

УДК 629.78

Д. А. Храмов

Інститут технічної механіки Національної академії наук України
і Національного космічного агентства України, Дніпропетровськ

МИНИАТЮРНЫЕ СПУТНИКИ СТАНДАРТА «CUBESAT»

Стандарт «CubeSat» дає можливість створювати мініатюрні супутники масою 1–3 кг за короткий період часу (1–2 роки) і порівняно невеликі кошти. Роботи зі створення «CubeSat'ів» ведуться в десятках навчальних центрів і творчих колективів по всьому світу. Більша частина подібних супутників створюється в навчальних цілях, однак сфера їхнього застосування постійно розширюється. Швидкий розвиток елементної бази дає надію на можливе комерційне застосування цих супутників вже в найближче десятиліття. Створення подібних супутників особливо актуальне в умовах України, яка має великий потенціал в області запуску супутників. Це дозволило б у проміжках між реалізацією великих проектів здійснювати космічні дослідження при порівняно невеликих фінансових витратах.

В последнее десятилетие отмечается значительный рост числа запусков космических аппаратов, масса которых не превышает 10 кг, так называемых пико- (до 1 кг) и наноспутников (от 1 до 10 кг) (centaur.sstl.co.uk/SSHP/, en.wikipedia.org/wiki/Miniaturized_satellite). Традиционно такие спутники используются для обучения и отработки новых технологий, однако сфера их применения постоянно расширяется. Важную роль в этом направлении играет стандарт «CubeSat» (cubesat.atl.calpoly.edu/media/Documents/Developers/CDS%20R9.pdf), в соответствии с которым выполнено большинство подобных спутников. В настоящей статье приводится краткий обзор состояния работ в области создания спутников стандарта «CubeSat», указаны тенденции и возможные перспективы развития данного направления.

Появление стандарта «CubeSat» связано с необходимостью решения одной из важнейших проблем подготовки специалистов в космической отрасли — проблемы проведения практических занятий. С одной стороны, практические работы по созданию и эксплуатации реальных, пусть даже простейших, спутников могли бы существенно повысить уровень подготовки будущих специалистов. С другой стороны, такие работы требуют значительного времени и по-

росту не вписываются в учебные планы, а необходимые для этого финансовые средства слишком велики даже для бюджетов крупнейших учебных центров. Поэтому исходные посылки предложенной в 1999 г. профессором Стэнфордского университета (США) Р.Твиггсом концепции создания спутников «CubeSat» заключались в следующем [6]:

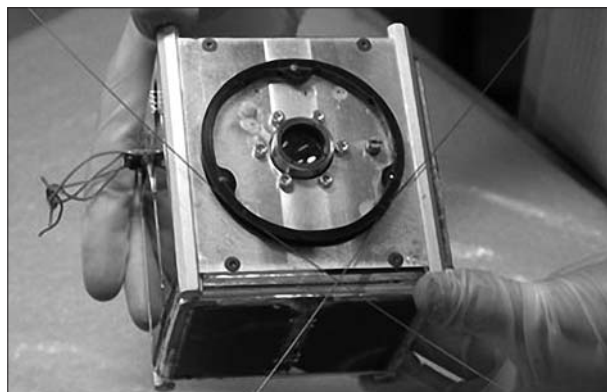
- создавать спутник за короткий период (1–2 года);
- стоимость создания спутника должна быть меньше 50 тыс. долл.;
- активно привлекать студентов, аспирантов и молодых специалистов на всех этапах работ по проектированию, созданию и использованию спутника.

В результате развития этой концепции специалистами из Стэнфордского университета и Калифорнийского политехнического института были созданы стандарт на пикоспутники «CubeSat» и устройство для их интеграции с ракетой-носителем (РН) P-POD (Poly Picosatellite Orbital Deployer) (www.cubesat.org).

Стандарт накладывает ограничения на размеры и массу спутника (cubesat.atl.calpoly.edu/media/Documents/Developers/CDS%20R9.pdf): его корпус должен представлять собой алюминиевый куб объемом $10 \times 10 \times 10 \text{ см}^3$, общая масса которого не должна превышать 1 кг (рисунок). Характеристики всех остальных систем и

устройств разработчик выбирает по своему усмотрению. Поскольку P-POD позволяет вывести одновременно до трех спутников, называемых также 1U (single unit), в стандарте предусмотрена возможность создания двойных (объемом $10 \times 10 \times 20 \text{ см}^3$ и массой 2 кг — 2U) и тройных ($10 \times 10 \times 30 \text{ см}^3$, 3 кг — 3U) спутников. В настоящее время для интеграции «CubeSat» с РН используются также устройства T-POD и X-POD (mtech.dk/thomsen/space/cubesat.php).

С момента появления популярность стандарта «CubeSat» неизменно растет. Если в 2001 г. над проектами подобных спутников работало всего семь организаций [6], то сейчас их 95 (www.cubesat.org), причём 38 спутников уже запущено (см. табл. 1, а также веб-страницу mtech.dk/thomsen/space/cubesat.php). Работы ведутся отнюдь не только в развитых космических державах, но и в Дании, Нидерландах, Израиле, Норвегии, Швейцарии, Турции, Колумбии. Вырабатываются новые формы сотрудничества, в частности совместная разработка спутника международной командой, координирующей свои действия с помощью интернета (<http://blogs.seds.org/sedsat2/>). Ежегодно проводятся семинары разработчиков (Annual CubeSat Work-



Прототип спутника AAUSat (www.cubesat.auc.dk)

shop); доклады, посвященные «CubeSat», широко представлены на престижных научных конференциях.

ЦЕЛИ ПОЛЕТОВ И ПОЛЕЗНАЯ НАГРУЗКА

Основная цель создания спутников типа «CubeSat» — повышение качества образования в аэрокосмической отрасли. Благодаря появлению стандарта студенты получили возможность в течение одного-двух лет участвовать в полном цикле работ над реальным космическим проектом: от выработки концепции, конструирования

Таблица 1. Запуски спутников «CubeSat»

Дата пуска	Ракета-носитель/ Космодром	Параметры орбиты	Количество спутников	Спутники
30.06.2003	«Рокот»/Плесецк (Россия)	818×832 км, солнечно-синхронная, наклонением 98°	6	CUTE-I, XI-IV, CanX-1, DTUosat, AAUSat, QuakeSat (3U)
27.10.2005	«Космос-3М»/ Плесецк (Россия)	686×686 км, солнечно-синхронная, наклонением 98°	3	NCube2, UWE-1, XI-V
22.02.2006	M-V/Uchinoura, (Япония)	800×185 км, солнечно-синхронная, наклонением 98°	1	CUTE 1.7 + APD (2U)
26.07.2006	«Днепр»/Байконур (Казахстан)	солнечно-синхронная, наклонением 97.43°	14	ION (2U), Sacred, KUTEsat Pathfinder, ICE Cube 1, ICE Cube 2, RINCON 1, SEEDS, HAUSAT 1, NCube1, MEROPE, AeroCube-1, CP1, CP2, Mea Huaka. Спутники погибли в результате аварии РН
16.12.2006	Minotaur/Wallops Flight Facility (США)	415×415 км, наклонением 40°	1	GeneSat-1 (3U)
17.04.2007	«Днепр»/Байконур (Казахстан)	780×660 км, солнечно-синхронная, наклонением 98°	7	CP3, CP4, AeroCube-2, CSTB-1, MAST (3U), CAPE-1, Libertad-1
28.04.2008	PSLV/Satish Dhawan Space Centre (Индия)	630×630 км, солнечно-синхронная, наклонением 98°	6	AAUSat-2, CanX-2 (3U), Compass-1, CUTE 1.7 + APD II (2U), Delfi-C3 (3U), SEEDS (2)

ния, изготовления и наземных испытаний до эксплуатации спутника на орбите. Кроме того, студенты приобретают практические навыки организации проекта, работы в коллективе, учатся тому, как правильно использовать время, деньги, кадры, планировать риск, организовывать совещания, готовить и использовать документацию.

Спутники «CubeSat» благодаря своей относительной дешевизне и скорости в разработке являются хорошей платформой для исследования новых подходов в космической технике, позволяющей демонстрировать инновационные технические и технологические решения. Учитывая эти преимущества, в проектах «CubeSat» активное участие принимают коммерческие фирмы (в частности, Boeing и Aerospace Corporation). Аprobация в условиях космического пространства среди прочего позволяет получить дополнительную рекламу, что особенно важно для небольших компаний, специализирующихся на высокотехнологичной продукции.

В табл. 2 перечислены цели и результаты полетов гражданских спутников типа «CubeSat» (кроме 14 спутников, погибших 26 июля 2006 г. при аварии РН «Днепр»).

В случае «CubeSat» термин «полезная нагрузка» фактически относится ко всему спутнику. Нередко аппаратура служебных систем подобных спутников впервые проходит аprobацию в условиях космического пространства, и в этом смысле также выступает в роли полезной нагрузки.

Во многих полетах «CubeSat» планируется тестирование готовых электронных компонентов и приборов. Так, на спутнике «Sacred» предполагалось испытать новые интегральные микросхемы разработки Alcatel. На спутнике «Mea Nuaka» (mtech.dk/thomsen/space/cubesat.php) планировалось испытание нового вида антенн диапазона 5.8 ГГц (оба спутника погибли при аварии РН). Солнечные датчики компании Optical Energy Technologies предполагалось тестировать в полёте CP1 и мн. др.

Чаще всего в качестве собственно полезной нагрузки использовались цифровые фотокамеры (табл. 2). Как правило, камера предназна-

лась для фотографирования поверхности Земли, хотя на спутнике CUTE-1 ее предполагалось использовать как солнечный датчик, а на канадских CanX-1, 2 камера входит в состав звездного датчика. Качество фотоснимков можно охарактеризовать как демонстрационное (все-таки главная цель создания большинства спутников — обучение). До коммерческих применений снимков, получаемых с подобных спутников, еще далеко.

Большая группа проектов предполагает проведение в ходе полета физических экспериментов, направленных на измерение числа и состава заряженных частиц в околоземном пространстве. Счетчики заряженных частиц предполагалось использовать на «Sacred», «KUTEsat Pathfinder», CUTE 1.7 + APD, CUTE 1.7 + APD II и MEROPE (mtech.dk/thomsen/space/cubesat.php). На спутнике ION, погибшем при аварии РН предполагалось использовать фотоумножитель, позволяющий исследовать собственное свечение верхних слоев атмосферы (mtech.dk/thomsen/space/cubesat.php). Пока рано говорить о какой-либо научной ценности результатов подобных экспериментов (по разным причинам подавляющее большинство из них так и не было поставлено). Тем не менее, одним из направлений возможного использования подобных спутников является проведение распределенных измерений в космическом пространстве. Орбитальные системы миниатюрных спутников-датчиков можно использовать, в частности, для распределенных измерений параметров ионосферной плазмы.

Ряд экспериментов предполагал развертывание в космосе тросовых систем ([en.wikipedia.org/wiki/Tether propulsion](http://en.wikipedia.org/wiki/Tether_propulsion)), что связано с актуальными в последние годы вопросами предотвращения накопления «космического мусора», в частности увода с орбиты спутников, отработавших свой срок. Одним из перспективных способов увода представляется использование для создания дополнительных сил сопротивления движению спутника электропроводящей тросовой системы [4]. Эксперименты с подобными системами на «CubeSat» — американский MAST (www.tethers.com/Missions.html) и датский DTU-

Таблица 2. Цели и результаты полетов спутников «CubeSat»

КА	Организация	Цель	Результаты
CUTE-I	Токийский технологический институт, Япония	Проверка возможности использования цифровой фотокамеры в качестве солнечного датчика	Функционирует нормально (январь 2007 г.)
XI-IV	Университет Токио, Япония	Фотографирование поверхности Земли с помощью цифровой фотокамеры	Функционирует нормально (январь 2007 г.)
CanX-1	Университет Торонто, Канада	Тестирование миниатюрных датчиков горизонта и звездного датчика, а также GPS приемника	Радиокontakt не установлен
DTUsat	Технический университет Дании, Дания	Тестирование солнечных датчиков, выполненных по технологии MEMS и развертывание 600-метрового троса для изменения орбиты спутника	Радиокontakt не установлен
AAUsat	Университет Ольборга, Дания	Фотографирование поверхности Земли с помощью цифровой фотокамеры	Получен сигнал радиомаяка
QuakeSat	Стэндфордский университет и компания Quakesat, США	Регистрация сигналов чрезвычайно низких частот для оперативного предсказания землетрясений.	Функционирует нормально (декабрь 2006 г.)
NCube2	Норвежский научно-технологический университет, Норвегия	Слежение за морскими судами и миграцией северных оленей	Радиокontakt не установлен
UWE-1	Университет Вюрцбурга, ФРГ	Апробация нового коммуникационного протокола, GaAs-солнечных батарей, использование мiсro Linux в качестве операционной системы бортового компьютера спутника	Функционировал нормально около 1 мес., после чего контакт был потерян
XI-V	Университет Токио, Япония	Фотографирование поверхности Земли (по сравнению с XI-IV увеличено разрешение фотокамеры), отработка нового вида солнечных батарей	Функционирует нормально (январь 2007 г.)
CUTE 1.7 + APD	Токийский технологический институт, Япония	Отработка универсальной платформы для 2U. Тестирование детектора заряженных частиц собственной разработки. Развертывание 10-м тросовой системы с эмиттером электронов для изменения орбиты спутника	Функционировал около одного месяца. В начале апреля 2006 г. контакт был потерян
GeneSat-1	Center for Robotic Exploration and Space Technologies, США	Орбитальный эксперимент с бактериями <i>E. Coli</i> . Первый биологический эксперимент на борту CubeSat.	96-ч эксперимент успешно завершён 22.12.2006 г.
CP3	Калифорнийский Политехнический институт, США	Трехосная стабилизации с использованием магнитных исполнительных органов	Радиокontakt не установлен
AeroCube-2	Aerospace Corporation, США	Отработка системы связи и цифровых фотокамер	Авария в системе энергообеспечения. Успел передать несколько снимков

КА	Организация	Цель	Результаты
CSTB-1 (Cubesat Testbed 1)	«Боинг», США	Отработка бортовых систем	Функционирует нормально
MAST	Компания Tethers Unlimited и Стэндфордский университет, США	Развертывание километровой тросовой системы и исследование поведения тросового соединения в космосе	Установлен радиокontakt с одним из модулей (вместо двух). Развернуть тросовую систему не удалось
CP4	Калифорнийский Политехнический институт, США	Тестирование стандартной платформы для 1U спутников	Радиокontakt не установлен
CAPE-1	Университет Луизианы, США	Фотографирование поверхности Земли с помощью цифровой фотокамеры	Авария в системе энергоснабжения
Libertad-1	Университет Sergio Arboleda, Колумбия	Отработка системы связи. Первый колумбийский спутник	Функционировал нормально в течение расчетного срока эксплуатации (около 52 дней)
AAUsat-2	Университет Ольборга, Дания	Детектирование гамма-лучей с помощью детектора, созданного в Датском национальном космическом центре	Установлен радиокontakt
CanX-2	Университет Торонто, Канада	Тестирование оборудования (реактивного двигателя, маховиков, солнечных датчиков, звездного датчика, приемника GPS), нового коммуникационного протокола, проведение ряда научных экспериментов	Установлен радиокontakt
Compass-1	Университет Аахена, Германия	Тестирование приемника GPS и цифровой фотокамеры	Установлен радиокontakt
CUTE 1.7 + APD II	Токийский технологический институт, Япония	Аналогичен CUTE 1.7 + APD	Установлен радиокontakt
Delfi-C3	Технологический университет Дельфта, Нидерланды	Тестирование автономного солнечного датчика, новой конструкции солнечных батарей и трансивера	Функционирует нормально
SEEDS (2)	Университет Nihon, Япония	Тестирование гироскопического датчика углового движения	Установлен радиокontakt

Sat-1 (www.dtusat.dtu.dk) — завершились неудачей, а на японском Cute 1.7+APD (lss.mes.titech.ac.jp/ssp/cute1.7/cute1.7-1/index_e.html) эксперимент так и не был проведен. Проведение тросового эксперимента на японском Cute 1.7+APD II (mtech.dk/thomsen/space/cubesat.php) намечено на 2009 г.

Еще одним интересным направлением, с которым связан, в частности, эксперимент на Cute-1.7+APD, является использование «CubeSat» в качестве ретрансляторов в любительской спутниковой радиосвязи.

Другие эксперименты на борту «CubeSat» носили единичный характер. Так, на норвежских спутниках NCUBE предполагалось использовать систему автоматического слежения за движением морских судов и миграцией стад оленей (www.ncube.no).

На борту спутника GeneSat-1 в течение 96 ч проводился космический эксперимент с бактерией *E. Coli*. Спутник «QuakeSat», оборудованный детекторами колебаний чрезвычайно низкой частоты, используются для прогнозирования землетрясений.

Следует отметить традиционный интерес военных организаций к миниатюрным спутникам. Агентство перспективных исследовательских проектов министерства обороны США (DARPA) еще в 1995 г. учредило программу по созданию микроспутников, в 1998 г. были начаты работы над программой по созданию кластеров микро- и наноспутников [8], а начиная с 2000 г. запущен ряд пикоспутников серий MEMS и MEPSI (www.nasa.gov/mission_pages/station/science/experiments/STP-H2-MEPSI.html) (последние основаны на стандарте «CubeSat»).

БЮДЖЕТ И СРОКИ РАЗРАБОТКИ

Девиз разработчиков «CubeSat»: «Smaller, Cheaper, Faster, Better» («Меньше, дешевле, быстрее и лучше»). Идеология [6], заключающаяся в максимальном использовании в конструкции готовых элементов и приборов (портативных компьютеров, радиостанций, камер от мобильных телефонов и др.), сближает эти спутники с первыми персональными компьютерами разработки IBM. По данным (en.wikipedia.org/wiki/CubeSat) стоимость создания и запуска «CubeSat» в настоящее время составляет 65–80 тыс. долл. (собственно запуск оценивается приблизительно в 40 тыс. долл. [3]). Наиболее дорогостоящими стали первые проекты. Сказывались отсутствие опыта разработки и сравнительно малый выбор готовых электронных компонентов. Так, расходы на разработку одного из первых «CubeSat», японского XI-IV [9] (покупка оборудования, тестирование отдельных узлов, наземные испытания), составили около 60 тыс. долл. Стоимость изготовления самого спутника составила около 10 тыс. долл. [9]. Таким образом, разработка и запуск «CubeSat» обходятся более чем на порядок дешевле даже в сравнении с микроспутниками, бюджеты которых составляют около миллиона долларов. В результате «CubeSat» стали наиболее распространенным типом малых спутников, создаваемых молодежными коллективами. Более крупные спутники, как правило, создают только организации, имеющие опыт работ в этом направлении.

ГОСУДАРСТВЕННАЯ ПОДДЕРЖКА

Спутники стандарта «CubeSat» создаются при активной поддержке государства в рамках национальных и региональных программ. Формы поддержки включают полное или частичное финансирование работ по подготовке и запуску спутника (в частности, финансирование наземных испытаний, запуска), а также предоставление оборудования, технологий, экспериментальной базы, проведение конкурсов на создание спутника и других организационных мероприятий. Так, существенную поддержку в подготовке японских «CubeSat» оказывает JAXA [9]. В США, помимо гражданских организаций, программы по созданию миниатюрных спутников финансируют также подразделения Министерства обороны (www.nasa.gov/mission_pages/station/science/experiments/STP-H2-MEPSI.html).

Особо следует отметить программу по созданию малых спутников, работающую в Дании. В рамках работ по ней три «CubeSat» уже запущено, и еще несколько готовятся к запуску (mtech.dk/thomsen/space/cubesat.php). Программа носит комплексный характер, в частности активно поощряется тестирование на спутнике оборудования и электронной техники отечественной разработки.

ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СПУТНИКА СТАНДАРТА «CUBESAT»

В настоящее время не существует готовой стандартной платформы «CubeSat». Значительная часть оборудования разрабатывается для конкретного спутника и ориентирована на выполнение целей его полета. Однако работы в области создания такой платформы ведутся довольно активно. Появились коммерческие компании, предлагающие готовые решения для ряда систем «CubeSat» (www.clyde-space.com, www.cubesatkit.com, www.isispace.nl). Быстрые темпы развития электронной техники говорят за то, что подобная платформа может появиться в самом ближайшем будущем. В первую очередь это касается двойных и тройных спутников. Так, на двойных японских спутниках Cute 1.7+APD и

Cute 1.7+APD-II применяется прототип унифицированной платформы, получившей название «SatelliteCore» (directory.eoportal.org/pres_CUTE17CubicalTokyoTechEngineeringSatellite17.html).

Корпус и компоновка. Первые «CubeSat», запущенные в 2003 г., имели весьма разнообразные компоновки (www.cubesat.auc.dk) [9]. Вскоре появились коммерческие предложения. Так, в состав набора готовых элементов CubeSatKit компании «Pumpkin, Inc.» (США, www.cubesatkit.com) входят два варианта реализации корпуса спутника: закрытый и открытый. Голландская компания ISIS (www.isispace.nl) также предлагает два варианта компоновки спутника: горизонтальную и вертикальную. В обоих случаях масса корпуса, крепежа и монтажных панелей составляет около 200 г.

Бортовой компьютер (БК) является центральным элементом — «сердцем» спутника. Его характеристики диктуются целями полета конкретного спутника, а также уровнем развития электронной элементной базы. Ввиду быстрого развития электронной техники решения, использованные первыми разработчиками «CubeSat» в 2001-2003 гг., зачастую уже устарели.

Условия космического пространства предъявляют жесткие требования к выбору элементов БК. Они должны быть устойчивы к действию космической радиации, работать в широком диапазоне температур, иметь достаточно низкое энергопотребление. Для спутников типа «CubeSat» используются промышленные электронные компоненты, более дешевые и менее устойчивые к действию радиации, чем «космические» компоненты, применяемые в традиционных спутниках. При этом промежуточные варианты конструкций создаются на основе еще более дешевых бытовых компонентов.

Двойные и тройные спутники позволяют разработчикам использовать более производительные процессоры. Так, в проекте двойного КА TU Sat [5] используется процессор Intel 80386 для обработки и хранения научной информации и электронной почты. В двойном «CubeSat» Cute-1.7+APD (directory.eoportal.org/pres_CUTE17CubicalTokyoTechEngineeringSatellite17.html) в качестве БК используются наладонные компьютеры Hitachi PDA NPD-20JWL. Масса подобных компьютеров (150-200 г) позволяет для повышения надежности даже использовать дублирование БК.

Система энергоснабжения «CubeSat» состоит из солнечных батарей, обеспечивающих его энергией на освещенной стороне орбиты, и аккумуляторных батарей, питающих бортовые системы на теневой стороне орбиты (примерно треть времени жизни для большинства «CubeSat») и запасающих энергию солнечных батарей.

Спутники, рассчитанные на краткосрочный полет, используют только аккумуляторные батареи («PolySat» [3], «Libertad» (mtech.dk/thomson/space/cubesat.php)). В одиночных «CubeSat» используются солнечные элементы различных типов (Si-, GaAs-, а также CIGS-элементы (www.cubesat.auc.dk) [9]), размещенные на корпусе спутника. На двойных и тройных «CubeSat» используются также раскрывающиеся панели солнечных батарей (cubesat.ece.uiuc.edu).

Наиболее удачными представляются конструкции системы энергоснабжения японских аппаратов серии XI, подробно описанные в [9].

Анализ энергетических бюджетов «CubeSat» показал, что запас энергии на борту одиночного спутника составляет от 1 до 10 Вт (www.cubesat.auc.dk, www.raumfahrt.fh-aachen.de/satellite/index.htm), на борту двойного — около 20 Вт (cubesat.ece.uiuc.edu). Однако не следует рассматривать эти цифры как предельные для подобных аппаратов. Разработка аккумуляторных батарей идет весьма быстрыми темпами. Достаточно сказать, что более половины всех видов аккумуляторов (в том числе литиево-ионные и литиево-ионно-полимерные) были разработаны после 1990 г. (en.wikipedia.org/wiki/Rechargeable_battery). Совершенствование батарей (как аккумуляторных, так и солнечных) позволит увеличить запас энергии на борту и даст возможность таким спутникам решать более серьезные задачи [2].

Система связи и аппаратура наземной станции слежения. Бортовая система связи «CubeSat»

осуществляет передачу сигналов радиомаяка, прием команд управления, передачу телеметрической информации и данных, полученных от полезной нагрузки.

Сигнал радиомаяка передается кодом Морзе в диапазоне частот 430 МГц. Для передачи телеметрии и команд, как правило, используется J-режим любительской радиосвязи, то есть для передачи данных со спутника используется диапазон 430 МГц, а для передачи команд на спутник — диапазон 144 МГц ([en.wikipedia.org/wiki/Amateur radio station](http://en.wikipedia.org/wiki/Amateur_radio_station)). Формат принимаемых со спутника данных обычно открыт для широкой публики, что позволяет осуществлять слежение за спутником радиолюбителям по всему миру. Для обмена информацией используется пакетная радиосвязь со скоростью 1200 бит/с ([en.wikipedia.org/wiki/Packet radio](http://en.wikipedia.org/wiki/Packet_radio)). Есть также проекты «CubeSat» с более развитой системой связи, в частности проект TU Sat 1 [5].

В ближайшей перспективе спутники типа «CubeSat» могут быть использованы в качестве элементов сети радиолюбительской связи, в качестве цифровых ретрансляторов и мейлбоксов. Здесь нужно сделать небольшое отступление в область техники любительской радиосвязи.

Мейлбоксами называются узлы сети любительской радиосвязи, позволяющие принимать, хранить, сортировать и пересылать по заданным радиоадресам электронную корреспонденцию. Если радиолюбитель не может связаться с мейлбоксом напрямую (слишком большое расстояние, малая мощность передатчика, низкое качество антенны), то связь с ним устанавливается через цепочку диджипитеров — цифровых ретрансляторов. В роли диджипитеров активно используются радиолюбительские спутники (например, серии OSCAR). Судя по описанию, японские спутники CUTE-1.7+APD и CUTE-1.7+APD II ([en.wikipedia.org/wiki/Packet radio](http://en.wikipedia.org/wiki/Packet_radio)) обладают многими функциями мейлбоксов и диджипитеров и после отработки платформы возможно использование подобных спутников для любительской радиосвязи.

Оборудование наземной станции слежения, как правило, традиционно для станций пакет-

ной радиосвязи и состоит из компьютера, модема, трансивера ([en.wikipedia.org/wiki/Packet radio](http://en.wikipedia.org/wiki/Packet_radio)) и антенны. Компьютер и модем объединяются в единый блок — так называемый контроллер терминального узла (Terminal Node Controller, [en.wikipedia.org/wiki/Terminal node controller](http://en.wikipedia.org/wiki/Terminal_node_controller)) — ключевой компонент станции пакетной радиосвязи. Антеннами являются две крестообразные антенны типа «волновой канал Яги» (430 МГц/144 МГц) и один плоский рефлектор. Антенны типа «волновой канал Яги» управляется персональным компьютером, используя данные о положении спутника в формате TLE, открытые для публики (www.space-track.org). В проекте [9] для независимого определения положения спутника было разработано программное обеспечение, позволяющее вычислять доплеровский сдвиг частоты, который затем используется для управления антенной.

Система управления ориентацией и стабилизацией (СУОС). Точность ориентации большинства запущенных к настоящему моменту единичных «CubeSat» невелика и составляет около 10°. Определение ориентации обычно осуществляется с помощью магнитных и солнечных датчиков, для управления чаще всего используются магнитные исполнительные органы (МИО) (www.cubesat.auc.dk, [en.wikipedia.org/wiki/Canadian Advanced Nanospace eXperiment Program](http://en.wikipedia.org/wiki/Canadian_Advanced_Nanospace_eXperiment_Program)). Однако уже двойным и тройным CubeSat'ам доступен почти весь спектр традиционных для современных СУОС приборов (mtech.dk/thomsen/space/cubesat.php).

Для определения ориентации, как правило, используются цифровые трехосные магнетометры (www.cubesat.auc.dk, www.ncube.no). В качестве солнечных датчиков могут использоваться солнечные батареи, ток в которых изменяется в зависимости от ориентации относительно Солнца (www.ncube.no) или фотодиоды, размещенные на гранях спутника (www.cubesat.auc.dk).

В состав СУОС также входят датчики температуры (термисторы), поскольку характеристики солнечных датчиков существенно зависят от температуры.

Для управления ориентацией «AAU-CubeSat» используются МИО: три катушки, расположенные на взаимно перпендикулярных гранях корпуса спутника. Спутники серии XI используют пассивную стабилизацию по магнитному полю Земли с помощью расположенного на борту постоянного магнита. Для рассеяния энергии колебаний спутника используется гистерезисный демпфер [9].

Спектр датчиков и исполнительных органов, которые можно использовать в составе СУОС, постоянно расширяется. Темпы развития элементной базы можно проиллюстрировать на примере двигателей-маховиков. Если в 2002 г. самые миниатюрные маховики имели массу 0.77 кг и энергопотребление более 3 Вт (www.dynacon.ca/index.php/product_19/ProdID/6.html), и потому не могли использоваться в пикоспутниках, то разработанные в 2007 г. маховики RW-B имеют массу всего 44 г, а максимальное энергопотребление составляет 0.7 Вт (www.astrofein.com).

На спутнике NCUBE-1 предполагалось использовать систему гравитационной стабилизации: полутораметровая гравитационная штанга являлась одновременно антенной (www.ncube.po). Испытания реактивных двигателей системы ориентации предполагалось провести на двойном спутнике ION [7].

Звездные датчики до сих пор не использовались на «CubeSat». Высокая точность определения ориентации пока не востребована в подобных спутниках, к тому же отсутствуют готовые приборы, подходящие по массогабаритным и энергетическим характеристикам. Самостоятельная же разработка датчиков представляет собой задачу, по сложности сравнимую с разработкой всего спутника. Однако в качестве полезной нагрузки звездные датчики используются на канадских «Can-X» (en.wikipedia.org/wiki/Canadian_Advanced_Nanospace_eXperiment_Program).

Датчики угловых скоростей (ДУС) рассматриваются многими разработчиками как весьма перспективные благодаря их малой массе, габаритам и низкому энергопотреблению. Однако необходимость принимать меры по коррекции

дрейфа показаний подобных датчиков усложняет конструкцию СУОС, и до сих пор ДУСы используются редко (mtech.dk/thomsen/space/cubesat.php).

Для определения положения спутника на орбите в настоящее время все чаще используются приемники системы GPS. Впервые, по-видимому, подобные устройства успешно использовались на колумбийском «Libertad-1» (mtech.dk/thomsen/space/cubesat.php).

Обеспечение теплового режима. Большинство проектов «CubeSat» используют пассивные способы управления тепловым режимом (специальные облицовка, окраска). Внешние элементы спутника подвергаются тепловым воздействиям в диапазоне температур от $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ при переходе с теневой стороны орбиты на освещенную, причем скачок температуры происходит в течение нескольких минут (www.raumfahrt.fh-aachen.de/satellite/index.htm). Такой перепад температур может привести к сбоям в работе или выходу из строя бортовой аппаратуры.

Согласно данным (www.raumfahrt.fh-aachen.de/satellite/index.htm) внутри спутника температура изменяется не так резко: от -20 до $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Основные электронные компоненты, отвечающие промышленным стандартам, способны работать в диапазоне температур от -40 до $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Известно, однако, что ряд «CubeSat» имели проблемы с работой аккумуляторов (см. табл. 2). Дело в том, что температурный диапазон нормальной работы современных литиево-полимерных аккумуляторов составляет от 0 до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Анализ (www.raumfahrt.fh-aachen.de/satellite/index.htm) показал, что на теневой стороне орбиты температура батарей будет падать ниже этого предела, если использовать только пассивные методы обеспечения теплового режима. Другим уязвимым местом может стать аппаратура полезной нагрузки (cubesat.ece.uiuc.edu).

Поскольку возможности активного управления температурой на борту «CubeSat» (особенно одиночного) весьма ограничены, выходом из ситуации является разработка такой компоненты, при которой батареи будут «подогре-

ваться» теплом от других элементов спутника. Образцами успешных компоновок могут служить японские XI-IV, XI-V и CUTE-I [9], успешно проработавшие на орбите в течение нескольких лет.

НАЗЕМНАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА

Разработчики «CubeSat» проводят наземное тестирование спутника в целом и отдельных его систем. Как правило, обязательными являются термовакуумные, вибрационные и радиационные испытания [9].

В ходе радиационных испытаний критические узлы спутника подвергаются воздействию дозы радиации, эквивалентной годовому пребыванию на орбите (www.studentspace.aau.dk/publications/RAST2003.pdf). Подобные испытания спутника XI-IV позволили выбрать наиболее радиационно устойчивый вариант конструкции БК [9].

Вибрационные испытания проводятся как для отдельных узлов, так и для спутника в целом, помещенного в стартовый контейнер P-POD (cubesat.ece.uiuc.edu).

Кроме этого, при создании XI-IV проводились испытания системы связи: приемник и передатчик размещались на метеорологическом зонде, поднимавшемся до высоты 400 км. Этот спутник прошел также тепловые испытания (равномерным нагревом в печи) для изучения диапазонов температур, в которых его элементы сохраняют работоспособность [9].

НАДЕЖНОСТЬ

На одиночных «CubeSat» в настоящее время затруднительно реализовать полноценную систему резервирования (с голосованием, дублированием и т.п.). В частности, реализация системы резервирования с голосованием затруднена из-за того, что для проверки работы какого-либо модуля необходим аналогичный модуль, собранный из компонентов, тестировавшихся в космических условиях, в то время как основные электронные компоненты многих «CubeSat» подобного тестирования не проходили.

Тем не менее, в ряде спутников используется дублирование критических узлов. Так, в одиночном спутнике RINCON 1 (погиб при аварии РН «Днепр») основная схема передатчика была продублирована маломощным радиомаяком, который должен был использоваться в случае отказа основной системы (mtech.dk/thomsen/space/cubesat.php). В одиночном CSTB-1 («CubeSat Testbed 1») разработки компании Boeing также использовалось частичное дублирование в системе связи (mtech.dk/thomsen/space/cubesat.php). В двойном Cute 1.7+APD использовалось дублирование БК (http://lss.mes.titech.ac.jp/ssp/cute1.7/cute1.7-1/index_e.html).

В спутниках XI-IV, XI-V реализована система из трех цепей питания с перекрестной проверкой [9]. Нормальная работа этих спутников возможна в случае отказа одной из трех цепей питания. Даже в случае остановки БК система связи способна принимать команды и посылать сигналы радиомаяка. Возможности отказов в работе питания системы связи сводятся к минимуму с помощью схемы обхода, обеспечивающей снабжение энергией непосредственно от аккумуляторных батарей. Такая система весьма экономна в использовании ресурсов спутника и доказала свою надежность, успешно проработав на орбите более трех лет.

ВЫВОДЫ

Ряд вопросов функционирования спутников типа «CubeSat» нуждается в дополнительном исследовании. Это относится, в частности, к анализу температурного поля внутри спутника. Нарушение теплового режима аккумуляторных батарей, возникающее вследствие неточности определения температурного поля, послужило причиной аварии ряда спутников (mtech.dk/thomsen/space/cubesat.php). В ряде случаев результаты, полученные для традиционных спутников, без должного обоснования переносились на малые спутники. Это показали, в частности, эксперименты по развертыванию тросовых систем. Схема развертывания, заимствованная у подобных систем с большой массой концевых тел [4], по-видимому, не подходит для использо-

вания на малых спутниках, поскольку не учитывает существенных особенностей развертывания в этом случае (низкого натяжения троса внешними силами, наличия в нем остаточных напряжений, необходимости стабилизации движения концевых тел) [1]. С другой стороны, «CubeSat» представляют собой прекрасный полигон для проведения экспериментов, а образовательная направленность создания подобных спутников позволяет исследовать проблемные вопросы широким кругом специалистов. В частности, в Дании проводятся конкурсы, посвященные исследованию определенных вопросов создания спутника, разработке конкретных узлов и систем (www.dtuosat.dtu.dk).

Характерной чертой успешных проектов «CubeSat» является монофункциональность — нацеленность проекта на проведение единственного эксперимента. Удачными, как правило, становились проекты, разработка которых являлась частью программы, ведущей от простого к сложному: от апробации бортовых систем спутника и аппаратуры наземной станции к проведению простых экспериментов с постепенным их развитием. Примерами подобных успехов являются японские спутники серии XI [9] и спутники, разрабатываемые в рамках Датской программы по созданию малых спутников (www.studentspace.aau.dk/program.html). Проекты, рассчитанные на проведение нескольких экспериментов без предварительного тестирования аппаратуры в условиях космоса, как правило, терпели неудачу.

Нередко подобные спутники называют «университетскими» или «молодежными». Опыт создания микроспутников, однако, показывает, что из университетских лабораторий могут вырасти компании, подобные британской SSTL (www.sstl.co.uk). В настоящее время эта компания имеет за плечами около трех десятков успешных запусков спутников, а также несколько разработанных спутниковых платформ с высокоточной системой ориентации. Приближение стоимости разработки спутника к цене автомобиля или крупной бытовой техники позволяет участвовать на рынке космических услуг небольшим фирмам и творческим коллективам. В

то же время стремление успеть за быстро развивающимся рынком электронной техники, дешевая натурная отработка перспективных технологий определяет интерес к миниатюрным спутникам со стороны крупных компаний.

Еще десять лет назад для обучения молодых специалистов и апробации перспективных технологий использовались микроспутники (centaur.sstl.co.uk/SSHP/). Теперь эту роль выполняют пико- и наноспутники, а микроспутники активно используются в коммерческих целях (www.sstl.co.uk). Развитие электронной техники, быстрое совершенствование таких технологий, как мобильная связь, цифровая фото- и видеотехника, создание аккумуляторных батарей, устройств MEMS и NEMS (микро- и наноэлектронно-механических устройств соответственно) позволяют надеяться на то, что в ближайшее десятилетие пико- и наноспутники смогут выполнять гораздо более широкий круг задач.

Создание и использование миниатюрных спутников массой от 1 до 10 кг особенно актуально для Украины, которая имеет большой потенциал в области запуска космических аппаратов. Это позволило бы Украине в промежутках между реализацией больших и дорогостоящих проектов проводить космические исследования при сравнительно небольших финансовых затратах.

1. Пироженко А. В., Храмов Д. А. Схема развертывания малой космической тросовой системы // Вісник Дніпропетровського ун-ту. Ракетно-космічна техніка. — 2007. — № 9/2. — С. 198–204.
2. Chan C. K. et al. High-performance lithium battery anodes using silicon nanowires // Nature Nanotechnology. — 2008. — N 3. — P. 31–35.
3. Heidt H., et al. CubeSat: A new Generation of Pico-satellite for Education and Industry Low-Cost Space Experimentation // 14 Annual/USU Conference on Small Satellites, Logan, Utah, 14, August 21–24, 2000. — Logan, 2000. — SSC00-V-5. — 19 p.
4. Hoyt R., et al. The RETRIEVE microsatellite tether deorbit experiment // AIAA Paper. — 2002. — N 3893.
5. Oehrig J. H., et al. TU Sat 1 — An Innovative Low-Cost Communications Satellite // 15th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites Logan, Utah, August 13–16, 2001. — Logan, 2001. — SSC01-VIIIb-4. — 15 p.
6. Puig-Suari J., Turner C., Twiggs R. J. CubeSat: The Development and Launch Support Infrastructure for

Eighteen Different Satellite Customers on One Launch // 15th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, Logan, Utah, August 13–16, 2001. — Logan, 2001. — SSC01-VIIIb-5.

7. *Rysanek F., et al.* MicroVacuum Arc Thruster Design for a CubeSat Class Satellite // 16th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites Logan, Utah, August 12–15, 2002. — Logan, 2002. — SSC02-I-2.
8. *Steyskal H., et al.* Pattern synthesis for TechSat21 — a distributed spacebased radarsystem // Aerospace Conference. IEEE Proceedings. — 2001. — V. 2. — P. 725–732.
9. *Tsuda Y., et al.* University of Tokyo's CubeSat Project — Its Educational and Technological Significance // 15th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites Logan, Utah, August 13–16, 2001. — Logan, 2001. — SSC01-VIIIb-7. — 8 p.

Поступила в редакцию 24.10.08

D. A. Khramov

MINIATURIZED SATELLITES OF CUBESAT STANDARD

CubeSat standard enables the capability to create miniaturized satellites with mass of 1–3 kg for a short time span (1–2 years) and rather small financial resources. CubeSats are being developed in tens educational centers and innovative companies worldwide. Most of similar satellites are developed in the educational purposes, however their scope extends constantly. Fast development of element base gives hope for possible commercial application of these satellites within the proximal decade. Development of similar satellites is especially actual in Ukraine which has a large potential in the field of satellite launches. This would allow one to realize space exploration at rather small costs in intervals between implementation of large projects.