

Опыт разработки радиационно-стойкого контроллера накопителя для бортовой космической аппаратуры

А.В. Руткевич, Д.И. Воронков, И.Ю. Сысоев, Н.Н. Хайло, А.А. Вейков

ООО «НПП «Цифровые решения», г. Москва, igor@dsol.ru

Аннотация — В работе описан опыт разработки контроллера памяти, позволяющий на базе микросхем NAND Flash создавать накопители ёмкостью до 256 Гбайт и скоростью передачи данных до 150 Мбайт/с. Контроллер поддерживает обмен информацией по интерфейсу сериалайзера TLK2711-SP, асинхронному интерфейсу статической памяти, последовательным интерфейсам и PCI. Стойкость контроллера к предельной накопленной дозе 100 крад и порог возникновения тирингового эффекта не менее 67,9 МэВ×см²/мг.

Ключевые слова — твердотельный накопитель информации, контроллер памяти, PCKH, NAND Flash, SLC, ONFI, PCI, PC/104-Plus, космическая аппаратура, FTL, ЭКБ, TLK2711-SP.

I. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день основным элементом для энергонезависимого хранения больших объёмов данных является твердотельная память. К наиболее доступной твердотельной памяти относится NAND Flash память. Микросхемы NAND Flash памяти позволяют достичь наилучших значений таких параметров накопителя как: информационная ёмкость, энергопотребление, габариты, масса, надёжность, скорость записи и воспроизведения, стойкость к механическим воздействиям.

Управление твердотельной памятью типа NAND Flash связано с рядом ограничений, задаваемых внутренним устройством микросхем хранения. Микросхемы состоят из двух основных частей – массива для хранения и контроллера. При записи данные сначала попадают в контроллер, затем отдельной командой переносятся в массив. Запись и чтение из массива могут осуществляться только постранично. Типовые размеры страниц современных микросхем: 4 кбайта, 8 кбайт и 16 кбайт. Операция записи – это установка в нулевое логическое значение соответствующих бит страницы. Операции записи всегда предшествует операция стирания. Во время операции стирания все биты блока устанавливаются в единичное логическое значение. Операция стирания применима только к блокам. Ёмкость блока, как правило, составляет несколько мегабайт. Блок содержит примерно нескольких сотен страниц. Причём страницы, принадлежащие одному блоку, должны записываться только по порядку. Дополнительно при работе с NAND Flash памятью нужно учитывать, что количество циклов «стирание-запись» для каждого блока ограничено. Для SLC памяти, наи-

более надёжной, оно составляет от 60 000 до 100 000 циклов. Также технология изготовления ячеек NAND Flash памяти не исключает возможность ошибки при считывании информации из массива.

Исходя из вышеперечисленных ограничений следует, что значения таких параметров, как скорость случайных и последовательных записи и чтения, равномерное распределение нагрузки, целостность информации и надёжность зависят от радиационно-стойкого контроллера накопителя (PCKH).

С развитием технологии в течение последних пятнадцати лет в космической сфере наблюдается переход на твердотельные накопители информации. В мировой промышленной сфере, благодаря организации комитетов лидерами отрасли, получилось выработать общие требования и стандарты к PCKH. Они касаются как внешних интерфейсов, так и поддерживаемой функциональности. Это отразилось в PCKH массового применения от таких компаний как Intel, Marvell, Phison и Seagate (ранее – SandForce).

Космическая сфера отличается большей консервативностью и закрытостью, чем промышленная. Новые разработки должны быть совместимыми с уже применяемыми решениями. При этом изделия, разработанные различными организациями, могут быть несовместимы между собой. Каждая организация придерживается собственной логики построения сложных систем, набора архитектур устройств и интерфейсов. Результатом этого является самостоятельная разработка каждой организацией своего собственного контроллера и программного обеспечения для него, как правило, на базе программируемой логической интегральной схемы. Как следствие, при низкой унификации повышается стоимость результата, и ухудшаются характеристики используемого решения.

Компания ООО «НПП «Цифровые решения», основываясь на собственном опыте разработки PCKH для космического применения на базе ПЛИС, а также требованиях потребителей, предложила универсальный PCKH для космической аппаратуры ЦКРФ.467316.001.

Разработанный PCKH предназначен для широкого применения в спутниках дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), системах телеметрии, чёрных ящиках, промежуточных высокоскоростных буферах данных высокой ёмкости.

II. ТРЕБОВАНИЯ К РСКН

A. Поддержка ранее разработанных систем на базе PC/104-Plus

Ранее разработанные и применяемые интерфейсы отличаются относительно невысокими скоростными характеристиками. Верхняя граница для записи и чтения данных составляет 30 Мбайт/сек. Также ёмкость ячейки запоминающего устройства, необходимая для функционирования системы, не превышает нескольких гигабайт.

Такие невысокие скоростные и ёмкостные требования, с учётом современной номенклатуры проверенных процессорных устройств, позволяют строить системы, в которых основная функциональная нагрузка ложится на процессор.

В космической аппаратуре подобного рода распространённым решением стало использование микрокомпьютеров на базе стандарта PC/104-Plus. В данной системе все модули подключаются по единому интерфейсу PCI, по которому передаются как команды управления, так и данные.

Таким образом разрабатываемый РСКН должен поддерживать шину PCI, обеспечивать скорость записи и чтения данных не менее, чем 30 Мбайт/с, позволять подключать массив NAND Flash памяти не менее 10-ти Гбайт и при этом вся ячейка на базе РСКН должна удовлетворять требованиям конструктива PC/104-Plus.

B. Поддержка специализированных систем с асинхронной памятью

Другим распространённым устоявшимся решением является использование управляющего процессорного устройства повышенной сбоеустойчивости в качестве основного узла. Скорости передачи данных в таких системах также не превышают 30 Мбайт/с, а ёмкость не превышает 10-ти Гбайт.

С точки зрения периферии такие процессорные устройства обязательно содержат выводы GPIO, интерфейсы UART, SPI и интерфейс для подключения ОЗУ или ПЗУ (как правило, SRAM, MRAM, ROM, EEPROM). Что касается остальных интерфейсов, то нельзя выделить общие решения.

Из вышеизложенного следует, что единственно правильным решением для обеспечения унификации при заданных скоростных требованиях будет реализация в РСКН интерфейса асинхронной памяти для подключения к внешнему процессорному устройству (ВПУ).

В этом случае для ВПУ управление РСКН будет выглядеть как запись или чтение команд и данных в определённые переменные карты памяти. РСКН тогда находится на стороне ведомого устройства, а источником и потребителем данных со стороны ведущего устройства является ВПУ.

C. Поддержка ранее разработанных систем на базе набора последовательных интерфейсов

Другой распространённый класс систем состоит из ВПУ и независимых от него источников (датчиков) и потребителей (ретрансляторов) данных. В таком случае ВПУ выполняет только функцию управления, без анализа принимаемых и передаваемых данных.

Устройства, являющиеся источниками и потребителями пользовательских данных, как правило, имеют невысокие скоростные характеристики, не более 50 Мбит/с, и интерфейсы, в которых основной упор сделан на минимизацию точек межсоединений, сигнальных и управляющих линий.

Стандартный состав такого интерфейса включает в себя линию тактирования сигнала, одну линию данных и одну линию управления для возможности остановки внешнего потока информации. При этом передача данных осуществляется только в одну сторону.

На этапе разработки РСКН была заложена возможность поддержки 4-х последовательных интерфейсов на приём и 4-х последовательных интерфейсов на передачу на скорости 50 Мбит/с. Также в целях гибкости РСКН должен обеспечивать механизм модификации потока данных с участием ВПУ. Поддержка работы с 8-ю внешними устройствами в целях снижения накладных расходов на обработку прерываний должна быть реализована с помощью системы дескрипторов.

D. Поддержка перспективных систем на базе радиационно-стойкого сериалайзера TLK2711-SP

Современные перспективные высокоскоростные системы оперируют потоками информации на символической скорости не менее 2,5 Гбит/с и скорости приёма и передачи пользовательских данных не менее 100 Мбайт/с.

Высокоскоростная передача в сложных системах невозможна без использования дифференциального потока данных и, как следствие, устройства сериализации и десериализации потока информации. Сериализация данных на большой скорости возможна только с использованием сложных аналоговых устройств, что может привести к невозможности применения изделия в космической аппаратуре. Поэтому номенклатура решений не отличается разнообразием.

Стандартной схемой для такой задачи является использование микросхем сериалайзера TLK2711-SP [3] или разработки сериалайзера на базе радиационно-стойкой ПЛИС. Поэтому на этапе разработки РСКН была заложена совместимость с микросхемой TLK2711-SP и возможность передачи и приёма данных на скорости до 150 Мбайт/с.

Дополнительно, РСКН должен обеспечивать возможность подключения массива NAND Flash памяти ёмкостью 256 Гбайт.

E. Требования к NAND Flash интерфейсу

Благодаря разработанному стандарту ONFI и его широкой поддержке, требования к NAND Flash интер-

фейсу РСКН для космической аппаратуры практически совпадают с требованиями к РСКН для коммерческих изделий.

ООО «НПП «Цифровые решения» имеют большой опыт по разработке контроллеров NAND Flash памяти [1]. Интерфейс NAND Flash памяти РСКН должен поддерживать одновременную работу по 4-м каналам данных, поддержку массивов NAND Flash памяти на базе наиболее надёжных микросхем типа SLC, возможность работы по любым 2-м или 1-му каналу данных, поддерживать ёмкость массива энергонезависимой памяти не менее 256 Гбайт. В целях помехоустойчивости в соответствии с требованиями производителя микросхем NAND Flash памяти, РСКН должен осуществлять автоматическое обнаружение и коррекцию до 12-ти битовых ошибок кодами БЧХ [2] в блоках размером 512 байт. Для снижения нагрузки на внутренний процессор контроллер NAND Flash памяти в составе ТНИ должен включать аппаратные ускорители для отправки, приёма команд и функцию троирования служебных данных.

F. Требования к аппаратной поддержке алгоритмов работы с NAND Flash памятью

При использовании NAND Flash памяти устройство управления должно обеспечивать возможность реализации следующих алгоритмов, относящихся к уровню взаимодействия с NAND Flash памятью (Flash Transition Layer) [3]:

- запись и чтение по секторам размером 1 кбайт;
- организация механизмов отображения логических блоков на область физических блоков (Logic Unit Number Table);
- управление неисправными блоками (Bad Block Management);
- контроль выравнивания износа (Wear Leveling);
- организация кэш-буферов для последовательной записи (Serial Logic Block);
- организация кэш-буферов для случайной записи (Random Logic Block);
- дефрагментация данных в массиве NAND Flash памяти (Garbage Collection);
- защита таблицы логических блоков от внезапного выключения питания (Power-Off Protection).

III. ОПИСАНИЕ ФУНКЦИЙ РСКН

A. Структурная схема РСКН

Структурная схема РСКН показана на рис. 1.

РСКН состоит из следующих основных блоков:

- RISC CPU – микропроцессорное ядро, реализованное по гарвардской архитектуре с сокращённым набором инструкций;
- IM – память инструкций микропроцессорного ядра объёмом 32 кбайта;

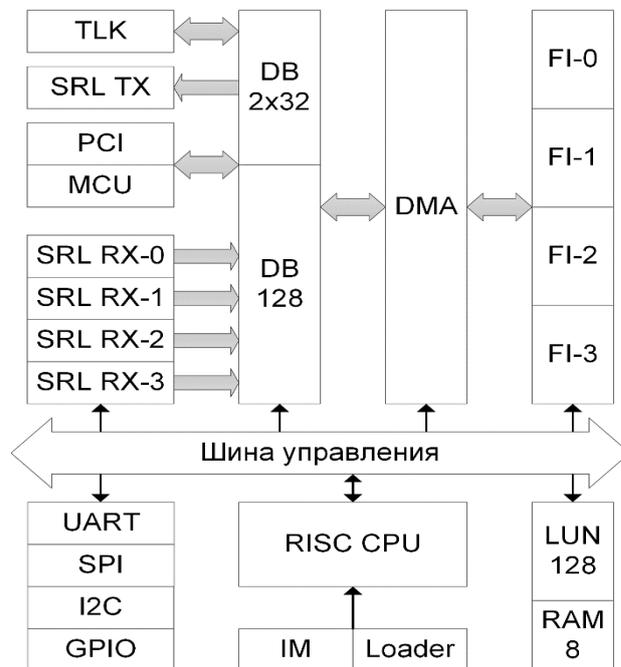


Рис. 1. Структурная схема РСКН

- Loader – загрузчик исполняемой программы микропроцессорного ядра из массива NAND Flash памяти;
- RAM – ОЗУ микропроцессорного ядра объёмом 8 кбайт;
- LUN – таблица отображения логических блоков на физические блоки массива NAND Flash памяти;
- FI-0..3 – контроллеры интерфейсов массива NAND Flash памяти;
- TLK – контроллер интерфейса TLK2711-SP;
- PCI – контроллер PCI;
- MCU – контроллер интерфейса асинхронной шины;
- SRL TX – контроллер передатчика последовательного интерфейса;
- SDL RX-0..3 – контроллеры последовательных интерфейсов приёма данных;
- DMA – контроллер прямого доступа к памяти;
- DB 2x32 – 2 буфера данных ёмкостью 32 кбайта каждый для передачи информации по шинам TLK2711-SP, MCU, PCI и шинам последовательного интерфейса к внешним принимающим устройствам;
- DB 128 – буфер данных ёмкостью 128 кбайт для приёма информации по последовательным интерфейсам от внешних передающих устройств;
- UART, SPI, I2C, GPIO – контроллеры интерфейсов к вспомогательной периферии.

IV. СЦЕНАРИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РСКН

Рассмотрим основные сценарии взаимодействия ВПУ и РСКН.

А. Режим работы по асинхронному интерфейсу

Асинхронный интерфейс (MCU) предназначен для подключения РСКН к ВПУ по шине асинхронной памяти. РСКН поддерживает работу с 8, 16 и 32 битной шиной данных MCU.

Большинство современных процессоров содержат встроенный контроллер внешней памяти, поддерживающий работу с асинхронной памятью. Рассмотрим работу РСКН с радиационно-стойким процессором 5023BC016 «Спутник» [4] в качестве ВПУ, подключённого к РСКН по интерфейсу MCU. Встроенное ОЗУ размером 128 кБ и контроллер прямого доступа к памяти позволяют снять с процессорного ядра задачу переноса массива данных из ОЗУ в буфер РСКН и обратно.

В режиме MCU задачей процессора «Спутник» является управление РСКН, а также запись и чтение полезных данных. В этом режиме процессор имеет непосредственный доступ к буферам данных и регистрам управления РСКН. Это позволяет самостоятельно заполнять буфер по мере поступления данных, либо использовать механизм прямого доступа к памяти.

Минимальный размер блока данных, записываемого в массив NAND Flash памяти – одна страница размером 32 кбайт при работе в четырёхканальном режиме. Общий объем буфера данных РСКН составляет 64 кбайт. Это позволяет организовать двойную буферизацию под управлением ВПУ. При заполнении первой половины буфера ВПУ отдаёт команду на перенос данных в массив NAND Flash памяти и приступает к заполнению второй половины. После заполнения второй части буфера ВПУ проверяет, переданы ли данные из первой части, и, если данные переданы, отдаёт команду на перенос данных из второй части. Это позволяет организовать непрерывный процесс записи данных в накопитель. Аналогичным образом организован механизм двойной буферизации при чтении данных из накопителя.

Несомненным преимуществом работы в режиме MCU является возможность изменения данных внутри буфера со стороны ВПУ. Это позволяет обойти ограничение NAND Flash памяти на страничную запись. При необходимости записи части страницы ВПУ отдаёт команду на чтение страницы из Flash памяти, изменяет необходимые данные в буфере и отдаёт команду на запись данных. Данная функция также может быть полезна при необходимости сопровождения записываемых данных служебной информацией (функция журналирования).

В. Режим работы по интерфейсу PCI

РСКН поддерживает подключение к ВПУ по шине PCI на частоте 33 МГц. Наличие интерфейса PCI позволяет легко интегрировать систему хранения данных на базе РСКН в готовую или вновь разрабатываемую систему стандарта PC/104-Plus или CompactPCI. Модульность этих систем позволяет использовать в новых системах ранее разработанные изделия без внесения каких-либо изменений, а также наращивать объем сис-

темы хранения данных за счёт увеличения количества подключаемых модулей.

Кроме того, шина PCI используется в качестве системной шины некоторых специализированных процессоров, что позволяет подключать устройства на базе шины PCI непосредственно к процессору без использования дополнительных преобразователей. Примером могут служить радиационно-стойкие процессоры семейства «Комдив» [5] и радиационно-стойкий процессор AT697E фирмы Atmel.

РСКН поддерживает подключение к шине PCI в режимах «Master» и «Target».

При работе РСКН в режиме «Target» адресное пространство буфера данных РСКН отображается на адресное пространство шины PCI и ВПУ имеет непосредственный доступ к буферу данных. Процесс записи и чтения данных происходит аналогично режиму MCU. ВПУ заполняет буфер данных и формирует команды для переноса данных во Flash память. Задача организации двойной буферизации ложится на ВПУ.

При работе РСКН в режиме «Master» ВПУ указывает начальный адрес в пространстве шины PCI и размер пакета данных. За передачу данных отвечает контроллер прямого доступа к памяти, входящий в состав РСКН. По окончании передачи блока данных РСКН формирует прерывание и возвращает результат выполнения команды.

С. Режим работы с сериалайзером TLK2711-SP

РСКН поддерживает интерфейс подключения к радиационно-стойкому сериалайзеру TLK2711-SP (интерфейс TLK). Данный интерфейс используется для записи и чтения данных совместно с одним из интерфейсов управления (MCU или PCI).

Сериалайзер TLK2711-SP представляет собой приемо-передатчик для построения высокоскоростных систем двунаправленной передачи данных типа «точка-точка» со скоростью передачи полезных данных от 1,6 до 2 Гбит/с. Он позволяет при соединении двух устройств заменить параллельную шину на последовательный интерфейс со средой передачи в виде печатного монтажа, коаксиального или оптоволоконного кабеля.

Интерфейс подключения к сериалайзеру представляет собой две параллельных шины: шину передатчика и шину приёмника. Каждая шина состоит из 16 бит данных, двух бит признака служебной информации и одного сигнала тактовой частоты. Частота параллельного интерфейса от 80 до 125 МГц. В сериалайзере применяется кодирование 8/10 и механизм передачи служебной информации в виде K-символов.

Разделение интерфейсов управления и передачи информации позволяет получить максимальную скорость записи/чтения полезных данных. Как правило, поточная передача данных подразумевает последовательную запись и чтение больших массивов информации. При работе в режиме TLK ВПУ передаёт одну команду на запись или чтение большого массива дан-

ных (вплоть до полного объёма накопителя) и ожидает прерывания по завершении выполнения команды. Дальнейшая работа по обеспечению буферизации и переносу данных из буфера в массив NAND Flash памяти и обратно выполняется РСКН.

При записи данных в накопитель РСКН игнорирует все принимаемые К-символы, а полезные данные записывает в буфер данных и автоматически переносит их во Flash память по мере заполнения буфера. Объем записываемых данных и адрес для записи данных в массив Flash памяти предварительно передаются ВПУ с помощью команды по интерфейсу управления.

При чтении данных из накопителя РСКН формирует поток данных в соответствии с форматом, заданным ВПУ с помощью специальной команды настройки приемо-передатчика интерфейса TLK. При этом заданными К-символами в потоке выделяются начало и конец посылки, а также происходит прореживание потока данных указанным количеством К-символов для снижения средней скорости передачи полезных данных.

D. Режим с приёмом и передачей данных по последовательным интерфейсам

РСКН поддерживает работу со специализированным последовательным интерфейсом, который состоит из четырёх каналов ввода и четырёх каналов вывода информации (интерфейс SRL). Данный интерфейс используется для записи и чтения данных совместно с одним из интерфейсов управления (MCU или PCI).

Каждый канал ввода и вывода информации состоит из 3-х сигналов: сигнал данных, сигнал синхроимпульса и сигнал разрешения передачи. Одновременно могут работать все четыре канала ввода информации. Одновременно может работать один из четырёх каналов вывода данных.

Так как при записи данных по последовательному интерфейсу источники данных не синхронизированы между собой, то возникает сложная задача управления потоками данных, поступающими из разных каналов. Как правило, данные каждого канала сохраняются по разным адресам во Flash памяти. Поэтому в РСКН они накапливаются в отдельных частях общего буфера и, по мере накопления, переносятся во Flash память.

Для управления этим процессом используется механизм дескрипторов и задач. ВПУ по интерфейсу управления формирует в отдельной области памяти РСКН очередь дескрипторов и очередь задач для каждого канала.

Дескриптор содержит информацию для конкретного приёмника о том, какая область буфера данных выделена для записи принимаемой информации, и каков её объем. Дескрипторы обрабатываются приёмником последовательного интерфейса.

Задача содержит информацию о том, какой адрес в массиве Flash памяти соответствует данным конкрет-

ного дескриптора. Задачи обрабатываются Flash контроллером.

По команде от ВПУ приёмник приступает к обработке дескрипторов. После получения указанного в дескрипторе объёма данных приёмник сигнализирует о завершении обработки текущего дескриптора и приступает к выполнению следующего. После этого Flash контроллер приступает к обработке задачи и переносит данные, соответствующие обрабатываемым задаче и дескриптору, во Flash память по адресу, указанному в задаче.

Функцией ВПУ является заполнение очереди дескрипторов и задач, отслеживание их состояния и своевременное пополнение очереди во избежание потери полезных данных.

При чтении данных используется аналогичный механизм. Сначала, в соответствии с задачей, происходит перенос данных из Flash памяти в буфер данных РСКН. После этого ВПУ при необходимости дополняет данные служебной информацией и формирует дескриптор. Передатчик обрабатывает дескриптор и передаёт соответствующую информацию по последовательному интерфейсу.

V. СХЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Рассмотрим несколько типовых схем систем хранения данных на базе РСКН с использованием разных наборов интерфейсов и устройств управления.

A. Схема с использованием TLK2711-SP

Использование отдельных интерфейсов для управления и передачи данных позволяет достичь наибольших скоростей передачи данных. На рис. 2 показан пример системы, где в качестве ВПУ используется процессор «Спутник», подключённый к РСКН по интерфейсу MCU. Источник данных подключён к системе по интерфейсу TLK.

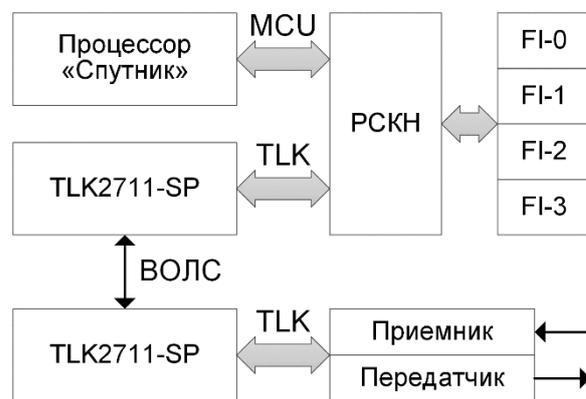


Рис. 2. Схема работы в режиме TLK

Подобная схема может быть применена в спутнико-вой связи или дистанционного зондирования Земли, где накопитель информации не может быть размещён в непосредственной близости от источника данных (приёмника, фотокамеры, регистрирующей аппаратуры) и получателя данных (передатчика).

В. PC/104-Plus

На рис. 3 показан пример бортовой системы сбора телеметрической информации, где в качестве накопителя используется система на базе РСКН. Такая система может быть построена на базе модулей формата PC/104-Plus. В данной системе шина PCI используется как для управления РСКН, так и для записи/чтения.

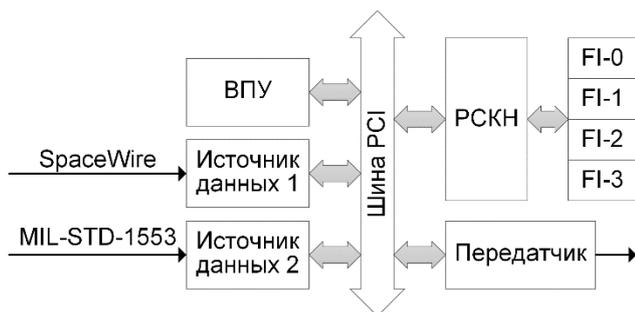


Рис. 3. Схема применения в конструктиве PC/104-Plus

Такая система может быть построена на базе модулей формата PC/104-Plus. В данной системе шина PCI используется как для управления РСКН, так и для записи/чтения данных. Большой выбор готовых модулей формата PC/104-Plus позволяет легко модернизировать подобные системы под используемые в аппаратуре интерфейсы.

С. Схема с последовательными интерфейсами

На рис. 4 приведён пример системы, в которой для записи данных в накопитель используются четыре последовательных канала ввода информации (интерфейс Serial RX). Источником данных для подобного интерфейса может служить аппаратура сбора данных спутника ДЗЗ: фотокамеры, датчики излучения, система телеметрии спутника.

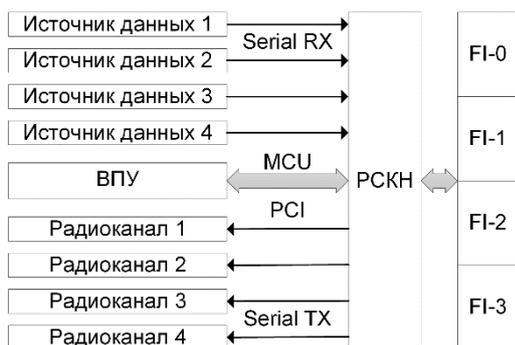


Рис. 4. Пример схемы с использованием последовательных интерфейсов

Как правило, накопленная информация передаётся на Землю в течение сеанса связи. Для этого может использоваться один из четырёх последовательных каналов вывода информации (интерфейс Serial TX).

Д. С процессором «Спутник»

Процессор «Спутник» может использоваться совместно с РСКН не только в качестве устройства управления, но и в качестве устройства чтения и запи-

си данных. Используемые в процессоре «Спутник» интерфейсы позволяют разрабатывать как самостоятельные системы на его основе, так и использовать его в качестве контроллера подсистемы хранения данных в составе других систем.

На рис. 5 представлен пример системы на базе процессора «Спутник», которая может быть использована в качестве устройства управления или сбора телеметрической информации.

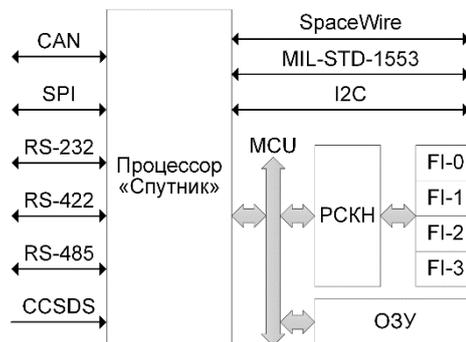


Рис. 5. Схема с использованием процессора «Спутник»

В данном устройстве в качестве накопителя используется система на базе модуля РСКН, подключённого к шине контроллера внешней памяти процессора по интерфейсу MCU. Большой выбор периферийных интерфейсов позволяет использовать процессор «Спутник» для решения широкого круга задач.

VI. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ИИ КП В РСКН

Для повышения стойкости к воздействию ИИ КП в РСКН применён ряд топологических, схемотехнических и алгоритмических решений [6].

А. Топологические методы

Для защиты от тиристорного эффекта (Single Event Latch-up, SEL) и деградации от накопленной дозы (Total Ionizing Dose, TID) в библиотеке элементов, на базе которой разработан РСКН, используется специализированная библиотека элементов. В основе топологии элементов лежат следующие решения:

- 1) элементы выполнены по технологии КМОП 180 нм, оптимальной с точки зрения боеустойчивости и стойкости к накопленной дозе;
- 2) для повышения стойкости к тиристорному эффекту используются охранные кольца;
- 3) для повышения стойкости к накопленной дозе используются кольцевые затворы.

В. Схемотехнические методы

При функционировании в условиях воздействия ИИ КП сбои, исправляемые схемотехническими методами, можно классифицировать следующим образом:

- одиночный сбой (Single Event Upset, SEU);
- множественный сбой (Multibit Upset, MBU);

- функциональный отказ (Single Event Functional Interrupt, SEFI);
- пробой затвора (Single Event Gate Rupture, SEGR).

Перечень схемотехнических решений в РСКН, повышающих сбоеустойчивость:

- 1) защита расширенным кодом Хэмминга блоков статической памяти для защиты от SEU;
- 2) повышение стойкости памяти LUN периодическим сканированием с использованием аппаратного блока (Scrubbing) для защиты от SEU;
- 3) использование кодирования данных кодами БЧХ в NAND Flash памяти с корректирующей способностью, в 1,5 раза превышающей рекомендации производителей NAND Flash для защиты от SEU;
- 4) троирование управляющих регистров контроллера интерфейса NAND Flash памяти для защиты от SEU;
- 5) защита контрольной суммой, многократным резервированием экземпляров, кодами БЧХ, расположением в различных физических областях образов программы в NAND Flash памяти для защиты от SEFI;
- 6) троирование служебной информации о блоках для защиты от SEFI;
- 7) предоставление возможности контроля со стороны ВПУ программного счётчика для определения нештатной ситуации для защиты от SEFI;

8) предоставление возможности контроля со стороны ВПУ возникновения некорректируемых ошибок в памяти инструкций и ОЗУ микропроцессорного ядра для защиты от SEFI;

9) возможность коррекции конфигурации массива NAND Flash памяти после изготовления аппаратуры за счёт изменения набора используемых каналов, режимов работы каналов (1-/2-/4-х канальные режимы) и набора используемых выводов выбора микросхем (Chip Select) памяти для защиты от SEGR.

С. Программные методы

В программном обеспечении для РСКН предусмотрены следующие алгоритмические решения:

- 1) троирование команд и параметров команд от ВПУ по интерфейсам MCU и PCI для защиты от SEU;
- 2) использование сторожевого таймера для контроля попадания микропроцессорного ядра в бесконечный цикл для защиты от SEFI;
- 3) заполнение неиспользуемой области памяти инструкций безусловными переходами в функцию для обработки нештатных ситуаций;
- 4) создание таблицы неисправных блоков (Bad Block Management).

Таблица 1

Функциональные параметры РСКН

	Ед. изм.	Значение
Поддерживаемые ёмкости массива NAND Flash памяти	Гбайт	16/32/ 64/128/256
Размер сектора	кбайт	1
Максимальная скорость записи и чтения по интерфейсу TLK2711-SP	Мбайт/с	150
Максимальная скорость записи и чтения по интерфейсу PCI	Мбайт/с	60
Максимальная скорость записи и чтения по MCU	Мбайт/с	60
Максимальная скорость записи по последовательному интерфейсу	Мбит/с	50
Максимальная скорость чтения по последовательному интерфейсу	Мбит/с	50
Интерфейс PCI	версия	2.2
Стандарт ONFI	версия	2.2
Количество экземпляров ПО в массиве NAND Flash памяти	шт.	4096
Корректирующая способность кодов БЧХ	—	12 бит на 512 байт
Поддержка функции перепрограммирования	—	есть

Таблица 2

Надёжность РСКН

	Единицы измерения	Значение
Диапазон рабочих температур	°С	от -60 до 125
Группа аппаратуры по ГОСТ РВ 20.39.304-98	—	5.3
Срок активного существования	лет.	15
Предельная накопленная доза	крад	не менее 100
Порог возникновения тиристорного эффекта	МэВ×см ² /мг	не менее 67,9
Порог возникновения SEU	МэВ×см ² /мг	6,2
Интенсивность сбоев на ГСО	шт./((с×бит)	10 ⁻⁹

VII. ПАРАМЕТРЫ РСКН

Параметры разработанного РСКН показаны в табл. 1 и 2.

VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Компанией ООО «НПП «Цифровые решения» был разработан РСКН, предназначенный для широкого

применения в космической аппаратуре. Он позволяет модернизировать уже разработанные системы и обеспечить перспективные космические аппараты высокоскоростными и ёмкими ячейками памяти. Партия опытных образцов прошла предварительные испытания и КД присвоена литера «О». Внешний вид РСКН показан на рис. 6.

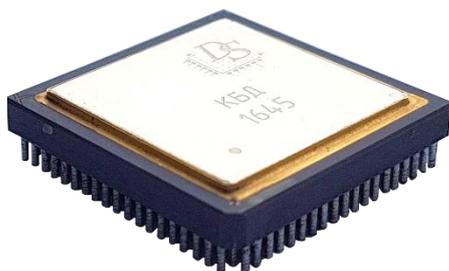


Рис. 6. Внешний вид радиационно-стойкого контроллера накопителя для бортовой космической аппаратуры

Изделие реализовано на 2-х кристаллах. Основной кристалл имеет размеры 10x10 мм. Аналоги по внешним интерфейсам отсутствуют. В отечественной и зарубежной космической аппаратуре задачи управления твердотельным накопителем, как правило, решаются с

помощью программируемых логических интегральных схем.

Благодаря заложенным конструктивным, топологическим, схемотехническим и алгоритмическим решениям РСКН соответствует современным требованиям, применяемым к электронной компонентной базе.

Использование РСКН в космической аппаратуре позволит унифицировать архитектуру, а также снизить стоимость и сроки её разработки.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Руткевич А.В., Поляков Е.А., Сысоев И.Ю. СФ-блок контроллера массива NAND Flash памяти / Сб. трудов «МЭС-2014». Ч. 4 М.: ИППМ РАН. 2014 С. 7-12;
- [2] Micheloni R., Marelli A., Ravasio R. Error Correction Codes for Non-Volatile Memories, 2008, 388 p.
- [3] Micheloni R., Crippa L., Marelli A. Inside NAND Flash Memories, 2010, 582 p.
- [4] URL: http://dsol.ru/projects/plis_n_sbis/sputnik/ (дата обращения: 15.04.2018);
- [5] URL: <https://www.niisi.ru/devel.htm> (дата обращения: 15.04.2018);
- [6] Чумаков А.И. Действие космической радиации на интегральные схемы. М: Радио и связь, 2004. 320 с.

The Experience of Rad-Hard Controller SSD Development for Space Application

A.V. Rutkevich, D.I. Voronkov, I.Y. Sysoev, N.N. Khaylo, A.A. Veykov

Institute Digital Solutions, SPE, LLC, igor@dsol.ru

Abstract — The study deals with implementation of a solid state memory controller. Solid state storage device can be built-up using: a controller and NAND Flash memories. The maximum storage capacity is 256 Gbytes. The maximum data transfer rate is 150 Mbyte/s. The controller has the following set of interfaces: PCI, an asynchronous interface of static random access memory, serial interfaces, an interface of serdes TLK2711-SP. The controller is rad-hard: TID equals 100 krad, SEL threshold is not less than 67,9 MeV×cm²/mg. By the means of a wide range of rad-hard microprocessors supporting an asynchronous interface or PCI can be extended a set of interfaces used on a spacecraft. The asynchronous interface and PCI support data transfer rate up to 60 Mbyte/s. For example, using processor 5023BC016 (“Sputnik”) the system with CCSDS, SpaceWire or MIL-STD-1553 buses can be built-up. The controller implemented in a ceramic dimpled grid array package with 399 pads. There are a lot of topological, schematic and algorithmic methods implemented in the controller to achieve rad-hard tolerance. Topological solutions include using 180 nm standard cell process and guard rings. Circuit methods include SEC-DEC Hamming coding for SRAM, scrubbing, a triple register map, CRC and multiplication for binary program image, an availability for external processor to read program counter and error counter, NAND Flash array reconfiguration (set of using channels and set of using CS signals). Algorithmic solutions include tripling set of command code and command parameters during task

initialization, using a watchdog timer for infinite loop detection, filling an unused instruction area of an unconditional jump into a special function, bad block table. The proposed controller has no functional analogue, as such problems are usually solved with FPGA. Using the application specific integrated circuit allows to reduce overall dimensions, development time, cost, a number of used components and power consumption of a spacecraft.

Keywords — solid state drive, memory controller, controller SSD, NAND Flash, SLC, ONFI, PCI, spacecraft, FTL, components, TLK2711-SP.

REFERENCES

- [1] Rutkevich A.V., Polyakov E.A., Sysoev I.Y. NAND Flash memory controller IP-core / Sb.trudov «MES-2014». CH 4. M.: IPPM RAN. 2004. S. 7-12.
- [2] Micheloni R., Marelli A., Ravasio R. Error Correction Codes for Non-Volatile Memories, 2008, 388 p.
- [3] Micheloni R., Crippa L., Marelli A. Inside NAND Flash Memories, 2010, 582 p.
- [4] URL: http://dsol.ru/projects/plis_n_sbis/sputnik/ (access date: 15.04.2018);
- [5] URL: <https://www.niisi.ru/devel.htm> (access date: 15.04.2018);
- [6] Chumakov A.I. Deystvie cosmicheckoy radiacii na integralnye schemy. M: Radio i svyaz, 2004. 320 p.