

УДК 621.396.96

ТЕХНОЛОГИИ ПОСТРОЕНИЯ БОРТОВЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА БАЗЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ С ПРОГРАММИРУЕМОЙ ЛОГИКОЙ

В. В. Кунгурцев,

канд. техн. наук

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского

Предлагается исполнение бортовых информационно-управляющих комплексов космических аппаратов на основе технологии «система на кристалле» с использованием высокоинтегрированных элементов программируемой логики. Данное решение позволяет повысить эксплуатационно-технические показатели информационно-вычислительного ядра, сократить ресурсы на дальнейшую модификацию и доработку.

Construction of spacecraft onboard information-control complexes is proposed on the basis of the "system-on-chip" technology with use of modern high-integrity elements of programmable logic. The given solution provides a substantial increase of operational and technical parameters of the spacecraft informational nucleus saving the resources for further modification and adaptation.

Основными тенденциями развития современных космических комплексов являются унификация бортовых и наземных комплексов управления и информационного обмена, снижение массогабаритных и энергетических характеристик, а также стоимости разработки и изготовления бортовой аппаратуры космических аппаратов. Для решения этих задач используются новейшие разработки в области радиоэлектронного приборостроения, микромеханики, электротехники.

Структура современной бортовой аппаратуры космических аппаратов подразумевает высокую степень конструктивной интеграции ее элементов. При этом основным элементом, обеспечивающим управление этой сложной аппаратурой, является бортовой информационно-управляющий комплекс (БИУК). Качество процесса функционирования элементов бортовой аппаратуры имеет высокую информативность и требует для ее эффективного управления решения множества задач, в частности:

- получение и обработка потока командно-программной информации управления, поступающего по каналам информационного обмена с наземных средств управления через бортовой радиотехнический комплекс;

- получение с датчиков глобального навигационного поля информации о положении космичес-

кого аппарата в пространстве, ее обработка и хранение в бортовом запоминающем устройстве;

- обработка данных системы ориентации и стабилизации положения космического аппарата в пространстве;

- накопление, обработка и передача на наземные средства приема информационных потоков целевой аппаратуры (специальная информация);

- сбор, предварительная обработка и передача на наземные средства управления телеметрической информации о состоянии и качестве функционирования элементов бортовой аппаратуры;

- формирование управляющих информационных потоков для модулей исполнительных устройств бортовой управляющей и целевой аппаратуры;

- формирование бортовой шкалы времени и осуществление операций по ее коррекции в соответствии с шкалой времени наземных средств управления.

Решение этих задач является достаточно ресурсоемким и осуществляется с использованием бортовых вычислительных комплексов. При этом для эффективного решения в зависимости от целевых назначений и характеристик космического аппарата могут потребоваться как минимальные, так и предельные максимальные вычислительные ресурсы. Например, большинство современных высокоорбитальных спутниковых систем связи пре-

дусматривает работу аппаратуры спутников-ретрансляторов в режиме непосредственной ретрансляции или ретрансляции с переносом частоты, что обеспечивается лишь переключением различных полуккомплектов приемо-передающей аппаратуры и не требует решения сложных вычислительных задач в рамках реализации целевой программы космического аппарата. Другим примером являются низкоорбитальные оптико-электронные спутники наблюдения и дистанционного зондирования Земли, функционирование которых подразумевает постоянное получение и сложную вычислительную обработку изображений подстилающей поверхности в совокупности с постоянным слежением за местоположением и ориентацией космического аппарата, обеспечивающим точность получаемых данных.

Построение бортовой аппаратуры на вновь разрабатываемых интегральных элементах является достаточно дорогостоящей и ресурсоемкой стадией разработки. Кроме того, при сохранении высокой динамики развития микроэлектронной техники такие разработки быстро устаревают. Как уже отмечалось, одной из основных тенденций развития современной бортовой аппаратуры является унификация ее элементов. Поэтому для ее построения все чаще используются не уникальные, вновь разрабатываемые, а прошедшие апробацию стандартизованные технологии. С учетом требований по вычислительной мощности и объему решаемых задач БИУК могут быть реализованы по различным принципам:

1) многомодульное построение элементов БИУК на базе современных микроконтроллеров и микропроцессоров;

2) иерархическое построение БИУК с реализацией основных требуемых вычислительных ресурсов центральным элементом (бортовой микроЭВМ) и использованием дополнительных элементов для решения вспомогательных задач;

3) построение по принципу «система на кристалле» (“system-on-chip”) – реализация всех функций БИУК в одной микросхеме сверхбольшой степени интеграции.

Перечисленные варианты возникли вследствие одновременного увеличения степени интеграции современной микроэлектронной базы, значительного снижения стоимости производства типовых модулей на прошедших долгий срок эксплуатации и модернизации микропроцессорах и микроконтроллерах, появления гибких технологий реализации элементов бортовой аппаратуры на базе интегральных схем с программируемой логикой (ПЛИС).

Первый вариант построения основан на использовании стандартизованных модулей и микросхем. Примером может служить стандарт РС 104, предусматривающий «этажерочную» конструкцию бортовой аппаратуры, в которой каждый модуль имеет стандартизованные размеры (форм-фактор) и элементы коммутации для взаимодействия. Центральным модулем, обеспечивающим в том числе

управление, является модуль центрального процессора. Другой вариант такого построения БИУК базируется на модульном принципе реализации на нескольких микроконтроллерах, имеющих упрощенную внутреннюю структуру, например на ПИС-контроллерах.

Иерархическая реализация БИУК подразумевает использование бортовой ЭВМ с достаточно высокой производительностью. Однако, как правило, такие ЭВМ обладают большими с точки зрения бортовой аппаратуры массогабаритными и энергетическими потребностями. Поэтому использование данного варианта возможно лишь в средних и больших космических аппаратах.

Концепция «система на кристалле» является наиболее приемлемой для использования в бортовой аппаратуре перспективных космических аппаратов, так как обладает максимальной степенью интеграции элементов аппаратуры в совокупности с малыми размерами и энергопотреблением. Для ее реализации могут быть разработаны специализированные интегральные схемы, изготовленные специально для данного конкретного космического аппарата. Однако разработка и штучное изготовление таких элементов требует больших экономических и временных затрат и оправдано лишь при серийном производстве космических аппаратов и платформ. Кроме того, усложняются процессы модернизации и реконструкции таких элементов.

В общем случае «система на кристалле» может включать в себя различные типы блоков: программируемые процессорные ядра, блоки специализированных интегральных схем, блоки программируемой логики, памяти, периферийных устройств, аналоговые компоненты и различные интерфейсные схемы. Не обязательно все такие блоки должны быть физически реализованы на одном кристалле: процессоры, блоки памяти могут использоваться как отдельные компоненты.

Значительное повышение эффективности разработки высокоинтегрированных БИУК, особенно по технологии «система на кристалле» достигается при использовании интегральных микросхем с программируемой логикой. Эта технология известна и распространена достаточно широко, однако в последнее время благодаря повышению степени интеграции и быстрдействию элементной базы появились возможности для ее активного внедрения в бортовую аппаратуру космического аппарата.

Интегральные схемы с программируемой логикой представляют собой относительно новое, быстроразвивающееся направление микроэлектроники, и в условиях жесткой конкуренции их популярность настолько выросла, что по некоторым прогнозам более 60% приборов с применением специализированных интегральных микросхем будут использовать ПЛИС и только 21% – специализированные вентиляционные матрицы.

Использование ПЛИС значительно повышает технологичность процесса проектирования цифро-

вых устройств и переводит практически весь этот процесс на ПЭВМ. Любое цифровое устройство реализуется на базе ПЛИС прямо на столе разработчика при помощи только персональной ЭВМ и программатора.

К классу программируемых логических интегральных схем относятся интегральные схемы, построенные по следующим технологиям:

- FPGA (Field Programmable Gate Array);
- EPLD ((E)EPROM technology-based complex Programmable Logic Devices);
- CPLD (CMOS FastFlash complex Programmable Logic Devices);
- MPLD (Mask Programmable Logic Devices).

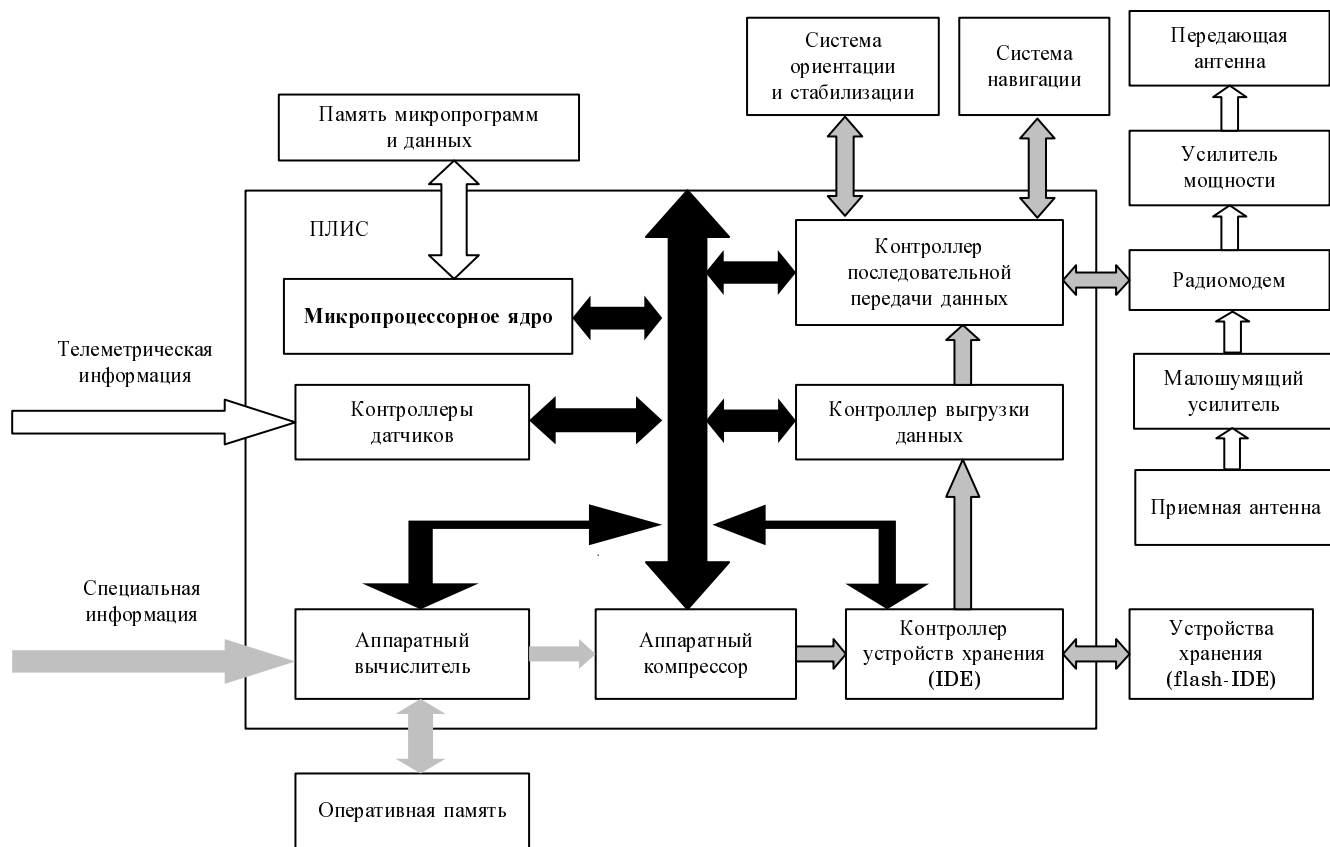
Технологии EPLD, CPLD, MPLD предполагают комбинацию полностью программируемых матриц вентилях И/ИЛИ банков макроячеек. Макроячейки образуют функциональные блоки, выполняющие различные комбинаторные или последовательные логические функции. Технология программируемых пользователем базовых матричных кристаллов (FPGA) является более совершенной, так как позволяет реализовать внутреннюю структуру интегральной схемы путем программирования внутренней матрицы.

Основными разработчиками и производителями элементной базы с программируемой логикой

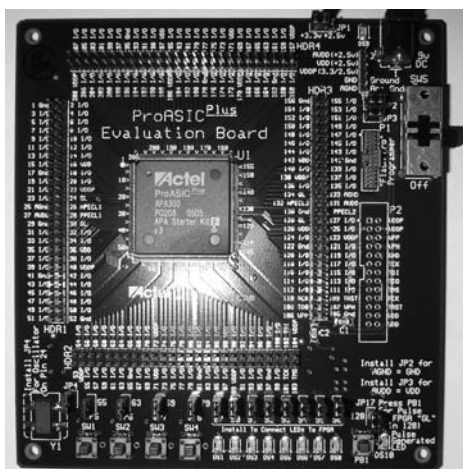
являются компании QuickLogic, Actel, Xilinx, Altera. В области использования ПЛИС в космических системах отдельное место занимает продукция компании Actel. Особенностью ПЛИС компании Actel является применение так называемой Antifuse-технологии, представляющей собой создание металлизированной перемычки при программировании. Данная технология обеспечивает высокую надежность и гибкие ресурсы трассировки, при этом не требуется конфигурационное ПЗУ. Продукция, производимая компанией, предусматривает варианты коммерческого, промышленного и радиационностойкого исполнения, соответствующие требованиям стандартов надежности и устойчивости функционирования в сложных условиях.

Проектирование схем на базе ПЛИС предусматривает выполнение следующих операций:

- ввод описания разрабатываемой логической схемы на нескольких языках высокого уровня (описание функционального поведения элемента, графический ввод его схемы в базе стандартизованных микросхем средней степени интеграции или с использованием библиотек типовых компонентов);
- экспертный выбор модели ПЛИС для реализации описанной схемы, осуществляемый с учетом требуемого количества программируемых ячеек и условий функционирования компонента;



■ Рис. 1. Пример реализации БИУК космического аппарата на базе микросхемы ПЛИС



■ Рис. 2. Отладочная плата микросхем с программируемой логикой

– перевод логического описания схемы элемента в модель ПЛИС и ее оптимизация (трансляция, оптимизация, размещение);

– функциональное и временное моделирование разработанного компонента с целью проверки соответствия требований к компоненту;

– верификацию разработанного компонента и редактирование его модели;

– загрузку отлаженной модели в ПЛИС с помощью ПЭВМ через соответствующий порт или программирование внутреннего постоянного запоминающего устройства в случае технологии FPGA, которая при включении питания сама в себя загружает конфигурационные данные. Чипы CPLD с памятью FAST FLASH после загрузки в них конфигурационных данных при выключении питания их сохраняет.

Чаще всего для описания компонентов ПЛИС используют язык VHDL – язык описания логической структуры цифровых компонентов. Кроме того, для большинства применений разработаны библиотеки компонентов, распространяемые бесплатно фирмами-производителями ПЛИС.

Вариант реализации БИУК перспективного космического аппарата связи представлен на рис. 1. ПЛИС в этом случае является центральным элементом, осуществляющим сбор и обработку специальной информации, а также управление и контроль состояния всех элементов бортовой аппаратуры. Структура БИУК на ПЛИС предусматривает использование внутренних шин обмена данными между различными компонентами. Ориентировочное число используемых при этом вентилях составляет порядка одного-полутора миллионов, что реализуемо в рамках одной микросхемы ПЛИС серии ProASIC. На рис. 2 показан внешний вид платы разработчика компонентов ПЛИС с интегрированной микросхемой серии ProASIC Plus, а также элементами, обеспечивающими отработку операций взаимодействия с внешними устройствами.

В настоящее время разработаны и находятся на этапе опытной эксплуатации несколько образцов бортовой аппаратуры, реализованной на базе ПЛИС-технологии, например в проекте «КОРОНАС-ФОТОН». При разработке бортовой аппаратуры был введен в ее состав полноценный компьютерно-ориентированный интерфейс, позволивший увеличить скорость обмена информацией между отдельными электронными модулями, что важно для создания адаптивных цифровых систем управления и сбора информации. Для расширения функциональных возможностей контроллеров, введения дополнительных возможностей в них были использованы ПЛИС фирмы Actel. Всего в комплексе научной аппаратуры «ФОТОН» используются 9 таких модулей. Упрощенный прототип данного контроллера был запущен на спутнике «КОРОНАС-Ф» в 2001 г. и до настоящего момента успешно функционирует на орбите.

Таким образом, реализация БИУК на базе микросхем ПЛИС позволяет обеспечить гибкость и эффективность процесса разработки и проектирования бортовой аппаратуры космических аппаратов. Проведенные с использованием методики, изложенной в работе [5], расчеты технико-экономического эффекта от внедрения технологий проектирования элементов бортовой аппаратуры КА на базе ПЛИС показали значительный экономический выигрыш предлагаемых технологий в сравнении с существующими технологиями проектирования и реализации БИУК.

Дальнейшая модернизация бортовой аппаратуры благодаря наличию программных моделей и разработанных библиотек стандартных компонентов фактически не будет требовать дополнительных затрат, что в случае массового использования данной технологии позволит обеспечить серийное производство перспективных космических аппаратов.

Литература

1. Точки Р. Дж., Уидмер Н. С. Цифровые системы. Теория и практика: Пер. с англ. 8-е изд. М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. 1024 с.
2. Зотов В. Ю. Проектирование цифровых устройств на основе ПЛИС. М.: Горячая линия – Телеком, 2003. 624 с.
3. Попович А. М. ПЛИС АСТЕЛ – платформа для «систем на кристалле» бортовой аппаратуры // Электроника Наука Техника Бизнес. 2004. № 4. С. 34–37
4. Попович А. М., Филатов А. А. Оценка производителей ПЛИС. Анализ системы качества // Электроника Наука Техника Бизнес. 2004. № 6. С. 58–59
5. Аболиц А. И. Системы спутниковой связи. Основы структурно-параметрической теории и эффективность / ИТИС. М., 2004. 426 с.