

ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 520.6

КОСМОС И COTS-ТЕХНОЛОГИЯ

© 2023 г. А. А. Лацинник^{1,*}

¹Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Россия

*E-mail: era_otd4@mil.ru

Поступила в редакцию 10.10.2023 г.

После доработки 10.10.2023 г.

Принята к публикации 10.10.2023 г.

Описаны суть COTS-технологии и область ее применения, рассмотрен пример использования в космосе. Отображены перспективы космических технологий и расписаны их требования. Показано влияние радиации на микросхемы и приведены способы борьбы с защелкиванием.

DOI: 10.56304/S2782375X23010059

ВВЕДЕНИЕ

Космическая электроника — отдельная область в сфере научных исследований, возникающая вместе с освоением космоса: ученым потребовались устойчивые к космическим условиям технологии сбора, хранения, обработки и передачи информации. Для решения этих задач ученые создают все более совершенные спутники — аппараты, движущиеся по околоземной орбите. С их помощью астрофизики изучают космическое пространство, ищут экзопланеты и наблюдают за космическими объектами. С середины XX века по сей день эволюцию космических устройств определяет прогресс электроники.

COTS-технология (*Commercial Off-The-Shelf*, «готовая к использованию») — технология применения специального подхода, согласно которому применяются промышленные вычислительные модули, а крейты, стойки, блоки коммутации и кабели обеспечивают требуемые условия эксплуатации (например, устойчивость к климатическим, вибрационным и другим воздействиям). В COTS-технологии применяются готовые аппаратные и программные технологии открытого типа, ранее широко апробированные и стандартизованные на рынке общепромышленных гражданских приложений. В космической отрасли использование данной технологии позволяет существенно сократить расходы на создание космического аппарата за счет сокращения сроков разработки и модернизации системы, повышения его быстродействия и надежности [1]. Для российских разработчиков в условиях введения санкций такой способ экономии средств особенно актуален.

Цель работы — показать преимущество применения COTS-технологии в разработках специаль-

ного назначения, где она является испытанным средством снижения временных и финансовых затрат на создание вычислителей для использования на борту космических аппаратов.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Наибольшую сложность при использовании электронных устройств на космических аппаратах представляет их защита от радиации, уровень которой в космосе гораздо выше, чем на Земле.

Нельзя допустить, чтобы отказ одного элемента привел к выходу из строя всего аппарата. Для этого существуют разные способы, в частности дублирование или резервирование системы. Для их осуществления на спутнике можно разместить, например, дополнительный аккумулятор, передатчик или вторую бортовую шину для связи бортового компьютера с другими электронными модулями.

Перспективы космических технологий связаны с возможностью создания микросхем, устойчивых к радиации. Ученые продолжают поиски лучших решений этой задачи. В электронике используют несколько видов микросхем: микроконтроллеры, микропроцессоры, программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) и другие. Сложность их защиты от радиации состоит в том, что чаще всего в современном чипе память хранит информацию (единицы и нули) как электрический заряд, а он изменяется, в первую очередь, при попадании в чип ионизирующего излучения.

За последние годы в электронной промышленности добились существенных успехов в производстве радиационно-стойких микроконтроллеров. Микроконтроллер — это чип, выполняющий про-

грамму, написанную на языке программирования, например С (Си). В бортовом компьютере космического аппарата микроконтроллер обрабатывает команды и управляет другими чипами. Он может также отключить или временно обесточить систему, что поможет избежать более масштабных отказов. Кроме того, микроконтроллер собирает данные и сохраняет их в памяти, он может общаться с приемопередатчиком, который посылает данные на наземную станцию, позволяя разработчикам получать важную информацию о температуре аппарата в разных местах.

Бесконечно увеличивать мощность микроконтроллера невозможно: разработчики сталкиваются с тем, что его внутренней памяти не хватает. Микроконтроллер можно заменить процессором, так как его производительность выше, и дополнительные чипы принимают на себя некоторые функции. Однако сделать процессоры, устойчивые к радиации, оказывается сложнее, чем микроконтроллеры, несмотря на некоторые исключения [2].

Существуют ПЛИС, которые удается производить радиационно стойкими. Если при программировании микропроцессоров и микроконтроллеров расписывают их действия во времени пошагово, то при программировании ПЛИС код описывает внутреннее устройство чипа, а все строчки кода работают параллельно. Соответственно, если подобрать ПЛИС для решения конкретной задачи, можно изготовить тысячи одинаковых чипов, что ощутимо снизит их стоимость, но перепрограммировать их уже будет невозможно.

Дополнительные требования к космическим микросхемам состоят в следующем:

- повышенные требования к надежности кристалла микросхемы и ее корпуса, повышенная устойчивость к вибрации и перегрузкам, влажности и температурному диапазону;

- стойкость к поражающим факторам ядерного взрыва. Нормальная работа в момент взрыва может быть невозможна, но, по крайней мере, прибор не должен необратимо выйти из строя;

- стабильность параметров по мере медленного набора суммарной дозы облучения и выживание после бомбардировки с тяжелыми заряженными частицами (ТЗЧ) космической радиации.

Однако не любую микросхему можно поставить в российскую военную технику. Существует список отечественных электронных компонентов, которые можно использовать при создании техники, где все перечислено поименно. Если какой-то завод создает новую микросхему, то до включения в этот список ее нельзя будет использовать.

Влияние радиации на микросхемы. Космическое излучение состоит примерно на 90% из протонов (т.е. ионов водорода), на 7% из ядер гелия (α -ча-

стиц), на ~1% из более тяжелых атомов и на ~1% из электронов. Звезды, включая Солнце, облучают все не только видимым светом, но и рентгеновским, а также γ -излучением. Во время вспышек на Солнце интенсивность радиации увеличивается в 10^3 – 10^6 раз, что может быть серьезной проблемой для космических аппаратов за пределами магнитосферы Земли [3].

Нейтронов в космическом излучении нет, так как свободные нейтроны имеют период полураспада 611 с и превращаются в протоны. Небольшое количество нейтронов прилетает с Земли.

Когда γ - и рентгеновское излучение проходит через микросхему, то в подзатворном диэлектрике транзисторов постепенно накапливается заряд, соответственно, начинают медленно изменяться параметры транзисторов: пороговое напряжение и ток утечки.

Помимо этого, γ - и рентгеновское излучение заставляет все p – n -переходы внутри микросхемы работать как маленькие “солнечные батареи”, и если в космосе обычно радиация недостаточна, чтобы это сильно повлияло на работу микросхемы, то во время ядерного взрыва потока γ - и рентгеновского излучения уже может быть достаточно, чтобы нарушить работу микросхемы за счет фотоэффекта.

Рассмотрим, например, память *flash/EEPROM* – это микросхемы памяти с УФ-стиранием. Чтобы снизить стоимость, выпускалась версия без кварцевого окна, считавшаяся однократно программируемой (стирание возможно рентгеновским излучением). Такой же эффект имеет место в космосе – радиация медленно стирает данные в *flash/EEPROM*-памяти, поэтому для космических применений активно исследуется *FRAM/mRAM*-память. Не стирается от радиации также память на пережигаемых и закорачиваемых перемычках – *fuse* и *antifuse*. На низких орбитах высотой от 300 до 500 км годовая доза составляет не более 100 рад, поэтому даже за 10 лет суммарная доза будет переносима “гражданскими” микросхемами. А вот на высоких орбитах (более 1000 км) годовая доза может составить 2×10^5 рад, и обычные микросхемы наберут “смертельную” дозу за считанные месяцы.

Практически все прилетающие первичные частицы, в том числе ТЗЧ, имеют такую высокую энергию, что “пробивают” микросхему насквозь (вместе с корпусом спутника) и оставляют за собой “шлейф” заряда. В лучшем случае это может привести к программной ошибке (0 может стать 1 или наоборот, SEU), в худшем – к тиристорному “зашелкиванию” (SEL). У зашелкнутого чипа питание закорачивается на “землю”, что может привести к выходу из строя микросхемы. Именно зашелкивание ограничивает использование обыч-

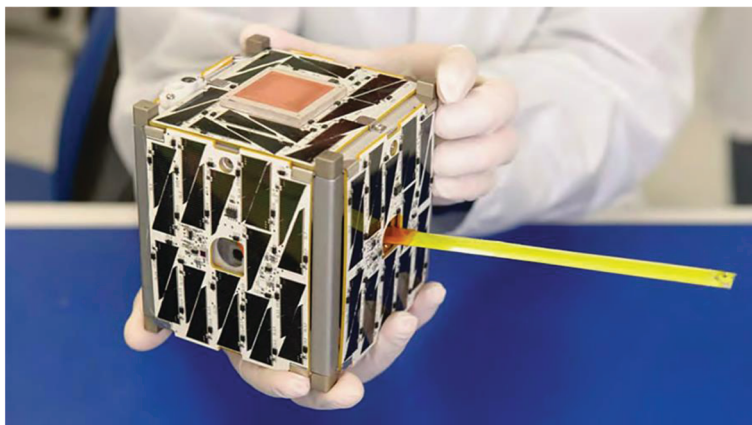


Рис. 1. Спутник стандарта CubeSat.

ных, “наземных” микросхем в космосе, даже с использованием программных алгоритмов для увеличения надежности [4].

Бороться с защелкиванием можно несколькими способами:

- следить за потребляемым током и при необходимости быстро отключать питание;

- использовать микросхемы на сапфировой подложке (SOS или SOI). Это исключает формирование биполярных паразитных транзисторов и, соответственно, защелкивание. Тем не менее программные ошибки все равно могут иметь место.

В случае, когда из-за ТЗЧ в космической аппаратуре произошло искажение содержимого памяти или логика сработала неправильно, бороться с этим остается только архитектурными способами:

- использованием кодов коррекции ошибок в памяти и регистрах;

- применением мажоритарной логики.

Но полностью от ошибок невозможно избавиться, так как есть вероятность того, что ТЗЧ пройдет вдоль чипа. В этом случае понадобятся высоконадежная система из нескольких независимых компьютеров и их правильное программирование.

Подтверждением использования в космосе COTS-технологии является растущая популярность спутников, выполненных по стандарту CubeSat.

CubeSat (кубсат) – формат малых (сверхмалых) искусственных спутников Земли для исследования космоса, имеющих объем 1 л и массу не более 1.33 кг (рис. 1).

Спецификация CubeSat включает в себя стандартизированные габариты и архитектуру. Все CubeSat подразделяются на размерности 1 unit (10 × 10 × 10 см), 2U (10 × 10 × 20 см), 3U (10 × 10 × 30 см) и т.д.

Стандарт CubeSat не ограничивает фантазию его разработчика. Внутри CubeSat не существует общепринятых инструкций по сборке (универсальных стандартов, описывающих информационные механические или электрические интерфейсы). Есть рекомендации типа соответствия габаритов электронных плат форм-фактору PC/104, некоторые подходы к распайке контактов, информационным шинам и шинам питания [5], но конкретная реализация у каждого разработчика своя. В этих спутниках используется электроника промышленного класса (предназначена для эксплуатации в земных условиях), но, несмотря на это, возможности этих чипов позволяют им работать и в космосе. Они могут быть недолговечны, но обеспечивают работоспособность до года.

Форм-фактор PC/104 был принят в 1992 г. в ответ на требования об уменьшении габаритных размеров и энергопотребления для компьютерных систем. Спецификация PC/104 предлагает полную аппаратную, архитектурную и программную совместимость с компьютерными стандартами в компактных размерах плат 3.6 (91.44 × 96.52 мм). Название связано с применением 104-контактной шины ISA, расположенной в нижней части платы (рис. 2).

Стандарты PC/104 описывают модульный принцип построения компактных встраиваемых систем в виде колонны состыкованных друг с другом плат и хорошо себя зарекомендовали среди разработчиков компактных бортовых компьютерных систем. Специалисты выбирают PC/104 из-за следующих преимуществ: малые вес и габариты устройств, механическая надежность разъемов и конструктива в целом.

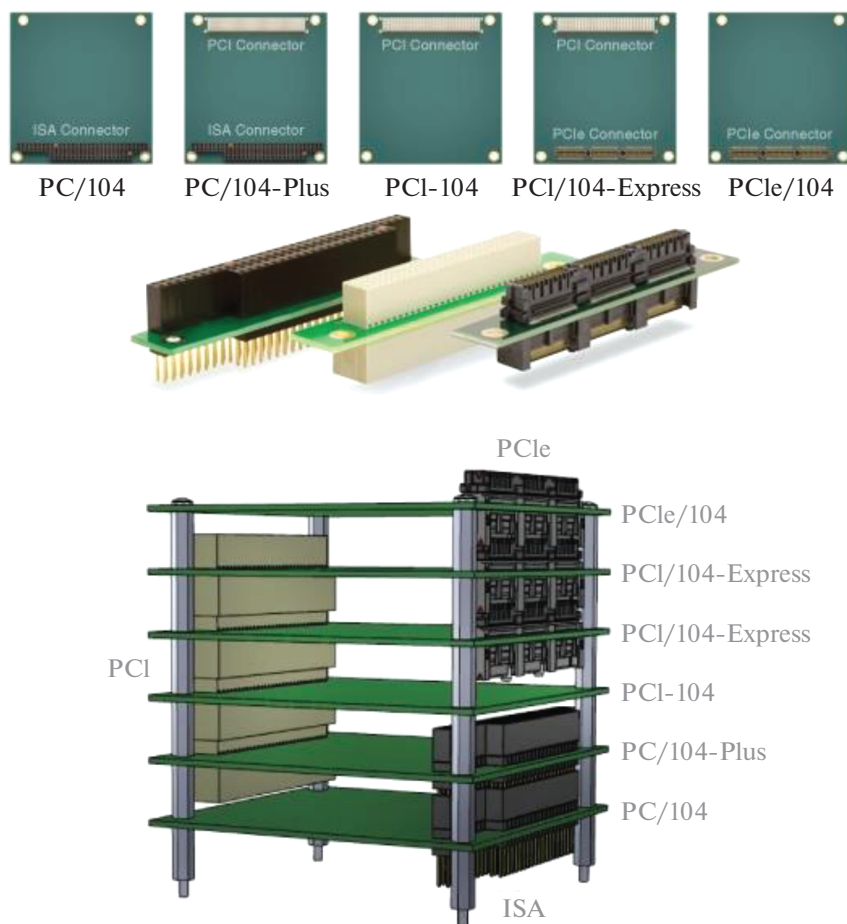


Рис. 2. Модули формата PC/104.

ВЫВОДЫ

Использование “гражданских” микросхем в космосе ограничено эффектом защелкивания и возможно в лучшем случае на низких орбитах. На высоких орбитах и в дальнем космосе необходимы специальные радиационно стойкие микросхемы.

Использование COTS-технологии позволяет быстро разработать изделие в условиях высокой конкуренции в космической отрасли и создать конкурентоспособные вычислительные системы. Эта технология обеспечивает применение новейших достижений в области разработки и модернизации вычислительных систем, повышения их быстродействия и надежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бретман В. // МКА: ВКС. 2016. № 2. С. 16.
2. Кулешов А.А., Малышев В.С., Нелаев В.В., Стемпницкий В.Р. // Микроэлектроника. 2003. Т. 32. № 31. С. 47.
3. Плис Н.И., Закиров Р.Г. // Международный форум “Микроэлектроника-2018”. 4-я международная научная конференция “Электронная компонентная база и микроэлектронные модули” (Республика Крым. г. Алушта, 01–06 октября 2018): Сб. тезисов. М.: Техносфера, 2018. С. 269. <http://microelectronica.pro/wp-content/uploads/docs-2018/Thesis2018.pdf>
4. Микроэлектроника для космоса и военных. [Электронный ресурс] <https://habr.com/ru/post/156049/> (дата обращения: 15.06.2022 г.).
5. Осторожно, кубсаты! <https://sputnix.ru/ru/analyt-ics/item/360-ostorozhno-kubsaty>