РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
2017, том 4, выпуск 4, с. 64–82

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ, ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ

УДК 67.02:67.05:004.9:004 DOI 10.17238/issn2409-0239.2017.4.64

Шестой технологический уклад в космическом приборостроении

А. А. Романов, *д. т. н., профессор, romanov@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация
А. Е. Тюлин, *к. т. н., contact@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье анализируется текущее состояние и прогноз разработки технологий космического приборостроения — шестого технологического уклада (ШТУ). Показано, что на протяжении последнего десятилетия ярко выявилась тенденция изменения архитектуры космических аппаратов и систем на их основе от модульно-функционального построения к созданию «систем на печатной плате», а в перспективе и «спутника на чипе» с широким использованием «систем на кристалле» и «систем в корпусе». Подобные архитектуры активно применяются в так называемых распределенных и федеративных космических системах.

Представлен обзор достигнутых уровней технологической готовности производимых серийно составных частей малоразмерных космических аппаратов: конструктивных элементов, систем ориентации и стабилизации, терморегулирования, систем электропитания, бортовых компьютеров, памяти, а также основные проблемные вопросы разработки перспективных изделий, имеющих низкие уровни технологической готовности.

Отдельно рассмотрены достижения по микроминиатюризации полезных нагрузок, показано, что для космических систем навигации, связи и дистанционного зондирования Земли использование архитектур распределенных систем позволяет существенно сократить сроки разработки и развертывания систем, а также уменьшить их стоимость при сохранении требуемого уровня качества.

Полученные результаты могут быть положены в основу разрабатываемой стратегии развития перспективных космических систем и комплексов.

Ключевые слова: шестой технологический уклад, система на кристалле, система в корпусе, спутник на чипе, распределенные космические системы, федеративные космические системы, уровни технологической готовности, малоразмерные космические аппараты

Sixth Technological Way in Space Device Engineering

A. A. Romanov, *Dr. Sci. (Engineering), Prof., romanov@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation
A. E. Tyulin, *Cand. Sci. (Engineering), contact@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper analyzes the current state and the forecast of the space device technologies development, for the sixth technological way. It has been shown that during the last decade the spacecraft architecture and systems based on it have a tendency to change from separate modules with specific functions to "Systems on a Printed Circuit" and in the near future to "Satellite on a microchip" widely using "Systems-on-a-chip" and "Systems in Package" technologies. Such architectures are actively used in the so called distributed and federated space systems.

The paper presents the survey of the achieved technology readiness levels (TRL) for small satellite elements (COTS): construction, AODS, thermal control, power supply systems, onboard computers, and memory elements. The main problem items of the promising product development with low TRLs are considered as well.

Separately the paper discusses the main achievements on smallsat payloads microminiaturization. Using the architectures of the distributed systems can drastically decrease the development and deployment schedule of the navigation, communications and Earth remote sensing systems, as well as reduce their cost keeping the required quality level.

The results of this work could be used for the creation of a perspective strategy of future space systems.

Keywords: sixth technological way, System-on-a-chip, System in Package, satellite on a microchip, distributed space systems, federated space systems, technology readiness levels, small spacecraft

Введение

В работе [1] представлены смены основных технологических укладов развития мировой экономики начиная с 1770 г. При этом под технологическими укладами понимаются длительные (50 лет и более) экономические циклы, для которых характерен определенный уровень развития производительных сил. История показала, что каждый подобный цикл завершался экономическим кризисом и последующим переходом производительных сил на следующий уровень развития. Отмечается, что период 2010–2018 гг. характеризует собой зарождение (эмбриональную фазу) шестого по счету технологического уклада, ядро которого составят нано-, био-, инфо- и когнитивные технологии, обеспечивающие от 30 до 70 % прироста в различных отраслях российской экономики (рис. 1).

При этом базовыми отраслями для внедрения технологий ШТУ прогнозируются телекоммуникации, образование, химико-металлургический комплекс, ракетно-космический комплекс, а также растениеводство и здравоохранение, где ожидается ежегодный рост выручки до 10 %.

Отмечается также, что «промышленное производство будет базироваться на открытиях в биотехнологиях, генной инженерии, нанотехнологиях, в области новых материалов, информационно-коммуникационных, когнитивных, мембранных, квантовых технологиях, нанофотонике и молекулярной фотонике, микромеханике, робототехнике, технологиях виртуальной реальности, термоядерной энергетике, наноматериалах и наноструктурированных покрытиях и т. д.» [2].

В космическом приборостроении переход на технологии ШТУ можно условно соотнести с созданием авиационной техники, когда внедрение инновационных технологических переделов предыдущих укладов приводило к созданию самолетов нового поколения. Например, до недавнего времени космические аппараты (КА) разрабатывались с использованием функционально-модульного принципа, когда каждая служебная подсистема и полезная нагрузка представляли собой отдельные модули, интегрируемые для обеспечения заданных требований применения. Для удобства классификации будем называть такие КА спутниками четвертого поколения, использующими технологии пятого уклада (микроэлектроника и компьютерная техника).

Появление малоразмерных космических аппаратов позволило перейти к технологии «спутник–прибор» [3], когда служебные системы и полезные нагрузки стало возможным реализовывать в виде отдельных печатных плат, интегрируемых в рамках единого конструктива. Такие КА соответствуют следующему поколению спутников, но все еще используют технологии пятого уклада.

Развитием данного подхода представляется реализация концепций «спутник на чипе» и «спутник на печатной плате» в негерметичном исполнении с широким внедрением технологий «система на кристалле» и «система в корпусе» [4–6], а это уже технологии ШТУ. Данные разработки могут стать основой следующего поколения КА и систем на их основе. Указанное обстоятельство не означает, что «спутник–прибор» или большие космические аппараты исчезнут при появлении микроминиатюрных КА (МКА). Какое-то достаточно длительное время они могут существовать параллельно. Более того, возникающие при этом новые возможности существенно расширят функциональные возможности существующих сегодня космических комплексов и систем.

Внешний вид спутника на печатной плате — нанозонда «Спрайт» представлен на рис. 2 [7], а системные требования к спутнику на чипе — в табл. 1 [8].

В нанозонде «Спрайт» используются современные дешевые интегральные микросхемы с малым энергопотреблением, обеспечивающие основные технические характеристики спутниковой платформы для интегральных микросенсоров. Применяются солнечные батареи производства Spectrolab TASC, микроконтроллер, а также радиосистема на чипе компании Texas Instruments CC430 (SoC), 3-осевой магнетометр компании Honeywell HMC5883L, 3-осевой микрогироскоп на МЭМС InvenSense ITG-3200, а также необходимые пассивные компоненты, размещенные на печатной плате размером $3{,}5 \times 3{,}5$ см^2 массой 5 г.

Микросхема CC430 SoC является «сердцем» нанозонда и обеспечивает все вычислительные и коммуникационные возможности.

Авиа-, судо-, автомобиле-, приборо-, станкостроение; солнечная энергетика, электроника, электротехника, атомная промышленность, ядерная энергетика

Телекоммуникации, образование, химико-металлургический комплекс, ракетно-космический комплекс, растениеводство, здравоохранение

Прирост: до 10 % в год
несущие отрасли

Рис. 1. Структура нового (VI) технологического уклада и темпы роста его составляющих

Таблица 1. Системные требования к SPACECHIP

Система	Требования	Результат
Верхний уровень	SpaceChip должен использовать коммерческую технологию КМОП, пригодную для интеграции цифровых, аналоговых и РЧ-компонентов. SpaceChip должен соответствовать всем целям миссии и поддерживать концепцию эксплуатации	Austriamicrosystems SiGe-BiCMOS 0,35 мкм
Полезная нагрузка	ПН должна обнаруживать интересные явления космической погоды. Для демострации необходимо рассмотреть простейшую ПН	Простая КМОП-камера
Орбита	SpaceChip должен функционировать на заданной орбите миссии	Высота 500 км Малое наклонение
Конфигурация и конструктив	Должна быть реализована конфигурация монолитного «спутника на чипе». Размер не должен превышать типичных значений шага сетки КМОП-процесса. Масса должна быть менее 10 г. Конструкция должна иметь встроенный интерфейс с РН	Требуются допуски 20 × 20 мм максимум 10 г упаковка
СЭП	Должно быть использовано преобразование солнечной энергии в электрическую с помощью встроенных солнечных батарей. Необходимо изучить возможность использования аккумуляторов	Бюджет потребления 1 мВт
Обработка и хранение данных	Должен быть использован экономичный микроконтроллер. Необходимо изучить технологии энергонезависимой памяти. Конструктив должен выдерживать условия космической радиации	Улучшенный асинхронный микроконтроллер
Связь	Неоходимо использовать нелицензируемый диапазон 2,4 ГГц	Мощность – 1 Вт, дальность — 1 км. Требуется внешняя антенна
Ориентация и стабилизация	Должно быть применено определение ориентации. Необходимо исследовать возможности определения характеристик орбиты	Пассивная СОС. Определение орбиты невыполнимо
Двигатель	Двигатель не требуется, но возможности необходимо изучить	Монолитного решения нет
Температура	Должно быть использовано пассивное терморегулирование	Термостабильная подложка

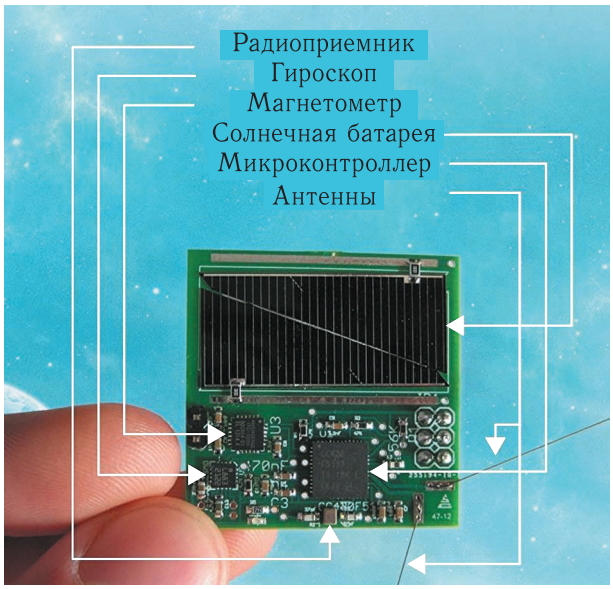


Рис. 2. Нанозонд «Спрайт»

Антенны нанозонда представляют собой полуволновой V-диполь, выбранный из-за однородного по пространству коэффициента усиления, простоты настройки, а также 50-омного волнового сопротивления, что устраняет необходимость использования дополнительных цепей развязки. Антенна выполнена из нитинола, никель-титанового сплава, обычно используемого в конструкциях с памятью формы, который даже при экстремальных механических воздействиях возвращает свою первоначальную форму.

Остальные компоненты нанозонда выбирались из соображения получения максимальной функциональности при минимальных размерах и имеющихся энергетических возможностях. Солнечная ячейка производит до 60 мА тока при напряжении 2,2 В с непосредственным подключением к электронике без дополнительных преобразований энергии и ее хранения. Соответственно «Спрайт» может функционировать только при освещении солнечным светом и совершенно не работоспособен на ночной стороне орбиты.

Использование новых технологий создания перспективных космических средств позволяет рассмотреть сетевые архитектуры организации космических систем на их основе: кластеров и созвездий малоразмерных космических аппаратов в составе распределенных или федеративных космических систем [9–11]. Так, концепция System F6 подразумевает использование вместо одного большого моноспутника набора нескольких малых космических аппаратов, существующих независимо и объединенных системой информационного обмена. При этом каждый МКА может обеспечивать только одну функцию по аналогии с модулями служебных подсистем большого КА. Указанный подход позволяет многократно повысить устойчивость системы к возникновению отказов (возможно перенесение функции на соседний аппарат), а также к возможности полного выхода одного из МКА из строя путем довыведения необходимого отдельного МКА.

Революционность концепции федеративной спутниковой системы (ФСС) состоит в том, что возможности каждого конкретного КА в группировке могут быть распределены с соседями на определенной основе — взаимодействие между ними осуществляется только в те моменты времени, когда это имеет конкретный смысл [12].

Кроме очевидного повышения эффективности работы собственно космических систем, это позволяет также наращивать спутниковые возможности путем подключения веб-сенсоров, обеспечивающих не только интеграцию спутниковых данных с данными сопутствующих контактных измерений, но и создание комплексных систем мониторинга, усваивающих на моделях все доступные данные о состоянии объектов наблюдения и среды их обитания на суше, на море и в атмосфере Земли. Использование подобных технологий позволяет также создавать самоорганизующиеся сетевые архитектуры будущего через объединение КА в сеть plug-and-play, что поддерживает бесшовное взаимодействие с существующими энергетическими и коммуникационными сетями наряду с предоставлением услуг конкретным потребителям.

Цель данной статьи — оценка возможностей использования технологий ШТУ в космическом приборостроении, включая оценки уровней технологической готовности (TRL) существующих и разрабатываемых МКА, а также определение основных направлений микроминиатюризации используемых электронных компонентов.

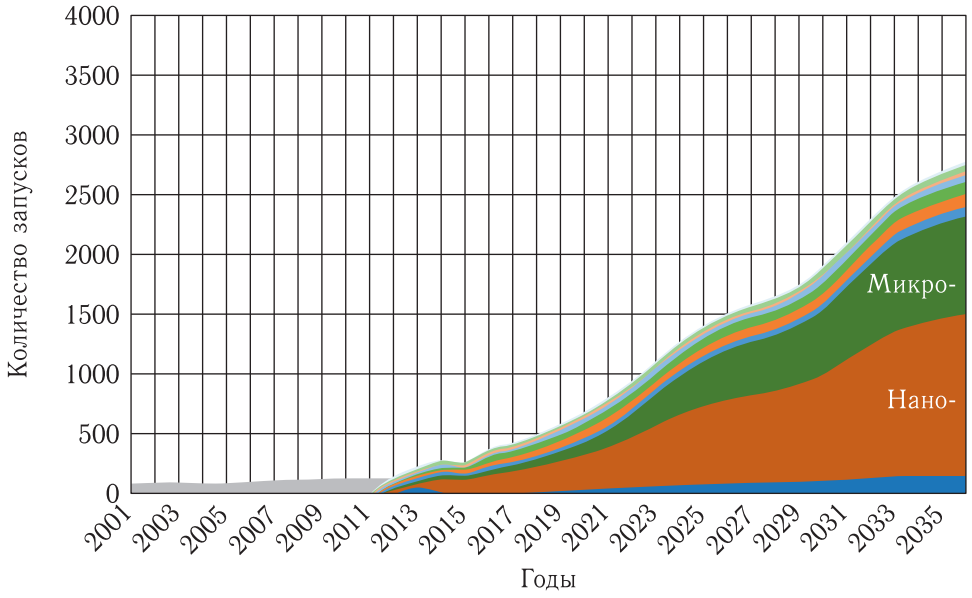


Рис. 3. Прогноз количества запусков микро/наноспутников

Прорывные перспективные технологии космического приборостроения

На рис. 3 представлен прогноз запусков разнообразных полезных нагрузок [13], использующих платформы МКА микро- и нанокласса, из которого отчетливо видно, что к 2035 г. количество запущенных аппаратов возрастет практически на порядок. Как было показано выше, следующее поколение МКА позволит обеспечить создание спутников на чипе. Однако совершенно очевидно, что переход к подобным технологиям займет некоторое время и возможен только при постепенном эволюционном переходе от технологий «система на печатной плате» и модульно-функционального принципа к использованию технологий «система в корпусе» и «система на кристалле».

Исследования различных авторов, например [14], идентифицировали десяток критических технологий, потенциально обеспечивающих десятикратное уменьшение веса и стоимости космических аппаратов и ракет-носителей с улучшенными на порядок характеристиками при условии соответствующих инвестиций в разработку и демонстрацию возможностей. Предлагаемые технологии могут быть положены в основу формулирования большого количества концепций как уже предложенных, так и будущих миссий и функций, имеющих революционный потенциал применения. Сосредоточимся в большей части не на отдельных небольших улучшениях, обеспечиваемых внедрением новых решений, а на так называемых прорывных инновациях, для которых возникающие новые свойства столь значительны или стоимость настолько мала, или обеспечивается и то и другое, что проявляется принципиально новое качество приложений.

Определим теперь перспективные возможности внедрения технологий ШТУ в космические приложения. Даже если в конечном счете могут быть реализованы только некоторые из них, это позволит значительно улучшить наши представления о будущем космических услуг для конкретных потребителей.

Выборочный и далеко не полный перечень первоочередных технологий, предполагаемых для реализации в перспективных концепциях космических систем, включает [15]:

- фотовольтаические биосенсоры, совмещенные с микроэлектронными элементами;
- микроэлектромеханические системы (МЭМС);
- многоспутниковые группировки распределенных космических систем;

- легкие большие апертуры приемопередающей аппаратуры разнообразных космических систем;
- широкополосные космические системы связи;
- системы генерации и передачи электроэнергии;
- системы хранения энергии;
- надувные конструкции;
- легкие конструкции и материалы;
- модернизированные микродвигатели;
- создание нанотоплива.

Все перечисленные технологии, безусловно, попадают под технологии ШТУ и должны активно продвигаться на рынки космического приборостроения. Следует отметить, что только перечисленными технологиями потенциальное применение технологий ШТУ не ограничивается.

Какие же технологии предстоит развивать в первую очередь? Прежде всего это микроэлектроника, поскольку, не обладая необходимыми средствами микроминиатюризации, невозможно создавать системы на кристалле, обеспечивая малое энергопотребление, а также модернизируя уже существующие аппаратные реализации.

Для оснащения спутников требуемыми полезными нагрузками, обеспечивающими решение различных целевых задач, необходимы съемочные камеры с улучшенными характеристиками, усовершенствованные микропроцессоры, а также реконфигурируемые компьютеры и возможности их дистанционного программирования.

Огромный потенциал заложен в технологиях микроэлектромеханических систем (МЭМС), на основе которых возможно создавать сверхмалые сенсоры, компоненты для оптической связи, а также источники питания.

Поддержание в работоспособном состоянии распределенных систем (кластеров) МКА может быть обеспечено только за счет современных методов создания кластерных группировок, прецизионного определения взаимного положения МКА в кластере и обеспечения необходимых регулирующих воздействий для их удержания. Требуется также разработка методологии проектирования распределенных систем, включая алгоритмы управления кластерами и создание аппаратно-программных средств искусственного интеллекта.

В работе [16] представлены первые результаты применения метода автономного адаптивного управления группой робототехнических устройств на примере модели кластера наноспутников. Предложенный подход представляет собой использование биологически инспирированного метода в концептуальной модели нейроинформационной системы. С технической точки зрения система автономного адаптивного управления (ААУ) представляет собой самообучающуюся систему распознавания–управления, обеспечивающую выполнение двух главных функций: исследование и аккумулирование знаний, а также оптимальное управление заданным объектом. В систему включены следующие подсистемы: формирования и распознавания изображений, базы знаний, принятия решений, эмоционального моделирования и некоторые вспомогательные модули. Система ААУ обеспечивает самообучение и управление в рамках единого процесса, основанного на базе эмпирических знаний и не использующего математические модели объекта управления.

В качестве примера использована модель кластера наноспутников, применяемых для мониторинга состояния ионосферы Земли. В космической миссии кластера группа наноспутников должна обеспечивать удержание взаимного расположения спутников по отношению друг к другу, поэтому индивидуальные ААУ системы самообучаются на выполнение поддержания локального порядка в кластере. В итоге система ААУ обеспечивает более дешевый способ высококачественного управления по сравнению с другими существующими методами.

Одним из перспективнейших направлений, обеспечивающих новое качество космических энергетических систем, является создание биологической солнечной батареи, способной, во-первых, к самовоспроизводству в естественных условиях и, во-вторых, к работе и (ограниченному) воспроизводству в специфических условиях космоса.

В настоящее время уровень развития синтетической биологии в мире не позволяет создать функциональный организм или клеточную культуру, которая способна вырабатывать электричество. В то же время наличие примеров таких организмов

среди растений и животных свидетельствует о том, что дальнейшие исследования позволят выделить интересующие нас кодирующие свойства участка генома и получить возможность создания искусственной формы жизни с необходимыми характеристиками.

Сегодняшнее состояние решения задачи основано на современных возможностях синтетической биологии, заключающихся в создании органической батареи, электрогенерирующим элементом которой является мембранный светочувствительный белок бактериородопсин, нанесенный на диоксид-титановую подложку.

Важным этапом в создании нового поколения солнечных батарей стало открытие экситонных солнечных батарей с использованием сенсибилизированных красителем солнечных элементов [17]. При такой реализации конструкции органический или органометаллический светочувствительный краситель фиксируется на наноструктурированной подложке из широкозонных полупроводниковых оксидов металлов и используется в качестве фотосенсибилизатора для захвата солнечной энергии и генерации экситонов — водородоподобных квазичастиц, представляющих собой электроны, находящиеся в возбужденном состоянии. В свою очередь, принцип действия биосенсибилизированных солнечных батарей основан на относительно менее изученном механизме — выбросе электронов под действием фотонов в активизированных светочувствительных белках.

Бактериородопсин является светочувствительным мембранным белком, служащим генератором протонов. В естественном виде он присутствует в архебактериях *Halobacterium salinarum*. Природный бактериородопсин и его модифицированные аналоги в комбинации с широкозонным полупроводником TiO_2 обеспечивает возможность обеспечить эффективного преобразования энергии света в электрический ток в солнечной батарее. Результаты проведенного в NASA компьютерного моделирования пространственной структуры молекул показали, что бактериородопсин в связанном состоянии с атомами молекул TiO_2 способен обеспечивать необходимый устойчивый перенос электронных потоков.

В основу конструкции биосенсибилизированной экситонной солнечной батареи легли бактериородопсинсодержащие пленки, зафиксированные на нанокристалической подложке TiO_2-электрода. В ходе поисковых исследований была построена характеристика зависимости плотности фототока от напряжения биосенсибилизированной солнечной батареи с использованием природного бактериородопсина и его модифицированного аналога. Результаты предварительных исследований показали, что модифицированный бактериородопсин имеет лучшие фотоэлектрические свойства: плотность фототока короткого замыкания составила 0,09 мА/см^2, напряжение холостого хода достигло значения 0,35 В при уровне освещенности 40,0 мВт/см^2.

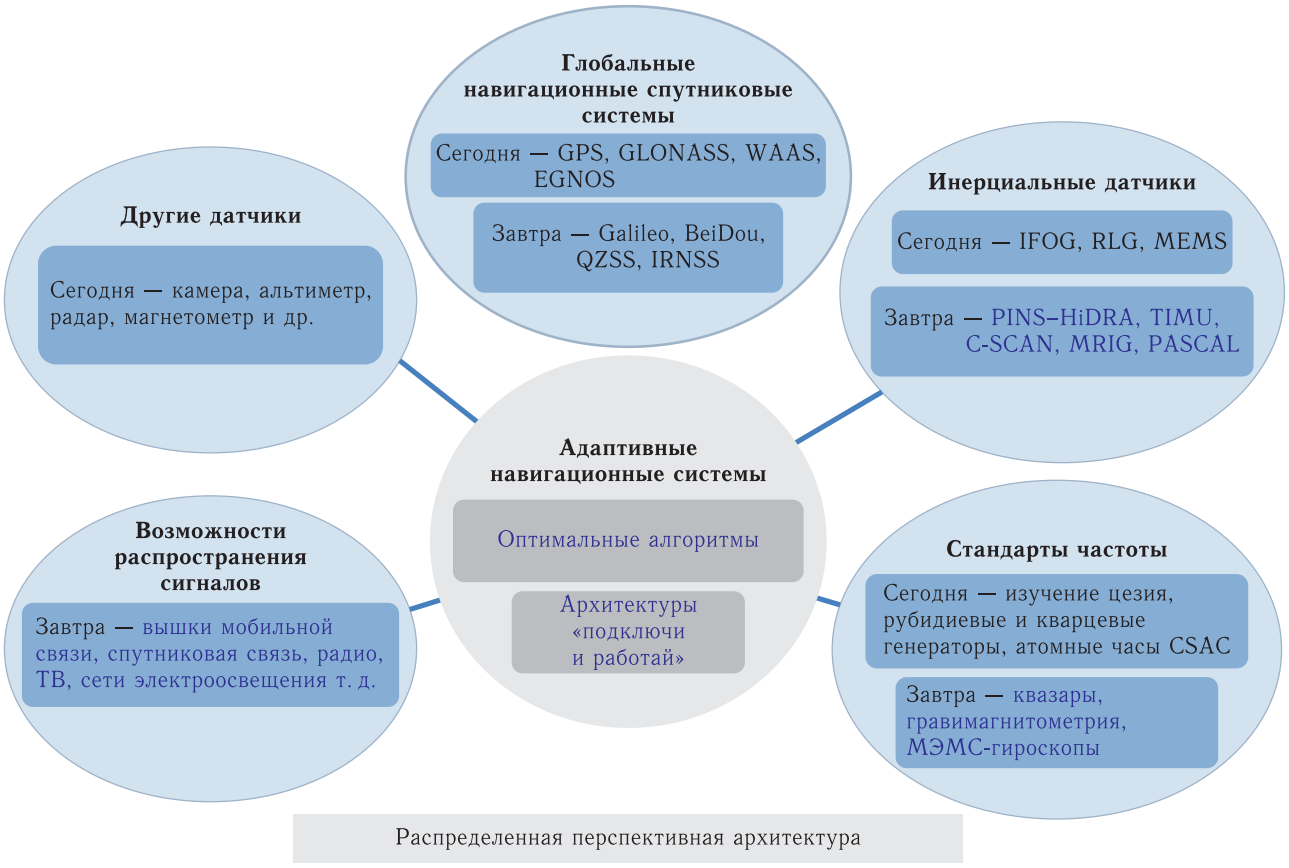
Фотонные технологии шестого технологического уклада

В работе [18] нами проведен анализ возможных применений технологий фотоники в интересах космического приборостроения, поскольку фотоника вообще, а также оптоэлектроника, нанофотоника и радиофотоника в частности позволяют получить рекордные характеристики перспективной аппаратуры, предназначенной для установки на космические аппараты различного целевого назначения.

Приведем далее более подробное рассмотрение некоторых технологий, используемых для улучшения навигационно-временного обеспечения ряда прикладных задач. На рис. 4 представлены адаптивные навигационные сенсоры и системы [19], использующие широкий спектр сенсоров, глобальных навигационных спутниковых систем, инерциальных датчиков и бортовых стандартов частоты.

Следует отметить, что перспективные разработки для целей навигации включают комплексное использование всех существующих спутниковых навигационных систем: Galileo, BeiDou, QZSS и IRNSS.

В части инерциальных датчиков в разработке находятся PINSP–HiDRA [20] — прецизионные инерциальные навигационные системы, использующие атомные сенсоры с высоким динамическим диапазоном; TIMU [21] — одночиповый модуль измерений времени и ускорений; C-SCAN [22] — комбинированный атомный навигатор на микросхеме; MRIG [23] — интегрированный микрораз-



IFOG — Interferometric Fiber Optic Gyro, RLG — Ring Laser Gyro, MRIG — Microscale Rate Integrating Gyroscope, PASCAL — The Primary and Secondary Calibration on Active Layer, TIMU — The single-chip Timing and Inertial Measurement Unit, C-SCAN — The Chip-Scale Combinatorial Atomic Navigator, PINSP–HiDRA — Precision Inertial Navigation Systems effort of the High Dynamic Range Atom Sensors, CSAC — Chip Scale Atomic Clock

Рис. 4. Адаптивные навигационные сенсоры и системы

мерный гироскоп; PASCAL — методология первичной и вторичной калибровки на активном уровне. Все перечисленные датчики имеют TRL от 3 до 5.

В программе MRIG разрабатывается серийно производимый трехосевой микроминиатюрный вибрационный гироскоп для непосредственных измерений углов вращения, а не угловой скорости вращения. MRIG функционирует, возбуждая упругую волну в трехмерной структуре, которая свободно прецессирует в пространстве, независимо от ориентации прибора. Подобный режим функционирования с интегрированием скорости расширяет динамический диапазон вибрационного гироскопа, а также устраняет погрешность накопления за счет интегрирования информации об угловой скорости. Для реализации данной технологии были успешно разработаны методы серийного производства миниатюрных трехмерных симметричных полусфер, изготавливаемых из стекла, полутороидальных структур, а также других пространственно-распределенных сферических оболочек с осью симметрии, обеспечивающей непосредственную ориентацию в пространстве.

Программа обеспечения первичной и вторичной калибровок на активном уровне (PASCAL) предназначена для решения вопросов калибровки долговременного ухода инерциальных датчиков на МЭМС путем обеспечения контактной самокалибровки либо физически, либо электронным способом. Калибровки внутри микросхемы позволяют провести периодические коррекции внутренних ошибок с целью уменьшения дрейфа и температурной чувствительности датчика, одновременно улучшая его характеристики и устраняя необходимость

получения периодических внешних калибровочных данных. Цель программы состоит в демонстрации возможности самокалибровки смещения гироскопа и его масштабирующих коэффициентов с относительной стабильностью порядка 1 импульса в минуту (1 ppm) за месячный измерительный цикл.

Одночиповый модуль временных и инерциальных измерений (TIMU) предназначен для решения проблем, связанных с интеграцией инерциальных датчиков на МЭМС. Целью программы TIMU является разработка инерциального измерительного модуля тактического уровня, включающего одновременное изготовление 3 гироскопов, 3 акселерометров и резонатора с конкурентными параметрами цены, размеров, веса и энергопотребления. Конечная цель программы состоит в демонстрации одночипового модуля, обеспечивающего накопленную погрешность положения менее 1 морской мили в час при объеме прибора менее 10 $мм^3$ и энергопотреблении менее 200 мВт.

Программа разработки однокристального комбинированного атомного навигатора (C-SCAN) направлена на создание миниатюрных инерциальных датчиков на основе технологий применения резонанса атомных переходов. Традиционные атомные датчики демонстрируют феноменальные характеристики по точности и долговременной стабильности, но имеют ограничения в применениях из-за высокой стоимости, больших размеров, веса и энергопотребления, необходимости внешних источников электропитания и комфортных условий эксплуатации. C-SCAN — это проведение микроминиатюризации физических устройств и других необходимых технологий до размера компактного портативного комплекта.

В рамках указанной программы проведено исследование двух различных подходов: ядерный магнитный резонанс (NMR) и атомная интерферометрия (AI). AI-датчики гораздо сложнее, чем датчики на ядерном магнитном резонансе, но позволяют одновременно регистрировать как вращения, так и ускорения.

Программа C-SCAN позволила успешно продемонстрировать работоспособность микрогироскопов NMR, а также датчиков AI в контролируемых условиях. Однако из-за высокой сложности датчики AI используют лабораторные лазеры, оптические системы, а также вакуумные насосы. Для преодоления указанных ограничений в рамках программы Micro-PNT параллельно разрабатываются технологии создания необходимых компонентов микросистем на холодных атомах (CAMS), применяющие МЭМС и элементы фотоники и пригодные для использования в условиях, соответствующих требованиям МО США.

В работе [18] мы уже отмечали, что для применения в качестве бортовых стандартов частоты наиболее перспективны три направления: использование излучения квазаров, технологии гравимагнитометрии и МЭМС-гироскопия.

Напомним, что идея использования высокостабильной повторяемости наблюдаемого импульсного пульсарного излучения на практически неограниченной пространственно-временной протяженности путем трансформации его в эталонную (пульсарную) шкалу времени возникла практически сразу после открытия пульсаров в 1967 г. Относительная нестабильность собственного вращения ряда пульсаров составляет величину 10^{-14} и выше на временном интервале в несколько лет. Подробный обзор технологии и обширная библиография приведены в упомянутой работе, поэтому в данной статье мы не будем на ней останавливаться подробно.

С теоретическими основами применения измерений параметров градиента магнитного поля Земли в задачах навигации летательных аппаратов можно ознакомиться, например, в работе [24]. Данный метод за счет очень высокой чувствительности к напряженности магнитного поля Земли позволяет обеспечить навигацию подводных объектов, а в сочетании с гравиметрическими измерениями — получать прецизионную информацию о форме геоида Земли.

Агентство DARPA начиная с 2010 г. запустило программу, направленную на создание промышленных технологий производства устройств микроэлектроники, названную «микротехнологии для позиционирования, навигации и измерения времени (Micro-PNT)» [25].

Сравнительные характеристики достигнутого уровня в волоконных гироскопах и акселерометрах, гироскопах и акселерометрах на МЭМС и атомных микрогироскопах и микроакселерометрах приведены в табл. 2. Очевидно, что характеристики,

Таблица 2. Сравнительные характеристики микрогироскопов и микроакселерометров

Параметры	Единицы	SOA	SOA MEMS	Micro-PNT
Размер	мм^3	$1{,}6 \times 10^7$	$6{,}5 \times 10^4$	8
Вес	г	$4{,}5 \times 10^3$	2×10^2	$\sim$2
Мощность	Вт	25	5	$\sim$1
Гироскопы: Рабочий диапазон	град/с (Гц)	1,000 (3)	3,600 (10)	15,000 (40)
Нестабильность смещения	град /ч	0,02	4	0,01 (0,001)
Угловой случайный уход (шум) ARW	град/$\sqrt{\text{ч}}$	0,01	0,12	0,001 (0,0001)
Относительная точность	ppm, 3σ	1	400	1
Акселерометры: Рабочий диапазон	g	25	70	1,000
Нестабильность смещения	mg	0,1	4	0,1 (0,001)
Неточность выравнивания	μ-radians, 3σ	200	1,000	100
Уход времени на краткосрочном интервале	нс/мин	0,001	100	1
Уход времени на долгосрочном интервале	нс/мес	10	N/A	32

потенциально достижимые в атомных микрогироскопах, существенно (иногда на несколько порядков величины) превосходят существующие достижения.

Ожидается, что применение изделий фотоники в бортовой аппаратуре космических аппаратов позволит снизить:

– вес сигнальных кабельных линий в 20 раз,

– потребление электрической мощности — на 30–50 %,

– стоимость изготовления — на 20–50 %.

При этом скорость обработки информации возрастет в 20–200 раз, а срок активного существования космической техники увеличится в 1,5–2 раза.

Современное технологическое состояние и перспективы развития служебных систем МКА

Для рассмотрения уровней готовности технологий служебных систем и целевой аппаратуры МКА оценим состояние работ по основным служебным системам с двух позиций: текущее состояние и ближайшая перспектива по данным публикаций [26, 27].

Платформы КА

Текущее состояние. В настоящее время МКА стали весьма привлекательными вследствие низкой стоимости разработки и укороченных сроков создания. Безусловно, существует очевидный компромисс между размером КА и его функциональностью, но успехи в развитии микроэлектроники позволяют его успешно преодолеть.

Windform Materials. Технология CRP основана на технологии SLS (избирательное лазерное спекание) для материала на основе углеродонаполненного полиамида, который называется Windform XT 2.0. Миссия Montana State PrintSat — это КА для демонстрации технологии эффективности аддитивного производства с использованием материала Windform XT. КА оснащен несколькими датчиками для изучения качеств материала во время миссии. Аппарат был задействован во время миссии ORS-4/ELaNa-7 и был запущен на борту Super Strypi LV [28].

Перспектива. Дальнейший тренд к миниатюризации и более высоким уровням интеграции, особенно заметным для пико- и фемтоспутников. Весьма многообещающими представляются распределенные архитектуры космических миссий.

Современные исследования сфокусированы на снижении стоимости и уменьшении сроков создания и интеграции КА. Это обеспечивается несколькими принципами, в частности более частым применением COTS, а также — электронных компонентов индустриального уровня качества, для которых уже сегодня достигнуты высокая миниатюризация и интеграция. Технология сборки по принципу конструктора (plug–and–play) из унифицированных модулей позволяет значительно ускорить сборку КА в любой необходимой потребителю конфигурации. Применение быстрого прототипирования методами 3D-печати конструктивных элементов, компонентов и даже достаточно сложных подсистем представляет существенно более гибкие возможности ускорения производственных процессов.

Электропитание

Текущее состояние. Современные МКА используют улучшенные технологии генерации и хранения электроэнергии с 29% КПД для солнечных элементов на тройном переходе, легких по весу (85 мг/см^2), а также литиево-ионные аккумуляторные батареи с высокой удельной мощностью (в среднем 200 Вт · ч/кг). Ускоренное внедрение плоских полимерных литиевых батарей для космической индустрии уникально само по себе из-за повышенного риска их использования разработчиками миссии, а также более строгих требований по массе и объему. Системы управления распределением электроэнергии сегодня надежны и устойчивы к условиям космического пространства даже в случае единичных поставок. Все системы КА могут получать реальные преимущества за счет усовершенствования технологий и миниатюризации компонентов на рынке промышленной электроники. Характеристики и статус TRL-элементов батарей питания приведены в табл. 3.

Перспектива. В настоящее время в рамках разработки новых концепций размещения солнечных батарей рассматриваются гибкие солнечные ячейки. Еще одна технология преобразования света в электрическую энергию использует органическую электронику или полимеры и молекулы, поглощающие свет и создающие заряды.

Наиболее перспективная технология для использования в КА стандарта CubeSat — малогабаритная радиоизотопная энергетическая система представлена в табл. 3. Отметим, что инновационные технологии таких тепловых генераторов пока имеют уровни технологической готовности TRL2, то есть еще не вышли из стадии фундаментальных исследований.

Двигатели

Текущее состояние. Двигатели для МКА быстро развиваются, хотя в настоящее время представляют пока несовершенный технологический домен. Наиболее распространены двигатели на холодных газах с удельным импульсом порядка $I_{sp} = 70$ с, твердотельные двигатели с I_{sp} порядка 270 с и импульсные плазменные двигатели с I_{sp} порядка 830 с. В скором времени ожидается появление на рынке экологических монотопливных систем с I_{sp} порядка 300 с. На системном уровне Массачусетский технологический институт (MIT) разработал масштабируемую ионную электрораспылительную систему (S-iEPS), представленную на рис. 5, на котором показаны восемь микродвигателей, испускающих струю по одной оси. Данный модуль в состоянии создать тягу 74 мкН и обеспечить удельный импульс более 1160 с с расходом мощности менее 1,5 Вт. Модуль имеет вес около 95 г и объем 0,2 U в терминологии стандарта CubeSat. Уже достигнутый уровень — TRL6.

Перспектива. В ближайшие 5 лет прогнозируется развитие как химических, так и электрических двигателей. Также в разработке находятся гидро-

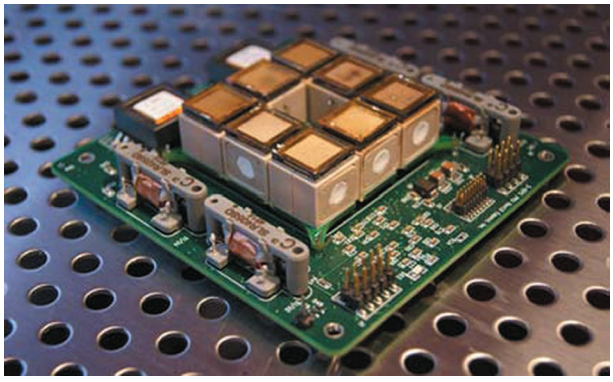
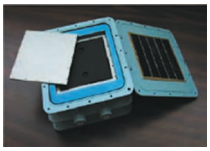
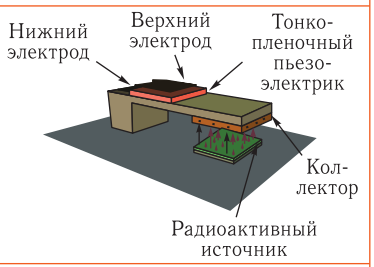


Рис. 5. Перспективный ионный электрораспылительный микродвигатель

Таблица 3. Технологии малогабаритных радиоизотопных энергетических систем

Технология	Описание	Разработчик	Статус TRL	Внешний вид
Термо-электрический преобразователь энергии	Тепловая энергия радиактивного изотопа преобразуется посредством термопары в разность потенциалов	Центр Гленна, NASA (США)	6 Летал на больших спутниках и применялся на марсианском ровере	
Бета-вольтаическое преобразование энергии	Бета-частицы, испускаемые радиактивным изотопом, поглощаются в полупроводниковом диоде с образованием электронно-дырочных пар	Центр Гленна, NASA (США)	5 Некосмические применения	
Альфа-вольтаическое преобразование энергии	Альфа-частицы, испускаемые радиактивным изотопом, поглощаются в полупроводниковом диоде с образованием электронно-дырочных пар	Центр Гленна, NASA (США)	2 Анализ и лабораторные испытания	
Термофото-вольтаическое преобразование энергии	Инфракрасное излучение, возникшее от радиактивного изотопа, поглощается инфракрасной фото-вольтаической ячейкой	Университет Торонто (Канада)	2 Анализ и лабораторные испытания	
Пьезо-электрическое преобразование энергии	Миниатюрная консольная балка бомбардируется радиактивным излучением от радиактивного изотопного источника, а энергия вибраций преобразуется в электрическую посредством пьезоэлектриков	Университет Торонто (Канада)	2 Анализ и лабораторные испытания	
Малогабаритная радиоизотопная энергетическая система	Энергия радиактивного изотопа преобразуется в термодинамическом цикле Стирлинга	Центр Гленна, NASA (США)	2 Анализ и лабораторные испытания	

литические технологии, использующие расщепление воды на водород и кислород, используемые совместно с интегральными первичными реактивными двигателями малой тяги и системами ориентации и стабилизации.

Системы ориентации и стабилизации

Текущее состояние. Современные средства ориентации и стабилизации для МКА используют технологии миниатюризации без существенного ухудшения характеристик. Миниатюризация обеспечена для ряда усовершенствованных технологий, таких как новые фотокамеры, материалы и цепи оснастки. Суммарная точность удержания ориентации типичных мини- и микроспутников для дистанционного зондирования Земли сегодня находится на уровне порядка 0,1°. Более высокая точность может быть достигнута путем включения основного целевого прибора полезной нагрузки

миссии в цепь обратной связи системы ориентации и стабилизации. Точность ориентации нано- и пикоспутников, включая кубсаты, на порядок хуже и достигает величины порядка 2°, но очень быстро улучшается, благодаря миниатюризации компонентов подсистемы ADCS. Ограничивающий фактор для ориентации кубсата — система управления положением КА; сегодня эта точность достигает уровня 1,8°. Постепенное снижение стоимости разработки программного обеспечения для ADCS будет способствовать снижению цены и быстрому получению выгоды от использования МКА.

Перспектива. Точность ориентации кубсатов может достигнуть величин ниже 1° за счет миниатюризации звездных датчиков.

Системы терморегулирования

Текущее состояние. Пассивные системы терморегулирования для МКА используют теплоизоляцию в виде многослойной изоляции и бета-ткани или тепловое покрытие из белой и черной полиуретановой краски и пленки.

Перенос тепла гарантированно обеспечивается тепловыми трубками (плоскими или петлевыми тепловыми трубками), задвижками, включающими омыватели, уплотнители и прокладки. Пассивное терморегулирование является дешевым и низкорисковым и представляется надежным базовым способом для МКА.

Системы активного терморегулирования имеют более жесткие проектные требования (в терминах массы и энергии), что существенно усложняет их применение в МКА. Инженеры стараются обеспечить температурно-чувствительные приборы, например батареи и камеры, электрическими нагревателями и холодильниками, обеспечивающими поддержание заданных эксплуатационных температур. До тех пор, пока не удастся миниатюризировать существующие активные тепловые методы, представляется маловероятным эффективное применение указанных технологий на МКА.

Перспектива. Существует тренд миниатюризации активных систем терморегулирования, устанавливаемых на больших КА, применением MEMS и других наноприборов.

Устройства связи

Текущее состояние. Современные стратегии передачи спутниковой информации используют VHF, UHF, микроволновый, а также видимый/инфракрасный диапазоны спектра электромагнитных волн. Выбор частотного спектра зависит от ряда факторов, включающих ожидаемый объем передаваемых данных, имеющийся запас электроэнергии, лимит массы и разрешение на использование соответствующей частоты. По указанным причинам в настоящее время продолжается разработка технологий для всех перечисленных частот. Современные технологии обозначают уверенный тренд в направлении увеличения несущей частоты сигналов, а также повышения скоростей передачи данных. Также следует отметить требования к повышению несущей частоты, а также мощности излучения передатчиков при снижении их массы. При использовании технологий передачи информации, приемлемых для МКА на низких околоземных орбитах, трансмиттеры UHF/VHF позволяют получить максимальную скорость передачи данных порядка 38 Кбит/с, S-диапазона — 10 Мбит/с, X-диапазона — около 500 Мбит/с и для K/Ku/Ka-диапазонов — около 1,2 Гбит/с. Инфракрасная система связи миссии NASA Ames' LADEE продемонстрировала скорость передачи данных порядка 2,88 Гбит/с. Выполнен также ряд разработок по установке антенн с высоким коэффициентом усиления, позволяющим увеличить объемы передаваемых данных.

Сегодня уже доступны развертываемые высокоэффективные антенны для кубсатов с максимальным коэффициентом усиления около 15–20 dBi. Также была продемонстрирована возможность передачи данных на КА через группировку низкоорбитальной связи Иридиум.

Перспектива. Область сегодняшнего повышенного интереса сосредоточена вокруг возможности лазерной связи для кубсатов. Также исследуются возможности двухсторонней связи с использованием спутниковых систем связи Иридиум и Глобалстар.

Анализ, проведенный в данном разделе, показывает, что технологии служебных систем наноспутников стандарта CubeSat совершенствуются

Таблица 4. Полезные нагрузки целевых систем ДЗЗ и мониторинга на базе МКА

Название	Краткое описание
Линейная сканирующая система (OLS)	Простая трехканальная сканирующая камера, обеспечивающая получение изображений в видимом БИК и тепловом ИК-диапазонах (10–13,4 мкм)
Одноканальный радиометр изображений (VIIRS)	Измеритель интегрального излучения видимого и ИК-диапазонов
Усовершенствованный микроволновый зондировщик (ATMS)	Зондирующий 22-канальный радиометр с поперечным сканированием, комбинирующий в едином устройстве возможности датчиков предыдущего поколения AMSU-A1, AMSU-A2, AMSU-B со значительным снижением массы, объема и потребляемой мощности
Специальная микроволновая камера/зондировщик (SSMIS)	Конический сканирующий радиометр на 21 частоте от 54 до 183 ГГц, обеспечивающий измерения температуры и влажности
Специальный микроволновый датчик влажности (SSMT-2)	Зондирующий радиометр с поперечным сканированием на 5 частотах от 91 до 183 ГГц для измерений влажности при всех видах ЧС
Специальный микроволновый датчик температуры (SMM/T)	Зондирующий 7-канальный радиометр с поперечным сканированием в диапазоне от 50 до 59 ГГц, обеспечивающий определение температуры атмосферы
Сканирующий инфракрасный зондировщик (CrIS)	Фурье-спектрометр, использующий 1305 спектральных каналов в 3 диапазонах длин волн: 9,14–15,38 нм, 5,71–8,26 нм и 3,92–4,64 нм для измерений профилей температуры и водяного пара в атмосфере

в очень быстром темпе. При этом использование COTS-технологий обеспечивает сохранение низкой стоимости разработки и создания наноспутников по сравнению с традиционно применяемыми большими КА. При этом возникают следующие технологические проблемы:

1. Перспективные миссии, формируемые на основе МКА, становятся более сложными за счет применения новых архитектур — группировки «Рой» и «Созвездие», а также более совершенных полезных нагрузок и вывода на орбиты, отличных от низких околоземных.

2. Существующие технологические возможности позволяют использовать МКА в качестве технологических демонстраторов. В среднесрочной перспективе можно предполагать развитие полноценных космических систем различного целевого назначения с использованием МКА.

3. Для КА весом легче 100 кг необходима разработка технологии рулевых двигателей для ADCS, особенно при переходе на миссии дальнего космоса на базе МКА.

4. Поскольку наноспутники приближаются в размерах к 6U, это приводит к генерированию количества тепла большего, чем возможно пассивно рассеять существующими технологиями, что ведет к необходимости разработки новых активных и пассивных систем терморегулирования в форм-факторе кубсата.

5. Необходима разработка технологии связи с МКА в дальнем космосе.

Современное технологическое состояние и перспективы развития целевых полезных нагрузок МКА

Современные технологические возможности создания полезных нагрузок целевых систем ДЗЗ и мониторинга на базе МКА показаны в табл. 4, которая содержит перечень основных видов полезных нагрузок, используемых для измерения характеристик атмосферы, океана и литосферы [29]. Безусловно, представленный набор не является исчерпывающим. Так, для измерения электрофизических параметров ионосферы могут потребоваться многоканальные когерентные зондировщики ионосферы в диапазоне 150–2000 МГц. Возможный вариант подобного зондировщика представлен в работе [30]. В работах [31, 32] приведены требования к приемникам сигналов спутниковых навигационных систем GPS и ГЛОНАСС в режиме затменного зондирования атмосферы, позволяющим восстанавливать вертикальные профили температуры и влажности.

Использование для реализации предложенных подходов наноспутников представляет собой, может быть, единственную возможность существенно продвинуть вперед решение проблем сокращения сроков разработки перспективных средств мониторинга различных природных явлений при одновременном снижении затрат.

В работах [33–35] приведены концептуальные предложения по созданию систем связи и ДЗЗ на базе наноспутников с характеристиками, соизмеримыми с теми, которые сегодня реализованы на больших аппаратах. Так, концепция USAS-MDC/ARSTRAT — армейская программа демонстрации технологий наноспутников тактической связи — предполагала запуск восьми КА SMDC-ONE с форм-фактором 3U весом 4 кг. Основная полезная нагрузка представляет собой бортовой УКВ-приемопередатчик, обеспечивающий пакетную передачу данных от удаленных абонентов в наземный центр. Первый запуск одного из них был осуществлен в 2009 г. Срок создания — 1 год. Стоимость — менее 1 млн долл. за один спутник. 5 декабря 2013 г. в США были запущены еще 4 КА.

Развитие программы — создание наноспутников SNaP (SMDC Nanosatellite Program), представляющих собой трехосевой стабилизированный маневрирующий 3U кубсат весом 5 кг по цене 500 тыс. долл. Скорость передачи данных по сравнению со спутниками первого поколения увеличена в 5 раз. Первый спутник планировался к запуску в августе 2015 г., но реально был запущен в декабре 2013 г. Три дополнительных КА SNaP-3 (SNaP-3 ALICE, SNaP-3 EDDIE, SNaP-3 JIMI) запущены с базы Ванденберг в октябре 2015 г.

Весьма многообещающими представляются разработки компаний IntelliTech Microsystems, Inc. и Microcosm, представленные наноспутниками ДЗЗ Kestrel Eye и Nano Eye. Вес созданного прототипа КА Kestrel Eye — 18 кг. Размеры КА — 35,6 × 35,6 × 80 см. В концепции предполагалось, что группировка из 40 наноспутников по 8 КА в 5 орбитальных плоскостях обеспечивает круглосуточное получение видеоинформации об обстановке на наблюдаемой области. Группировка может запускаться непосредственно в зоне повышенного мониторингового интереса и обеспечивает получение jpeg-изображений с пространственным разрешением 1,5 м по площади кадра 5,8 × 3,8 км^2 с частотой 2 кадра/с. Прием сигналов со спутника осуществляется в реальном времени на портативную станцию приема.

Заявленная стоимость КА — 1,3 млн долл. Все элементы спутника, включая полезную нагрузку — съемочную камеру высокого пространственного разрешения — коммерчески доступны и прошли наземные испытания, в том числе объектив с входной апертурой 25 см. Первый запуск KE-1 — 2012 г., развитие — блок KE-2 (45 кг), запуск — 2015 г. на РН Falcon-9.

В работе [36] представлен 3U-кубсат весом 5,5 кг — наноспутник для микроволнового атмосферного зондирования с полезной нагрузкой из микроволнового сканирующего пассивного спектрометра на частоте 118,75 ГГц, соответствующей полосе поглощения кислорода. Главная задача первой миссии MicroMAS-1 заключается в наблюдении конвективных грозовых облаков, тропических циклонов и ураганов с приэкваториальных орбит высотой около 400 км. Первый запуск состоялся 13 июля 2014 г. с борта МКС.

Отдельно следует отметить разработку компанией GATR мобильной портативной наземной приемной станции [37], имеющей оригинальную антенную систему, основанную на использовании надувной сферы в качестве несущего конструктива. Она обладает следующими основными характеристиками: диаметр антенны — 2,4 м, частотный диапазон — S-Band, скорость передачи данных — 100 Мб/с, транспортировка — в 2 ящиках, для сопровождения низкоорбитальных КА использована поворотная платформа.

Выводы

В результате выполненного исследования можно сформулировать следующие выводы:

1. Только обладание технологиями шестого уклада может обеспечить в ближайшее десятилетие лидерство в космическом приборостроении, особенно в таких направлениях, как оптоэлектроника, фотоника, биосенсорика, микромеханика и микроэлектроника, приводя в конечном счете к созданию «спутника на чипе».

2. Использование технологий создания новых фоточувствительных элементов, лазерных линий связи, квантовых вычислений, биоорганических фотовольтаических преобразователей и микроэлектромеханических систем позволят создать спутники нового поколения с кардинально улучшенными параметрами по стоимости, размерам, весу и энергопотреблению.

3. Ожидается, что применение изделий фотоники в бортовой аппаратуре космических аппаратов позволит снизить:

– вес сигнальных кабельных линий в 20 раз,

– потребление электрической мощности — на 30–50 %,

– стоимость изготовления — на 20–50 %.

При этом скорость обработки информации возрастет в 20–200 раз, а срок активного существования космической техники увеличится в 1,5–2 раза.

4. Применение при создании целевой аппаратуры технологических подходов проектирования «систем на кристалле» и «систем на печатной плате» обеспечит внедрение перспективных архитектур распределенных и федеративных космических систем.

5. Анализ уровней технологической готовности ряда перспективных разработок служебной и целевой аппаратуры, предназначенной для размещения на спутниках нового поколения, показывает, что многие из них находятся в задельной стадии с TRL, не превышающими 3.

6. Для координации освоения технологий шестого уклада представляется целесообразным создание корпоративного центра исследований и разработок, где будут сосредоточены работы по формированию научно-технического задела и доведения новых технологий до требуемых уровней технологической готовности (не ниже 6). Центр должен на принципах создания научных консорциумов привлекать организации РАН и высшей школы, а также институты инновационного развития Российской Федерации (ФПИ, Сколково, Роснано).

7. Коммерциализация результатов внедрения технологий шестого уклада в космической отрасли поможет, наконец, выбраться из заколдованного круга: «Мы не можем найти финансирования для разработки новых технологий, так как отсутствует обширный рынок, в то же время приложения, развивающие рынок, не внедряются из-за отсутствия необходимых технологий».

Список литературы

1. *Глазьев С.Ю.* Выход из хаоса // Военно-промышленный курьер. 12–18 ноября 2014, № 42(560). С. 2.
2. *Конина Н.Ю.* Шестой технологический уклад и менеджмент современных компаний // Вопросы экономики и права, 2014, № 3. С. 43–46.
3. *Романов А.А., Романов А.А., Урличич Ю.М., Буравин А.Е.* Концептуальные подходы к созданию перспективных космических систем // Механика, управление и информатика. М.: Изд–во Ин-та космич. исслед. РАН, 2011. С. 92–104.
4. *Barnhart D.J., Vladimirova T., Sweeting M.* Satellite-on-a-Chip feasibility for distributed space missions // Proceedings of CANEUS 2006, August 27–September 1, 2006, Toulouse, France.
5. *Barnhart D.J., Vladimirova T., Baker A.M., Sweeting M.N.* A low-cost femtosatellite to enable distributed space missions // Acta Astronautica, June–July 2009, vol. 64, Iss. 11. P. 1123–1143.
6. *Perez T. et al.* A survey of current femtosatellite designs, technologies, and mission concepts // JoSS, 2016, vol. 5, № 3. P. 467–482.
7. *Manchester Z., Peck M., Filo A.* KickSat: a crowd-funded mission to demonstrate the world's smallest spacecraft // 27th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, August 2013.
8. *Barnhart D.J., Vladimirova T., Sweeting M.N.* System-on-a-chip design of self-powered wireless sensor nodes for hostile environments // IEEEAC paper #1362. Final version. Last updated 8 December, 2006.
9. *Brown O.C.* System F6: program overview // Presentation at NASA Colloquium, February 2007.
10. *Barnhart D.J.* Very small satellite design for space sensor networks // PhD Theses at Surrey University, July 2008.
11. *Golkar A.* Developing space infrastructure: the future of aerospace technology is now // Russia Beyond the Headlines, 14 November, 2014.
12. *Golkar A.* Federated satellite systems: a case study on sustainability enhancement of space exploration systems architectures // 64th International Astronautical Congress, Beijing, China, IAC-13-D3.4, 2013.

13. SpaceWorks 2017. Nano and micro satellite market observations.

14. *Bekey I.* Advanced space system concepts and technologies: 2010–2030+ // American institute of aeronautics and astronautics, Inc. The Aerospace Press, El Segundo, California, 2003, 292 p.

15. *Braun R.D.* Investment in the future: overview of NASA's space technology, NASA chief technology office presentation, 5 May 2010.

16. *Жданов А.А.*, *Романов А.А.*, *Романов А.А.*, *Семенов С.С.* Применение метода автономного адаптивного управления для группы робототехнических устройств на примере модели кластера наноспутников // Мехатроника, автоматизация, управление, 2016, т. 17, № 1. С. 11–18.

17. *Thavasi V.*, *Lazarova T.*, *Filipek S.*, *Kolinski M.*, *Querol E.*, *Kumar A.*, *Ramakrishna S.*, *Padrys E.*, *and Renugopalakrishnan V.* Study on the feasibility of bacteriorhodopsin as bio-photosensitizer in excitonic solar cell: a first report // Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2008, vol. 8, 1–9. P. 1–9.

18. *Пономарев А.К.*, *Романов А.А.*, *Тюлин А.Е.* Фотонные технологии в космическом приборостроении // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2016, т. 3, вып. 2. С. 3–22.

19. *Lutwak R.* Micro-technology for positioning, navigation, and timing towards PNT everywhere and always // Space-based positioning navigation & timing national advisory board fourteenth meeting, Washington, DC, December 10, 2014.

20. *Suriano M.A.* Robust technology to augment or replace the US reliance on the global positioning system // A Research Report Submitted to the Faculty In Partial Fulfillment of the Graduation Requirements, 16 February 2011.

21. *McCaney K.* Tiny chip provides precise GPS navigation without the GPS // GCN, 19 April, 2013.

22. *Shkel A.* The chip-scale combinatorial atomic navigator // GPS World, 14 August 2013. P. 8–10.

23. *Liu H. and Quan H.* Research of ring MEMS rate integrating gyroscopes // World academy of science, engineering and technology international journal of electrical, computer, energetic, electronic and communication engineering, 2013, vol. 7, № 4. P. 360–364.

24. *Каршаков Е.В.* Применение измерений параметров градиента магнитного поля Земли в задаче навигации летательного аппарата // Управление большими системами: Сб. трудов ИПУ РАН им. В. А. Трапезникова, 2011, вып. 35. С. 265–282.

25. *Shkel A.* Microtechnology for positioning, navigation, and timing (Micro-PNT), Washington, DC; May 3, 2012.

26. NASA/TP-2014–216648/REV1, Small Spacecraft Technology State of the Art, July 2014.

27. NASA/TP-2015–216648/REV1, Small Spacecraft Technology State of the Art, December 2015.

28. *Dr. David Klumpar K.M.* (2015) PrintSat Spacecraft. http://ssel.montana.edu/printsat.html

29. *Taylor Ch.*, *Sarzi-Amade N.*, *Young S.* Reinventing disaster reconnaissance through space assets, AIAA Reinventing Space Conference 2013, AIAA–RS-2013–6001, October 14–17, 2013, Los Angeles, CA.

30. *Romanov A.A.*, *Romanov A.A.*, *Makarov Y.N.* Russian technologies of monitoring and remote sensing using nanosatellites. Manuscript of IAC'2013 IAC–13–B4.4.9, Beijing, October 2013.

31. *Selivanov A.*, *Romanov A.*, *Vishnyakov V.*, *Vinogradov A.*, *Selin V.*, *Pavelyev A.*, *Yakovlev O.*, *Matyugov S.* Space system "Radiomet" for GLONASS/GPS navigation signal radio occultation monitoring of lower atmosphere based on super small satellites // Small satellite missions for earth observation — new developments and trends, 1st Edition. Springer Berlin Reidelberg, 2010.

32. *Романов А.А.*, *Селиванов А.С.*, *Тюлин А.Е.* Перспективы разработки малоразмерных космических аппаратов различного целевого назначения АО «Российские космические системы» // Известия вузов: Приборостроение, 2016, т. 59, № 6. С. 415–422.

33. *Finley Ch.J.*, *Moretti G.*, *Bhopale A.* The 7-day solution: how ors will answer the rapid call-up challenge // 7-th IAA small satellite symposium, April 2007, Berlin, IAA-B7-1002.

34. *London J.R. III*, *Ray M.E.*, *Weeks D.J.*, *Marley A.B.* The first US army satellite in fifty years: SMDC-ONE first flight results // 25th annual conference on small satellites, London, 2011, SSC11-III-5.

35. *Wertz J.R.*, *Van Allen R.E.*, *Barcley T.* Nano eye-military relevant surveillance for less than $5 million total recurring mission cost // 8th responsive space conference, March 8–11, 2010, Los Angeles, CA.

36. *Blackwell W. et al.* Nanosatellites for earth environmental monitoring: the microMAS project // IGARSS 2012, Munich, Germany.

37. *Gierow P.A., Clayton W.R., Dr. Romanofsky R., Dr. Lambert K.M.* GATR ground antenna transmit and receive // Space foundation, 2013.

References

1. Glaz'ev S. Yu. Vykhod iz khaosa [Way out from the chaos]. *Voenno-promyshlennyy kur'er* [Military and industrial courier]. 2014, No. 42(560), November 12–18, 2 p.

2. Konina N. Yu. Shestoy tekhnologicheskiy uklad i menedzhment sovremennykh kompaniy [The sixth technological structure and management of modern companies]. *Voprosy ekonomiki i prava* [Economic and Law Issues]. 2014, No. 3, pp. 43–46. (in Russian)

3. Romanov A. A., Romanov A. A., Urlichich Yu. M., Buravin A. E. Kontseptual'nye podkhody k sozdaniyu perspektivnykh kosmicheskikh sistem [The concept approach to perspective space systems development]. *Mekhanika, upravlenie i informatika* [Mechanics, control and informatics]. Moscow, Izd-vo In-ta kosmich. issled. RAN, 2011, pp. 92–104. (in Russian)

4. Barnhart D. J., Vladimirova T., Sweeting M. N. Satellite-on-a-chip feasibility for distributed space missions. *Proceedings of CANEUS 2006*. August 27–September 1, 2006, Toulouse, France.

5. Barnhart D. J., Vladimirova T., Baker A. M., Sweeting M. N. A low-cost femtosatellite to enable distributed space missions. *Acta Astronautica*. Vol. 64, No. 11, June–July 2009, pp. 1123–1143.

6. Perez T. et al. A survey of current femtosatellite designs, technologies, and mission concepts. *JoSS*. 2016, Vol. 5, No. 3, pp. 467–482.

7. Manchester Z., Peck M., Filo A. KickSat: a crowd-funded mission to demonstrate the world's smallest spacecraft. *27th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*. August 2013.

8. Barnhart D. J., Vladimirova T., Sweeting M. N. System-on-a-chip design of self-powered wireless sensor nodes for hostile environments. *IEEEAC paper #1362*. Final version, Last updated December 8, 2006.

9. Brown O. C. System F6: program overview. *Presentation at NASA Colloquium*. February 6, 2007.

10. Barnhart D. J. Very small satellite design for space sensor networks. *PhD Theses at Surrey University*. July 2008.

11. Golkar A. Developing space infrastructure: the future of aerospace technology is now. *Russia Beyond the Headlines*. November 14, 2014.

12. Golkar A. Federated satellite systems: a case study on sustainability enhancement of space exploration systems architectures. *64th International Astronautical Congress*. Beijing, China, IAC-13-D3.4, 2013.

13. *SpaceWorks 2017. Nano and Micro Satellite Market Observations.*

14. Bekey I. Advanced space system concepts and technologies: 2010–2030+. *The Aerospace Press.* American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., El Segundo, California, 2003, 292 p.

15. Braun R. D. Investment in the future: overview of NASA's space technology. *NASA Chief Technology Office Presentation*. May 5, 2010.

16. Zhdanov A. A., Romanov A. A., Romanov A. A., Semenov S. S. Primenenie metoda avtonomnogo adaptivnogo upravleniya dlya gruppy robototekhnicheskikh ustroystv na primere modeli klastera nanosputnikov [Method of autonomous adaptive control application for group of robots on example of nano-satellite cluster model]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, aumatization and control]. 2016, Vol. 17, No. 1, pp. 11–18. (in Russian)

17. Thavasi V., Lazarova T., Filipek S., Kolinski M., Querol E., Kumar A., Ramakrishna S., Padrys E., Renugopalakrishnan V. Study on the feasibility of bacteriorhodopsin as bio-photosensitizer in excitonic solar cell: A first report. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2008, Vol. 8, pp. 1–9.

18. Ponomarev A. K., Romanov A. A., Tyulin A. E. Fotonnye tekhnologii v kosmicheskom pribo–rostroenii [Photonic technologies in space device engineering]. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy* [Rocket-Space Device Engineering and Information Systems]. 2016, Vol. 3, No. 2, pp. 3–22. (in Russian)

19. Lutwak R. Micro-technology for positioning, navigation, and timing towards PNT everywhere and always. *Space-Based Positioning Navigation & Timing National Advisory Board Fourteenth Meeting*. Washington, DC, December 10, 2014.

20. Suriano M. A. Robust technology to augment or replace the US Reliance on the Global Positioning System. *A research report submitted to the Faculty*

in Partial Fulfillment of the Graduation Requirements. February 16, 2011.

21. McCaney K. Tiny chip provides precise GPS navigation without the GPS. *GCN*. April 19, 2013.
22. Shkel A. The chip-scale combinatorial atomic navigator. *GPS World*. August 14, 2013, pp. 8–10.
23. Liu H., Quan H. Research of ring MEMS rate integrating gyroscopes. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*. 2013, Vol. 7, No. 4, pp. 360–364.
24. Karshakov E. V. Primenenie izmereniy parametrov gradienta magnitnogo polya Zemli v zadache navigatsii letatel'nogo apparata [Applying measurements of Earth's magnetic field gradient for aerial vehicle navigation problem]. *Upravlenie bol'shimi sistemami: Sbornik trudov IPU RAN im. V. A. Trapeznikova* [Large-Scale Systems Control: Collected papers of V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences]. 2011, Vol. 35, pp. 265–282. (in Russian)
25. Shkel A. *Microtechnology for Positioning, Navigation, and Timing (micro-PNT)*. Washington, DC, May 3, 2012.
26. *Small Spacecraft Technology State of the Art*. NASA/TP-2014-216648/REV1, July 2014.
27. *Small Spacecraft Technology State of the Art*. NASA/TP-2015-216648/REV1, December 2015.
28. Dr. David Klumpar K. M. *PrintSat Spacecraft*. 2015. Available at: http://ssel.montana.edu/printsat.html
29. Taylor Ch., Sarzi-Amade N., Young Sh. Reinventing disaster reconnaissance through space assets. *AIAA Reinventing Space Conference 2013*. AIAA–RS–2013–6001, October 14–17, 2013, Los Angeles, CA.
30. Romanov A. A., Romanov A. A., Makarov Y. N. Russian technologies of monitoring and remote sensing using nanosatellites. *Manuscript of IAC'2013 IAC-13-B4.4.9*. Beijing, October 2013.
31. Selivanov A., Romanov A., Vishnyakov V., Vinogradov A., Selin V., Pavelyev A., Yakovlev O., Matyugov S. Space system "Radiomet" for GLONASS/GPS navigation signal radio occultation monitoring of lower atmosphere based on super small satellites. *Small Satellite Missions for Earth Observation — New Developments and Trends*. 1st Edition. Springer Berlin Reidelberg, 2010.
32. Romanov A. A., Selivanov A. S., Tyulin A. E. Perspektivy razrabotki malorazmernykh kosmicheskikh apparatov razlichnogo tselevogo naznacheniya AO "Rossiyskie kosmicheskie sistemy" [Perspectives of small size spacecraft development for various purposes at JSC Russian Space Systems]. *Izvestiya vyssh. ucheb. zavedeniy: Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering]. 2016, Vol. 59, No. 6. pp. 415–422. (in Russian)
33. Finley Ch. J., Moretti G., Bhopale A. The 7-day solution: How ors will answer the rapid call-up challenge. *7-th IAA Small Satellite Symposium*. April 2007, Berlin, IAA-B7-1002.
34. London J. R. III, Ray M. E., Weeks D. J., Marley A. B. The first US army satellite in fifty years: SMDC-ONE first flight results. *25th Annual Conference on Small Satellites*. London, 2011, SSC11-III-5.
35. Wertz J. R., Van Allen R. E., Barcley T. Nano Eye — military relevant surveillance for less than $5 million total recurring mission cost. *8th Responsive Space Conference*. 2010, March 8–11, Los Angeles, CA.
36. Blackwell W. et al. *Nanosatellites for Earth environmental monitoring: The MicroMAS project*. IGARSS 2012, Munich, Germany.
37. Gierow P. A., Clayton W. R., Dr. Romanofsky R., Dr. Lambert K. M. GATR ground antenna transmit and receive. *Space Foundation*. 2013.