

АНАЛИЗ И КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НАНОКЛАССА ЗА РУБЕЖОМ И В РОССИИ

Ю.Н. ШАРИТКИН, *главный специалист ФГУП ЦНИИмаш*

sharitkin@yandex.ru

ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (ФГУП ЦНИИмаш)
141070, Московская область, г. Королев, ул. Пионерская, д. 4

Проведен анализ мировых тенденций в разработках космических аппаратов «нано» класса. Представлен расширенный состав космического аппарата «нано» класса и его составных частей (модулей). Рассмотрены особенности построения космических аппаратов «нано» класса. Проанализирован опыт создания стандарта проектирования космических аппаратов «нано» класса. Рассмотрены различные варианты конструкции космических аппаратов, варианты их компоновок. Рассмотрены условия эксплуатации космических аппаратов «нано» класса, а также круг задач, которые они способны выполнять в интересах различных ведомств. Рассмотрены особенности построения электрической части, а также интерфейсы, рекомендованные к применению в космических аппаратах «нано» класса. Рассмотрен стандарт проектирования космических аппаратов «нано» класса CubeSat, проанализированы особенности стандарта, а также представлена история создания стандарта CubeSat. Описаны некоторые особенности применения электронной компонентной базы в космических аппаратах, сделанных по стандарту CubeSat, и шаги для удешевления стоимости проекта, использующего стандарт CubeSat. Представлена приблизительная стоимость и сроки проектирования космических аппаратов данного класса. Представлен перечень предприятий производителей космических аппаратов и составных частей к ним. Рассмотрены способы доставки космических аппаратов «нано» класса на рабочую орбиту как традиционные, так и перспективные, которые могли бы удешевить стоимость доставки и обеспечить ее гарантированность, уменьшив зависимость от основной полезной нагрузки. Представлено состояние разработки космических аппаратов и их составных частей на территории Российской Федерации. На основе проведенного анализа представлены обобщенные требования к характеристикам космического аппарата. Обозначены перспективы развития данного направления космических аппаратов и способов их доставки на рабочую орбиту.

Ключевые слова: наноспутник, транспортно-пусковой контейнер (POD), стандарт CubeSat.

На заре освоения космоса космические аппараты (КА) имели небольшие размеры и большие энергетические характеристики при низкой функциональности и надежности, что ограничивало их круг задач, а малоизученные факторы, воздействующие в космическом пространстве на КА, приводили к малому сроку службы и низкой надежности. Задачи для КА становились сложнее и увеличивалось их количество, что влекло за собой увеличение массы и энергопотребления КА, что усугублялось применением аналоговой элементной компонентной базы.

Наука не стояла на месте, появлялись новые технологии, становились доступными все большие сведения о космическом пространстве. Да и в целом остальные отрасли начали подтягиваться за космосом. Электронная компонентная база с аналоговой перешла на цифровую, что положительно сказалось на надежности, энергопотреблении и массе КА в целом.

С миниатюризацией электронной компонентной базы в КА увеличились их функциональные задачи, теперь КА мог не только производить съемку подстилающей поверх-

ности в оптических диапазонах, но и проводить сканирование радиолокационным комплексом поверхность Земли и параллельно работать ретранслятором, а также проводить научные исследования, изучающие воздействие факторов космического пространства.

В конце XX в. возникла идея создания дешевых сверхмалых космических аппаратов, обладающих меньшими функциями, надежностью и ресурсом, но при этом обладающих меньшей стоимостью (около 65–80 тыс. долл.), а также малым сроком разработки и изготовления (не более 1 года).

Американским профессором факультета аэронавтики и астрономии Стенфордского университета Бобом Твиггсом и его коллегой, профессором из Калифорнийского технологического университета Джади Обиспо в 1999 г. была разработана концепция, которая не имела аналогов в мировой практике, впоследствии получившая название CubeSat.

Суть концепции состояла в следующем. Был введен универсальный типоразмер с габаритами 100×100×100 мм с массой не более 1,33 кг и объемом 1 литр, который получил обозначение «1U» (т. е. «1 Unit» что

в переводе на русский «1 модуль»). Минимальный размер КА не должен быть меньше «0,5U», а максимальный размер КА не должен превышать «3U». На основании концепции был создан стандарт CubeSat, в котором оговаривались используемые интерфейсы, типы корпусов и типоразмеры.

В концепции использовалась типовая архитектура построения бортовых систем со стандартными интерфейсами, отдельное место отводилось транспортно-пусковым контейнерам (P-POD).

Однако существующие разработки уже давно вышли за рамки данного стандарта и все чаще можно встретить КА размером в «6U», немного реже – «12U» и «24U».

Сейчас во многих странах мира занимаются разработкой и выпуском КА и комплектов (составных частей) к ним по стандарту CubeSat. Наибольший опыт в данной части имеют такие страны, как США, Германия и Япония.

В России данный стандарт не получил развития в связи с отсутствием правовой и технологической базы.

Несмотря на малые размеры, космические аппараты стандарта CubeSat могут выполнять определенный круг задач – от фундаментальных научных исследований околоземного космического пространства до дистанционного зондирования Земли и связи, в интересах МО РФ и МЧС РФ и других пользователей. Учитывая короткие сроки создания (около 1 года) и низкую стоимость (около 10–20 млн руб., с учетом пусковых услуг) и простоту изготовления, сегмент наноаппаратов может занять свою нишу бюджетных КА в космической отрасли.

Описание обобщенной концепции построения нано спутников

Принимая во внимание, что в России практически отсутствуют аналогичные разработки, рассмотрим зарубежный опыт создания КА стандарта CubeSat.

На основании анализа открытых источников, и оценив разработки космических аппаратов и их составных частей, созданных по стандарту CubeSat, был определен укруп-

ненный состав космического аппарата. В него вошли:

– Бортовой комплекс управления, в который функционально входят следующие подсистемы:

1) бортовая цифровая вычислительная машина (БЦВМ);

2) система ориентации и стабилизации (СОС);

3) бортовой радиокomплекс УВЧ-диапазона (БРК УВЧ);

4) GPS-модуль;

– система электроснабжения (СЭС);

– система обеспечения тепловых режимов (СОТР);

– полезная нагрузка (ПН), в состав которой входят;

1) целевая аппаратура по назначению;

2) бортовой радиокomплекс Ка-диапазона (БРК Ка);

– конструкция КА;

– отладочный модуль (ОМ).

В стандарте CubeSat наиболее полно был реализован принцип модульности или, как он еще называется, принцип «Lego», реализованный с использованием 104-контактного разъема и типовых посадочных мест. При разработке КА по стандарту CubeSat применяются следующие интерфейсы:

– I²C – применяется в работе средств БКУ;

– МКО – применяется в работе средств БКУ (применяется редко);

– SpaceWire – в основном, применяются для космических аппаратов военного назначения;

– CAN – может применяться для всех систем (встречается редко);

– RS485/RS422 – применяется для работы с датчиковой аппаратурой, входящей в состав БКУ;

– UART – применяется в основном для работы с БРК и аппаратурой системы стабилизации;

– SPI – применяется в работе средств телеметрии;

– LVDS – применяется, в основном, для передачи информации из аппаратуры ПН в БРК;

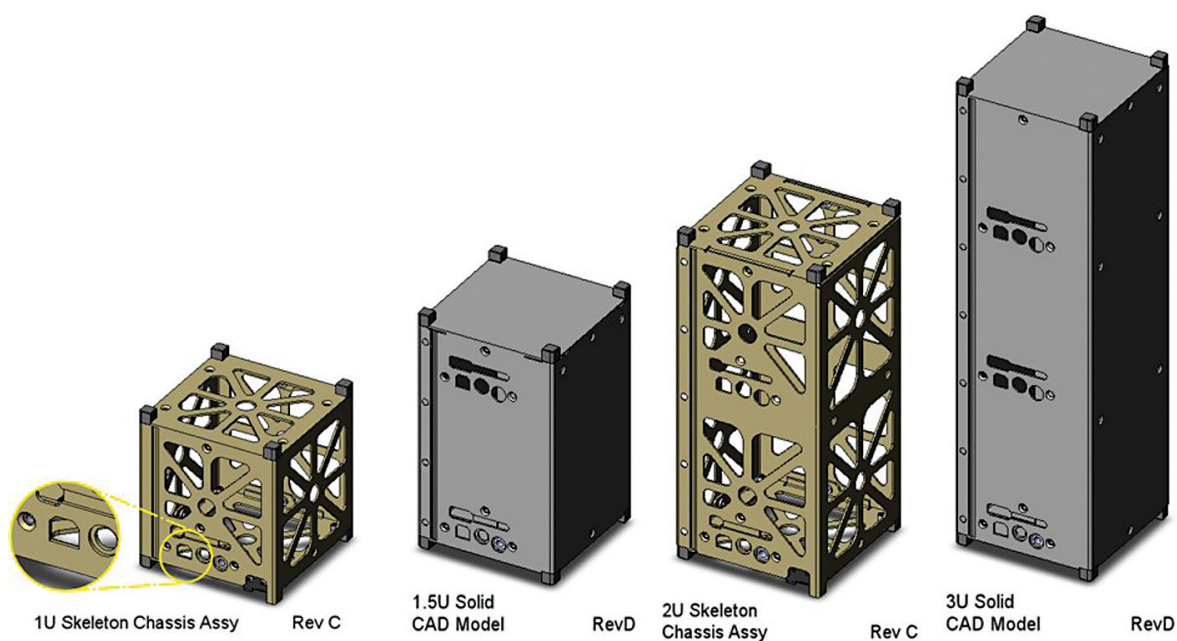


Рис. 1. Структуры «1U», «2U», «3U»
Fig. 1. Structures «1U», «2U», «3U»

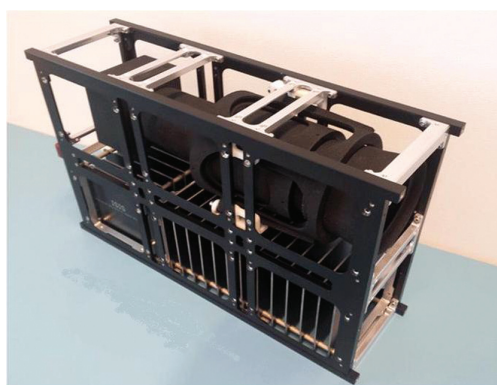


Рис. 2. Структура «6U»
Fig. 2. Structure «6U»

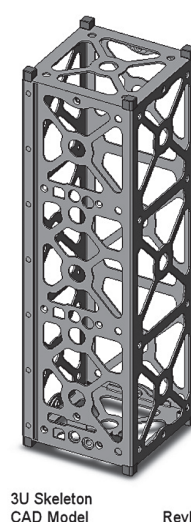


Рис. 3. Скелетный тип корпуса КА
Fig. 3. Skeleton type of spacecraft housing

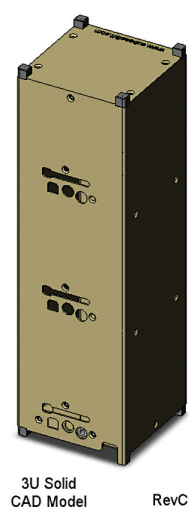


Рис. 4. Монолитный тип корпуса КА
Fig. 4. Monolithic type of spacecraft housing



Рис. 5. Реечный тип корпуса КА
Fig. 5. Rack Enclosure type of spacecraft housing

- USB – применяется, в основном, для отладочных работ;
- Ethernet – применяется, в основном, для отладочных работ;
- PCI – применяется в основном для отладочных работ.

В КА стандарта CubeSat используются следующие типоразмеры: «1U», «2U», «3U» (рис. 1), «6U» (рис. 2) (Типоразмер «12U» и «24U» используются реже и строятся по аналогии с представленными выше вариантами).

Конструкция корпуса производится 3 типов: скелетного (рис. 3) и монолитный (рис. 4), а также встречается корпус более простой конструкции, назовем его реечным (рис. 5).

Представленные выше типы корпусов КА стандарта CubeSat различны по характеристикам и выбираются из расчета орбиты существования, внешних воздействующих и специальных факторов. Таким образом:

- Монолитный тип – имеет наилучшие теплоотводящие свойства, наибольшую защиту, наилучшие прочностные характеристики, но при этом обладает наибольшей массой и больше подходит для орбит порядка 600–1000 км.

- Реечный тип – имеет наиболее слабые теплоотводящие свойства, наименьшую защиту, наихудшие прочностные характеристики, но при этом обладает наименьшей массой и больше подходит для орбит порядка 350–400 км.

- Скелетный тип – имеет средние во всех отношениях характеристики по сравнению с описанными выше типами корпуса.

Раскроем подробнее задачи составных частей и подходы к их реализации.

Бортовой комплекс управления, предназначен для управления бортовыми системами КА, управлением угловым движением и обеспечения функционирования целевой аппаратуры КА. БКУ состоит из следующих модулей:

1. Бортовая цифровая вычислительная машина (БЦВМ) является составной частью БКУ, предназначена для управления всеми системами КА и определения местоположения КА на орбите.

БЦВМ, как правило, состоит из следующих модулей:

- вычислительная часть;
- интерфейсная часть;
- запоминающее устройство.

На рынке представлено большое число производителей БЦВМ для КА такого класса, таких как GomSpace ApS, ISIS Pumpkin, AAC Microtec, SpaceMicro, Tyvak nano satellite system LLC и другие.

Фирмой ISIS Pumpkin реализован принцип модульности в БЦВМ, разбитый на 2 модуля: интерфейсный и процессорный, что позволило без доработок производить замену центрального процессора, тем самым изменяя возможности аппарата под требования заказчика без доработки аппаратной части.

2. Система ориентации и стабилизации предназначена для определения ориентации и поддержания стабилизации космического аппарата и управления угловым движением вокруг центра масс и имеет следующий состав аппаратуры:

- двигатели маховики (3 шт.);
- магнитометр 3-осный;
- магнитные исполнительные органы (3 шт.);
- 3-осный микромеханический гироскоп (может комплектоваться со встроенным акселерометром);
- солнечный датчик (устанавливается по желанию заказчика, подключается через типовой размер и доработки аппаратуры не требует);
- звездный датчик (устанавливается по желанию заказчика, подключается через типовой размер и доработки аппаратуры не требует).

Весь состав аппаратуры располагается внутри небольшого герметичного корпуса размером не более 100×100×100 мм, т. е. «1U». На рынке представлен фирмой Maryland Aerospace.

3. Бортовой радиокomплекс УВЧ-диапазона предназначен для получения команд с НКУ и передачи ТМИ в НКУ, состоит из антенны и приемника/передатчика. Структурно входит в состав БКУ. На рынке представлено

большое количество фирм, разрабатывающих радиокомплексы под стандарт CubeSat, такие как SSTL, Clyde Space, AeroAstro, ComDev, Canopus и другие.

4. GPS-модуль предназначен для определения орбитальных параметров движения космического аппарата.

На рынке представлены лишь две фирмы, которые занимаются изготовлением и поставкой уже готовых бортовых комплексов управления для КА стандарта CubeSat: Maryland Aerospace и Berlin space technologies.

Система обеспечения тепловых режимов предназначена для поддержания нормальных температурных условий на борту космического аппарата и на аппаратах данного класса данная система, как правило, механического типа, где тепло выводится на корпус КА через медные прожилки, вмонтированные в корпус.

Система электроснабжения состоит из аккумуляторных батарей, солнечных батарей, модуля управления СЭС и предназначена для обеспечения бортовой аппаратуры электроэнергией постоянного тока в условиях функционирования на заданной орбите. На рынке представлены фирмами Clyde Space, GomSpace ApS и т. д.

Полезная нагрузка служит для выполнения целевой задачи и обмена полученной информацией с НКПОР и состоит из следующих модулей:

1. Целевой аппаратуры, предназначенной для съемки подстилающей поверхности в оптическом и радиодиапазоне, ретрансляции и прочих задач. Состав и задачи могут меняться в зависимости от назначения КА. Лидерами в производстве целевой аппаратуры по стандарту CubeSat являются фирмы Canopus, GomSpace ApS, AeroAstro, SSTL, Berlin space technologies и др.

2. Бортовой радиокомплекс Ка-диапазона предназначен для передачи целевой информации на пункт приема (НКПОР) и получения с НКПОР полетных заданий на выполнение целевых задач КА. Состоит из антенны и приемника/передатчика.

К космическим аппаратам, разработанным по стандарту CubeSat, как правило,

не предъявляются жестких требований в связи с их малым сроком активного существования и низким воздействием на аппаратуру факторов космического пространства, что обусловлено орбитой КА.

Электронная компонентная база (ЭКБ), применяемая при разработке КА данного класса, используется, как правило, класса «Commercial» и «Industrial», реже применяют ЭКБ класса «Military» и «Space» (в основном для производства КА в интересах министерства обороны США).

Следует обратить особое внимание на тот факт, что аппаратного резервирования в космических аппаратах данного стандарта не предусмотрено, что обусловлено их сверхмалыми размерами и массой.

Эксплуатируемые в настоящее время КА стандарта CubeSat имеют следующие характеристики:

- точность ориентации нано КА составляет около 1° с применением солнечного датчика и около $3-5'$ с использованием звездного датчика;

- скорость разворота для КА размером «3U» и массой 4 кг составляет около $2^\circ/\text{сек}$ с применением двигателей-маховиков и магнитных исполнительных органов;

- стойкость к накопленной дозе составляет порядка 30 крад;

- диапазон рабочих температур $-40...+80^\circ\text{C}$.

Также немаловажной проблемой для КА стандарта CubeSat является выведение его на рабочую орбиту. Сейчас используется только один способ доставки – попутной нагрузкой с использованием транспортно-пускового контейнера (ТПК), закрепленного либо на переходной платформе, либо установленного на разгонном блоке. Тем не менее в США ведутся исследования по выведению с использованием малой ракеты со стартового комплекса. Однако не рассмотрен еще один эффективный способ доставки, с использованием самолета – так называемый «воздушный старт», где под фюзеляж устанавливается ракета, на которой и предполагается выводить космический аппарат на целевую орбиту.

Дальнейшая концепция КА стандарта CubeSat развивается в следующих направлениях:

- максимальная реализация принципа модульности;
- увеличение возможностей КА данного класса в части целевой нагрузки, сроков службы и маневренности на целевой орбите;
- разработка способов увода с орбиты;
- совершенствование и поиск более дешевых и надежных средств доставки на целевую орбиту.

В 2013 г. на проходившей в США 27-й конференции по малым космическим аппаратам было рассмотрено следующее интересное направление дальнейшего развития. Осуществление обмена по радиоканалу (аналогично Wi-Fi или Wi-Max) координатной информацией с соседними космическими аппаратами при выходе из строя у одного из них датчиковой аппаратуры, таким образом обеспечивая живучесть всей группировки.

В России в последние два года проявляется интерес к космическим аппаратам нанокласса.

Однако следует отметить, что российские предприятия на данный момент разработок КА данного класса и комплектующих к ним не проводят, хотя данное направление и является весьма перспективным и позволило бы решать большой круг задач в интересах многих потребителей с минимальными затратами.

Выводы

Анализ разработок космических аппаратов нанокласса за рубежом показал, что данное направление получило широкое распространение в последнее десятилетие. Разработан стандарт CubeSat, позволяющий создавать КА на основе унифицированных компонентов (модулей) и их интерфейсов.

В России данное направление получило развитие в последние два года, однако отечественные комплектующие для этих аппаратов в данный момент не разрабатываются.

Данное направление развития космической отрасли является перспективным, так как космические аппараты нанокласса позволяют при относительной дешевизне решать ряд задач в области фундаментальных научных исследований, дистанционного зондирования Земли, метеорологии и т. д.

Библиографический список/References

1. 26th Annual AIAA/USU conference on small satellite / Kuwahara. USA. 2012.
2. 27th Annual AIAA/USU conference on small satellite / Stern. USA. 2013.
3. <http://www.cubesatkit.com>.
4. <http://www.sinclairinterplanetary.com>.
5. <http://www.sstl.co.uk>.
6. <http://www.gomspace.com>.
7. <http://www.spacemicro.com>.
8. <http://www.bradford-space.com>.
9. <http://www.ssbv.com>.
10. <http://www.vectronic-aerospace.com>.
11. <http://www.tyvak.com>.
12. <http://www.aacmicrotec.com>.

ANALYSIS AND CONCEPT DEVELOPMENT OF NANOCCLASS SPACECRAFT IN RUSSIA AND ABROAD

Sharitkin Y.N., FSUE TsNIIMash

sharitkin@yandex.ru

Central Research Institute of Machine Building (FSUE TsNIIMash), 4, st. Pioneer, Korolev, Moscow region, 141070, Russia

The analysis of global trends in the development of spacecraft of the «nano» class has been made. An advanced structure of the spacecraft of «nano» class and its component parts (modules) is presented. Peculiarities of «nano» class spacecraft constructing are singled out. The experience of creating a standard design of «nano» class spacecraft has been analysed. Various options for the design of space vehicles and options for their layouts have been considered. The conditions of operation of «nano» class spacecraft, as well as the range of tasks they can perform in the best interests of different departments, are shown. Peculiarities of constructing of the electrical parts, as well as the interfaces recommended for usage in «nano» class space vehicles, are singled out. The standard design of «nano» class spacecraft CubeSat has been considered, the features of the standard design have been analysed, and the history of the CubeSat standard is presented. Some features of the use of electronic components in the spacecraft that met the CubeSat standard and steps to reduce the cost of the project using the CubeSat standard are described. The approximate cost and time of designing space vehicles of this class has been calculated. A list of manufacturers of spacecraft and parts to them has been presented. Both the traditional and the perspective methods of delivery of «nano» class spacecraft into the working orbit which could lower the cost of delivery and ensure its warranty by reducing dependence on the primary payload have been researched. The state of development of space vehicles and their components on the territory of the Russian Federation is presented. On the basis of the analysis the summarized requirements and characteristics of the spacecraft are presented. The perspective of development of spacecraft and methods of their delivery into the working orbit is given.

Keywords: nanosatellite, the transport and launch container (POD), CubeSat standard.