko, Head of Sector, e-mail: galat@niisi.msk.ru,  
K. A. Kostyukhin, Senior Researcher, e-mail: kost@niisi.msk.ru  
Research Institute of System Analysis of RAS, Moscow

## Controlled Execution of Tightly-Coupled Multiprocessor Systems

*Development of complex software and hardware systems is a long laborious process. It is believed that about a half of the development time is spent on debugging. It makes a debugging of tightly-coupled multiprocessor systems more important and more complex.*

*This article discusses the controlled execution concept proposed by the authors and its application in debugging of tightly-coupled multiprocessor systems.*

*The main problem in debugging of tightly-coupled systems is in usage of complex asynchronous interactions between its components. This feature offers various approaches to tightly-coupled systems debugging process and determines the choice of tools and methods for debugging. The complexity of debugging is also increases due to a big number of tightly-coupled system components, software and hardware. The traditional debugging tools such as an interactive debugger, a tracer, self-control and playback libraries, and performance profiling does not lose its relevance, but its application is changed.*

**Keywords:** tightly-coupled multiprocessor systems, controlled execution, debugging, tracing, monitoring, EJTAG

### References

1. Timmerman M., Gielen F., Lambrix P. High level tools for the debugging of real-time multiprocessor systems. *ACM SIGPLAN Notices*, 1993, vol. 28, is. 12, pp. 151–157.
2. MIPS EJTAG 5.00. URL: <http://www.t-es-t.hu/download/mips/md00047f.pdf> (date: 08/04/2015).
3. IEEE STD. 1149.1–2001 (IEEE Standard Test Access Port and Boundary Scan Architecture). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/7481/20326/00938734.pdf> (date: 08/04/2015).
4. MIPS PDItrace specification. URL: <http://www.t-es-t.hu/download/mips/md00439g.pdf> (date: 08/04/2015).
5. Ahmad S., Hsien-Hsin L. S. Total recall: a debugging framework for GPUs. *GH '08: Proceedings of the 23rd ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS symposium on Graphics hardware*, 2008, pp. 13–20.
6. Chi-Neng W., Shu-Hsuan C., Tien-Fu C., Peisheng S. A. NUDA: a non-uniform debugging architecture and non-intrusive race detection for many-core. *DAC'09: Proceedings of the 46th Annual Design Automation Conference*, 2009, pp. 148–153.
7. Mayer A., Siebert H., McDonald-Maier K. D. Boosting Debugging Support for Complex Systems on Chip. *Computer*, 2007, vol. 40, no. 4, pp. 76–81.
8. GNU Debugger. URL: <http://www.gnu.org/software/gdb/> (date: 08/04/2015).
9. Non-stop Multi-Threaded Debugging in GDB. URL: [http://www.codesourcery.com/publications/non\\_stop\\_multi\\_threaded\\_debugging\\_in\\_gdb.pdf](http://www.codesourcery.com/publications/non_stop_multi_threaded_debugging_in_gdb.pdf) (date: 08/04/2015).
10. Beynon M. D., Andrade H., Saltz J. Low-Cost Non-Intrusive Debugging Strategies for Distributed Parallel Programs. *IEEE International Conference on Cluster Computing*, 2002, P. 439.
11. Li Y., Wang F., Wang G., Liu X., Liu J. MKtrace: An Innovative Debugging Tool for Multi-Threaded Programs on Multiprocessor Systems. *Software Engineering Conference. APSEC 2007*, 2007, pp. 510–517.
12. Moore L. J., Moya A. R. Non-intrusive debug technique for embedded programming. *Software Reliability Engineering. ISSRE 2003*, 2003, pp. 375–380.

УДК 004.384, 004.31

С. Г. Бобков<sup>1, 2</sup>, д-р техн. наук, зам директора, e-mail: bobkov@cs.niisi.ras.ru,  
О. В. Сердин, канд. техн. наук, зам. зав. отделения, e-mail: serdin@cs.niisi.ras.ru

<sup>1</sup> НИИ системных исследований РАН,

<sup>2</sup> НИЯУ МИФИ

## Проблемы унификации микросхем космического применения на примере международного проекта космического телескопа "ГАММА-400"

*Рассмотрены аспекты унификации электронных компонентов различных уровней: микросхем, интерфейсов, модулей, программного обеспечения, применяемых в космическом приборостроении. Представлена система сбора научной информации, разрабатываемая НИИСИ РАН для проекта космического телескопа "ГАММА-400". Даны основные характеристики комплекта высоконадежных и сбоеустойчивых микросхем разработки НИИСИ РАН, которые позволяют проектировать различные электронные системы космической аппаратуры.*

**Ключевые слова:** "ГАММА-400", система сбора научной информации, КНИ-технология, система на кристалле, 8-портовый коммутатор SpaceWire, 6-портовый коммутатор Serial RapidIO, интерфейс SpaceWire, интерфейс Serial RapidIO.

## Введение

Каждый спутник для научных исследований уникален и во многом из-за этого приходится под каждый эксперимент создавать уникальную вычислительную систему. Специфика области не позволяет использования коммерческих микросхем для создания вычислительных систем, серийность требуемых микросхем небольшая, а сами микросхемы должны функционировать в течение многих лет под воздействием радиации. Все это создает дополнительные проблемы, касающиеся унификации элементной базы и самих приборов. Раньше мощными толчками к стандартизации электронных изделий являлись усложнение и увеличение числа проводимых научных исследований. Достаточно вспомнить создание стандартов NIM и CAMAC. Их введение было продиктовано прежде всего ростом числа и сложности многоканальных систем сбора и накопления информации в экспериментах физики высоких энергий. В настоящее время также наблюдается значительный рост запуска научных спутников, многократно возрастает сложность экспериментов, не за горами межпланетные перелеты. В то же время стоимость научной аппаратуры значительно возрастает, очень многие эксперименты в космосе в силу их высокой сложности и стоимости становятся международными. С нашей точки зрения, все это должно привести к стандартизации как электронной аппаратуры космического применения, так и ее элементной базы. Таким образом, актуальность унификации элементной базы не вызывает сомнений.

Унификация элементной базы может происходить на уровне ядер микропроцессоров, внешних интерфейсов, коммуникационной среды, ОЗУ и внешних запоминающих устройств, схем передачи данных на Землю. Электронные модули могут унифицироваться по типоразмерам, электрическим параметрам, внешней передающей среде для связи отдельных модулей. Унификация также должна проводиться на уровне системного программного обеспечения. К сожалению, практически в каждом российском спутнике компаниями используются свои технические решения. Возьмем, например, печально известный проект космической экспедиции "Фобос-Грунт". Разработка систем управления, съема и обработки информации и передачи ее на Землю велись различными коллективами для каждого прибора. Не было единой вычислительной платформы, единых решений, обеспечивающих максимальную надежность изделий. Повсеместно использовались коммерческие компоненты иностранного производства, такие как ADSP-21060, BU-61580, AT28010, WF4M32-100G2TC5, микросхемы памяти. По официальной версии использование нерадиационно-стойких импортных микросхем памяти привело к сбою электроники в аппарате "Фобос-Грунт". Соответственно решение проблем

функционирования микропроцессоров и микросхем памяти в условиях космического пространства являются наиболее важными для успешного выполнения миссии.

В статье рассматриваются решения, принятые в НИИСИ РАН для унификации вычислительных систем космического применения.

## Основные требования к элементной базе космического применения

Применение микроэлектронных изделий в условиях космического пространства предъявляет к ним ряд специальных требований, таких как: долговечность — не менее 200 тысяч часов, стойкость к накопленной дозе не ниже 200 крэд, стойкость к тяжелым заряженным частицам (ТЗЧ) с линейной передачей энергии (ЛПЭ) не ниже  $100 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$ , сохранение работоспособности после 50 нс импульсного облучения до  $10^{12}$  рад/с, стойкость к нейтринному потоку до  $10^{13}$  нейтрино/см<sup>2</sup>, минимальная чувствительность к сбоям, вызываемым космическими частицами с высокими энергиями, т. е. речь должна вестись о создании специальной категории микросхем для космических применений. Целесообразность разработки такой категории изделий подтверждена практическим опытом ряда фирм, таких как Aeroflex, Atmel и др. Так, для построения бортовых вычислителей наиболее широко используются специальные микропроцессоры, выпускаемые компанией Aeroflex (66 МГц, технология 0,25 мкм, 5 млн транзисторов) и ф. Atmel (100 МГц, технология 0,18 мкм, 8 млн транзисторов). Оба процессора имеют уровень стойкости к накопленной дозе 300 крэд, порог по сбоеустойчивости 10...15 МэВ и уровень стойкости к эффекту зашелки  $100 \text{ МэВ}/\text{мг} \cdot \text{см}$ .

Для повышения устойчивости микропроцессоров к эффектам одиночных сбоев использованы специальные схемные решения функциональных элементов, а для обеспечения защиты вычислительного процесса от ошибок в процессорах применено мажорирование. В ближайшей перспективе (3...5 лет) указанные фирмы планируют начать выпуск микропроцессоров с рабочей частотой 150...200 МГц и числом транзисторов, превышающим 10 млн. Таким образом, очевидно, что обеспечение паритета России в использовании космического пространства возможно только при использовании элементной базы такого же уровня.

Дополнительными требованиями могут являться требования к широкому температурному диапазону, которые могут заметно различаться в зависимости от мест расположения аппаратуры. В настоящее время в мире существуют четыре общепринятых диапазона температур функционирования микросхем: коммерческий — 0...+70 °С, промышленный — -40...+85 °С, авиационный — -40...+125 °С, военный (в рамках стандарта MIL-STD-883) и косми-

ческий (Spice) —  $-55$  ( $-60^\circ$  для России) ...  $+125^\circ\text{C}$ , выделяются также высокотемпературные микросхемы, функционирующие при температурах свыше  $150^\circ\text{C}$ . Часть сложных физических детекторов для исследования космоса не может функционировать в широком диапазоне температур, соответственно требования к аппаратуре, устанавливаемой вблизи таких физических установок, аналогичны. Однако в большинстве случаев требования к комплектующим соответствуют понятию Military и Spice. Прежде всего это требования к электронике аппаратов, функционирующих на высоких орбитах и в дальнем космосе.

Одна из наиболее сложных задач — создание электронной аппаратуры для контроля и управления двигателем для полета в дальний космос. В новых подобных проектах вместо центрального компьютера используется множество распределенных микроконтроллеров и микропроцессоров. Это позволяет значительно уменьшить число и длину медных кабелей, снизить вес аппарата и увеличить надежность управления, приблизив микроконтроллер к исполнительному механизму. Кроме того, замена центрального компьютера множеством распределенных микроконтроллеров позволяет уменьшить число разъемных соединений и повысить надежность. Однако такое решение (приближение к двигателям) приводит к тому, что диапазон температур, в котором должна работать аппаратура, составляет от  $-60$  до  $+200^\circ\text{C}$ . Это уже область высокотемпературной электроники. Таким образом, для таких применений должна создаваться радиационно стойкая высокотемпературная элементная база.

### Унификация элементной базы и интерфейсов вычислительных систем

НИИСИ РАН свыше 10 лет занимается созданием элементной базы ЭВМ космического применения, это одно из основных направлений научной деятельности института. Проблемы унификации и стандартизации всегда были основополагающими в разработках института. Унификация проводилась по всем указанным выше направлениям. В качестве процессорных ядер использовались созданные в институте ядра с MIPS-подобной архитектурой КОМДИВ32 и КОМДИВ64. Была достигнута унификация ядер как для высокопроизводительных систем, так и для систем космического применения [1—3]. Унификация проведена также на уровне модулей [4]. В качестве базовых интерфейсов космических систем выбраны следующие:

- Space Wire для создания многопроцессорных высоконадежных вычислительных комплексов; этот интерфейс является стандартным для космических систем средней производительности;
- последовательные каналы Serial RapidIO для создания высокопроизводительных многопроцессорных систем; этот стандарт также выбран

ведущими космическими компаниями США для создания перспективных вычислительных космических систем;

- Ethernet 10/100 Мбит/с для передачи некритичных данных и совместимости с имеющимися системами;
- мультиплексный канал по ГОСТ Р 52070—2003 для обеспечения высоконадежных низкоскоростных обменов;
- RS232/RS485 для обеспечения низкоскоростных обменов, прежде всего с выпускаемыми изделиями;
- PCI для расширения функциональных возможностей модулей и организации обменов;
- JTAG для организации тестирования;
- разовые команды;
- контроллер последовательного интерфейса SPI для подключения медленных устройств.

Для создания вычислительных систем предлагается использовать два типа стандартов: VPX (конструктив Евромеханика 6U) для создания высокопроизводительных вычислительных систем и PCI/104-Express или PCIE/104 для малогабаритных систем. Стандарты позволяют строить многопроцессорные вычислительные системы различной производительности и с различными размерами и позволяют обеспечить потребности космической отрасли на 10...20 лет. Эти стандарты широко используются при создании систем промышленного, военного и космического применений в США и Европе, что дает возможность использовать модули различных производителей для верификации, тестирования и отладки программного обеспечения с последующей их заменой на отечественные аналоги.

В качестве операционной системы предлагается использование ОС РВ Багет 3.0 [5, 6]. Операционная система ОС РВ Багет 3.0 предназначена как для разработки программного обеспечения для одно- и многопроцессорных вычислительных комплексов, работающих в режиме реального времени, так и для обеспечения их функционирования.

ОС РВ Багет 3.0 представляет собой информационно безопасную и технологически независимую отечественную разработку. Эти качества подтверждаются длительным опытом эксплуатации (более 10 лет с учетом эксплуатации ОС РВ Багет 2.0) и поддержкой оборудования, разработанного в НИИСИ РАН.

ОС РВ Багет 3.0 базируется на следующих основных принципах:

- использование стандартов (спецификация ARINC 653 и стандарт POSIX);
- мобильность (возможность работы на различных аппаратных платформах);
- гибкие средства планирования, включающие как периодические вычисления, так и использование приоритетов;

- развитые средства диагностики и обработки ошибок, а также восстановления работоспособности после сбоев (монитор здоровья);
- управляемость (в частности, наличие средств конфигурирования).

При разработке ОС РВ использовалась спецификация ARINC 653 и стандарт POSIX 1003.1. Как POSIX, так и ARINC 653 определяют интерфейс прикладных программ с операционной системой. Этим обеспечивается мобильность создаваемых приложений.

В целях повышения мобильности операционной системы она разбита на три части:

- часть ОС РВ, не зависящая от аппаратуры;
- часть ОС РВ, зависящая только от типа центрального процессора;
- пакет поддержки модуля.

Первая и большая часть ОС РВ написана на языке Си и не зависит от аппаратной части вычислительного комплекса.

Вторая часть ОС РВ, которая зависит только от типа процессора, написана на языке Си или на Ассемблере и имеет сравнительно небольшой объем.

Пакет поддержки модуля (ППМ) содержит ту часть ОС, которая зависит от конкретной ЭВМ (процессорного модуля). ППМ, в частности, содержит драйверы устройств и частично диспетчер прерываний.

### Система сбора и хранения научной информации проекта "ГАММА-400"

Применение комплексных решений унификации осуществлено в разрабатываемой системе сбора и хранения научной информации комплекса научной аппаратуры "ГАММА-400" (ССНИ). Научный комплекс "ГАММА-400" [7] предназначен для получения данных для определения природы "темной материи" во Вселенной, развития теории происхождения высокоэнергичных космических лучей и физики элементарных частиц, исследования космического гамма-излучения в диапазоне высоких энергий, регистрации заряженных частиц космических лучей, поиска и исследования гамма-всплесков.

Основными функциями ССНИ являются:

- прием информации от научных подсистем комплекса научной аппаратуры (КНА);
- предварительная обработка научной информации и сохранение ее в энергонезависимой массовой памяти;
- передача информации в радиоканал космического аппарата (КА) во время сеансов связи с Землей;
- прием информации от бортового командного устройства и передача ее в научные приборы и их подсистемы.

Ежедневно планируется передача информации на Землю в течение сеанса связи в объеме 100 Гбайт. Для обеспечения устойчивой передачи в течение

всего срока службы (7...10 лет) планируется создание накопителя объемом 1 Тбайт. Огромные объемы передаваемой информации приводят к требованиям создания высокопроизводительных вычислительных систем с высокоскоростными каналами обмена данными. ССНИ является ключевым узлом (КНА) "ГАММА-400" и, следовательно, должна быть высоконадежным элементом. В разрабатываемой вычислительной системе используются как каналы SpaceWire со скоростью передачи до 200 Кбит/с, так и Serial RapidIO 4X со скоростью передачи 1,25 Гбит/с на линию (1 Гбайт/с на канал).

Основной тенденцией в создании систем КНА является унификация и стандартизация оборудования, в том числе и интерфейсов передачи данных. В разрабатываемой системе предполагается большое число каналов (до 16) от разнородных источников цифровых массивов. Прием данных должен осуществляться по надежному высокоскоростному каналу, которым является интерфейс SpaceWire. Наличие коммутаторов каналов SpaceWire позволяет масштабировать вычислительную систему.

В проекте "ГАММА-400" выделен объем порядка  $1 \times 0,5 \times 0,5$  м под создаваемую многопроцессорную вычислительную систему, что позволяет использовать стандарт VPX с размерами печатных плат  $160 \times 233$  мм (Евромеханика 6U).

В целях обеспечения требуемой надежности в ССНИ применяется "перекрестное" резервирование, т. е. основной и резервный полукомплекты ССНИ могут использовать подключения к дублированной высокоскоростной линии (ВРЛ) и к основному, и резервному долговременному запоминающему устройству (ДЗУ), каждое объемом по 500 Гбайт.

Схема одного полукомплекта ССНИ представлена на рис. 1. Сбор данных с научных детекторов (на рис. 1 обозначены как ИЦМ — источник цифровых массивов) осуществляется по 16 высокоскоростным каналам SpaceWire (на рис. обозначены SW1-16). Общая требуемая пропускная способность каналов сбора научной информации (НИ) составляет 70 Мбайт/с. НИ через устройство коммутации (Коммутатор SW) передается по каналам

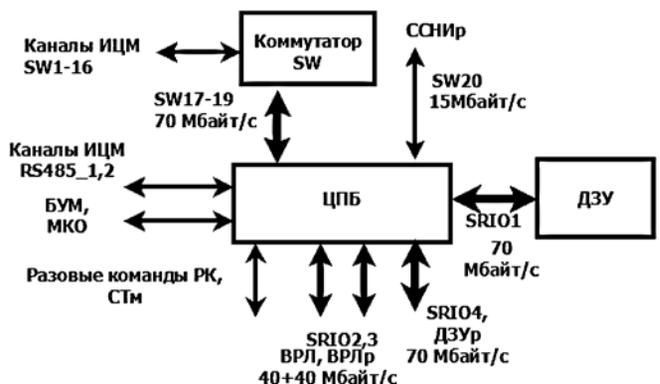


Рис. 1. Схема полукомплекта ССНИ

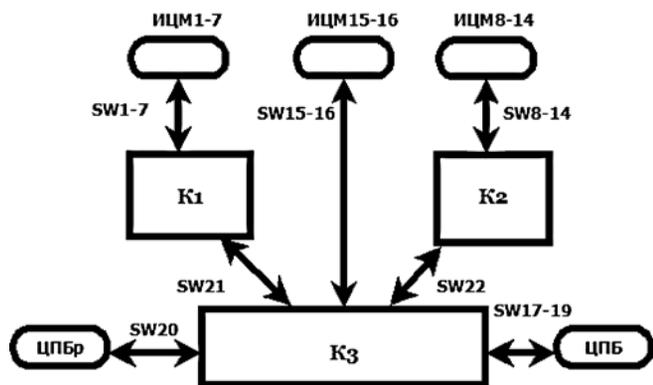


Рис. 2. Схема модуля коммутатора SW

SpaceWire (SW17-19) для обработки в центральный процессорный блок (ЦПБ), в состав которого входит управляющий микропроцессор на базе микросхемы 1907BM038. Микропроцессор 1907BM038 через 6-портовый коммутатор Serial RapidIO (микросхема 1907KX018) одновременно обеспечивает сохранение обработанной НИ в ДЗУ (канал SRIO1) и выборку ранее сохраненных данных из ДЗУ для передачи их на наземный комплекс управления через ВРЛ (канал SRIO2). ДЗУ выполнено на микросборках из микросхем NAND-флэш фирмы 3Dplus. Высокий уровень надежности ССНИ достигается минимальным необходимым числом высокоинтег-

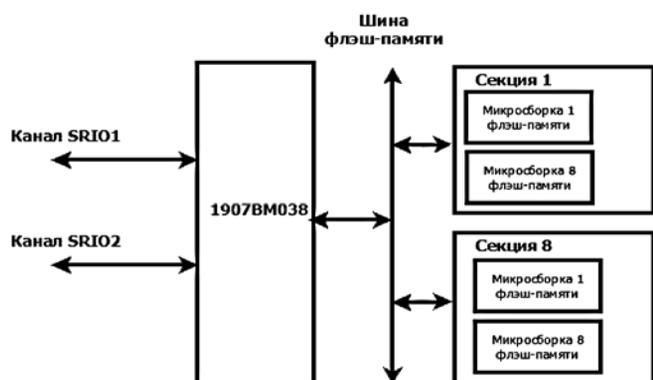


Рис. 3. Схема ДЗУ

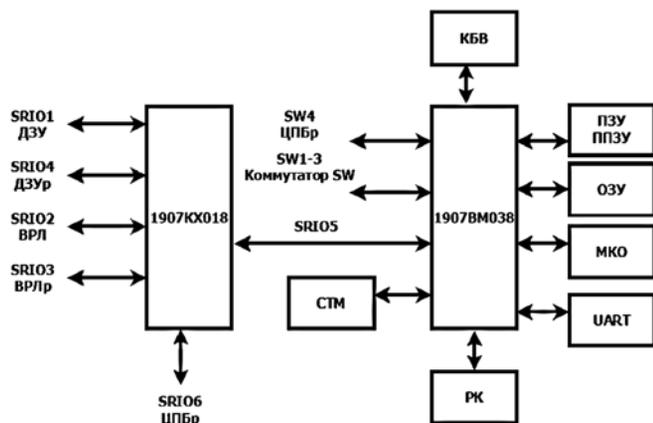


Рис. 4. Схема ЦПБ

рированных микросхем, разрабатываемых коллективом НИИСИ РАН.

Связь с бортовым комплексом управления (БКУ) ССНИ осуществляет через резервированный мультиплексный канал обмена (МКО) и дублированные разовые команды. Система телеметрии (СТМ) обеспечивает проверки исправности отдельных узлов, контроль температур наиболее теплонагруженных микросхем, доставку результатов телеметрического контроля от научных приборов.

На рис. 2 представлена схема модуля коммутатора. Основой модуля являются три микросхемы восьмиканального коммутатора SpaceWire (K<sub>1</sub>—K<sub>3</sub>), проектируемого в НИИСИ РАН по технологическим нормам КМОП КНИ 0,25 мкм.

Схема ДЗУ представлена на рис. 3. Все необходимые функциональные блоки для управления массивом флэш-памяти интегрированы в микросхему 1907BM038.

На рис. 4 представлена схема модуля ЦПБ. Управляющий микропроцессор 1907BM038 способен выполнять все необходимые системные функции:

- прием и проверка данных по каналам SpaceWire от коммутатора SW;
- сортировка, контроль расхода выделенных информационных объемов и отправка данных по каналам Serial RapidIO либо в ДЗУ, либо в радиолинию (ВРЛ);
- прием от БКУ бортовой шкалы времени (БШВ) и генерация кода бортового времени (КБВ) и меток времени для научных приборов;
- прием от БКУ управляющих кодов по мультиплексному каналу (МКО) и трансляция кодов по сети SpaceWire научным приборам;
- прием от БКУ управляющих разовых команд (РК) и обеспечение телеметрической информации (СТМ), поступающей на БКУ;
- периодический контроль исправности основных микросхем, а также выполнение самодиагностики;
- управление резервированием отдельных блоков, в том числе подключение обходных путей передачи данных в сетях SpaceWire и Serial RapidIO.

Сеть Serial RapidIO основана на коммутаторе 1907KX018. Коммутатор последовательных каналов в неблокирующем режиме способен коммутировать одновременные потоки данных от управляющего микропроцессора в режиме записи данных в ДЗУ и чтения данных из ДЗУ и отправки их в ВРЛ. Число портов коммутатора достаточно для подключения резервных блоков радиолинии (ВРЛр) и массовой памяти (ДЗУр).

### Основные характеристики базовых микросхем проекта "ГАММА-400"

Система на кристалле 1907BM038 является перспективной микросхемой для создания различных систем бортового космического применения, срок

окончания ОКР — 2015 г. Технология изготовления — КНИ 0,25 мкм, завод-изготовитель — 1Х1 (НИИСИ РАН). Структурная схема СнК представлена на рис. 5.

В состав системы входят следующие основные блоки:

- 32-разрядное управляющие ядро (CPU);
- 128-разрядный арифметический сопроцессор (на рис. обозначен как CP2);
- системный контроллер с набором интерфейсов: DDR2, SPI, два канала Serial RapidIO, четыре канала SpaceWire, I2C, GPIO, два контроллера UART.

Тактовая частота микросхемы — 100 МГц. Пропускная способность ОЗУ — 512 Мбайт/с.

Конструкция корпуса микросхемы: металлокерамический корпус типа dumdled BGA с числом выводов — 675 шт.

Микросхема коммутатора последовательных каналов 1907KX018 предназначена для организации связи между устройствами (коммутаторами и системы на кристалле, СнК), имеющими в своем составе каналы последовательного RapidIO. Коммутатор спроектирован в НИИСИ РАН, является перспективной микросхемой для создания высокопроизводительных систем бортового космического применения. Технология изготовления — КНИ 0,25 мкм, завод-изготовитель — 1Х1 (НИИСИ РАН).

Коммутатор содержит шесть портов последовательного RapidIO, среда передачи: LP-Serial 4X либо 1X. Максимальная скорость передачи по каждому каналу — 1,25 Гбит/с. Структурная схема микросхемы представлена на рис. 6. Отличительными характеристиками являются: отдельная таблица коммутации для каждого порта, система контроля производительности, встроенный блок управления ошибками. Коммутатор способен непосредственно соединять до 256 оконечных устройств (СнК, контроллеры ввода-вывода и т. п.) в системе, что обычно является достаточным для бортовых систем. Индивидуальные таблицы коммутации позволяют гибко настраивать пути прохождения пакетов по сети. Система контроля производительности используется для определения характеристик потока данных в канале, определения перегрузок в сети, определения мест блокировок. Определение величины потока данных в канале проводится при выборе топологии сети на этапе моделирования и проведении натурного эксперимента. Причинами перегрузок в сети могут быть ухудшение состояния канала, возникшее в результате сбоев. Поэтому раннее оповещение об ошибках уменьшает время, необходимое на подключение резервного пути. Для выбора обходного пути крайне полезной является

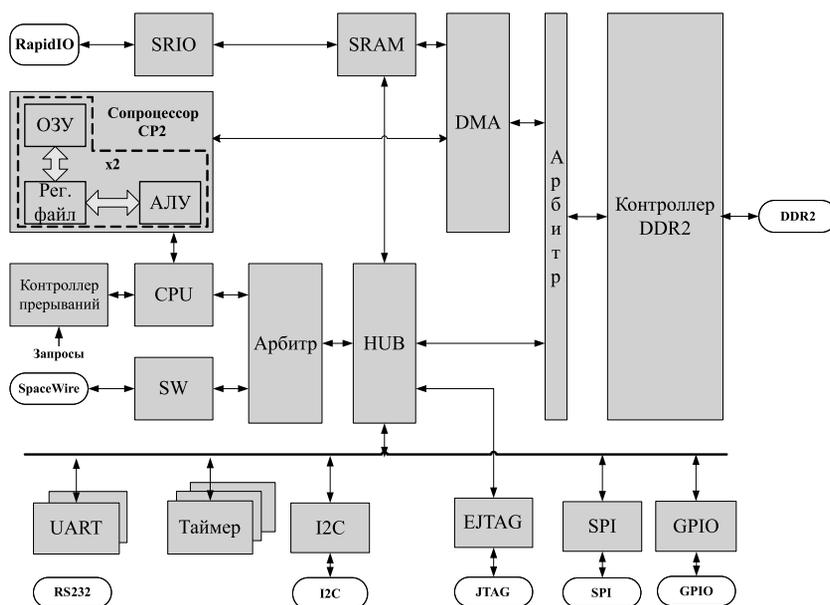


Рис. 5. Структурная схема микросхемы микропроцессора 1907BM038

способность коммутатора определять заблокированные каналы.

Максимальная потребляемая мощность при использовании всех шести портов в режиме 4X не более 6 Вт. Предусмотрено снижение потребляемой мощности в режимах работы портов 1X, а также путем индивидуального отключения передатчиков каждого порта. Микросхема имеет два канала питания: 2,5 В и 3,3 В.

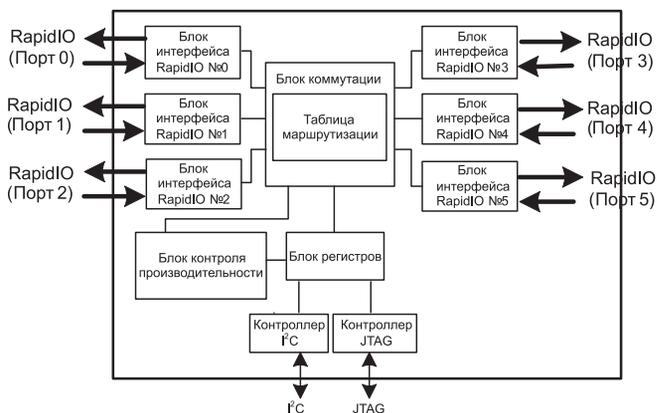


Рис. 6. Структурная схема и фотография микросхемы коммутатора RapidIO 1907KX018

Конструкция корпуса микросхемы: керамический корпус типа *dumped BGA* с числом выводов 399 шт.

В создаваемой системе число необходимых внешних компонентов сведено к минимуму, что позволяет соответственно поднять надежность системы. Таблицы коммутации можно либо запрограммировать через порты последовательного *RapidIO*, либо загружать из последовательного *EEPROM* через интерфейс *I2C*.

Повышенная стойкость к сбоям достигается комплексом дополнительных мер:

- помехоустойчивое кодирование при обращении к памяти буферов пакетов;
- использование резервирования таблиц маршрутизации;
- топологические и схемотехнические решения библиотечных элементов.

Коммутатор имеет расширенные возможности диагностики работоспособности. Состояние диагностических регистров доступно через интерфейс *I2C*. Кроме того, отдельные интегрированные сигналы сбоев и ошибок могут быть выведены на порт дискретных сигналов для дальнейшего анализа системой контроля исправности (СКИ), которая в данном случае упрощается, соответственно повышается надежность.

Микросхема многопортового коммутатора *SpaceWire* со встроенным микропроцессором (ОКР "Схема-23") проектируется в НИИСИ РАН, срок окончания ОКР — 2016 г. Технология изготовления — КНИ 0,24 мкм, завод-изготовитель — ОАО "НИИМЭ и завод Микрон". Структурная схема коммутатора представлена на рис. 7.

Тактовая частота микросхемы — 100 МГц. Максимальная потребляемая мощность не более 6 Вт. Предусмотрены режимы отключения неиспользуемых функциональных блоков в целях понижения потребляемой мощности.

При выполнении функций коммутатора для работоспособности микросхемы требуется малое

число элементов, например, не требуются микросхемы внешнего ОЗУ.

Для определения возможности применения рассмотренных микросхем в космических аппаратах был проведен комплекс исследований. Были получены следующие характеристики:

- пороговое значение линейных потерь энергии тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) по тиристорному эффекту не менее  $80 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$  (эффект не наблюдался);
- пороговое значение линейных потерь энергии ТЗЧ по одиночным событиям не менее  $6 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$ ;
- сечение насыщения по одиночным событиям при воздействии ТЗЧ — не более  $3 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{бит}$ ;
- уровень стойкости к накопленной дозе — 500 крад.

Высокие параметры по стойкости объясняются прежде всего созданием в НИИСИ РАН специального технологического процесса производства микросхем с нормами 0,25...0,35 КНИ, а также разработкой радиационно стойкой библиотеки. Диапазон температур функционирования микросхем от  $-60^\circ$  до  $+125^\circ \text{C}$ . Таким образом, созданные микросхемы позволяют решить большую часть задач создания вычислительных систем космического применения и с огромным запасом покрывают потребности проекта "ГАММА-400".

Для определения возможности использования микросхем в высокотемпературных приложениях были проведены исследования микросхем при температуре функционирования  $150^\circ \text{C}$ . Получены следующие результаты. При данной температуре частота функционирования в среднем уменьшается на 10 %, рост потребляемой мощности не наблюдался, однако это связано, вероятно, с падением частоты функционирования. Длительность функционирования в таком режиме не определялась. Для создания полноценного процесса изготовления высокотемпературных микросхем необходима модернизация технологического процесса: изменение типа примеси, утолщение проводников и пр. Тем не менее, показана принципиальная возможность создания высокотемпературных микросхем космического применения на базе имеющихся проектов.

### Заключение

Таким образом, достигнута унификация микросхем космического применения на уровне ядра, внешних интерфейсов и среды обмена данными. Для сокращения потребляемой мощности и повышения надежности среда передачи данных сделана иерархической. На верхнем уровне находится коммутируемая среда *RapidIO* со скоростью обмена до 1 Гбайт/с на канал. На следующем уровне — коммутируемая среда

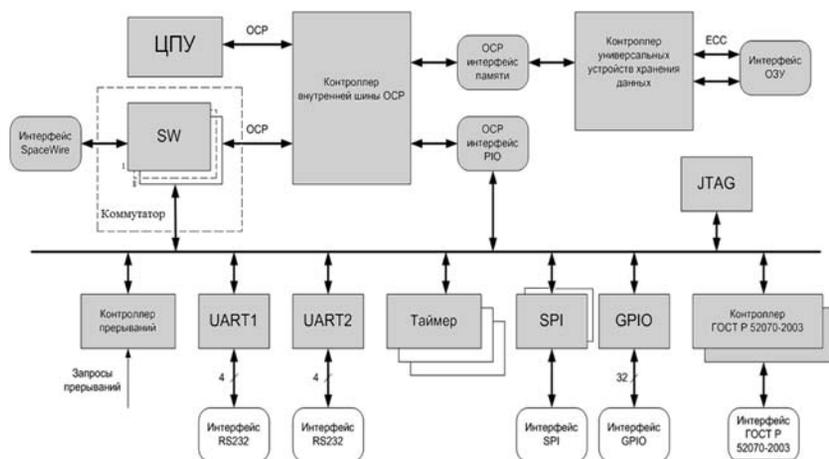


Рис. 7. Структурная схема многопортового коммутатора *SpaceWire* со встроенным микропроцессором

SpaceWire со скоростью обмена до 200 Мбит/с и на нижнем уровне низкоскоростные мультиплексный канал по ГОСТ Р 52070—2003 и RS232/RS485. Интерфейс Ethernet является технологическим и предусмотрен также для связи с ранее выпускаемыми модулями. Коммутируемые среды позволяют создавать различные архитектуры системы с резервированием в рамках стандартных решений для таких сред.

Для создания вычислительных систем космического применения предложено использовать два типа стандартов: VPX (конструктив Евромеханика 6U) для создания высокопроизводительных вычислительных систем и PCI/104-Express или PCIe/104 для малогабаритных систем. В проекте "ГАММА-400" вычислительная система создается на базе стандарта VPX.

В качестве операционной системы предложено использование отечественной ОС РВ Багет 3.0. Операционная система сделана в соответствии с международными стандартами, переносима на различные платформы и апробирована в многочисленных системах (несколько сотен).

*Работа выполнена в рамках проекта по созданию вычислительной системы космического телескопа "ГАММА-400" и при поддержке гранта РФФИ*

№ 14-29-09207 офи\_м "Фундаментальные аспекты конструктивно-схемотехнической организации элементов радиационно-стойких запоминающих устройств для высокотемпературной микроэлектроники".

#### Список литературы

1. **Бобков С. Г.** Архитектура микропроцессоров суперЭВМ эксафлопсного диапазона // Информационные технологии. 2012. № 12. С. 2—9.
2. **Соколов И. А., Степченко Ю. А., Бобков С. Г., Захаров В. Н., Дьяченко Ю. Г., Рождественский Ю. В., Сурков А. В.** Базис реализации супер-ЭВМ эксафлопсного класса // Информатика и ее применения, 2014. Т. 8, Вып. 1. С. 47—72.
3. **Бобков С. Г.** Импортозамещение элементной базы вычислительных систем // Вестник Российской Академии Наук. 2014. Т. 84, № 11. С. 1010—1016.
4. **Бобков С. Г., Ерёмин А. В., Катаев А. Ф., Комиссаров П. В., Кондратьева Н. В., Сердин О. В.** Разработка высоконадежных многопроцессорных модулей на базе высокоскоростных каналов RapidIO // Программные продукты и системы. 2013. № 4. С. 49—55.
5. **Годунов А. Н.** Операционная система реального времени Багет 3.0 // Программные продукты и системы. 2010. С. 16—20.
6. **Годунов А. Н., Солдатов В. А.** Операционные системы семейства Багет (сходство, отличия и перспективы) // Программирование. 2014. № 5. С. 68—76.
7. **Adriani O., Galper A. M., Bonvicini V., Topchiev N. P., Bobkov S. G.** and et. The GAMMA-400 Space Observatory: Status And Perspectives. URL: <http://arxiv.org/abs/1412.4239>, Submitted on 13 Dec. 2014.

**S. G. Bobkov**, Deputy Director, SRISA, e-mail: bobkov@cs.niisi.ras.ru,

**O. V. Serdin**, Deputy Head of Division, SRISA, e-mail: serdin@cs.niisi.ras.ru

## Unification of Chip Space Application on the Example of International Project Space Observatory "GAMMA-400"

*The problems of electronic component unification at the different levels (circuits, interfaces, modules, software used in space industry) are considered. The task of computer systems for space purposes developing is considered. The system of collecting scientific information (SCSI) developed by SRISA for the space telescope GAMMA-400 project is presented. The basic characteristics of the set of high reliable and fault tolerant chips developed by SRISA for the computational systems design for space purposes is given.*

*Achieved the chips unification for space applications for the kernel level, external interfaces and Data Acquisition System. To reduce power consumption and enhance data reliability embedded system interconnect is made hierarchical: upper level is Serial RapidIO  $\times 4$  or  $\times 1$  with rate transfer 1.25 Gbaud per line; next level — SpaceWire with rate transfer up to 200 Mbaud and lower level — MIL-STD-1553B and RS232/RS485. The Ethernet 10/100 is technology interface and provided connection with the previously released modules. System interconnect allows to create different redundancy system. Designers can develop heterogeneous systems that leverage the peer-to-peer networking performance of RapidIO while at the same time using multiprocessor clusters that may only be SpaceWire enabled. The first application of the system is "GAMMA-400" gamma-ray telescope, measuring the energy spectra of Galactic and extragalactic diffuse gamma-ray emission, studying gamma-ray bursts and gamma-ray emission from the Sun.*

**Keywords:** "GAMMA-400", the system of collecting scientific information, SOI technology, system on chip, the SpaceWire switch, the Serial RapidIO switch, SpaceWire interface, Serial RapidIO interface

#### References

1. **Bobkov S. G.** Архитектура микропроцессоров суперЭВМ эксафлопсного диапазона. *Informacionnue tekhnologii*, 2012, no. 12, pp. 2—9.
2. **Sokolov I. A., Stepchenkov U. A., Bobkov S. G., Zakharov V. N., Diachenko U. G., Rozhdestvensky U. V.** Базис реализации суперЭВМ эксафлопсного класса. *Informatika i eje Primenenie*, 2014, vol. 8, iss. 1, pp. 47—72.
3. **Bobkov S. G.** Importozameshenie elementnoi bazu vuchislitelnych sistem. *Vestnik Rossiiskoi Akademii nauk*, 2014, vol. 84, no. 11, pp. 1010—1016.

4. **Bobkov S. G., Eremin A. V., Kataev A. F., Komissarov P. B., Kondratieva N. V., Sedin O. V.** Razrabotka vusokonadezhnykh mnogoprocessornukh modulei na baze vusokoskorostnykh kanalov RapidIO. *Programmnie produktu i sistemy*, 2013, no. 4, pp. 49—55.
5. **Godunov A. N.** Operacionnaia Sistema realnogo vremeni Baget 3.0. *Programmnie produktu i sistemy*. 2010, no. 4, pp. 16—20.
6. **Godunov A. N., Soldatov V. A.** Operacionnue sistemu semeistva Baget (shodstva, otlichia, i perspektivu). *Programmirovaniye*, 2014, no. 5, pp. 68—76.
7. **Arinani O., Galper A. M., Bonvicini V., Topchiev N. P., Bobkov S. G.** The GAMMA-400 Space Observatory: Status and Perspectives. URL: <http://arxiv.org/abs/1442.4239>. Submitted on 13 Dec 2014.