Применение модуля MicroPC в аппаратуре АВС-Ф на борту спутника «КОРОНАС-Ф»

Александр Гляненко, Андрей Архангельский

В статье приводится описание контроллера системы, выполненного на основе процессорной платы Octagon Systems 4020 для эксперимента по амплитудно-временной спектрометрии Солнца на борту спутника «КОРОНАС-Ф». Особое внимание уделено особенностям реализации контроллера, направленным на повышение надёжности его функционирования в составе бортового комплекса космического аппарата. Дано краткое описание эксперимента и полученных результатов.

Введение

Эксперимент АВС-Ф (Амплитудно-временная спектрометрия Солнца) предназначен для изучения характеристик потоков жёсткого рентгеновского и гамма-излучения от Солнца, солнечных вспышек, а также поиска и регистрации событий типа гамма-всплесков (нестационарных потоков космического гамма-излучения — НПКГИ). Эксперимент проводится в рамках международной программы «КОРОНАС» («Комплексные орбитальные наблюдения активного Солнца») на специализированной автоматической космической станции «КОРОНАС-Ф», являясь продолжением эксперимента АВС на борту спутника «КОРОНАС-И».

Аппаратура АВС-Ф [1], [2] обеспечивает решение следующих задач:

- выделение событий типа солнечной вспышки или гамма-всплесков;
- регистрация спектральных характеристик рентгеновского и гамма-излучения Солнца;
- определение минимального времени переменности гамма-излучения солнечных вспышек;
- исследование механизмов ускорения и распространения ускоренных во вспышках частиц на основании регистрации линий в спектре гамма-излучения (линий возбуждённых ядер, захвата нейтронов, аннигиляции позитронов);
- исследование временных корреляций гамма-излучения солнечных вспышек с излучением в других диапазонах с высоким временным разрешением;
- изучение фоновых условий.

Информация, получаемая в ходе исследований, должна позволить, помимо решения перечисленных фундаментальных задач, получить новые интересные данные по различным проявлениям солнечно-земных связей и провести поиск эффектов, возможным источником которых является геофизическая активность:

- высыпаний частиц из радиационных поясов;
- событий — возможных предвестников землетрясений;
- рентгеновских и гамма-вспышек земного происхождения и т.д.

Прибор АВС-Ф

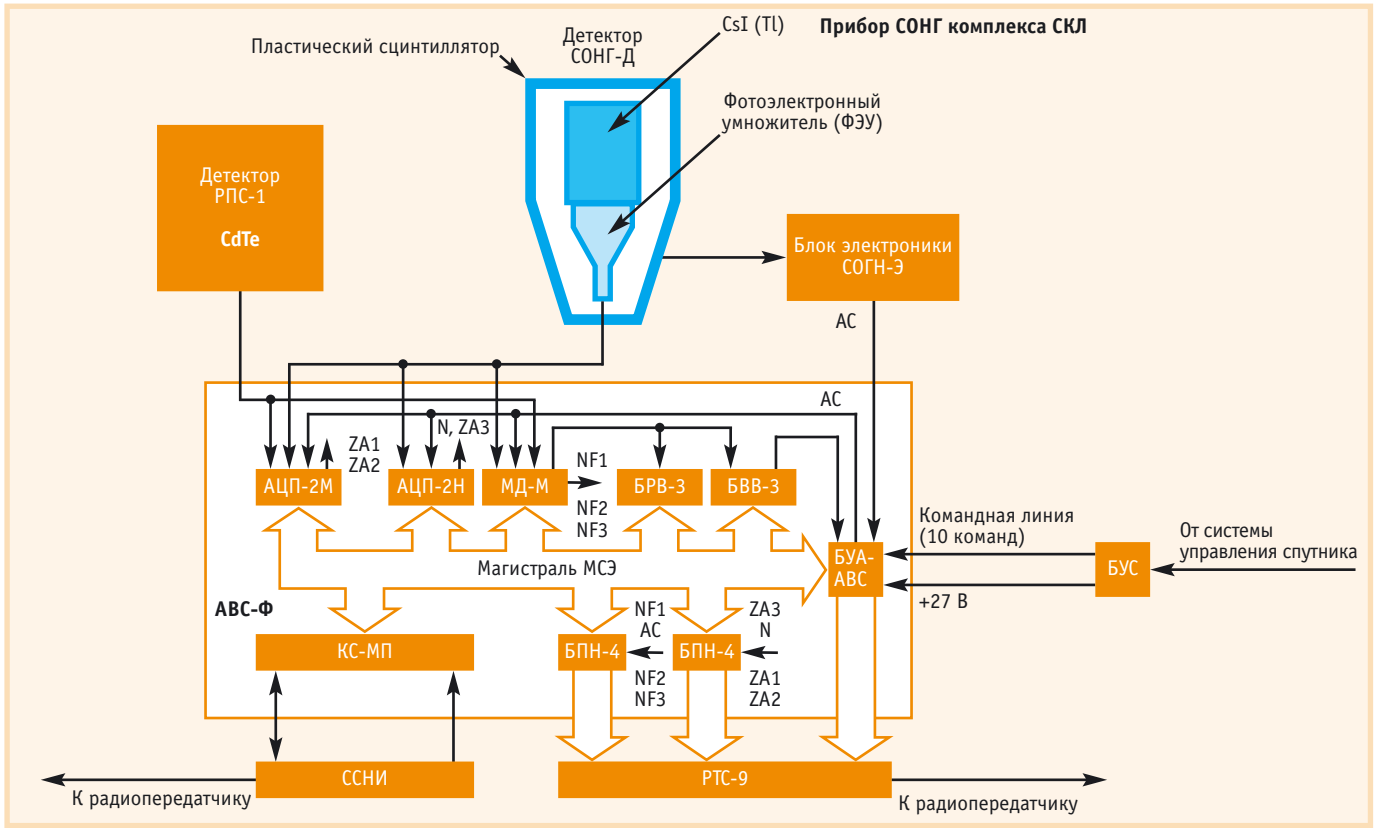
Прибор АВС-Ф разработан и изготовлен на основе конструктива модульной системы электроники (МСЭ) для астрофизических исследований [2] и включает в себя унифицированный каркас (крейт) с источниками питания и набор электронных модулей различного назначения, устанавливаемых в крейт. Общая функциональная схема прибора АВС-Ф приведена на рис. 1. Его габаритные размеры не превышают 275×400×190 мм без учёта зон подключения разъёмов и выступающих реле. Масса прибора не превышает 8,6 кг, потребляемая мощность – 17 Вт.

Вывод получаемой в ходе эксперимента информации осуществляется в различные телеметрические системы:

- в циклическую телеметрическую систему (РТС-9);
- в специализированную систему телеметрии ССНИ [3] (квота — 24 Мбит, число опросов — до 4 в секунду).

РТС-9 имеет 9 цифровых каналов по 8 бит для передачи данных о величинах потоков излучений в различных энергетических диапазонах прибора, периодичность считывания данных составляет 2,5 с. Выходная информация формируется в блоках БПН-4 на основе данных от неперегружающихся цифровых интенсиметров с использованием потоков данных от дискриминаторов, находящихся в блоках амплитудно-цифрового преобразования (АЦП-2М и АЦП-2Н) и модуле дискриминаторов МД-М. Интенсиметры имеют в своей основе счётчики, которые не могут переполниться по принципу своего действия: в телеметрическую систему выводится либо накопленное за интервал измерений число зарегистрированных импульсов, либо время, за которое придёт фиксированное количество импульсов. Кроме того, РТС-9 получает от 4 аналоговых датчиков различные контрольные дан-

© 2004, СТА Тел.: (095) 234-0635 Факс: (095) 232-1653 http://www.cta.ru



Условные обозначения:
МСЭ — модульная система электроники;
РТС-9 — циклическая телеметрическая система;
ССНИ — специализированная система телеметрии;
БУС — система управления научной аппаратурой;
БВВ-3 — блок выделения вспышки;
БРВ-3 — блок регистрации вспышки;
АЦП-2М, АЦП-2Н — амплитудно-цифровые преобразователи;
БУА-АВС — блок управления аппаратурой;
КС-МП — контроллер системы;
БПН-4 — блок патрульных наблюдений (интенсиметры);
МД-М — модуль дискриминаторов;
АС — сигнал запрета при прохождении заряженной частицы;
N, NF1-3, ZA1-3 — импульсные сигналы, несущие информацию об энергии и типе зарегистрированной частицы.

Рис. 1. Функциональная схема прибора АВС-Ф

ные, характеризующие работу источников питания прибора.

Для управления режимами работы прибора АВС-Ф используются 10 команд, поступающих от системы управления научной аппаратурой БУС. Приём и отработка управляющих воздействий в приборе осуществляется блоком управления аппаратурой БУА-АВС.

Как и в эксперименте АВС проекта «КОРОНАС-И», аппаратура АВС-Ф предназначена для работы с комплексом СКЛ («Солнечные космические лучи»), созданным НИИЯФ МГУ. Детектор СОНГ-Д на основе CsI(Tl) имеет размеры ∅200×100 мм, он помещён под активную антисовпадательную защиту из пластического сцинтиллятора. Принципиально новым, по сравнению с экспериментом АВС на борту «КОРОНАС-И», является использование второго детектора — рентгеновского полупроводникового спектрометра РПС-1. В спектрометре РПС-1 используется нетрадиционный полупроводниковый детектор (ППД) из теллурида кадмия (CdTe). ППД из такого материала для получения достаточно высокого энергетического разрешения не требует глубокого охлаждения (только до температуры порядка −30°C), работает при небольших значениях напряжения питания, обладает высокой эффективностью регистрации и радиационной стойкостью, а также многими другими достоинствами. На наш взгляд, данный детектор предпочтительно выбрать для применения в патрульных наблюдениях за активностью Солнца в рентгеновском диапазоне 3...30 кэВ. С его помощью может быть зарегистрирована в спектре вспышки линия железа 5,9 кэВ, уточнена нижняя граница нетеплового излучения, измерены спектры «предвестников» (слабые возмущения в потоке излучения, предшествующие основной вспышке), которые ранее были обнаружены во временном интервале минуты-сутки. Эксперимент с РПС-1 подготовлен совместно МИФИ и ИКИ РАН. Значения энергетического разрешения ΔE на линии E=5,9 кэВ (Fe^{55}) составляли ΔE=740 эВ при загрузке детектора 1000 Гц и ΔE=950 эВ при загрузке 23 кГц, а на линии E=22,1 кэВ (Cd^{109}) — ΔE=1,21 кэВ при загрузке детектора 1000 Гц.

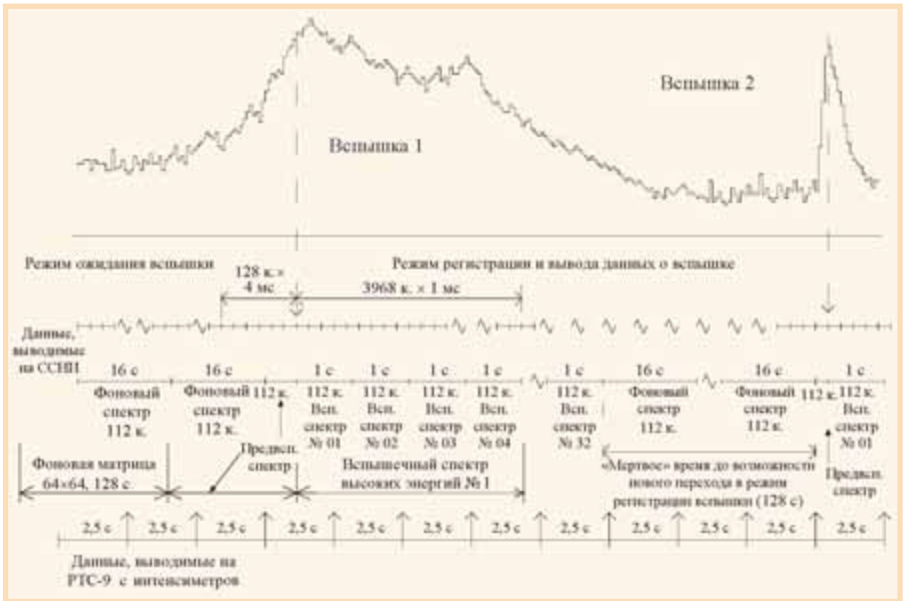
Для решения задач комплексной обработки информации с двух детекторов в трёх энергетических диапазонах (табл. 1) была проведена значительная модификация прибора АВС [4], причём наибольшим изменениям под-

Таблица 1

Энергетические диапазоны потоков жёсткого рентгеновского и гамма-излучения от Солнца и космических гамма-всплесков, регистрируемых аппаратурой АВС-Ф

	Детектор	Тип излучения, его энергия
1	РПС-1БД	Гамма-излучение в диапазоне 0,003…0,03 МэВ
2	СОНГ-Д	Гамма-излучение в диапазоне 0,1…8,0 МэВ
3	СОНГ-Д	Гамма-излучение и нейтроны в диапазоне 2,0…80,0 МэВ

© 2004, СТА Тел.: (095) 234-0635 Факс: (095) 232-1653 http://www.cta.ru



Условные обозначения:
Всп. — вспышечный;
Предвсп. — предвспышечный;
к. — канал.

Рис. 2. Циклограмма сбора и вывода информации прибором АВС-Ф

верглась часть, связанная с получением спектрометрической информации. Для обработки информации по трактам низких энергий (с РПС-1 и СОНГ-Д) используются амплитудно-цифровые преобразователи АЦП-2М с числом каналов 512 (без сжатия). Для обработки данных в диапазоне высоких энергий и разделения нейтронов и гамма-квантов по соотношению компонентов световой вспышки в сформированном детектором электрическом сигнале используются специальные преобразователи АЦП-2Н с числом каналов 256 (до сжатия).

Прибор АВС-Ф имеет два режима работы: фоновый, в котором проводится анализ потоков излучения и поиск событий типа «вспышка», и в случае обнаружения такого события — режим регистрации вспышки. Выделение события типа «вспышка» производится специальным цифровым процессором блока выделения вспышки (БВВ-3). Этот процессор выполняет статистический анализ потоков гамма-излучения в диапазоне 0,1...8,0 МэВ и при выявлении статистически обеспеченного превышения числа квантов в данном временном интервале (критерий 6б) над средним значением числа зарегистрированных гамма-квантов в 128 предыдущих интервалах накопления формирует сигнал, служащий для перевода прибора в режим «вспышка». Базовый временной интервал для БВВ-3 составляет 16 мс. При появлении такого сигнала блоком регистрации вспышек (БРВ-3) производится запись быстрого временного профиля со временем накопления числа гамма-квантов в канале, равном 1 мс, и с длительностью записи 4 с, причём в 128 каналах регистрируется информация, предшествующая появлению сигнала «вспышка». Кроме того, интенсивность рентгеновского и гамма-излучения в различных энергетических диапазонах, а также информация о потоках заряженных частиц выводится через модули интенсиметров на циклическую телеметрическую систему РТС-9. Циклограмма сбора и вывода информации приведена на рис. 2.

Прибор АВС-Ф обеспечивает:

- регистрацию в фоновом режиме энергетических спектров потоков гамма-излучения в диапазонах 3...30 кэВ и 0,1...8,0 МэВ, частота вывода спектра 1 раз в 16 с, число каналов амплитудного анализа (после сжатия) — 114 (32 канала — спектры с прибора РПС-1 и 82 канала — с СОНГ-Д);
- регистрацию в режиме «вспышка» последовательных энергетических спектров в диапазонах 3...30 кэВ и 0,1...80 МэВ, время накопления спектра 1 с, число каналов амплитудного анализа (после сжатия) — 114 (аналогично фоновому режиму), число спектров на одну вспышку – 32;
- регистрацию в режиме «вспышка» последовательных энергетических спектров потоков высокоэнергетического излучения в диапазоне 2,0...80,0 МэВ, время накопления спектра 4 с, число каналов — 114, число спектров на вспышку — 8;
- выявление статистически обоснованного факта резкого роста интенсивности потока гамма-излучения с характерным временем 16 мс и генерацию сигнала «вспышка»;
- регистрацию профилей события типа «вспышка» с временным разрешением около 1 мс по 4096 каналам;
- получение набора последовательных двухмерных энергетических спектров и соотношений компонентов сцинтилляционной вспышки в детекторе с размером матрицы (после сжатия) 64×64 для регистрации потоков гамма-квантов и нейтронов высоких энергий в диапазоне 2,0...80,0 МэВ, время набора 128 с;
- накопление и выдачу в систему циклической телеметрии данных о загрузках детекторов в различных энергетических диапазонах (частота вывода данных – 1 раз в 2,5 с).

Анализ энергетических и временных характеристик по поступающим с детекторов данным, поиск, выделение и регистрация событий типа «вспышка», формирование и вывод массивов информации по мере готовности данных на ССНИ осуществляется подсистемой «Вспышка», в состав которой входит контроллер системы КС-МП.

Электронный блок прибора АВС-Ф на этапе сборки бортовой аппаратуры спутника показан на рис. 3.

Контроллер системы КС-МП

Основными задачами, решаемыми контроллером системы, являются сбор, накопление и первичная обработка информации, формирование выходных массивов данных, привязка информации к бортовому времени и вывод данных в систему сбора научной информации.

В предыдущих экспериментах, проводимых при участии авторов на орбитальной станции «Мир» и спутнике «КОРОНАС-И», а также на высотных аэростатах, в качестве вычислительных ядер контроллеров системы использовались специализированные модули собственной разработки. Их основу составляли микропроцессоры серий 580, 588, 1801, Intel 80C186EC. Несмотря на успешный опыт разработки и эксплуатации этих

© 2004, СТА Тел.: (095) 234-0635 Факс: (095) 232-1653 http://www.cta.ru

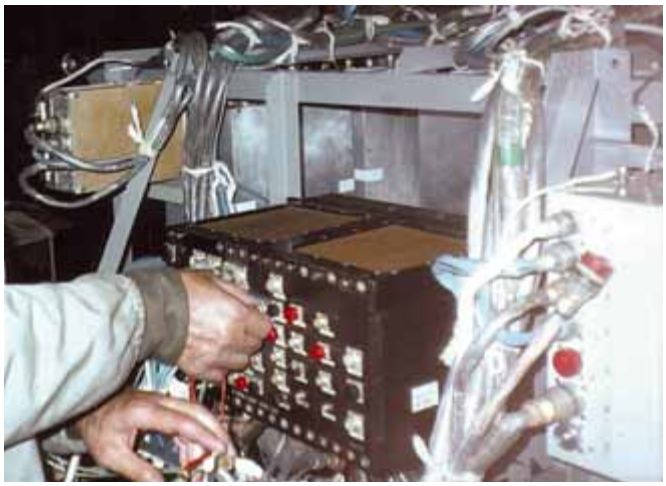


Рис. 3. Электронный блок прибора АВС-Ф на этапе сборки бортовой аппаратуры спутника

Модуль выполнен в виде платы с габаритами 124,46×114,3 мм. Несмотря на такие малые размеры, эта плата фактически является завершённым одноплатным промышленным компьютером, удобным для отладки программного обеспечения, так как на плате предусмотрены дополнительные средства для подключения клавиатуры и

контроллеров в различных экспериментах, все они обладают рядом недостатков:

- индивидуальная разработка плат и программного обеспечения;
- практическое отсутствие готовых ядер операционной системы и, как следствие, необходимость разработки программных средств «с нуля»;
- сложность отладки разработанного программного обеспечения в сменных ППЗУ;
- малая ёмкость ОЗУ и системного ППЗУ.

Значительно возросшие по сравнению с экспериментом АВС на спутнике «КОРОНАС-И» требования к вычислительным возможностям и объёмам оперативного и постоянного запоминающих устройств привели к необходимости использовать в контроллере КС-МП стандартный модуль центрального процессора 4020 фирмы Octagon Systems [5], который находит применение в различных отечественных приборах, в том числе и космического назначения [6], [7].

Основные характеристики этого модуля, выполненного в формате MicroPC, таковы:

- процессор 386SX/25 МГц;
- динамическое ОЗУ 1 Мбайт;
- 3 последовательных порта, в том числе один настраиваемый на работу с интерфейсом RS-485;
- 48 каналов цифрового ввода-вывода;
- 3 твердотельных диска ёмкостью до 1 Мбайт на основе флэш-памяти;
- 8-битовая магистраль ISA;
- сторожевой таймер;
- прошитая в ППЗУ операционная система DOS 6.22;
- оптоизолированные входы сброса и прерываний.

организации с помощью программного обеспечения межмашинного обмена. Стандартная система команд процессоров семейства x86 и встроенная операционная система DOS 6.22 позволяют сильно упростить процесс создания и отладки специализированного программного обеспечения, в том числе с применением языков программирования высокого уровня.

Для использования платы 4020 в составе модульной системы электроники АВС-Ф был разработан специальный модуль, обеспечивающий интерфейс между процессорной платой и магистралью МСЭ, а также реализующий связь вычислительного ядра с телеметрической системой ССНИ. Функциональная схема интерфейса между платой 4020 и магистралью МСЭ приведена на рис. 4. В состав интерфейсной платы входят следующие узлы:

- узел управления МСЭ, состоящий из дешифратора выбора блока и формирователя отклика (подтверждения приёма данных с магистрали МСЭ);
- буфер данных МСЭ, решающий задачу согласования уровней магистрали данных МСЭ и параллельного порта ввода-вывода платы 4020;
- специальный узел приёма признаков состояния и прерываний от МСЭ, который на основе полученной информации формирует запросы на прерывание (IRQ 4, 5, 7, 9) и обеспечивает ввод в плату 4020 сигналов состояния модулей;
- интерфейс с ССНИ, реализующий следующие функции:

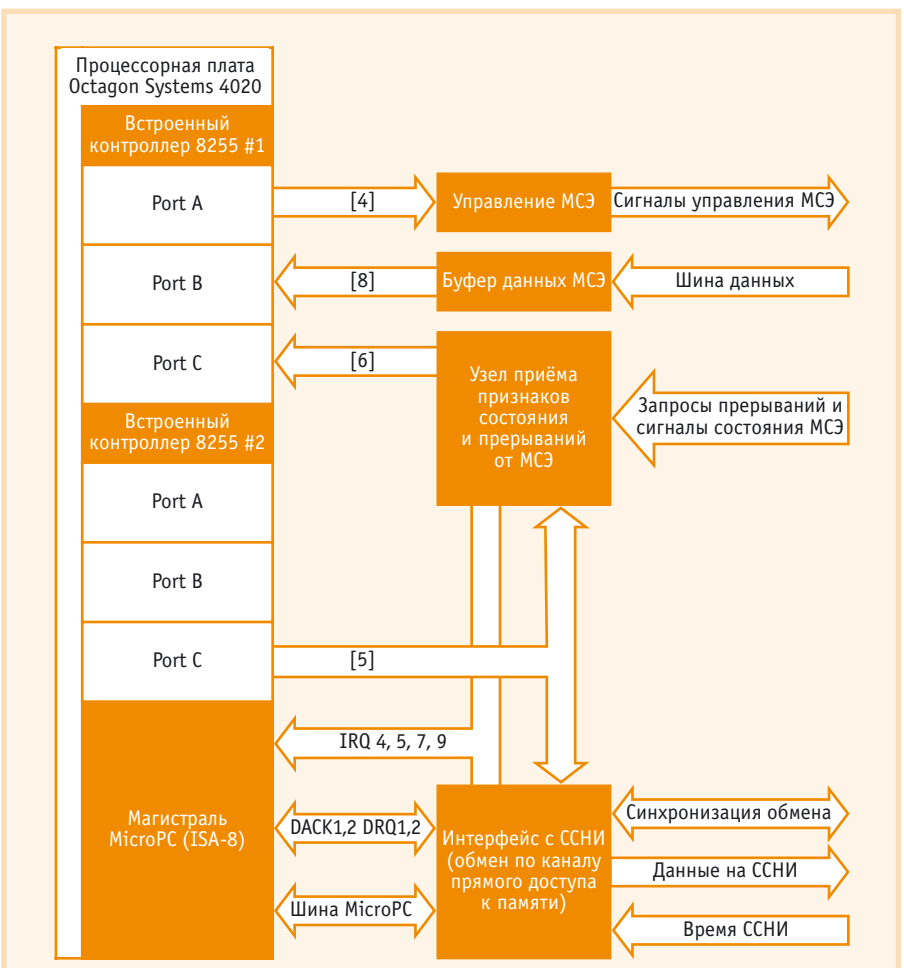


Рис. 4. Функциональная схема интерфейса между процессорной платой 4020 и магистралью МСЭ

© 2004, СТА Тел.: (095) 234-0635 Факс: (095) 232-1653 http://www.cta.ru

- синхронизация обмена информацией между ССНИ и платой 4020 по каналам прямого доступа к памяти и формирование запросов на обмен данными,
- преобразование параллельного кода в последовательный и наоборот для обмена данными между ССНИ и платой 4020, выполнение необходимого согласования уровней и формирование соответствующих типу обмена временных диаграмм,
- формирование сигналов сброса (инициализации) для платы 4020 и модулей МСЭ.

Из приведенной на рис. 4 функциональной схемы интерфейсной платы видно, что управление режимами работы модулей МСЭ, ввод данных и сигналов о состоянии и готовности модулей МСЭ, ввод данных с информационной магистрали крейта МСЭ, а также выдача управляющих сигналов для организации обмена данными с ССНИ производятся через четыре из шести параллельных портов, реализованных посредством соответствующей настройки групп линий дискретного ввода-вывода платы 4020. Собственно обмен информацией с ССНИ (ввод оцифрованной метки времени и вывод массивов накопленной информации) для уменьшения загрузки процессора производится через магистраль ISA с использованием прямого доступа к памяти платы 4020. Чтобы организовать такой обмен, в состав преобразователей кода введены дополнительные регистры для промежуточного хранения информации с целью избежания коллизий во время обмена данными и искажения информации. Эти регистры являются основой безадресного устройства ввода-вывода данных по каналу прямого доступа к памяти. Для синхронизации обмена используются стандартные сигналы DACK1,2 и DRQ1,2 магистрали ISA.

Таким образом, контроллер КС-МП обеспечивает управление модулями МСЭ, считывание и предварительную обработку данных, упаковку их в массивы и передачу в телеметрическую систему ССНИ, а его вычислительной мощности достаточно даже для накопления двухмерных энергетических спектров в случае реализации дополнительных нейтронных измерений при проведении эксперимента АВС-Ф.

Габариты платы 4020 и способ её подключения соответствуют спецификации системы МСЭ. Эта плата устанавливается и крепится «этажеркой» на плате контроллера КС-МП, образуя единый модуль в крейте МСЭ. Связь платы 4020 с функциональными узлами интерфейсной платы производится с помощью кабелей.



Рис. 5. Технологический образец модуля КС-МП в сборе, с установленной верхней фиксирующей крышкой



Рис. 6. Технологический образец модуля КС-МП в сборе, со снятой верхней фиксирующей крышкой

На рис. 5 и 6 приведены фотографии технологического образца модуля КС-МП в сборе, соответственно с одетой и снятой верхней фиксирующей крышкой.

Для повышения надёжности устройства при эксплуатации в условиях космического пространства [6], [7] и, в первую очередь, для обеспечения его повышенной устойчивости в случае повреждения наиболее радиационночувствительных элементов процессорной платы (микросхем флэш-памяти, используемых для хранения операционной системы, BIOS и программ обслуживания МСЭ, а также микросхем ОЗУ) были приняты следующие меры:

- введено дублирование операционной системы контроллера на дополнительной микросхеме флэш-памяти с переключением загрузочной микросхемы по команде с Земли;
- введено 12-кратное дублирование программы обслуживания МСЭ на каждой микросхеме флэш-памяти (SSD0 и SSD1) с проверкой целостности загружаемой программы и последовательным перебором её копий до выполнения условия совпадения контрольной суммы загружаемой программы с эталонным значением;
- для предотвращения «зависания» системы используется сторожевой таймер, который автоматически перезагружает систему при отсутствии отклика загруженной программы в течение 0,5 секунды;
- резервируется 10 буферов обмена информацией с ССНИ в ОЗУ, выбираемых случайным образом при каждом перезапуске системы.

Большое внимание уделялось проблемам обеспечения радиационной стойкости аппаратуры. Электронная часть аппаратуры для эксперимента АВС-Ф расположена в гермоотсеке. На рис. 3 видно, что по оси Z над и под крейтом прибора располагается другая научная и служебная аппаратура. Поэтому для увеличения толщины защитного вещества были применены следующие меры: установлены лицевая панель модуля толщиной 3 мм и дополнительная крышка-фиксатор кабелей (рис. 5) непосредственно над платой 4020 толщиной 2 мм. С учётом орбиты КА «КОРОНАС-Ф» оценка верхней предельной дозы за три года активного существования на орбите даёт величину поглощённой дозы не более 500 рад, что намного меньше, чем приведенные в статье [8] результаты экспериментальных исследований по различным компонентам и устройствам. По нашему мнению, намного более опасными, с точки зрения инициации сбоев и отказов аппаратуры, являются эффекты, связанные с большим энерговыделением при прохождении через микросхемы тяжёлых заряженных частиц. Эти эффекты могут приводить к сбоям, «зависаниям» в вычислительной системе или даже повреждению (искажению) информации во флэш-ППЗУ. Поэтому для повышения надёжности и живучести системы мы применили, проведя небольшую доработку платы 4020, дублирование операционной системы контроллера на дополнительной микросхеме флэш-памяти (SSD1)

© 2004, СТА Тел.: (095) 234-0635 Факс: (095) 232-1653 http://www.cta.ru

с переключением загрузочной микросхемы по команде с Земли. На начальном этапе, когда мы постоянно и тщательно контролировали работу контроллера по тестовой информации, в течение 3 месяцев мы выявили 2 случая сбоев и «зависания» системы, выход из которого осуществлялся по сторожевому таймеру. Эти «зависания», видимо, были связаны со сбоями процессора или программного обеспечения в ОЗУ контроллера. Если говорить о работоспособности ППЗУ 29F040 производства AMD, то, судя по номерам загруженных копий прикладного программного обеспечения, фиксируемым в процессе запуска тестовых программ с полной перезагрузкой системы, отказов, приводящих к изменению контрольных сумм программного обеспечения, выявлено до настоящего времени не было.

Последовательность работы аппаратуры определяется программным обеспечением контроллера КС-МП и состоит из следующих режимов: режим начальной инициализации, поиск события типа «вспышка» и накопление фоновых спектров в режиме патрульных наблюдений, при возникновении события типа «вспышка» переход в режим его регистрации, после чего вновь переход на начало данного цикла.

Ядро программы, определяющее логику работы измерительной системы и порядок опроса внешних устройств, реализовано средствами языка Borland Pascal. Программные единицы, обслуживающие прямой доступ к памяти, операции ввода-вывода, обработчики прерываний, а также критичные по времени выполнения участки кода написаны на Turbo Assembler. Блок-схема программы приведена на рис. 7 и 8.

Для повышения надёжности системы исполняемый код программы обслуживания хранится в нескольких копиях на обоих устройствах флэш-памяти платы 4020. На твердотельный диск SSD1 программы записывались с использованием встроенного программатора платы Octagon Systems 4020. Для записи копий программ на BIOS DRIVE использовался внешний программатор, при этом вручную вносились изменения в прошивку BIOS DRIVE: удаление неиспользуемых утилит, добавление программ обслуживания системы и коррекция MBR, DIR и FAT BIOS DRIVE. При запуске программы обслуживания производится проверка её контрольной суммы, и в случае неправильного значения суммы производится последовательный перебор копий программы до достижения положительного результата проверки.

Во время начальной инициализации системы, при включении питания или при выдаче на систему с Земли команды «Сброс», а также при переключении режима работы аппаратуры производится проверка целостности ОЗУ и обоих флэш-ППЗУ, инициализация служебных переменных, а также начальная инициализация внешних устройств. По результатам проверки на Землю передаётся служебный телеметрический кадр, содержащий массив байтов с «бегущей» единицей в разрядах, для контроля работоспособности тракта передачи телеметрической информации. Кадр также включает POST Diagnostic Status Byte, POST Shutdown Code, дополнение до нуля суммы байтов ROM BIOS Octagon Systems 4020, признак ошибки флэш-ППЗУ, признак ошибки ОЗУ, номер загруженной копии программы, число перезагрузок системы с момента запуска и контрольную сумму кадра. Оба флэш-ППЗУ платы 4020 используются и для хранения ряда служебных параметров системы.

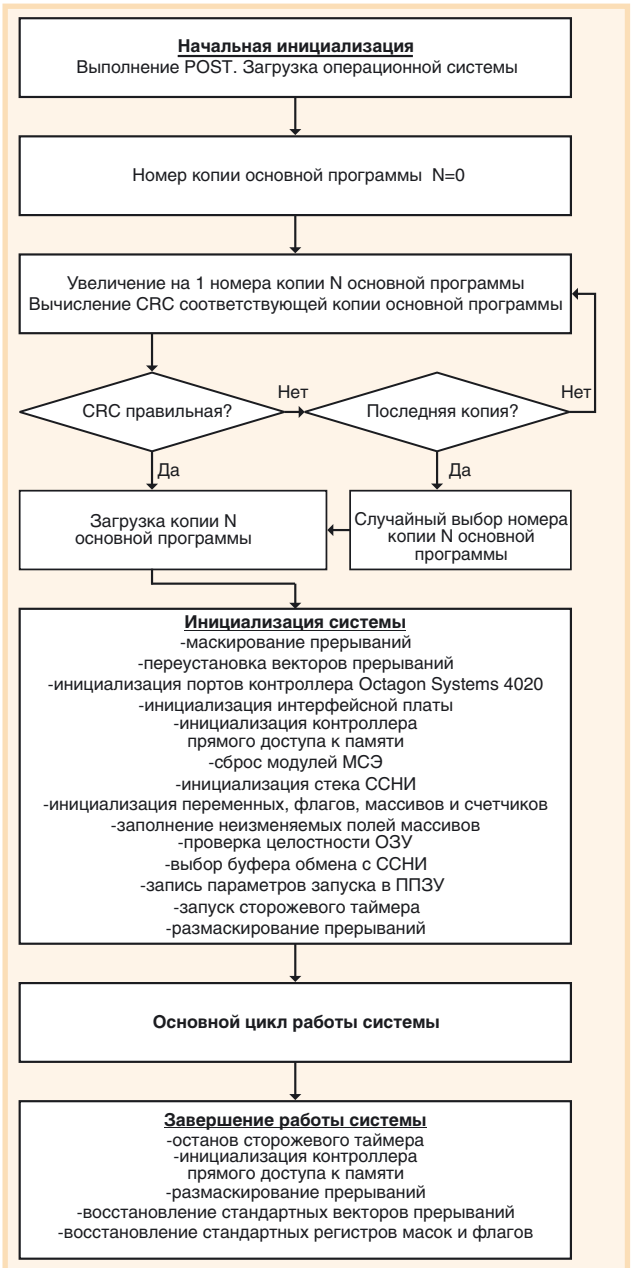


Рис. 7. Блок-схема программы обслуживания контроллера КС-МП

Основной цикл работы системы представляет собой бесконечный цикл опроса ряда флагов, состояние которых изменяется при появлении запросов на обслуживание от внешних устройств, поступающих по линиям IRQ 5-7, а также определяемых состоянием соответствующих разрядов регистра запросов аппаратуры. При поступлении запросов производится в соответствии с их приоритетом приём научной информации от внешних устройств и упаковка информации в телеметрические кадры размером 120 байт. После заполнения телеметрические кадры помещаются в программно организованный в ОЗУ платы 4020 FIFO-стек с динамически изменяемым размером от 0 до 375 кбайт и затем в режиме прямого доступа к памяти передаются в ССНИ по каналу DMA1. Одновременно с этим при инициализации каждого нового цикла опроса внешних устройств контроллер по каналу DMA2 принимает от ССНИ 32-разрядную метку кода бортового времени (КБВ), предназначенную для точной абсолютной временной привязки измерений. Временные диаграммы циклов опроса внешних устройств формируются в обработчике прерываний от системного таймера IRQ 1. В аппаратуре АВС-Ф используются циклы, кратные 0,5, 1, 16 и 900 секундам. Если в течение

© 2004, СТА Тел.: (095) 234-0635 Факс: (095) 232-1653 http://www.cta.ru

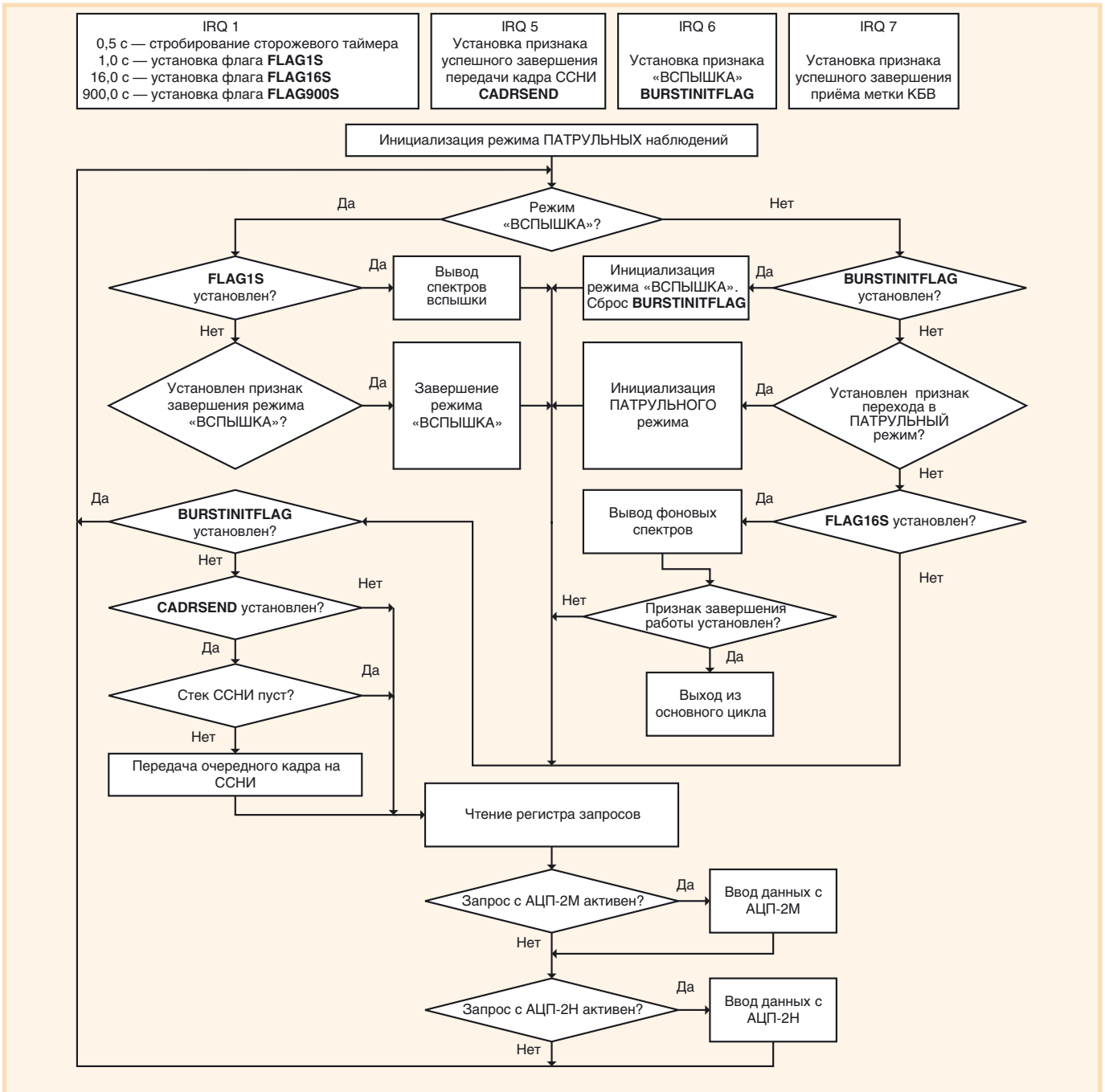


Рис. 8. Блок-схема основного цикла работы системы

900 секунд аппаратура не передает на ССНИ ни одного телеметрического кадра, это расценивается как аварийная ситуация и система автоматически перегружается при помощи сторожевого таймера. Точность формирования циклов ~55 мс, обеспечиваемая стандартными настройками системного таймера, может при необходимости быть улучшена до ~5 мкс путём его перепрограммирования в процессе проведения измерений.

Основные результаты наблюдений

Аппаратура АВС-Ф была запущена в космос в составе спутника «КОРОНАС-Ф» 31 июля 2001 г. Спутник был выведен на почти круговую орбиту с высотой ~500 км и наклонением ~82°. С этого момента прибор АВС-Ф непрерывно функционирует на орбите. За это время проведено около 2300 сеансов связи с общим объёмом информации примерно 8,3 Гбайт, время наблюдений составило около 70×10^6 секунд, причём приблизительно две трети этого времени — вне тени Земли. На рис. 9 приведена фотография КА «КОРОНАС-Ф».

Наибольшей трудностью получения данных о гамма-излучении вспышек являются фоновые условия. Фоновые загрузки детекторов зависят от



Рис. 9. Космический аппарат «КОРОНАС-Ф» и авторы статьи (в центре — А. Гляненко, справа — А. Архангельский)

© 2004, СТА Тел.: (095) 234-0635 Факс: (095) 232-1653 http://www.cta.ru

целого ряда факторов, включающих в себя массу и конфигурацию спутника, параметры орбиты, материал детекторов, их расположение на борту и уровень солнечной активности. Влияние всех этих факторов приводит к тому, что фон в каждом конкретном эксперименте довольно специфичен. Типичный временной профиль по данным аппаратуры АВС-Ф приведён на рис. 10. На рисунке отчетливо видны области радиационных поясов (1), области, где регистрируется тормозное излучение высыпающихся из внешнего радиационного пояса Земли электронов (2), области полярных шапок (3) и область Южно-Атлантической магнитной аномалии (4), при пересечении которой спутником возникают перегрузки электроники прибора (5), обусловленные большими потоками регистрируемых частиц. Наибольший интерес представляют области вблизи экватора (6), в которых условия для регистрации всплесковых событий (солнечных вспышек, гамма-всплесков) наиболее благоприятны.

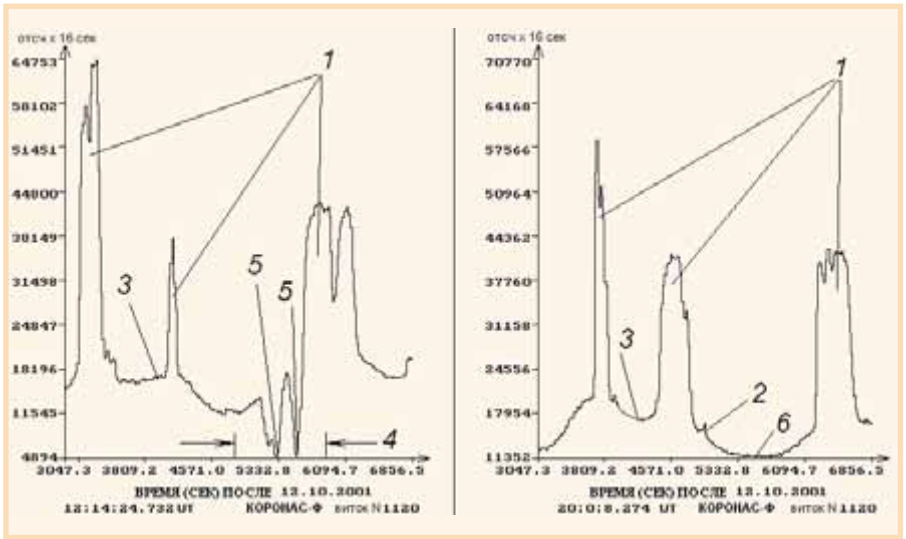
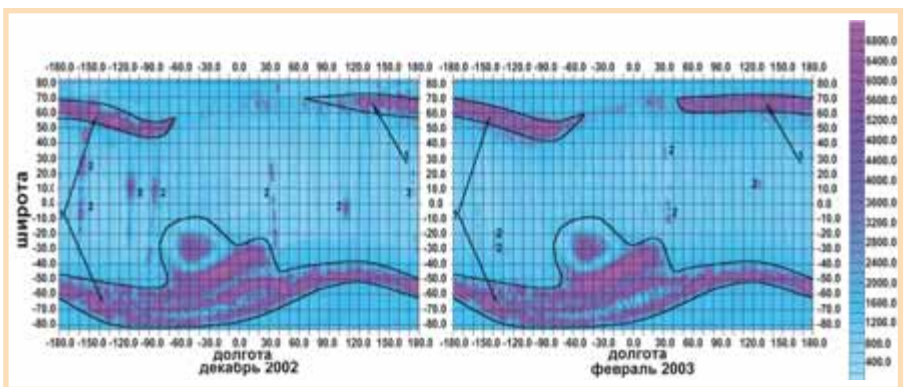


Рис. 10. Типичные примеры временного профиля, полученного по данным аппаратуры АВС-Ф



Условные обозначения:
1 — радиационные пояса и Южно-Атлантическая магнитная аномалия; 2 — области высыпаний.

Рис. 11. Пример карты интенсивности потоков гамма-излучения

Большой интерес представляют измеренные долгоживущие высыпания из радиационных поясов на средних широтах. Примеры таких высыпаний (некоторые учёные связывают их с процессами генерации тропических штормов и тайфунов или оценивают как возможные признаки землетрясений) приведены на картах интенсивности потоков гамма-излучения на рис. 11. Цифрой 1 помечены радиационные пояса и Южно-Атлантическая (Бразильская) магнитная аномалия, цифрой 2 — области высыпаний.

Основная задача эксперимента с прибором АВС-Ф — поиск и регистрация нестационарных потоков космического гамма-излучения и солнечных вспышек. Почти за 3 года непрерывных наблюдений на орбите было зарегистрировано несколько сот событий – предполагаемых солнечных вспышек и космических гамма-всплесков, многие из которых были подтверждены данными других экспериментов и информацией с других космических аппаратов.

Для примера на рис. 12 и 13 приведены энергетические

© 2004, СТА Тел.: (095) 234-0635 Факс: (095) 232-1653 http://www.cta.ru

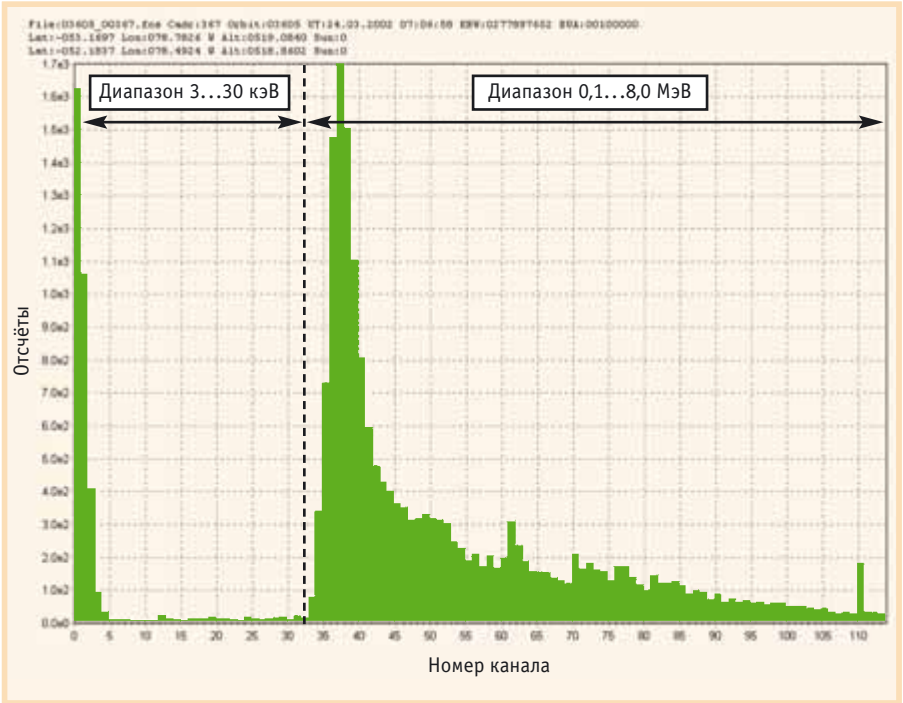


Рис. 12. Исходный фоновый спектр (каналы 1-32 соответствуют диапазону 3...30 кэВ, каналы 33-114 — диапазону 0,1...8,0 МэВ)

спектры регистрируемого излучения (диапазон 0,1...8,0 МэВ) в спокойной обстановке и при регистрации солнечной вспышки 29 октября 2003 года (20:39:07... 20:55:00). Характерная особенность спектра вспышки — наличие линии 2,2 МэВ — совпадает в данных, полученных и аппаратурой АВС-Ф, и спутником HESSI.

На рис. 14 показано двухмерное распределение энергия-соотношение компонентов сцинтилляционной вспышки в спокойной обстановке, а на рис. 15 — временной профиль одного из гамма-всплесков (GRB020214), зарегистрированного аппаратурой АВС-Ф и спутником HETE-2 в трёх энергетических диапазонах: 0,1...11 МэВ (1), 0,41...11 МэВ (2) и 0,563...2,34 МэВ (3).

И, наконец, ещё один пример — данные эксперимента АВС-Ф, которые получены благодаря рекордному для отечественных приборов временному разрешению (1 мс): на рис. 16 показан профиль событий, достоверная интерпретация которого пока вызывает затруднение.

Что дальше?

Успешный опыт работы контроллера, построенного на основе модуля центрального процессора 4020 фирмы Octagon Systems, вселил в нас уверенность в правильности выбранного подхода при создании научной аппаратуры для космических исследований. В следующем крупном проекте по исследованию активного Солнца в рамках международной программы «КОРОНАС» на спутнике «КОРОНАС-ФОТОН» [9], над которым сейчас активно ведётся работа, мы предполагаем также использовать платы Octagon Systems 4020.

© 2004, СТА Тел.: (095) 234-0635 Факс: (095) 232-1653 http://www.cta.ru

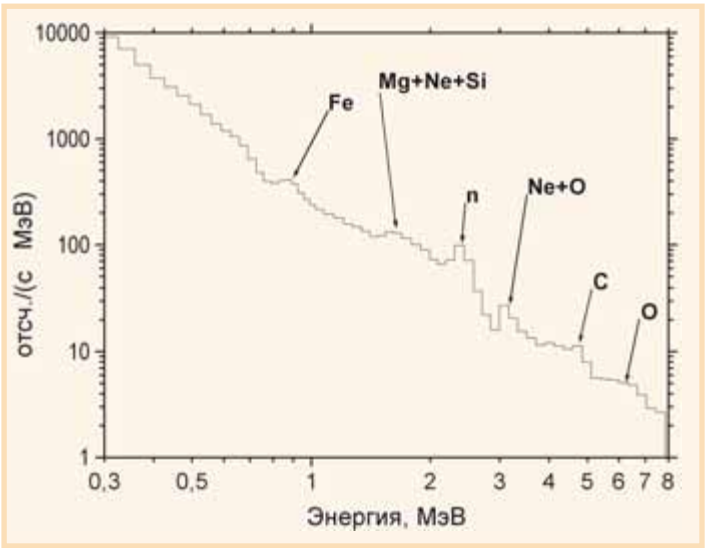


Рис. 13. Суммарный спектр солнечной вспышки 29.10.2003 (20:39:07…20:55:00), полученный по данным аппаратуры АВС-Ф (стрелками показано местоположение линий от возбужденных ядер в спектре вспышки, n — радиационный захват нейтрона)

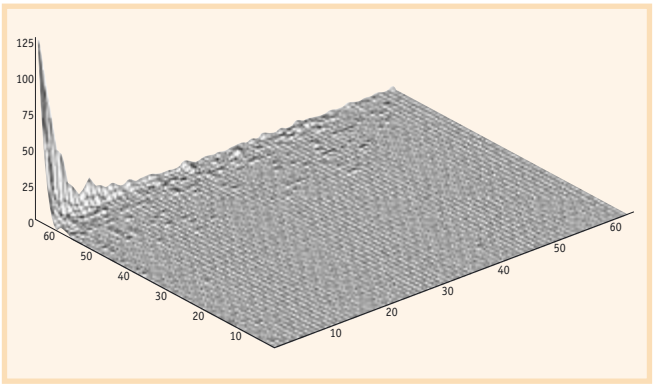


Рис. 14. Двухмерное распределение энергия-соотношение компонентов сцинтилляционной вспышки в спокойной обстановке

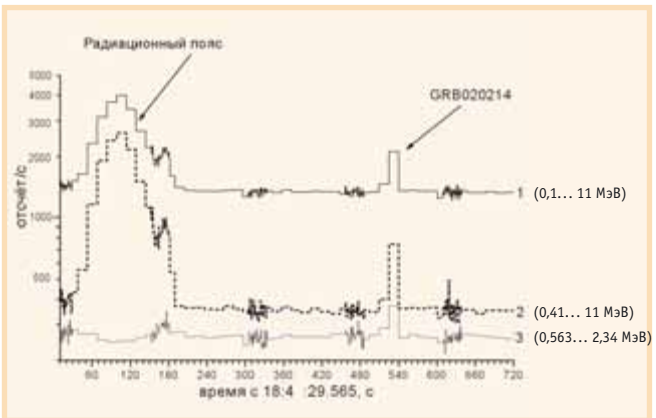


Рис. 15. Временной профиль одного из зарегистрированных гамма-всплесков

Сама модульная система электроники уже претерпела определенные изменения. Сохранены типоразмеры печатных плат модулей, весь механический конструктив, но для повышения скоростей обмена мы пошли по пути модернизации магистрали МСЭ на базе более мощной шины MicroPC (ISA-8) с использованием дополнительного набора управляющих сигналов магистрали последовательного межпроцессорного обмена SPI, а также сигналов управления и состояния аппаратуры. Это соответствует изменившейся концеп-

© 2004, СТА Тел.: (095) 234-0635 Факс: (095) 232-1653 http://www.cta.ru

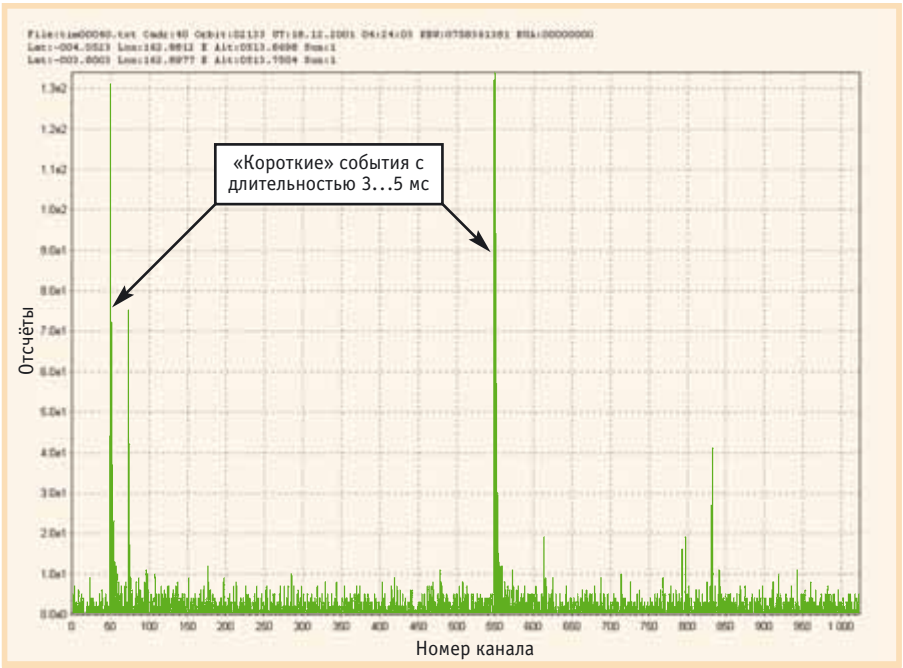


Рис. 16. Регистрация «коротких» событий

ции модулей: теперь каждый измерительный модуль становится узлом, работающим в качестве специализированного периферийного контроллера магистрали MicroPC. Для подключения к магистрали МСЭ используются разъёмы СНП260-135, в которых для надёжности контакты попарно объединяются.

Применение ПЛИС позволяет значительно расширить эксплуатационные возможности научной аппаратуры. В качестве ПЛИС для контроллеров и специализированных устройств бортовой аппаратуры выбраны микросхемы семейства 54SX фирмы Actel, отработка технологических образцов проводится на ПЛИС фирмы Altera, допускающих многократное перепрограммирование [10]. Всего в проекте «КОРОНАС-ФОТОН», в приборах, разрабатываемых МИФИ, будет использоваться 9 контроллеров на базе плат Octagon Systems 4020, причем 7 из них будут объединены в локальную сеть по интерфейсу RS-485. На рис. 17 представлены фотографии технологического образца контроллера для проекта «КОРОНАС-ФОТОН».



Рис. 17. Технологический образец контроллера для проекта «КОРОНАС-ФОТОН»

При реализации новых контроллеров будут использованы все технологические и программные решения, хорошо себя зарекомендовавшие в эксперименте АВС-Ф на борту КА «КОРОНАС-Ф».

Заключение

В заключение можно отметить, что успешный опыт работы контроллера системы, выполненного на основе процессорной платы 4020 фирмы Octagon Systems, в составе бортовой космической аппаратуры в течение почти 3 лет (к моменту написании данной статьи) убедил нас в высоких эксплуатационных характеристиках этой платы. Альтернативы применению этого изделия в следующем проекте «КОРОНАС-ФОТОН» мы пока не видим. ●

Литература

1. Боговалов С.В., Гляненко А.С., Григорьев А.И. и др. Перспективы исследования быстропеременного рентгеновского и гамма-излучения Солнца в экспериментах «КОРОНАС»// Комплексное исследование Солнца и солнечно-земных связей: Сб. ст. — Л.: ЛФТИ, 1989. — С. 130-159.
2. Гляненко А.С., Григорьев А.И., Курочкин А.В. и др. Модульная система ядерно-физической электроники для астрофизических исследований// Материалы XII Международного симпозиума по ядерной электронике. — Дубна: ОИЯИ, 1985. — С. 405-407.
3. Stepanov A.I., Klepikov V.Yu., Oraevsky V.N. et al.// CORONAS information, Astrophysical Institute, Potsdam, Germany. — 1994. — № 10.
4. Архангельский А.И., Гляненко А.С., Котов Ю.Д. и др. Эксперимент АВС-Ф по регистрации быстропеременных потоков космического и солнечного гамма-излучения в проекте КОРОНАС-Ф// Приборы и техника эксперимента. — 1999. — № 5. — С. 16-24.
5. Каталог продукции Octagon Systems. — М., 1998.
6. Гобчанский О.П. Применение MicroPC в вычислительных комплексах специального назначения// Современные технологии автоматизации. — 1997. — № 1. — С. 38-41.
7. Гобчанский О.П. Унифицированные средства бортовых вычислительных комплексов космических аппаратов// Современные технологии автоматизации. — 1998. — № 1. — С. 72-76.
8. Гобчанский О.П., Попов В.Д., Николаев Ю.М. Повышение радиационной стойкости индустриальных средств автоматики в составе бортовой аппаратуры// Современные технологии автоматизации. — 2001. — № 4. — С. 36-40.
9. Котов Ю.Д., Юров В.Н., Никольский С.И., Залюбовский И.И. Основные научные задачи спутникового проекта «ФОТОН» по изучению солнечных вспышек// Известия Академии наук: Серия физическая. — 1997. — Т. 61. — № 6. — С. 1162-1168.
10. Гляненко А.С., Фирсанов А.Е. Разработка периферийных устройств на базе ПЛИС фирм Altera и Actel для микропроцессорных контроллеров научных приборов проекта «КОРОНАС-ФОТОН»// Научная сессия МИФИ-2004: Сб. ст. — М.: МИФИ, 2004. — Т. 7. — С. 49-50.

Авторы — сотрудники Института астрофизики МИФИ
Телефон/факс: (095) 323-9250/9249

© 2004, СТА Тел.: (095) 234-0635 Факс: (095) 232-1653 http://www.cta.ru