

НОВАЯ АРХИТЕКТУРА НАНОСПУТНИКА СТАНДАРТА CUBESAT БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БОРТОВОЙ КАБЕЛЬНОЙ СЕТИ

Е. В. УСТЮГОВ, С. В. ШАФРАН, А. А. СОБОЛЕВ

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева
(Самарский университет),
443086, Самара, Россия
E-mail: efm163@gmail.com

Предложена новая архитектура наноспутника формата CubeSat, позволяющая повысить технологичность изготовления и испытаний наноспутника, а также упростить процесс его разработки и сборки. Полностью или практически полностью исключается бортовая кабельная сеть в наноспутнике, что уже на этапе проектирования гарантирует правильность сборки. Рассмотрены результаты экспериментальной отработки наноспутников, выполненных в предлагаемой архитектуре. Приведен пример универсальной оснастки для проведения широкого спектра функциональных испытаний отдельных бортовых систем, сборок узлов и подготовки наноспутника на стартовом комплексе. Рассмотрены возможности по улучшению процесса предпусковой подготовки наноспутников, в том числе посредством автоматизированного контроля всех соединений.

Ключевые слова: наноспутник, бортовая кабельная сеть, методика проектирования, компоновочная схема, бортовые системы, архитектура наноспутника, CubeSat

Процесс проектирования наноспутников (НС) стандарта CubeSat несколько отличается от процесса проектирования классических космических аппаратов вследствие некоторых конструктивных особенностей [1—6]. В стандарте CubeSat [6] учитывается ряд условий и ограничений. Первым из таких ограничений является геометрия наноспутника, предполагающая наличие четырех продольных направляющих, образующих квадрат со сторонами $100 \times 100 \pm 0,1$ мм ([6], п. 3.2.1). Длина наноспутника выбирается кратной $113,5 \pm 0,1$ мм. Ширина продольных направляющих при этом не должна быть менее 8,5 мм ([6], п. 3.2.5). Эти и другие ограничения характеризуют геометрию наноспутника, а вместе с тем и определяют габаритные размеры бортовых систем (БС) и их компоновочную схему (рис. 1).

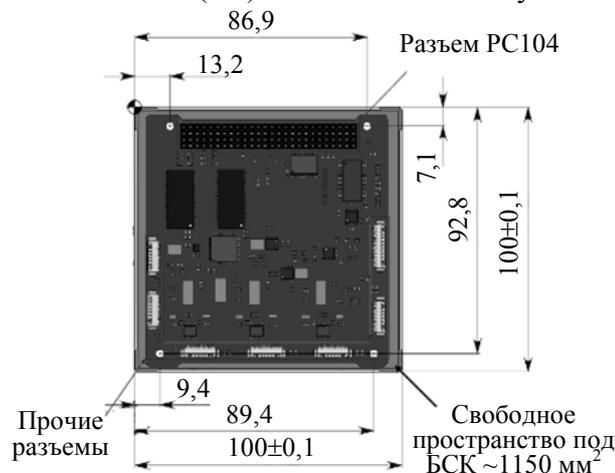


Рис. 1

Мировой рынок комплектующих для наноспутников широко развит [7—10]. В условиях такого рынка разумным решением является некоторая стандартизация комплектующих для обеспечения их взаимной совместимости.

В наноспутниках активно применяется модульный принцип проектирования [11]. Типовой перечень бортовых систем — бортовой компьютер, система электропитания и система связи — давно известен. Каждая из плат или их сборка представляет собой независимую бортовую систему и допускает их взаимную замену на любую другую при условии наличия совместимости. Так, например, многие бортовые системы производства компаний ISIS, GomSpace и ClydeSpace совместимы друг с другом, что позволяет в одном наноспутнике использовать комплектующие от разных производителей. Это достигается использованием единого дизайна плат бортовых систем. Единый дизайн подразумевает использование разъема PC104 с определенной разводкой выводов (см. рис. 1). Также используется асимметричное расположение крепежных отверстий, что позволяет исключить неправильную сборку. Все прочие подключения, не предусмотренные разъемом PC104, осуществляются через периферийные разъемы, расположенные по периметру платы. Через такие периферийные разъемы с использованием кабелей осуществляется подключение отладочных средств, программаторов, панелей солнечных батарей, органов управления.

Однако бортовые системы на базе разъема PC104 (см. рис. 1) имеют ряд недостатков: группировка шины с одной стороны платы; низкотехнологичная пайка (пайка волной); низкая ремонтпригодность разъема; низкая технологичность сборки и разборки стека наноспутника; большие габариты разъема; невозможность выполнения лабораторной или тестовой сборки без вспомогательной оснастки; невозможность надежной очистки разъема; необходимость использования дополнительных разъемов для подключения некоторых периферийных устройств; затрудненный контроль качества соединения.

С целью устранения перечисленных недостатков разработана новая архитектура для бортовых систем наноспутника (рис. 2). Предлагаемая архитектура состоит из двух разъемов, образующих две шины, проходящие вдоль всего наноспутника. Центральные шины образуются разъемами Samtec ERM8-050-07.0 и ERF8-050-09.0 [12]. Предлагаемая пара разъемов имеет золочение толщиной 10 или 30 мкм, что широко применяется в космической промышленности. Также данные разъемы являются элементами поверхностного монтажа (SMD — Surface Mounted Device), что делает процесс их установки более технологичным и увеличивает их ремонтпригодность.

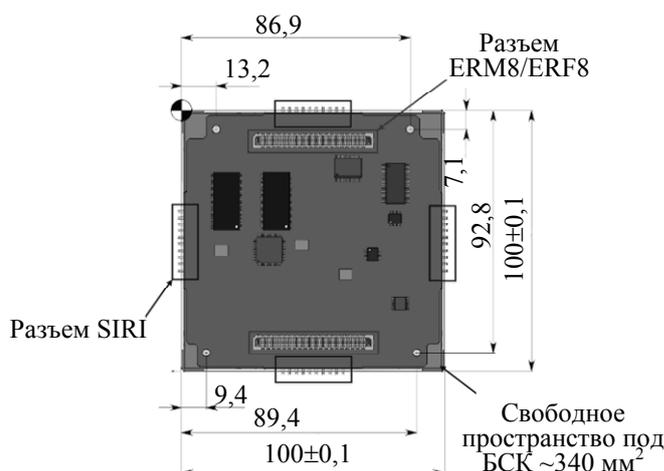


Рис. 2

Панели бортовой системы традиционно подключаются двумя кабелями к системе электропитания (рис. 3), что очевидно неэффективно. Предлагается БС подключать через подпружиненный разъем Samtec SIR1-10 [12] непосредственно к платам стека наноспутника. Разъем и форма БС (тыльная сторона панели БС с контактными площадками по всей длине) показаны на рис. 4, а, б соответственно, а схема подключения приведена на рис. 5.

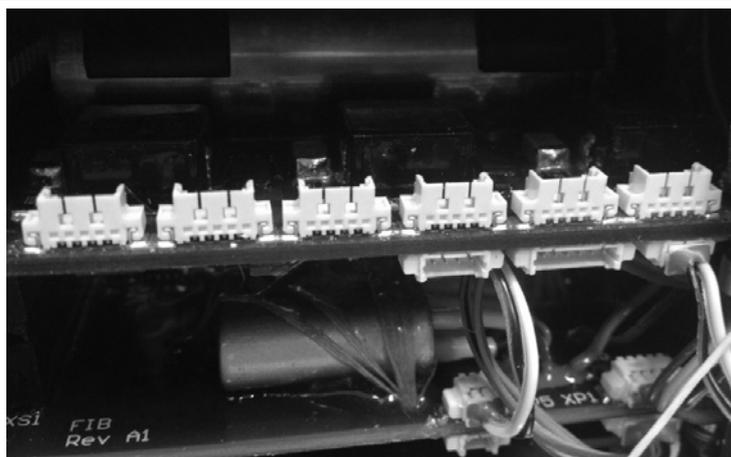


Рис. 3

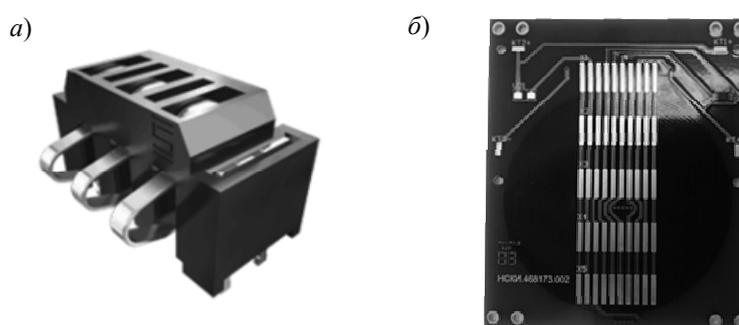


Рис. 4

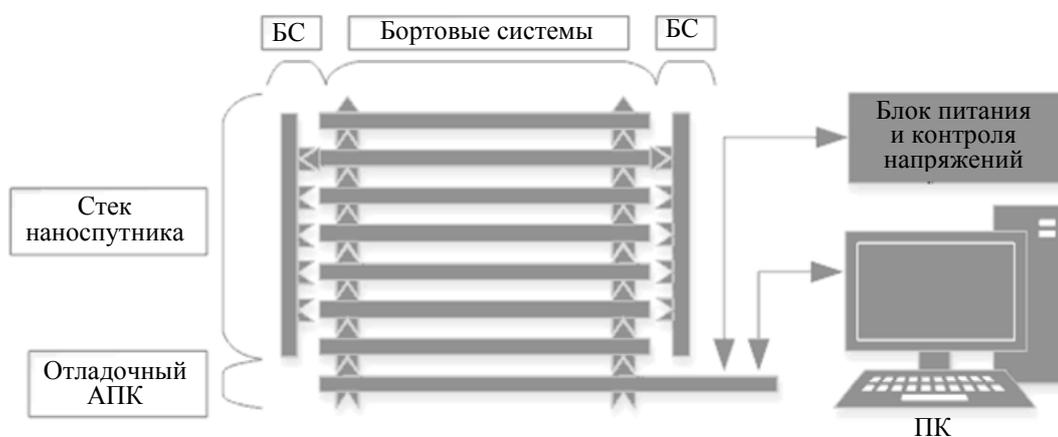


Рис. 5

Новая архитектура представляет собой стек, образованный платами бортовых систем, объединенных двумя разъемами Samtec ERM8/ERF8. Высота между платами при этом постоянная и составляет 16 мм. К стеку может быть подключен отладочный аппаратно-программный комплекс (АПК), обеспечивающий подключение ПК к центральной I2C шине НС, что позволяет осуществлять ее мониторинг, посылать команды, эмулировать бортовые системы, производить симуляцию нештатной работы шины или отдельных систем. АПК оборудован интерфейсами для подключения программаторов и отладчиков к микропроцессорам подсистем НС, что дает возможность отладки и программирования подсистем непосредственно в стеке, без его разборки.

Доступ к шинам питания наноспутника через АПК обеспечивает возможность контроля напряжений или подачу питания от внешних источников в случае отсутствия системы электропитания в стеке. С помощью АПК возможно производить отладку как собранного НС, так и отдельных систем, подавая внешнее питание и управляющие команды через штатные шины.

В рамках предложенной архитектуры необходимо разработать стандарт (интерфейсный контрольный документ), регламентирующий максимальные габаритные размеры плат внутри наноспутника, расположение и разводку выводов стекообразующих разъемов и разъемов для панелей солнечных батарей, расположение крепежных отверстий и способ крепежа, интерфейс для программирования бортовых систем через центральные шины.

Использование новой архитектуры позволяет практически полностью исключить бортовую кабельную сеть (БКС) в наноспутнике, что позволит существенно сократить время разработки [13]. Также исключение БКС может повысить собственные резонансные частоты, увеличить точность расчета массово-центровочных характеристик и упростить процесс сборки. Правильность соединений в этом случае будет обеспечиваться автоматически. Упрощение и ускорение процессов сборки и разборки наноспутника позволит повысить технологичность монтажа. Появится удобная возможность контроля качества всех соединений в наноспутнике, проверку которых можно будет проводить, в том числе, на этапе подготовки на техническом комплексе перед запуском.

К стеку наноспутника сверху и снизу подключаются две платы контроля, образуя интерфейс между блоком контроля и стекком НС (рис. 6). Блок контроля, подавая тестовое воздействие на одну из плат контроля, принимает прошедшие через весь стек НС сигналы со второй платы. Анализируя параметры тестовых сигналов, можно определить качество контактов шин НС на проход. Поскольку разъемы шины являются SMD-компонентами, а соединение между верхним и нижним разъемами осуществляется через печатную плату, то одновременно производится контроль качества пайки разъемов на все печатные платы. Через интерфейс контроля осуществляется полный доступ ко всей шине НС, что позволяет производить и функциональный контроль. В сочетании с технологиями периферийного сканирования, такими как JTAG, процесс контроля может быть автоматизирован.

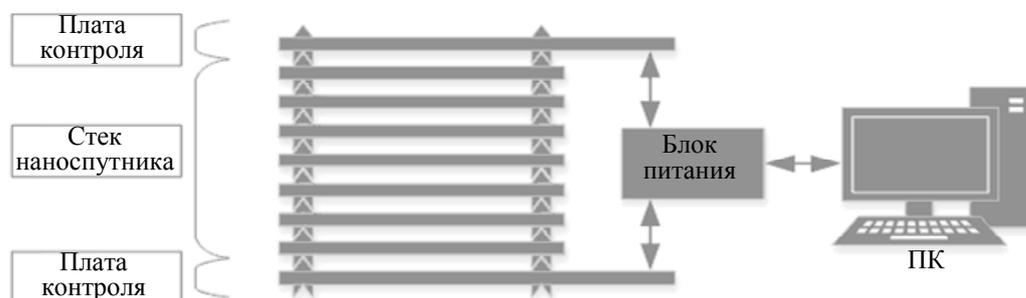


Рис. 6

В таблице приведены сравнительные характеристики прежней архитектуры РС104 на базе разъема Samtec ESQ и новой архитектуры на базе разъемов Samtec ERM8-050-07.0 и ERF8-050-09.0 [12].

Характеристика	Архитектура	
	Прежняя	Новая
Наличие БКС	Да	Нет
Технологичность:		
— тип монтажа	Штыревой	Поверхностный
— ремонтпригодность	Низкая	Высокая
— возможность визуальной инспекции контактирующих частей разъемов	Неполная	Полная
— возможность протирки контактов разъемов	Неполная	Полная
Сопrotивление разъема	10 мОм	15 мОм
Максимальный ток на одну контактную пару, А	5,7	2,2
Температура эксплуатации, °С	-55...+125	-55...+125

Продолжение таблицы

Характеристика	Архитектура	
	Прежняя	Новая
Максимальное количество циклов подключений/отключений	100	1000
Эффективная площадь платы, мм ²	~ 2×7529	~ 2×8693
Площадь центрального разъема, мм ²	~ 665	~ 560
Количество контактов шины	104	2×100
Заполняемость центральной шины, %	~ 30—50	~ 75
Расстояние между платами, мм	~ 10—15	16 ± 0,2
Доступное пространство под кабельную сеть, мм ²	~ 1150	~ 340
Поддерживаемые высокоскоростные каналы связи	Нет	100 GigE, PCI Express

Несмотря на значительные изменения в архитектуре наноспутника сохранена возможность взаимной совместимости бортовых систем, выполненных по новой и прежней архитектуре. Наличие такой совместимости необходимо для обеспечения более гладкого переходного процесса между концепциями проектирования. Для того чтобы использовать в рамках одного наноспутника бортовые системы различных архитектур, достаточно установить между ними переходно-коммутиционную плату известной конструкции, так как все крепежные отверстия, номиналы питания, протоколы и интерфейсы остались неизменными.

На рис. 7 представлены S-параметры (параметры матрицы рассеяния многополюсника) шинных разъемов для одного соединения стандартной высоты недифференциальной линии.

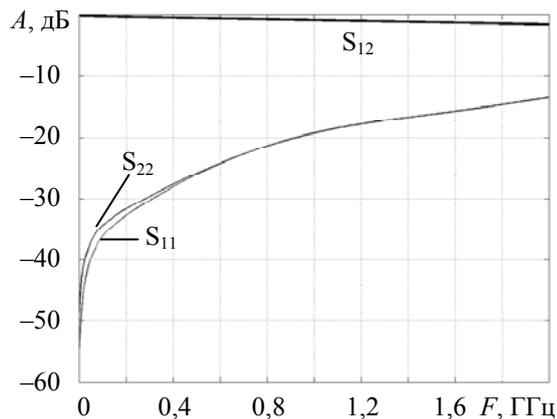


Рис. 7

Эти параметры описывают передаточные коэффициенты и коэффициенты рассеяния линии с разъемами. Данные разъемы могут применяться для передачи данных с частотой F до 5 ГГц. При $F < 2$ ГГц вносимые потери составляют менее 2 дБ по амплитуде, а отражения менее -13 дБ [12]. При создании микрополосковой линии на всех печатных платах возможно соединение приемопередатчика НС, вплоть до УВЧ-диапазона, с антенной через образованную шину.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Давыдов Д. Д., Соболев А. А., Устюгов Е. В., Шафран С. В. Проектирование системы электропитания наноспутников семейства SamSat // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 6. С. 459—465.
2. Белоконов И. В., Гусев С. И., Таганов А. И. Итоги работы и решения первого российского симпозиума по наноспутникам // Вестн. Рязанского гос. радиотехнического ун-та. 2015. № 52. С. 179—182.
3. Горячева Е. П., Куйшибаев Т. З., Прошин А. А. Наноспутники Cubesat // NovaInfo.Ru. 2015. Т. 1, № 36. С. 51—55.
4. Клоушиков В. Ю., Клементьев С. А. Наноспутники — наиболее перспективный класс малых космических аппаратов // Инноватика и экспертиза: Науч. тр. 2016. № 2. Июнь. С. 97—105.

5. Степанов А. В. Управление орбитальной группировкой наноспутников // Вестн. научных конференций. 2017. № 5—4. С. 115—117.
6. Cubesat Design Specification. Cubesat.org. [Электронный ресурс]: <https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/56e9b62337013b6c063a655a/1458157095454/cds_rev13_final2.pdf>, 06.08.2017.
7. Gonzalez-Llorente J., Rodriguez-Duarte D., Sanchez-Sanjuan S., Rambal-Vecino A. Improving the efficiency of 3U CubeSat EPS by selecting operating conditions for power converters // IEEE Aerospace Conf. Proc. AERO. 2015. June.
8. Kirillin A. N., Belokonov I. V., Timbai I. A., Kramlikh A. V., Melnik A., Ustiugov E. V., Egorov A., Shafran S. V. SSAU nanosatellite project for the navigation and control technologies demonstration // Procedia Engineering. 2015. N 104. P. 97—106. DOI: 10.1016/j.proeng. 2015.04.101.
9. Vannitsen J., Rizzitelli F., Wang K., Segret B., Juang J.-C., Miao J.-J. A satellite data analysis and CubeSat instrument simulator tool for simultaneous multi-spacecraft measurements of solar energetic particles // J. of Astrophysics and Astronomy. 2017. Vol. 38, N 4. DOI: 10.1007/s12036-017-9485-2.
10. Hanafi A., Karim M., Latachi I., Rachidi T., Dahbi S., Zouggar S. FPGA-based secondary on-board computer system for low-earth-orbit nano-satellite // Proc. of the 3rd Intern. Conf. on Advanced Technologies for Signal and Image Processing, ATSIP 2017, Morocco. 2017. DOI: 10.1109/ATSIP.2017.8075514.
11. Ustiugov E. V., Shakhmatov E. V., Belokonov I. A., Timbai I. A., Nikitin A., Shafran S. V. SSAU project of the nanosatellite SamSat-QB50 for monitoring the Earth's thermosphere parameters // Procedia Engineering. 2015. N 104. P. 139—146. DOI: 10.1016/j.proeng. 2015.04.105.
12. Connectors. Samtec.com. [Электронный ресурс]: <<https://www.samtec.com/connectors>>, 14.08.2017.
13. Устюгов Е. В. Выбор оптимальной компоновочной схемы и архитектуры бортовой кабельной сети наноспутника SamSat-QB50 // Информация и космос. 2017. № 2. С. 168—178.

Сведения об авторах

- Ефим Владимирович Устюгов** — ассистент; Самарский университет; межвузовская кафедра космических исследований, E-mail: efim163@gmail.com
- Степан Вячеславович Шафран** — аспирант; Самарский университет; кафедра электротехники; E-mail: mailbox-kddk@mail.ru
- Арсений Александрович Соболев** — аспирант; Самарский университет; кафедра электротехники; E-mail: teomant@bk.ru

Поступила в редакцию
14.02.18 г.

Ссылка для цитирования: Устюгов Е. В., Шафран С. В., Соболев А. А. Новая архитектура наноспутника стандарта CubeSat без использования бортовой кабельной сети // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 5. С. 423—429.

NEW CUBESAT ARCHITECTURE WITHOUT ONBOARD CABLE NETWORK

E. V. Ustyugov, S. V. Shafran, A. A. Sobolev

*Samara National Research University, 443086, Samara, Russia
E-mail: efim163@gmail.com*

A new CubeSat architecture is proposed, which makes it possible to increase the efficiency of nanosatellite manufacturing, assembling, and testing. The proposed architecture makes it possible to simplify the development process and simplify significantly the nanosatellite assembling process. The onboard cable network in the nanosatellite is completely, or almost completely, eliminated, which guarantees the correct assembly at the design stage. The problems of testing of nanosatellites manufactured in the proposed architecture are considered. An example of a universal tool for carrying out a wide range of functional tests for individual onboard systems, assemblies process and nanosatellite preparation on the launch complex is presented. Possibilities for improving the pre-launch preparation of the nanosatellites, including through automated monitoring of all connections, are considered.

Keywords: nanosatellite, onboard cable network, design method, nanosatellite layout scheme, onboard subsystem, nanosatellite architecture, CubeSat

Data on authors

- Efim V. Ustyugov** — Assistant; Samara University, Interuniversity Department of Space Research; E-mail: efim163@gmail.com
- Stepan V. Shafran** — Post-Graduate Student; Samara University, Department of Electrical Engineering; E-mail: mailbox-kddk@mail.ru
- Arseniy A. Sobolev** — Post-Graduate Student; Samara University, Department of Electrical Engineering; E-mail: teomant@bk.ru

For citation: Ustyugov E. V., Shafran S. V., Sobolev A. A. New CubeSat architecture without onboard cable network. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 5. P. 423—429 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-5-423-429