

Применение средств промышленной автоматизации в бортовой аппаратуре малых космических аппаратов

Вячеслав Фатеев, Дмитрий Лебедев, Александр Фарафонов, Фёдор Гришин

Описывается опыт применения промышленных контроллеров формата MicroPC для создания аппаратуры «Облик» малого космического аппарата «Можаяец-4». Используемый авторами подход отвечает современным тенденциям в области разработки бортовой аппаратуры малых космических аппаратов и позволяет сократить временные и финансовые затраты при требуемом уровне надёжности.

ВВЕДЕНИЕ

Традиционно создание образцов космической техники проводилось с привлечением большого числа специалистов из широкого ряда научных и производственных организаций. Создаваемая техника была уникальной и требовала для своего создания огромных материальных и временных затрат. Однако такой подход оказывается неприемлемым в жёстких условиях динамично развивающегося современного рынка космических услуг. Стоимость, а главное, временные затраты оказываются решающими при создании бортовой аппаратуры современных космических аппаратов (КА). Эти факторы, а также сложившаяся тенденция, направленная на микроминиатюризацию и стандартизацию своей продукции ведущими мировыми производителями изделий космического назначения, приводят к расширению направления создания дешёвых малогабаритных КА. Такие КА не требуют больших затрат на выведение, так как могут запускаться на орбиты функционирования лёгкими и сверхлёгкими ракетами-носителями (в том числе и снимаемыми с вооружения средствами РВСН и ВМФ), а также использовать в полной мере возможности пакетного запуска.

Всё более широкое применение находят малые космические аппараты (МКА), которые созданы коллективами специалистов, не входящими в тради-

ционную кооперацию производителей космической техники. В основном к таким МКА относятся орбитальные средства учебного и научно-исследовательского назначения. Однако, как показывает опыт, с их помощью можно решать гораздо более широкий круг разнообразных прикладных задач, например:

- исследование природных ресурсов Земли из космоса;
- обеспечение дешёвой и устойчивой коммерческой спутниковой связи;
- создание региональных систем мониторинга и безопасности на транспорте (наземном, морском, воздушном), а также систем антитеррористического контроля;
- фундаментальные и прикладные научные исследования, отработка элементов новых систем и комплексов.

Конструктивно МКА должны создаваться на основе универсальных многофункциональных платформ с возможностью размещения на борту различных типов специальной аппаратуры. Такой подход позволяет создавать унифицированные ряды бортовой аппаратуры, что существенно снижает как временные, так и финансовые затраты на разработку МКА в целом.

Военная космическая академия (ВКА) имени А.Ф. Можайского осуществляет подготовку специалистов по более чем 30 специальностям в интересах Космических войск России. В 90-х

годах прошлого века руководством академии был взят курс на создание собственных учебных мест управления космическими аппаратами в целях практической подготовки специалистов и повышения качества профессионального образования. Так было положено начало созданию серии малых космических аппаратов «Можаяец».

«ТЫ ПОМНИШЬ, КАК ВСЁ НАЧИНАЛОСЬ...»

Первый МКА серии — «Можаяец-1» — используется в качестве посо-



Малый космический аппарат
«Можаяец-4»

бия в учебном процессе академии. «Можаец-2» был запущен в 1997 году под именем «Зая». «Можаец-3» функционирует на орбите более полутора лет и используется в учебном процессе академии, а также для проведения научных экспериментов [1].

В качестве бортового комплекса управления (БКУ) в этих МКА выступал радиотехнический комплекс «ДОКА», разработанный НИЛАКТ (г. Калуга). Для проведения экспериментов, посвящённых исследованию влияния неблагоприятных факторов космического пространства на работу современных полупроводниковых приборов, использован комплект аппаратуры «Призма». Также на борту установлен комплект навигационной аппаратуры потребителя (НАП) КНС «ГЛОНАСС».

«Можаец-4» должен был стать очередным КА серии со штатным набором бортовой аппаратуры. Однако руководство ВКА им. А.Ф. Можайского решило не останавливаться на достигнутом. К тому же не устраивали некоторые аспекты применения комплекса «ДОКА». Немаловажной причиной создания нового комплекса бортовой аппаратуры явилось обращение предприятий промышленности с просьбой разработать и установить на МКА аппаратуру для измерения интенсивности импульсного излучения наземного источника в оптическом диапазоне с целью проведения исследований в рамках создания перспективных орбитальных оптических каналов связи. В академии был объявлен конкурс на оптимальное техническое решение в области разработки оригинального бортового радиотехнического комплекса и аппаратуры для проведения натурного эксперимента (аппаратура «Облик»), по результатам которого был выбран предложенный авторами данной статьи проект, основанный на использовании в составе бортовой аппаратуры управляющих промышленных микроконтроллеров. Проект предусматривал организацию БКУ МКА на базе двух спаренных микроконтроллеров для решения следующих задач:

- приём и дешифрация команд и программ управления от наземного комплекса управления;
- управление аппаратурой «Призма»;
- управление аппаратурой «Облик»;
- управление остальными подсистемами КА (системой ориентации, НАП и др.).

В штатном режиме один из контроллеров предназначался для управления

непосредственно аппаратурой «Облик», а второй решал все остальные задачи БКУ. Оба контроллера имели независимые источники питания, и в случае выхода из строя одного из них второй брал решение его задач на себя. Так было реализовано аппаратное и программное резервирование. БКУ представлял собой распределённую вычислительную сеть с независимыми узлами, взаимно дополняющими друг друга.

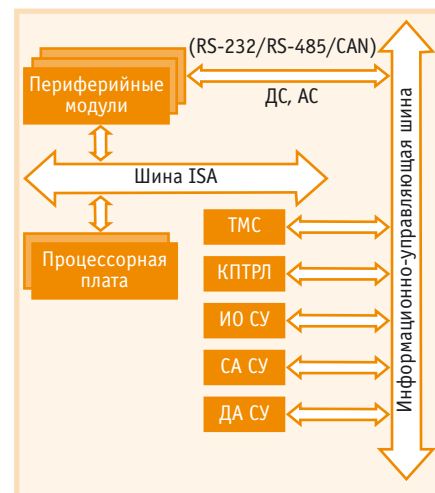
Структурная схема такого БКУ представлена на рис. 1.

«Всё было впервые и вновь...»

Высокая стоимость доставки разрабатываемой аппаратуры к месту функционирования и невозможность коррекции её работы после запуска порождают требование минимального риска отказа создаваемой аппаратуры. При традиционном подходе к созданию космической техники это обеспечивается проведением большого объёма наземных испытаний как отдельных блоков, так и всей аппаратуры КА в целом, что требует значительных временных и материальных затрат на разработку необходимой стендовой базы для каждого из испытываемых параметров. Существующая практика создания космической техники предусматривает построение бортовых систем КА в виде уникальных экземпляров, предназначенных для решения только тех задач, для которых они создавались. В результате на разработку и, главное, испытание уходили годы. Но в нашем случае такой подход был неприемлем ввиду жёстких временных ограничений, которыми обуславливалась поставленная задача. К тому же достаточно скромные объёмы финансирования и ограниченное количество исполнителей требовали принятия принципиально новых решений.

Предложенный подход во многом шёл вразрез с традиционным и основывался на использовании характеристик составных частей создаваемой аппаратуры, которые гарантировались производителем. Эти характеристики в общем подходили под ограничения, накладываемые спецификой запуска и функционирования КА, но практически не имели под собой прецедентов реального использования в отечественной космонавтике.

В целом работа по созданию бортовой аппаратуры сводилась к выполнению ряда действий, а именно: ку-



Условные обозначения:
 ТМС — телеметрическая система;
 КПТРЛ — командно-программная траекторная радиолния;
 СУ — система управления;
 ИО СУ — исполнительные органы СУ;
 СА СУ — служебная аппаратура СУ;
 ДА СУ — датчиковая аппаратура СУ;
 ДС — дискретные сигналы;
 АС — аналоговые сигналы.

Рис. 1. Структурная схема бортового комплекса управления (проектный вариант)

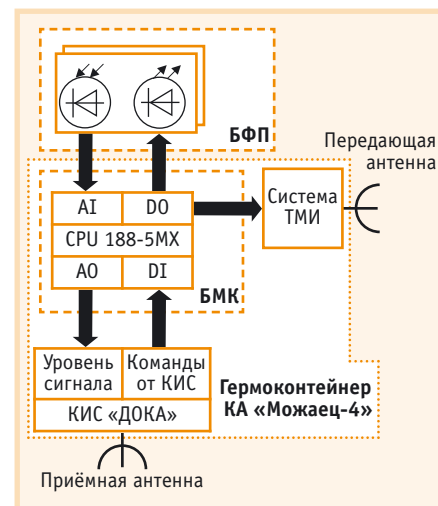
пил—собрал—настроил—проверил—запустил. От исполнителей требовался лишь опыт применения и программирования микроконтроллеров, а таковой имелся. Все это позволило реализовать предложенный проект до стадии действующего макета менее чем за 2 месяца.

При защите разработанного проекта авторы сознательно шли на определённый риск и были неоднократно подвергнуты критике, основным доводом которой было отсутствие реальных опытных данных, подтверждающих возможность длительного функционирования предложенного состава аппаратуры в жёстких условиях космического пространства.

Это и ряд других причин привели к тому, что исходный проект был существенно сокращён: было принято решение разрабатывать аппаратуру «Облик» в виде отдельного блока бортовой аппаратуры, а существующий комплекс бортовых средств оставить без изменений.

«Как строили...»

Аппаратура «Облик» предназначена для приёма и измерения интенсивности импульсного излучения (длительность 9 нс) наземного источника в оптическом диапазоне в ходе эксперимента по организации оптического канала связи.



Условные обозначения:

БФП — блок фотоприёмников;

БМК — блок микроконтроллера;

КИС — командно-измерительная система;

ТМИ — телеметрическая информация.

Рис. 2. Структурная схема аппаратуры «Облик»

Комплект аппаратуры «Облик» состоит из двух частей: блока фотоприёмников (БФП) и блока микроконтроллера (БМК). Блок фотоприёмников размещается снаружи МКА на нижнем силовом днище с ориентацией фотодетекторов в надир. Блок микроконтроллера размещается внутри гермоконтeйнера МКА на приборной раме. Структурная схема комплекта аппаратуры «Облик» представлена на рис. 2.

При создании БМК решались задачи выбора платы микроконтроллера и блока питания.

Выбор платы микроконтроллера БМК проходил по двум основным направлениям:

- выбор формата микроконтроллера;
- выбор фирмы-производителя.

Выбор формата микроконтроллера проводился на основе анализа технической документации изделий различных производителей, а также современных публикаций по данному вопросу [2], [3], и был остановлен на изделиях в формате MicroPC.

Изделия формата MicroPC характеризуются высокой надёжностью, расширенным диапазоном эксплуатационных параметров и полной совместимостью с IBM PC, что обуславливает простоту их программирования и эксплуатации.

При выборе фирмы-производителя микроконтроллера, как и блока питания, учитывались следующие факторы:

- соответствие изделий необходимым характеристикам;

- время поставки оборудования;
- стоимость оборудования.

В результате для блока микроконтроллера был выбран промышленный программируемый логический контроллер (ПЛК) CPU188-5MX фирмы Fastwel. Данный выбор определился следующими факторами:

- фирма Fastwel является отечественным производителем;
- изделие способно работать в расширенном диапазоне температур ($-40...+85^{\circ}\text{C}$);
- изделие устойчиво к ударным (до 20g) и вибрационным (до 5g) перегрузкам;
- среднее время безотказной работы составляет не менее 100000 часов;
- разработчики аппаратуры имели опыт создания систем управления с использованием ПЛК Fastwel.

Программируемый логический контроллер функционирует под управлением операционной системы FDOS, совместимой с MS-DOS. Для написания программного обеспечения использовался язык программирования высокого уровня Borland C++ версии 3.0.

В качестве блока питания были выбраны изделия отечественной фирмы «Александр Электрик». Решающим фактором здесь выступили сроки их изготовления и поставки (до 1 месяца). Дело, правда, осложнилось тем, что в период разработки аппаратуры фирма не принимала заказы ввиду поры массовых отпусков, однако руководство Воронежского завода с учётом важности решаемой задачи обеспечило изготовление двух блоков питания МДМ15-1А05МУ и поставку их в Санкт-Петербург в рекордно короткие сроки — за 1 неделю.

Создание блока фотоприёмников было осложнено малой длительностью фиксируемого импульса и требованием обеспечить высокую вероятность его приёма. К тому же фотоприёмники имели достаточно высокий уровень собственного шума. Поэтому в дополнение к поставленной аппаратуре был разработан предварительный усилитель на базе операционного усилителя МСР601 и пиковый детектор с малым дрейфом, который позволяет зафиксировать уровень мощности импульса на время, необходимое для его считывания микроконтроллером.

В состав блока фотоприёмников входят два идентичных модуля приёма и предварительной обработки светового сигнала, разработанных ОАО «Гириконд», чувствительные элементы кото-



Рис. 3. МКА «Можаец-4» на второй ступени ракеты-носителя «Космос-3М»

рых закрыты ИК-светофильтрами с разными коэффициентами ослабления сигнала. В качестве чувствительного элемента для определения интенсивности импульса светового излучения используется фотоприёмник ИК-диапазона, конструктивно объединённый с тестовым светодиодом. Токковый сигнал с выхода фотоприёмника поступает на вход предварительного усилителя. Уровень сигнала с предварительного усилителя фиксируется пиковым детектором, на выходе которого устанавливается максимальное значение амплитуды полученного сигнала, после чего сигнал подается на аналоговый вход ПЛК CPU188-5MX, расположенного в блоке микроконтроллера. Полученный сигнал анализируется по уровню мощности излучения и выдаётся на дискретные выходы ПЛК, к которым подключены контакты системы телеметрии, для передачи полученных значений на Землю. Съём результатов измерения может осуществляться в любой момент времени, если сохраняется включённое состояние комплекса после проведения измерения и если по соответствующей разовой команде с Земли не осуществлялось обнуление результатов измерений. Сброс пикового детектора осуществляется кратковременным замыканием на корпус накопительного конденсатора. Если данные не были переданы на Землю в ходе эксперимента, информация о мощности потока излучения после обработки подаётся через ЦАП микроконтроллера в командно-измерительную систему

МКА, где она запоминается и хранится до соответствующего запроса с Земли.

Для осуществления контроля работоспособности и тестирования комплекса при проведении автономных и комплексных проверок, а также в ходе штатной эксплуатации в составе МКА «Можаец-4» в БФП конструктивно встроены внутренние источники оптического излучения (светодиоды). Они включаются по разовым командам с Земли и создают засветку, соответствующую максимальному уровню интенсивности регистрируемого излучения.

Управление блоком фотоприёмников осуществляется через электронные ключи, подключённые к дискретным выходам CPU188-5MX.

После создания и испытания макета на базе производственных мощностей ОАО «Новая эра» был собран действующий образец аппаратуры «Облик». Вес аппаратуры вместе с металлическими корпусами не превысил 1,5 кг, потребляемая мощность составила в рабочем режиме не более 2 Вт.

В августе 2003 года на базе ПО «Полет» (г. Омск) при участии авторов данной статьи была осуществлена окончательная сборка и проведены успешные автономные испытания МКА «Можаец-4».

«...и вдалёк уходила Земля...»

27 сентября 2003 года с космодрома «Плесецк» ракетой-носителем «Космос-3М» МКА «Можаец-4» был выве-



а



б

Рис. 4. Ракета-носитель «Космос-3М» с МКА «Можаец-4»: а — на стартовом столе, б — в первые секунды полёта

ден на расчётную орбиту функционирования. Представители ВКА им. А.Ф. Можайского, в том числе и авторы данной статьи, были приглашены на космодром для проведения заключительного цикла испытаний (рис. 3) и наблюдали процесс запуска ракеты-носителя (рис. 4). За время функционирования МКА на орбите было проведено несколько десятков сеансов связи, а также научные эксперименты, в том числе с включением аппаратуры «Облик». Например, было выполнено несколько успешных космических экспериментов по засветке блока БФП аппаратуры «Облик» излучением Солнца при проведении программных разворотов КА.

На рис. 5 представлены результаты тестирования аппаратуры «Облик» в процессе штатной эксплуатации. График соответствует преобразованным микроконтроллером сигналам с фотоприёмников. На графике ясно видны пики от засветки фотоприёмников встроенными светодиодами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

МКА «Можаец-4» функционирует на орбите более полугода. За это время вся аппаратура «Облик», в том числе и микроконтроллер CPU188-5MX, продемонстрировали высокие технические характеристики и надёжность работы в жёстких условиях космического пространства.

По результатам штатного функционирования можно сделать следующие выводы:

- эксплуатация ПЛК CPU188-5MX фирмы Fastwel в составе аппаратуры МКА «Можаец-4» показала стойкость ПЛК к вибрационным и ударным перегрузкам на участке выведения, а также радиационную стойкость и надёжное функционирование в условиях изменения температуры окружающей среды в широком диапазоне;
- номенклатура изделий фирмы Fastwel позволяет разрабатывать бортовую аппаратуру для малогабаритной универсальной платформы перспективных МКА;

- использование изделий формата MicroPC при разработке бортовых систем КА не требует дополнительных затрат на стендовое оборудование;
- применение открытой архитектуры MicroPC позволяет создавать бортовую аппаратуру МКА в кратчайшие сроки и сокращает финансовые затраты на разработку.

Авторы статьи выражают глубокую благодарность ОАО «Гириконд» и лично Дийкову Л.К., ОАО «Новая эра» и лично Мартынову А.В., фирме «Александр Электрик Дон» и лично Гончарову М.Ю. за плодотворное сотрудничество при разработке и изготовлении аппаратуры «Облик», а также лично Яковлеву В.А. за помощь и техническую консультацию в процессе создания проекта. ●

ЛИТЕРАТУРА

1. Куприянов В. Учебно-исследовательский КА «Можаец»// Новости космонавтики. — 2003. — № 7.
2. Гобчанский О.П. Применение MicroPC в вычислительных комплексах специального назначения// Современные технологии автоматизации. — 1997. — № 1.
3. Гобчанский О.П. Проблемы создания бортовых вычислительных комплексов МКА// Современные технологии автоматизации. — 2001. — № 4.

**Авторы — сотрудники
Военной космической академии
им. А.Ф. Можайского
Телефоны: (812) 235-8722,
936-8118, (911) 219-3817**

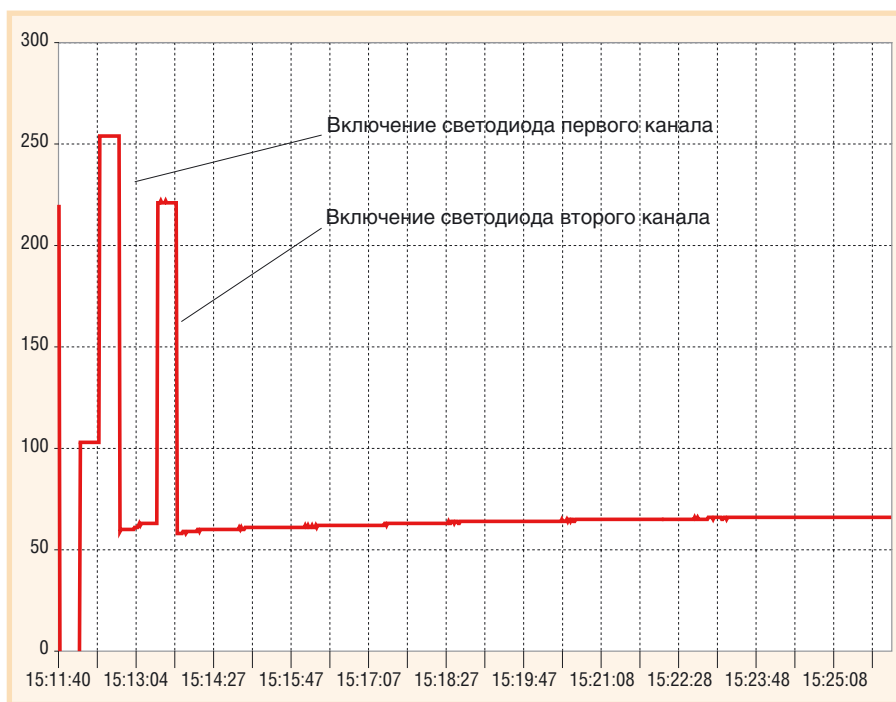


Рис. 5. Результаты тестовых включений аппаратуры «Облик» на орбите