

УДК 681.3:629.7

## РАЗРАБОТКА АППАРАТУРЫ СИСТЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА\*

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

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, г. Красноярск, просп. имени газеты «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: hanov@sibsau.ru

*Описываются основные технические решения и результаты разработки аппаратуры информационного обмена бортового комплекса управления для малого космического аппарата. Определена типовая структура аппаратуры информационного обмена. Обоснованы основные технические решения, к которым относятся использование только открытых продуктов и технологий, сетевая архитектура на базе технологии SpaceWire с использованием спецификации SxPA, элементная база на базе программируемых логических интегральных схем. Разработаны три типа устройств: маршрутизирующий коммутатор SpaceWire, однокристалльный бортовой компьютер на процессоре Leon3, модуль расширения интерфейсов. Представлены внешний вид разработанных устройств, их основные характеристики. Устройства аппаратуры информационного обмена отличаются высокой функциональностью и производительностью, малыми габаритами, низким энергопотреблением. Аппаратура информационного обмена прошла процедуру приемочных испытаний и передана заказчику.*

*Ключевые слова: малые космические аппараты, бортовой комплекс управления, сетевая архитектура, рабочий комплект аппаратуры бортового комплекса управления.*

## DEVELOPMENT OF THE INFORMATION EXCHANGE SYSTEM EQUIPMENT FOR THE SMALL SPACECRAFT ONBOARD CONTROL UNIT

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

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: hanov@sibsau.ru

*This paper describes the main engineering solutions and results of the information exchange system for the small spacecraft onboard control unit design. The structure of the information exchange system has been determined. Main engineering solutions have been substantiated including usage of the open source products and technologies, network architecture based on SpaceWire with SxPA, with the use of FPGA. Three types of devices have been designed: SpaceWire routing switch, single-chip onboard computer based on LEON3 processor, interface extension unit. The exterior of the developed devices and their main characteristics are presented. The devices of the information exchange system are of rich functionality, high performance, small size and low power consumption. The information exchange system was tested and delivered to the customer.*

*Keywords: small spacecrafts, onboard control complex, network architecture, onboard control complex design, onboard control complex experimental model.*

Создание малых космических аппаратов в последнее время приобрело характер массового явления. За последние пять лет в мире запущено более 100 микро и нано-спутников и в ближайшие годы прирост малых космических аппаратов (МКА) будет только увеличиваться. В нашей стране также развивается спутнико-строение МКА, примером которого являются микро-спутники «Юбилейный», «Чибис-М», «МиР», «Аист». Среди многих достоинств микроспутников, обеспечивающих их популярность, можно выделить возможность в условиях низкого финансового риска выполнить летную отработку новых перспективных техни-

ческих решений, которые впоследствии можно будет использовать на космических аппаратах (КА) больших и средних классов. Малый финансовый риск определяется невысокой стоимостью разработки, создания, испытаний, запуска и эксплуатации МКА.

Одним из таких перспективных технических решений является сетевая технология SpaceWire [1]. Данная технология разработана по инициативе Европейского космического агентства для замены низкоскоростных интерфейсов передачи данных на борту КА и организации полноценной сети передачи данных.

\*Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14.В37.21.0451 «Исследование и разработка сетевой архитектуры бортового комплекса управления малого космического аппарата».

В мире насчитывается более 20 успешных проектов применения технологии SpaceWire, в России примеров применения данной технологии в летной практике пока нет.

В СибГАУ накоплен значительный опыт наземно-экспериментальной отработки технологии SpaceWire [2; 3], разработаны и изготовлены отработочные образцы каналаобразующей аппаратуры SpaceWire. В 2012 г. к СибГАУ обратилась компания «Спутникс» для разработки аппаратуры системы информационного обмена бортового комплекса управления (БКУ) на базе технологии SpaceWire.

Компания «Спутникс» ведет разработку микро-спутниковой платформы ТаблетСат массой до 50 кг с использованием, так называемого модульного принципа и архитектуры Plug-and-Play. Это принцип позволяет из типовых служебных систем собственной разработки и полезной нагрузки заказчика собирать спутники по принципу LEGO-конструктора. Подход основан на использовании открытых SxPA-спецификаций (SPUTNIX Plug-and-Play Architecture), описывающих механические, электрические, и информационные интерфейсы между служебными системами и полезной нагрузкой. Данные спецификации доступны для всех желающих на сайте компании [4]. Базовой единицей конструкции платформы ТаблетСат является модуль массой около 10 кг, получивший название 1U (U-от английского слова UNIT, т. е. модуль). Другие типовые размеры (2U, 3U, 4U) с большим резервом по массе и электрической мощности под полезную нагрузку могут выполняться посредством увеличения количества однотипных модулей формата 1U.

Отметим, что SxPA-спецификации имеют открытый, а, следовательно, развивающийся характер. К моменту обращения в СибГАУ в SxPA-спецификациях была проработана лишь общая концепция, реального воплощения, как в аппаратной, так и в программной части на тот момент еще не имеющей. Таким образом, перед СибГАУ стояла задача воплотить и верифицировать идеи компании «Спутникс», создав аппаратуру информационного обмена (АИО) бортового комплекса управления МКА.

Анализ предъявленных в техническом задании требований к АИО микро-спутника «ТаблетСат» позволил сформулировать и уточнить основные технические решения.

Следуя общей концепции платформы ТаблетСат, как открытой системы, принято решение применять только открытые технологии и продукты. К числу основных открытых технологий используемых в проекте следует отнести:

- использование только стандартизированных интерфейсов и сетей: межблочная аппаратурная сеть SpaceWire, внутриблочный интерфейс AMBA;
- использование только открытых сложно-функциональных блоков (IP-блоков): софт-процессор Leon 3, кодеки интерфейсов SpaceWireLight и CAN;
- использование только открытых операционных систем: операционной системы реального времени RTEMS.

Платформа ТаблетСат отнесется к классу микро-КА. Это обстоятельство определяет крайне жесткие требования к энергопотреблению и массогабаритным показателям. Для удовлетворения этим требованиям использована мезонинная конструкция устройств АОИ, основная элементная база имеет BGA-исполнение корпусов и исполнение (модификацию) с минимальным потреблением. Кроме того, учитывая реальный дефицит электрической энергии на борту микро-спутника, реализована коммутация электропитания устройств, подключаемых к АОИ.

В качестве основной элементной базы реализации устройств проекта были определены программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС). Данное решение приводит не только к снижению габаритов, массы и энергопотребления устройств, но и позволяет многократно модифицировать функционал аппаратуры без изменения ее конструкции. Для того, чтобы приблизить отработочный комплект к летному, применены многократно программируемые ПЛИС Actel семейства АЗРЕ. Данные ПЛИС имеют радиационно-стойкие аналогии с гарантированной работоспособностью до 30 кРад, что более чем достаточно для микро-КА. Остальная элементная база не имеет радиационно-стойких аналогов, что вполне допустимо для низкоорбитальных КА с маленьким сроком активного существования (к каким относятся микро-спутники), и позволяет снизить стоимость аппаратуры.

Основопологающим проектным решением стало применение сетевой технологии SpaceWire. Применение SpaceWire обосновывается двумя ключевыми требованиями к АИО:

- модульность и масштабируемость информационной инфраструктуры при наращивании U-блоков ТаблетСат;
- поддержка SxPA-спецификаций для подключения внешних устройств к АИО.

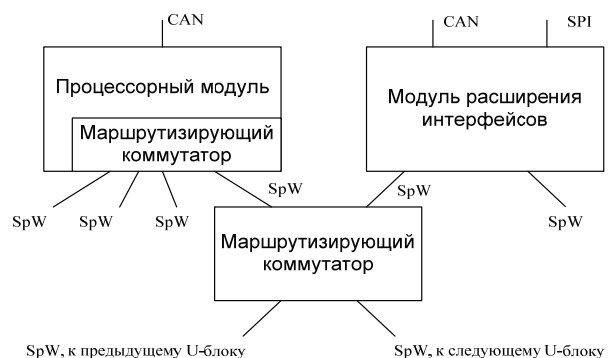


Рис. 1. Типовая структура аппаратуры информационного обмена

SpaceWire как и любая сетевая технология полностью удовлетворяет требованию масштабируемости. Модульность реализуется минимальной типовой структурой АИО для любого U-блока, представленной на рис. 1. Типовая структура АИО U-блока, состоит из маршрутизирующего коммутатора, процессорного модуля и модуля расширения интерфейсов. Обяза-

тельным модулем для каждого U-блока является маршрутизирующий коммутатор, который определяет обязательную инфраструктуру сети SpaceWire (SpW). Остальные модули являются не обязательными и включаются в инфраструктуру сети при необходимости. Процессорный модуль подключается к сети, если в U-блоке необходим вычислитель для служебных систем или аппаратуры пользователя. Модуль расширения интерфейсов необходим в случае преобразования интерфейсов SpW ↔ CAN, SpW ↔ SPI, SpW ↔ I2C. Очевидно, что полная конфигурация, представленная на рис. 1 всегда присутствует в системообразующем блоке платформы IU-блока, состав остальных блоков может быть разным. Подобная реализация модульности и масштабирования позволяет говорить, что в каждом U-блоке создается собственная подсеть SpW с переменным составом аппаратуры, а в целом сеть платформы ТаблетСат имеет вид структурированной сетевой архитектуры.

Спецификация SxPA – это Plug-and-Play архитектура, основным назначением которой является быстрое агрегирование и конфигурирование подсистем микроспутников с использованием принципа Plug-and-Play. Данный принцип обеспечивает возможность подключать устройство к системе без его предварительной подготовки и подготовки самого БКУ, т. е., обеспечивается автоматизированный процесс распознавания устройств и обмена данными между ними [4]. С целью упрощения реализации SxPA в созданном отработочном комплекте АИО функции Plug-and-Play переложены на программный уровень. Аппаратный уровень в соответствии со спецификацией SxPA предоставляет соединительные компоненты, вычислительные и другие аппаратные средства, посредством которых программное обеспечение SxPA реализует свои функции. Для этого каждое устройство, реализующее SxPA, имеет собственный процессор и память. Например, модуль расширения интерфейсов имеет усеченный вариант процессора Leon 3.

Как уже выше отмечалось, сетевая инфраструктура платформы ТаблетСат состоит из всего трех типов устройств:

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

Внешний вид разработанных устройств показан на рис. 2. Остановимся более подробно на каждом устройстве отдельно. Основные характеристики маршрутизирующего коммутатора представлены в табл. 1. Устройство состоит из 2-х плат: одна является собственно маршрутизирующим коммутатором, другая плата выполняет функции коммутации электропитания внешних для коммутатора устройств. Команды для выполнения подключения или отключения внешних устройств передаются от модуля процессора. Для этого может быть использован протокол RMAP, аппаратно реализованный (RMAP-target) в каждом узле SpW. Плата коммутации питания, кроме своей основной функции, осуществляет контроль тока, напряжения на коммутируемой линии и температуры коммутирующего ключа. Мезонинная конструкция устройства позволила снизить габариты маршрутизируемого коммутатора.

Самым сложным устройством АИО является процессорный модуль, характеристики которого представлены в табл. 2. В нем в одной ПЛИС ActelA3PE 3000 размещены, как собственно, сам процессор, так и маршрутизирующий коммутатор на 4 внешних порта. Характеристики встроенного маршрутизатора совпадают с маршрутизируемым коммутатором, изготовленным в виде отдельного устройства. В качестве процессора использован открытый реконфигурируемый софт-процессор Leon 3, рекомендованный ЕКА для новых космических проектов. Системное программное обеспечение, а также тесты и примеры применения процессорного модуля разработаны под операционную систему реального времени RTEMS.

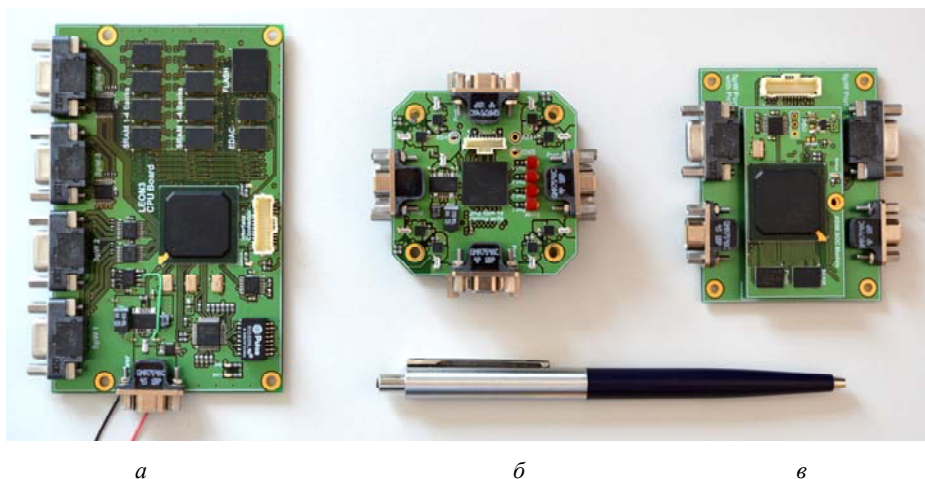


Рис. 2. Внешний вид аппаратуры информационного обмена без корпусов:  
*а* – процессорный модуль; *б* – маршрутизирующий коммутатор; *в* – модуль расширения интерфейсов

Таблица 1

Параметр	Единица измерения	Значение параметра
Количество внешних портов SpW	шт.	4
Скорость SpW	Мбит/с	от 10 до 100
Коммутируемые напряжения	В	5, 12
Напряжение питания	В	5
Потребление с 4-мя активными SpW	А	0,14
Габариты печатной платы	мм	55x55

Таблица 2

Параметр	Единица измерения	Значение параметра
Тип процессора		Leon 3, без FPU
Тактовая частота	МГц	25
Емкость ОЗУ	Мбайт	16
Емкость ПЗУ (flash)	Мбайт	8
Количество внешних портов маршрутизир. коммутатора	шт.	4
Скорость SpW	Мбит/с	от 10 до 100
Скорость CAN 2.0	Мбит/с	до 1
Скорость Ethernet	Мбит/с	10/100
Напряжение питания	В	5
Потребление:	А	
без подключения Ethernet		0,2
с активным Ethernet		0,3
Габариты печатной платы	мм	115×109

Таблица 3

Параметр	Единица измерения	Значение параметра
Количество узлов SpW	шт.	2
Количество выходов CAN 2.0	шт.	1
Количество выходов SPI	шт.	1
Тип процессора		Leon 3 с тактовой частотой 25 МГц, ОЗУ 2048 Кбайт, ПЗУ 256 Кбайт
Скорость SpW	Мбит/с	от 10 до 100
Скорость CAN 2.0	Мбит/с	до 1
Напряжение питания	В	5
Потребление:	А	
без активного CAN		0,14
с активным CAN		0,2
Габариты печатной платы	мм	70×65

Процессорный модуль имеет дополнительные внешние интерфейсы: CAN и Ethernet. Ethernet является отладочным интерфейсом и не будет использоваться во время космической миссии. Интерфейс CAN имеет большую популярность среди разработчиков микроспутников, поэтому он был включен в процессорный модуль для возможного подключения аппаратуры внешних разработчиков. Применение BGA-корпусов позволило снизить габариты печатной платы процессорного модуля.

Модуль расширения интерфейсов служит для сопряжения системного интерфейса SpW к интерфейсам внешних устройств подключаемым к АИО. В настоящее время реализованы преобразования SpW ↔ CAN, SpW ↔ SPI, SpW ↔ I2C. В дальнейшем возможно расширение подключаемых внешних интерфейсов. Это-

му способствует концепция модуля, состоящего из двух плат: вычислительной платы и платы внешних соединителей. Вычислительная плата посредством программного обеспечения производит преобразование данных принятому по одному интерфейсу в другой. Плата внешних соединителей предоставляет физические соединители для подключения внешних устройств по необходимым интерфейсам. Таким образом, заменяя плату внешних соединителей одну на другую с другим количеством и типами интерфейсов, не изменяя при этом конструкцию платы вычислителя, можно расширить номенклатуру подключаемых к АИО внешних устройств. Основные характеристики модуля расширения интерфейсов представлены в табл. 3. В качестве вычислителя использована усеченная версия софт-процессора Leon 3. Таким обра-

зом, вся аппаратура АОИ использует один и тот же процессор, что создает дополнительные удобства в работе.

Отработанный комплект АИО прошел этап приемосдаточных испытаний, подтвердив при этом соответствие предъявленным в техническом задании требованиям, и передан заказчику.

В настоящее время «Сканекс» проводит разработку бортового программного обеспечения, а СибГАУ, как разработчик аппаратуры, оказывает техническую поддержку.

Таким образом, в результате проведенных работ определены основные технические решения, разработана, изготовлена, испытана и передана заказчику аппаратура системы информационного обмена бортового комплекса управления малого космического аппарата ТаблетСат. Запуск первого микроспутника-демонстратора серии ТаблетСат запланирован на конец 2014 г.

#### Библиографические ссылки

1. Шейнин Ю., Солохина Т., Петричкович Я. Технология SpaceWire для параллельных систем и бортовых распределенных комплексов // *Электроника* : НТБ. 2006. № 5. С. 64–75.
2. Сетевая архитектура бортового комплекса управления / Д. А. Никитин, В. Х. Ханов, М. Ю. Вер-

газов, С. А. Чекмарев // Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения УКИ-12 : тр. рос. конф. М. : ИПУ РАН, 2012. С. 1539–1546.

3. Сетевая архитектура сопряжения комплексов бортового оборудования космического аппарата / В. Х. Ханов, А. В. Шахматов, М. Ю. Вергазов, С. А. Чекмарев // *Вестник СибГАУ*. 2012. № 4 (44). С. 148–151.

4. Спутникс [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sputnix.ru/ru/technologies> (дата обращения: 25.08.2013).

#### References

1. Sheinin Yu., Solokhina T., Petrichkovich Ya. *Elektronika, NTB*, 2006, no. 5, p. 64–75.
2. Nikitin D. A., Khanov V. Kh., Vergazov V. Yu., Chekmarev S. A. *Materialy nauchnoy konferentsii "Tehicheskie i programmie sredstva system izmereniya i kontrolya UKI-12"*. Moscow, IPU RAN, 2012, p. 1539–1546.
3. Khanov V. Kh., Shahmatov A. V., Vergazov V. Yu., Chekmarev S. A. *Vestnik SibGAU*. 2012, no. 4 (44), p. 148–151.
4. Sputniks, available at: <http://www.sputnix.ru/ru/technologies> (accessed 25 August 2013).

© Ханов В. Х., Шахматов А. В., Чекмарев С. А., Вергазов М. Ю., Лукин Ф. А., 2013

УДК 629.78

### СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИЕЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА ВЫСОКОЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ОРБИТЕ

Е. Н. Якимов<sup>1</sup>, В. А. Раевский<sup>2</sup>, М. В. Лукьяненко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 662972, г. Железнодорожск Красноярского края, ул. Ленина, 52. E-mail: yen@iss-reshetnev.ru.

<sup>2</sup>Сибирский аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: sibgau-sau@mail.ru

*Рассмотрены актуальные вопросы исследования системы управления ориентацией космического аппарата (КА) с учетом того, что антенный блок КА специального назначения имеет большие габаритные размеры. По результатам синтеза системы управления ориентацией КА на высокоэллиптической орбите принято решение устанавливать антенны на корпусе неподвижно, а панели батареи солнечной (БС) должны быть подвижны относительно корпуса КА. Предложено применять электромеханические исполнительные органы (ЭМИО) не имеющие скрытого кинетического момента, а в качестве исполнительных органов, создающих внешние моменты, использовать реактивные двигатели. Для разворота панелей БС относительно корпуса КА необходимо использовать два привода БС, разгрузку ЭМИО необходимо осуществлять с помощью электромагнитных устройств (ЭМУ). Ориентация на Солнце и на Землю будет осуществляться по информации с оптического-электронных приборов.*

*Ключевые слова: система управления ориентацией, батарея солнечная, орбитальная система координат, степень свободы, кинетический момент, внешний момент, антенно-фидерная система, электромеханические исполнительные органы, электромагнитные устройства.*