

# Применение современных российских СБИС повышенной стойкости в системах управления солнечными космическими экспериментами в дальнем космосе

**К особенностям разработки и применения научной аппаратуры в космических экспериментах в дальнем космосе следует отнести значительные тепловые и радиационные нагрузки и длительный (5–10 лет) срок непрерывной эксплуатации аппаратуры. Учитывая значительно возросшую актуальность вопросов импортозамещения электронной компонентной базы, вопросы применения современных российских комплектующих изделий радиоэлектроники, в том числе сверхбольших интегральных схем (СБИС), в научной аппаратуре подобного класса требуют все более пристального внимания.**

Дмитрий ЛИСИН  
lisindv@izmiran.ru  
Николай ЛЕБЕДЕВ  
lebedev@izmiran.ru  
Владимир СМЕРЕК  
smerek@niiet.ru

В статье рассматриваются вопросы применения современных российских СБИС в системе управления многоканальным солнечным фотометром для проведения непрерывных многолетних экспериментов на гелиоцентрической орбите. Показано, что система подобного класса может быть реализована на базе перспективной спецстойкой СБИС 1887ВЕ6Т разработки воронежского ОАО «НИИЭТ».

## Введение

Исследования физики Солнца и солнечно-земных связей — одно из важных направлений современной науки, в рамках которого в России и других странах активно производятся экспериментальные изыскания с помощью космических аппаратов [1]. В современных солнечных космических проектах наблюдения Солнца проводятся с орбиты Земли, то есть с расстояния в одну астрономическую единицу и находясь в плоскости эклиптики. Тем не менее для получения новых, более точных данных о Солнце и внутренней гелиосфере требуется дистанционное зондирование с намного меньших расстояний и возможностью выхода из плоскости земной орбиты. В настоящее время в рамках Федеральной программы космических исследований на 2016–2025 гг. разрабатывается космический проект, в котором будет реализован данный подход, —

многоцелевая солнечная обсерватория «Интергелиозонд» [2, 3]. Планируется, что космический аппарат, за счет многократных гравитационных маневров у Венеры, будет постепенно приближаться к Солнцу по гелиоцентрической орбите до расстояния в 60–70 радиусов Солнца. При этом плоскость орбиты аппарата, за счет тех же гравитационных маневров, будет наклонена до 30° к плоскости эклиптики. В состав научной аппаратуры проекта «Интергелиозонд» войдут 19 приборов [3], одна группа которых будет проводить дистанционные наблюдения Солнца и его короны, а вторая — локальные гелиосферные измерения. Основные задачи связаны с изучением тонкой структуры и динамики солнечной атмосферы, механизмов нагрева солнечной короны и ускорения солнечного ветра, свойств внутренней гелиосферы в областях, изучением полярных и экваториальных областей Солнца с высоких гелиоширот [1].

## Многоканальный солнечный фотометр

Наблюдения, реализуемые комплексом научной аппаратуры проекта, должны охватить весь спектр энергий солнечного излучения — от рентгеновского диапазона до радиоизлучения. В этом аспекте измерения потока солнечного излучения, его флуктуаций и спектрального распределения в диапазоне

300–1600 нм, проводимые в эксперименте «Фотоскоп» [4], обеспечивают непрерывность энергетической шкалы в области видимого и ближнего инфракрасного диапазона спектра.

Научная программа эксперимента «Фотоскоп» ориентирована на исследования в двух областях физики Солнца: задачи, связанные с измерениями интегрального потока солнечного излучения в широком спектральном диапазоне (от ультрафиолетовой границы до ближней инфракрасной области) — так называемой квазисолнечной постоянной, и изучением процессов в фотосфере и подфотосферных слоях на основе наблюдения собственных колебаний Солнца.

Для решения задач эксперимента в Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН) разрабатывается высокоточный и стабильный многоканальный солнечный фотометр «Фотоскоп». Измерительная часть прибора содержит спектроскопический и фотометрический модули, которые позволят проводить непрерывные спектральные измерения, а также измерения интегрального потока солнечного излучения в диапазоне 300–1600 нм.

Фотометр состоит из одного блока, установленного на верхней платформе космического аппарата непосредственно под теплозащитным экраном (рис. 1).

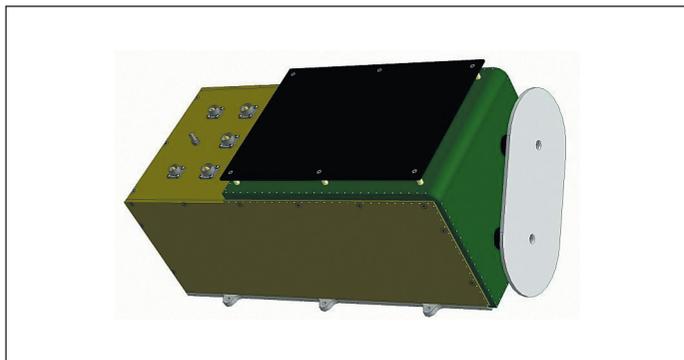


Рис. 1. Фотометр «Фотоскоп»

Суточный объем информации, передаваемой на Землю, не превышает 20 Мбайт, мощность, потребляемая прибором от бортовой сети электропитания, — не более 12 Вт, габаритные размеры — 224×182×470 мм, вес — 6,5 кг.

### Структура системы управления фотометром

В задачи системы управления прибором входят:

- получение, первичная обработка и передача научной информации в бортовую систему сбора научной информации;
- передача контрольно-служебной телеметрической информации в бортовые служебные системы;
- прием и исполнение команд управления;
- возможность автономной работы (без связи с Землей) до 1 месяца;
- периодическое проведение калибровок и самодиагностики функционирования фотометра.

Общая структура системы управления фотометром показана на рис. 2.

Аналоговые блоки АБ-1/2 полностью идентичны. Каждый блок содержит линейный фотоприемник с необходимыми операционными схемами обработки сигнала при считывании и коммутируется одновременно на оба полукомплекта цифровой электроники. При этом АБ-1 используется для основных измерений, а АБ-2 включается только для проведения калибровочных измерений. При необходимости АБ-2 может выполнять и роль основного измерительного блока.

Два блока цифровой электроники также полностью идентичны и содержат цифро-аналоговый блок (ЦАБ), комплект цифровой логики, выполненный на базе ПЛИС, цифровую вычислительную

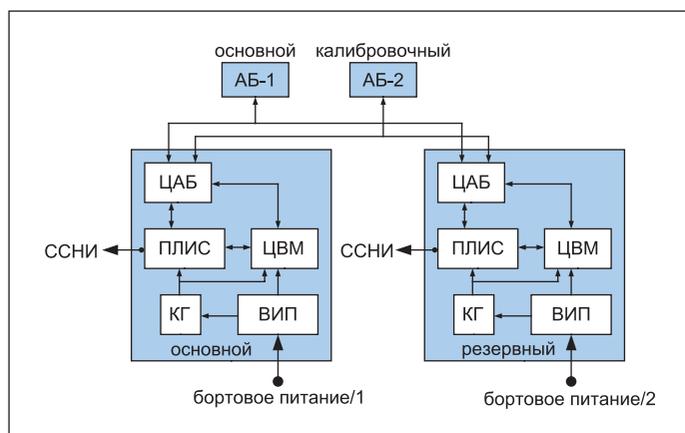


Рис. 2. Общая структура системы управления фотометром: АБ — аналоговый блок; ЦАБ — цифро-аналоговый блок; ПЛИС — программируемая логическая интегральная схема; ЦВМ — цифровая вычислительная машина; КГ — кварцевый генератор; ВИП — вторичный источник электропитания; ССНИ — система сбора научной информации

машину (ЦВМ), кварцевый генератор (КГ) и вторичный источник питания (ВИП). Данная статья посвящена вопросам выбора элементной базы для построения узла ЦВМ. Основные задачи, стоящие перед ЦВМ, выглядят следующим образом:

- Непрерывный сбор цифровой информации с АЦП фотолинейки с параметрами: разрядность слова — 16 бит, время выборки — 10 мкс, количество выборок в кадре — 512, частота кадров, изменяемая в диапазоне 1–16 Гц.
- Первичная обработка полученных видеок кадров: спектральная, временная и комбинированная цифровая фильтрация в темпе поступления, подготовка телеметрических кадров к выдаче в бортовую систему сбора научной информации (ССНИ).
- Сбор, накопление, первичная фильтрация данных со вспомогательных АЦП (дополнительные фотоэлементы, датчики температуры и т. п.).
- Поддержка обмена научной и служебной информацией по последовательному протоколу связи с ССНИ с частотой до 1 Мбит/с.
- Организация самодиагностики прибора (фиксация нештатной работы узлов, отказы аппаратуры, сбои работы отдельных ячеек памяти и т. п.) для выдачи соответствующих флагов-признаков на ССНИ либо автоматического парирования и/или ввода резервных узлов.

Большинство современных микроконтроллеров имеют встроенное ПЗУ на основе флэш-памяти. Это чрезвычайно удобно, однако, учитывая потенциальную уязвимость флэш-ячеек к сбоям вследствие радиоактивного облучения, данный вариант не удовлетворяет требованиям к устойчивости системы к воздействию радиации при длительной работе в открытом космосе.

Одной из наиболее устойчивых к подобным воздействиям в настоящее время является технология создания запоминающих элементов на основе пробиваемого диэлектрика (английское название «antifuse» — «антиперемычка»). Микросхемы ПЗУ на базе этой технологии выпускаются в настоящее время ЗАО «ПКК Миландр» [5]. Таким образом, оптимальным с точки зрения радиационной стойкости в данном случае будет применение микроконтроллера без встроенного ПЗУ с реализацией такового на базе микросхем 1645PT2У.

В настоящее время в линейке спецстойких микроконтроллеров воронежского ОАО «НИИЭТ» [6] имеется 16-разрядный RISC-микроконтроллер без ПЗУ на базе ядра С166, который на данный момент и выбран в качестве основы для реализации узла ЦВМ солнечного фотометра.

### Спецстойкий 16-разрядный микроконтроллер 1887BE6T

Фирма Infineon (полупроводниковое подразделение компании Siemens) представила архитектуру С166 в 1993 году. Основная область применения контроллеров данной архитектуры — задачи измерения и управления, в том числе в сложных условиях эксплуатации. Это связано с тем, что процессорное ядро имеет ряд особенностей, отличающих его от других:

1. Расширенная обработка битов. Для работы с битами в микроконтроллере предназначено большое число команд. В отличие от аналогичных команд других микроконтроллеров, эти команды обеспечивают постоянный доступ к операндам без необходимости перемещения данных в промежуточные регистры. Перезапись одного бита не затрагивает другие.
2. Возможность блокирования настройки критических системных регистров специальной командой конца инициализации.
3. Быстрое реагирование на прерывания от периферии.
4. Высокая производительность благодаря конвейеризации и наличию аппаратных вычислительных устройств.
5. Наличие механизмов контроля правильности выполнения программ (контроль за стеком, недопустимые операции и т. д.).

Такие достоинства, позволяющие сразу создавать потенциально надежные системы, и определили выбор архитектуры для нового радиационно-стойкого изделия ОАО «НИИЭТ».

**Таблица. Основные технические характеристики микросхемы**

Архитектура; 16-разрядное ЦПУ с четырехуровневым конвейером команд	C166
Тактовая частота	до 25 МГц
Объем адресуемой памяти	16 Мбайт
Объем встроенного ОЗУ	6 кбайт
Объем области регистров специальных функций	1 кбайт
Количество источников прерываний	77
Количество линий ввода/вывода	103
Количество внешних линий вывода ШИМ-сигнала	6
Количество каналов захвата/сравнения	32
Количество асинхронно/синхронных последовательных приемопередатчиков	2
Количество высокоскоростных синхронных последовательных приемопередатчиков	2
16-разрядный многофункциональный таймерный модуль	2
Программируемый сторожевой таймер	1
Контроллер интерфейса I <sup>2</sup> C	1
Контроллер сдвоенного интерфейса CAN	1
Отладочный интерфейс JTAG	1
Количество режимов пониженного энергопотребления	3
Напряжение питания микросхемы	3–3,6 В

Микросхема 1887BE6T представляет собой 16-разрядный RISC-микроконтроллер с тактовой частотой 25 МГц со встроенным ОЗУ и расширенной периферией. Архитектура микроконтроллера оптимизирована для работы в режиме реального времени и обеспечения высокой производительности при малом времени реакции на внешние события.

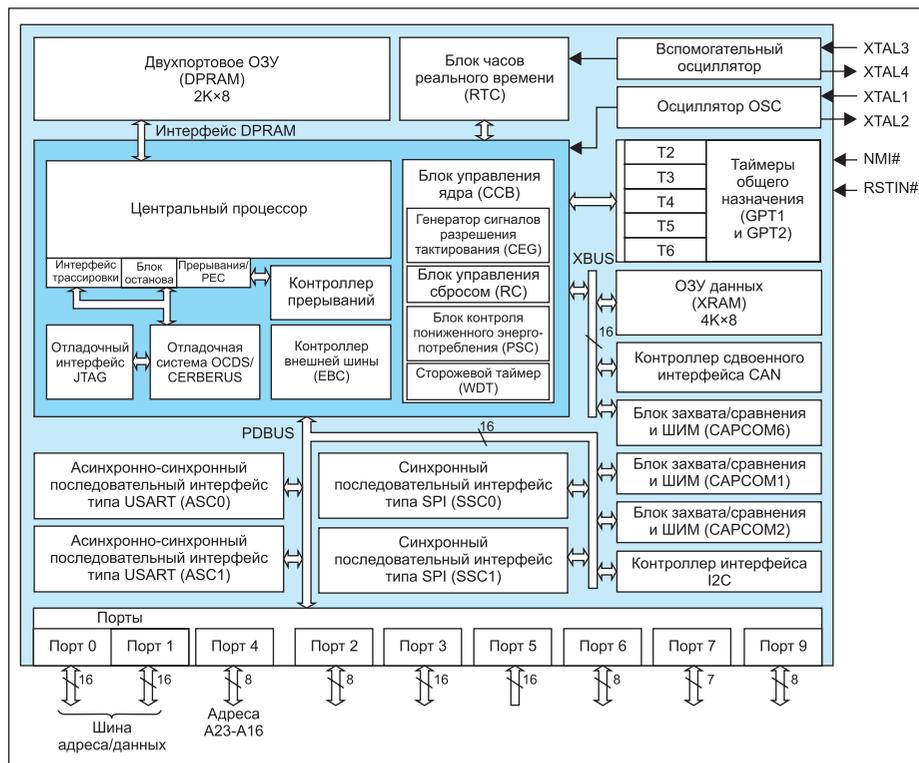
Основные технические характеристики микросхемы представлены в таблице.

Структурная схема микроконтроллера представлена на рис. 3.

При разработке микроконтроллера 1887BE6T были использованы как технологические, так и схемотехнические типы защиты от воздействия спецфакторов.

Технологические методы состоят в использовании различных производственных методов в целях достижения высокой степени защиты от радиации. Производственные процессы, такие как эпитаксиальный КМОП, кремний на сапфире и кремний на изоляторе, могут помочь минимизировать тиристорные эффекты и эффекты от накопленной дозы. Пластины с кристаллами ИС 1887BE6T изготавливаются по технологии КНИ-КМОП, проектная норма 0,35 мкм, 4 слоя металлизации, 3,3 В, реализованные на технологической линейке НИИСИ РАН (Москва). Применение технологии КНИ позволяет снизить токи утечки, паразитные емкости и исключает появления тиристорного эффекта. Однако использование только технологических методов не в состоянии защитить микросхему от одного из типов радиационных эффектов — одиночных сбоев [7].

Одиночные сбои — это изменения состояний элементов, которые хранят какую-либо информацию, под воздействием ионизирующего излучения. Поскольку цифровые схемы работают с двоичной информацией, такие сбои проявляются как изменение состояния элемента на противоположное. Защита статического запоминающего устройства — одно из главных мероприятий при проекти-



**Рис. 3. Структурная схема микроконтроллера 1887BE6T**

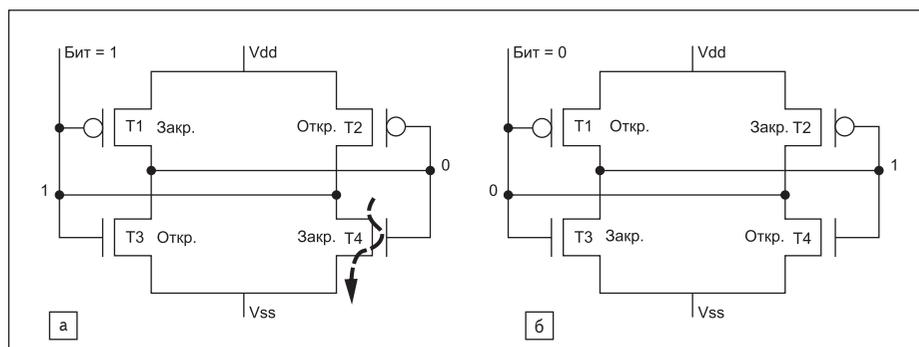
ровании интегральных микросхем (ИМС) с повышенной устойчивостью к воздействию тяжелых заряженных частиц. Защита оперативного запоминающего устройства подчиняется принципам введения какого-либо типа избыточности (мажоритирование, использование кодов Хэмминга и т. д.) или применения специальной схемотехники ячейки памяти. Блоки ОЗУ в микроконтроллере 1887BE6T сосредоточены в следующих областях:

1. Область двухпортовой DPRAM объемом 2048×8 бит.
2. Область расширенной XRAM объемом 4096×8 бит.
3. Область сообщений узлов интерфейса CAN.

Для микросхемы 1887BE6T был выбран метод защиты ОЗУ путем использования специальной схемотехники ячеек — DICE (Dual Inter-locked storage Cell).

На рис. 4 представлена самая простая ячейка памяти, состоящая из четырех транзисторов T1, T2, T3 и T4. В зависимости от состояния этих транзисторов ячейка может хранить или логический «0», или логическую «1». Рассмотрим ситуацию, когда ячейка памяти хранит состояние логической «1». Одиночный сбой происходит в области транзистора T4, что приводит к его открытию (рис. 4а). Соответственно, происходит изменение состояний остальных транзисторов (T2 закрывается, T4 открывается, T3 закрывается). Как результат, хранящееся в ячейке памяти значение с логической «1» изменяется на противоположное. Так происходит возникновение сбоя в ячейке ОЗУ (рис. 4б).

DICE-ячейка состоит из симметричной структуры четырех инверторов, каждый из которых имеет *n*-канальный и *p*-канальный транзисторы, отдельно управляемые смежными узлами, сохраняю-



**Рис. 4. Простая ячейка памяти**

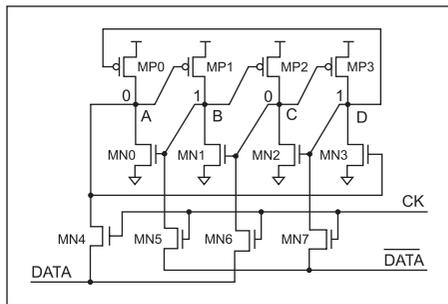


Рис. 5. Схема ячейки памяти типа DICE

щими одно и то же состояние. Эти четыре узла DICE-ячейки формируют пару защелок на двух альтернативных путях, зависящих от сохраняемого логического значения. Один из смежных узлов управляет состоянием проводимости транзистора, соединяющего данный узел с энергетической шиной, а другой узел блокируется комплементарным транзистором инвертора, изолирующим его от противоположной энергетической шины. Схема DICE-ячейки представлена на рис. 5.

В микроконтроллере DICE-ячейки применяются во всех областях памяти.

Еще одним способом достижения требуемых параметров стойкости микроконтроллера является использование специальных верифицированных по стойкости библиотек стандартных элементов. Современный процесс проектирования цифровых ИМС предполагает следующие этапы:

1. Создание технологически независимого описания микросхемы (Verilog, VHDL-описания).
2. Реализация функциональности с помощью САПР (синтез) на библиотеке стандартных элементов.

Элемент библиотеки представляет собой элементарный комбинационный (ИЛИ, И, НЕ) или последовательный элемент (триггер, защелка), реализованный в данном техпроцессе. Состоит из схематехнического и топологического представления. При создании такой библиотеки (обычно фабрикой — производителем кремниевых пластин) происходит проверка стойкости всех библиотечных элементов к требуемым видам воздействий.

В случае если параметры какого-то элемента выходят за границы допустимого диапазона, происходит его корректировка и повторный процесс реализации в кремнии и тестирования. Таким образом, если в процессе синтеза микросхемы использовать гарантированно стойкие элементы, то этим обеспечивается стойкость и целого изделия. Конечно, это не отменяет проведение испытаний готового микроконтроллера на ВВФ, но позволяет минимизировать количество итераций и удешевить производство.

Важнейшей компонентой повышения радиационной стойкости является процесс проведения испытаний, оценки стойкости элементной базы и микросборок в аппаратуре при реальных условиях эксплуатации. В данной области определены методы проведения испытаний; разработаны алгоритмы, программы проверки и рациональные тестовые последовательности, созданы автоматизированные средства диагностики, включая нестандартное контрольно-измерительное оборудование, позволяющие адекватно оценить работоспособность при воздействии дестабилизирующих факторов в условиях жестких временных ограничений, в том числе и дистанционно. Для испытаний микроконтроллера 1887ВЕ6Т использовалась экспериментальная база ОАО ЭНПО «СПЭЛС». Полученные результаты доказали соответствие микросхемы требованиям технического задания по стойкости.

Особо следует отметить разработку аппаратно-программных средств диагностики микроконтроллера 1887ВЕ6Т при проведении испытаний на воздействие тяжелых заряженных частиц. Такие средства обеспечивают полный функциональный контроль изделий в процессе испытаний с автоматическим определением характера возникающей неисправности, их классификации по условиям возникновения и поражения блоков микросхемы, а также определение адреса неисправности при сбое ячеек памяти. Проведение испытаний осуществлялось в автоматическом режиме с записью информации в память ЭВМ и последующим автоматическим запуском программы тестирования. Кроме отказов, приводящих к нарушению закона функцио-

нирования, оценивались отказы, связанные с тиристорным эффектом. Контроль и учет таких отказов также выполнялись в автоматическом режиме.

## Заключение

Проведенные исследования возможности применения спецстойкого микроконтроллера 1887ВЕ6Т производства ОАО «НИИЭТ», включая макетирование системы управления солнечного фотометра и ресурсные испытания в течение более 100 суток, показали, что на базе данной микросхемы могут быть успешно реализованы перспективные разработки высоконадежных систем управления для ответственных применений, в том числе для сложных и длительных научных экспериментов в дальнем космосе.

## Литература

1. Кузнецов В. Д., Зеленый Л. М. Космические проекты по солнечно-земной физике // Солнечно-земная физика. 2008. Вып. 12. Т. 1.
2. Проект Интергелиозонд. Труды рабочего совещания (Таруса, 11–13 мая 2011)/Под ред. В. Д. Кузнецова. М.: ИЗМИРАН, 2012.
3. Кузнецов В. Д., Зеленый Л. М., Зимовец И. В. и др. Космическая миссия Интергелиозонд для изучения Солнца и гелиосферы / В сб. «Солнечная и солнечно-земная физика-2015». Труды XIX Всероссийской конференции, 5–9 октября 2015. Под ред. А. В. Степанова и Ю. А. Наговицына. СПб.: ГАО РАН, 2015.
4. Лебедев Н. И., Жугджа Ю. В. Фотометрические наблюдения флуктуаций излучения Солнца в эксперименте ФОТОСКОП // Механика, управление и информатика. 2012. № 1.
5. Микросхема 1645РТ2У. [www.milandr.ru/uploads/Products/product\\_255/spec\\_1645RT2U.pdf](http://www.milandr.ru/uploads/Products/product_255/spec_1645RT2U.pdf) (дата обращения 09.03.2016)
6. ОАО «НИИЭТ». Официальный сайт. [www.niet.ru](http://www.niet.ru)
7. Ачкасов В. Н., Смерек В. А., Уткин Д. М., Зольников В. К. Методы обеспечения стойкости микросхем к одиночным событиям при проектировании радиационно-стойких микросхем / Сборник под общ. ред. академика РАН А. Л. Стемповского. М.: ИППМ РАН, 2012.