

Унифицированные средства бортовых вычислительных комплексов космических аппаратов

Олег Гобчанский

В предлагаемой статье приводится описание унифицированных средств для бортовых вычислительных комплексов космических аппаратов (КА) — отказоустойчивого бортового компьютера и встраиваемого периферийного контроллера. Приводятся результаты практической работы, представляющие интерес для разработчиков бортовой аппаратуры.

Разработка первой специализированной вычислительной системы [1] с использованием MicroPC заняла три года (при традиционно недостаточном финансировании). За это время проведены предварительные испытания плат MicroPC, прошла первая поставка плат по специальным требованиям, оформлен сертификат на их применение, разработаны комплект конструкторской документации, системное и целевое программное обеспечение (ПО), изготовлены отработочные и лётный комплекты бортовой системы, завершается комплекс отработочных испытаний согласно требованиям ГОСТов.

Такой срок для последующих разработок явно велик. В связи с этим в РНИИ КП начата работа по созданию унифицированных средств бортовых вычислительных комплексов (УС БВК) на базе процессоров MicroPC и аппаратно-программных средств собственной разработки. По окончании этой работы последующие целевые применения потребуют значительно меньше времени и средств.

Архитектура

Концепция УС БВК основана на следующих основных принципах и средствах:

- распределённый вычислительный комплекс с резервированными аппаратными средствами;
- отказоустойчивый бортовой компьютер (ОБК) на основе MicroPC;
- встраиваемый в системы контроллер (ВК) на основе СБИС-микроконтроллера;
- объединение систем через локально-вычислительную сеть на базе интерфейса RS-485;
- синхронизация работы компьютера (ОБК) и встроенных контроллеров систем (ВК) в рамках единого временного цикла;
- прямое подключение оборудования систем к ВК через байт-канал;
- индивидуальная защита от факторов космического пространства для ОБК и радиационно стойкие комплектующие для ВК;
- автоматическое восстановление вычислений после сбоев;
- системное программное обеспечение (ПО), модифицированное для бортового применения;
- единая технология разработки целевого ПО, построения отладочного комплекса и испытательной аппаратуры.

Архитектура компоновки бортовой аппаратуры с использованием предла-



(C) 1998 СТА Тел.: (095) 234-0635 Факс: (095) 330-3650 http://www.cta.ru

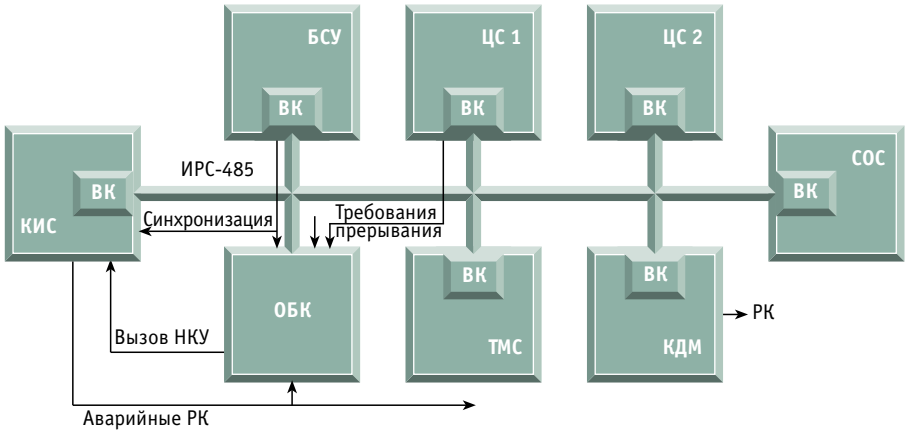

Рис. 1. Пример использования ОБК и ВК в составе бортового вычислительного комплекса КА
КИС — командно-измерительная система;
ТМС — телеметрическая система;
КДМ — дополнительная командно-диагностическая матрица;
СОС — система орбитальной стабилизации;
ЦС1,ЦС2 — целевые системы;
БСУ — бортовое синхронизирующее устройство;
НКУ — наземный комплекс управления;
РК — разовые команды.

гаемых средств приведена на рис. 1. Унификация архитектуры и интерфейсов вычислительных средств открывает возможность унификации других компонентов бортовой аппаратуры и прежде всего ОБК. Доступ к ОБК обеспечивается только через системный интерфейс. Исключение составляют каналы синхронизации (бортового времени) и каналы требования прерывания. Похожая концепция используется, в частности, фирмой Lockheed Martin Astro Space «для разработки геостационарных спутников сегодняшнего дня и 21 столетия» [1] и предлагается в ряде отечественных разработок. Однако все они используют последовательный канал по MIL-STD 1553 (ГОСТ 26765.52-87).

Отказоустойчивый бортовой компьютер

Отказоустойчивый бортовой компьютер (рис. 2) компонуется из трёх одинаковых комплектов, объединённых внутренней кабельной сетью, использующей каналы LPT. Комплект состоит из процессорной платы, системного узла и узла питания. В структуре ОБК может применяться большинство выпускаемых плат MicroPC в зависимости от требуемых ресурсов.

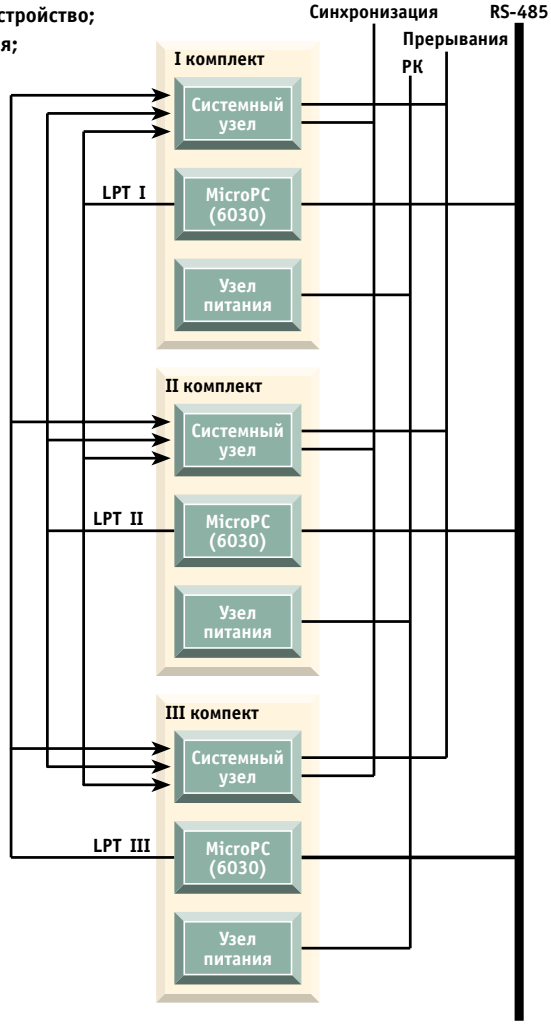

Рис. 2. Структурная схема отказоустойчивого бортового компьютера (ОБК)

Системный узел включает:
- мультиплексор каналов LPT для обеспечения обмена между комплектами;
- устройство поддержки отказоустойчивости;
- мультиплексор требований прерывания;
- устройство приёма/выдачи сигналов системной синхронизации;
- формирователь признака «Вызов НКУ».

Узел питания включает:
- модули питания фирмы Interpoint;
- фильтры и устройство защиты от короткого замыкания в нагрузке;
- телеметрические датчики (питание, норма).

Комплекты, как правило, выполняют одинаковую программу, синхронизируемую по внешнему синхросигналу, однако выдавать информацию в сеть абонентам может только один из комплектов — ведущий, в то время как формирователи остальных комплектов блокируются аппаратно. Ведущий комплект назначается системным ПО в зависимости от состояния всех комплектов по результатам
- самотестирования;
- взаимного тестирования;
- обработки текущей информации;
- сохранности информации в ЗУ;
- оценки другими комплектами выдаваемой ведущим информации при «подслушивании»;
- сравнения информации, принятой разными комплектами;
- повторного просчёта или просчёта по другой программе.

Специальная системная программа в каждом комплекте на основании анализа перечисленной информации формирует своё слово состояния ОБК в целом и выдаёт его на устройство поддержки отказоустойчивости каждого комплекта. Устройство на основании предложений, полученных от комплектов, вырабатывает на аппаратной логике признак «ведущий» для одного комплекта. Алгоритм назначения ведущего отрабатывается при внесении отказов в аппаратуру и ПО комплектов и «прошивается» в ПЗУ системного узла.

В случае, если в процессе дальнейшей работы у ведущего комплекта зафиксирован сбой или отказ, системные узлы блокируют его выходы, ведущим комплектом становится другой и продолжается работа. Для отказавшего комплекта начинает выполняться программа реабилитации: восстановление хода вычислений, восстановление искажений в системных или целевых программах, перезагрузка программ со своих или чужих дисков. После восстановления он может быть назначен ведущим, например при очередном сбое в другом комплекте. В случае если сбой привел к возникновению тиристорного пробоя, схема защиты узла питания отключает

(C) 1998 СТА Тел.: (095) 234-0635 Факс: (095) 330-3650 http://www.cta.ru

питание на несколько секунд, после чего идёт процесс восстановления. Такие ситуации, в частности, являются весьма распространёнными при воздействии радиационного излучения космического пространства.

В случае нескольких отказов (или ошибок в ПО), приведших к невозможности назначения одного ведущего, аппаратно формируется сигнал «Вызов НКУ», передаваемый через обратный канал КИС на Землю. В этом случае назначение ведущего проводится принудительно по радиокомандам с наземного комплекса управления (НКУ) через аппаратуру КИС. По командам с Земли может быть также отключено питание любого комплекта ОБК.

В БВК применяются дублированные каналы для обмена с внешними системами по сети ИРС-485 (RS-485 со специальным протоколом). Каждый комплект может принимать информацию с обоих каналов. Выдачу информации, включая адрес, проводит только ведущий. При этом через входы остальных комплектов реализуется режим подслушивания для оценки её достоверности.

Необходимо заметить, что применение интерфейса RS-485 сокращает в 1,5-2 раза габаритно-массовые характеристики и потребление бортового компьютера.

Системное ПО ОБК включает

- операционную систему PTS DOS ROM, разработанную ТОО «Физтех-Софт» по заказу АО НПП «Система» специально для бортового применения MicroPC;
- многозадачный монитор реального времени, оптимизированный для работы в жестком цикле;
- монитор отказоустойчивости, обеспечивающий «прозрачность» работы программиста-пользователя в многопроцессорной структуре БК;
- программы поддержки сети ИРС-485;
- фоновые и технологические тесты.

Технология разработки и отладки ПО определяется совместимостью архитектуры ОБК с ПЭВМ. Загрузка ПО и отладка проводится через RS-232 или сеть ИРС-485 с использованием стандартных средств отладки. В ОБК предусмотрена перезагрузка ПО на орбите через радиоканал. Для резидентной отладки предусматривается имитационный стенд, поддерживающий обмен через ИРС-485 и внутренний программируемый интерфейс, выполненный на базе унифицированных средств распределенных вычислительных комплексов (УС РВК), также широко использующих модули MicroPC. Этот же имитационный стенд может быть доработан для использования в качестве контрольно-проверочного стенда целевой аппаратуры.

Конструктив ОБК обеспечивает механическую прочность и совместимость плат MicroPC и плат собственной разработки. MicroPC и печатные платы с узлами собственной разработки устанавливаются в металлические рамки, обеспечивающие механическую жесткость и защиту от радиации. Рамки от трёх комплектов объединяются в одну конструкцию, закрываются крышкой и устанавливаются на амортизаторы. Занимаемый объём — около 3 дм^3, масса от 2 до 5 кг в зависимости от требований радиационной защиты.



Встраиваемый контроллер

Встраиваемый контроллер (рис. 3), в отличие от ОБК, не имеет развитой аппаратной поддержки отказоустойчивости. Встраиваемый контроллер (ВК) устанавливается в соответствующий полукомплект абонента, имеющего «холодный резерв». Выбор полукомплекта обеспечивается коммутацией питания через командную матрицу. Каждый полукомплект имеет связь с двумя каналами ИРС-485 и байт-канал (внутренний программируемый интерфейс ВПИ) для подключения к приборам системы. Синхронизация работы ВК-абонентов обеспечивается внешним синхросигналом частотой 0,05-1Гц от бортового синхронизующего устройства, а при его отсутствии по сети ИРС-485.

Вычислительные возможности ВК ориентированы на непосредственное управление абонентом и рутинную первичную обработку (микроконтроллер 80C32E, статическое ОЗУ и ПЗУ по 32 кбайт). Применение ВК решает проблему согласования с системами и разгружает ОБК от программ жесткого реального времени. В ВК применяются комплектующие, устойчивые к воздействию космической радиации. Программа записывается в ПЗУ в заводских условиях.

Внутренний программируемый интерфейс ВПИ предназначается для непосредственного обмена ВК с полукомплектами целевой аппаратуры. Скорость обмена — до 50 кбайт в секунду. Состав сигналов: адрес — 5; данные чтения — 8; данные записи — 8; строб чтения; строб записи; требование прерывания. Электрические параметры интерфейса соответствуют КМОП-сигналам.

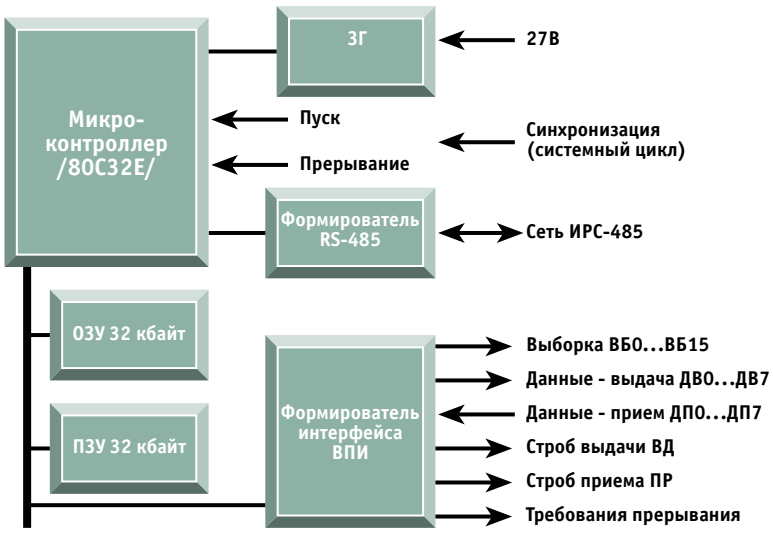

Рис. 3. Структурная схема встраиваемого периферийного контроллера

(C) 1998 СТА Тел.: (095) 234-0635 Факс: (095) 330-3650 http://www.cta.ru

Системное ПО ВК включает только многозадачный монитор, программу межпроцессорного обмена через канал RS-232, программы поддержки сети, интерфейса ВПИ и тесты.

Сеть ИРС-485

ИРС-485 определяет жесткий сетевой протокол для RS-485. Протокол предусматривает наличие в сети одного постоянного ведущего, (ВК КИС, или ОКБ), который назначается по командам с НКУ. Ведущий регулярно с заданным периодом (10-100 мс) передает по сети специальные сообщения-анонсы. После каждого анонса разрешается двухсторонний обмен с одним адресуемым абонентом (или передача сообщения для всех). Выдача проводится одновременно по основному и дублирующему каналам. Любое сообщение в сети может подслушиваться любым абонентом. Передаваемое сообщение защищается контрольной суммой и квитируется адресуемым абонентом. Скорость при обмене — 115 или 230 кбод — определяется возможностями MicroPC.

Используя предложенную концепцию унификации, РНИИ КП в настоящее время проводит проектирование БВК для нескольких перспективных КА.

Замечания по применению MicroPC

Полученные автором отклики на статью [2] показали, что сейчас в России и на Украине многие разработчики рассматривают возможность применения MicroPC в аппаратуре летательных и космических аппаратов. При взаимном обмене информацией оказалось, что существует много общих организационных и технических проблем. Далее приводятся ответы на наиболее актуальные вопросы применения.

Сертификат на применение. В настоящее время фирма Octagon Systems поставила в РНИИ КП первую партию узлов MicroPC (платы 6024, 5600, кабели), изготовленных в соответствии с «Частными техническими требованиями 201-98», согласованными между РНИИ КП и фирмой. ЧТТ предусматривают специальную технологию изготовления, комплектации и тестирования. При изготовлении используются комплектующие элементы только определенных поставщиков. Платы полностью комплектуются микросхемами ЗУ, применяются улучшенные колодки под



микросхемы (MIL-STD). Проверка функционирования проводится в нормальных условиях, при предельных температурах, при повышении температуры от минимальной к максимальной. Одновременно платы подвергаются низкочастотной вибрации, замеряется ток потребления при подаче сигнала Reset и при выполнении теста. Весь технологический цикл изготовления проводится под специальным контролем. Узлы поставляются с паспортом, гарантия 5 лет.

На основании проведенных дополнительных испытаний Научный центр сертификации элементов и оборудования при РНИИ КП оформил Сертификат Российского космического агентства по применению узлов MicroPC в бортовой аппаратуре КА. Сертификатом оговаривается порядок применения, в том числе диагностического входного контроля, проверок и испытаний в составе аппаратуры. Проводятся испытания на подтверждение срока активного существования 5-10 лет.

Поставки по ЧТТ по согласованию с фирмой проводятся только через ЗАО НПП «Система» (дилерское представительство РНИИ КП). При этом проводится входной контроль, включающий проверку по специальной методике и термотренировку, после чего выдаётся соответствующий паспорт.

Доработка плат проводится в РНИИ КП в следующем объёме: замена микросхемы с «прошитым» BIOS/PTS DOS ROM (флэш — 28F020, в дальнейшем масочное ПЗУ), распайка перемычек вместо джамперов, распайка шины при использовании плат расширения, изъятие ЗУ setup.

Номенклатура применяемых плат MicroPC для бортовой аппаратуры, по нашему мнению, должна быть ограничена по показателям надежности и потребления (табл. 1) даже в ущерб запасам по вычислительной мощности. Наиболее перспективной по этим параметрам на сегодняшний день остаётся плата 6024. С увеличением степени интеграции возрастает опасность сбоев и отказов при воздействии радиационных полей космического пространства. По этой причине применение платы 5066 (MTBF — 13,6 лет, потребление — 920мА) не планируется.

Кабели СМА по соглашению с Octagon Systems поставляются в сборе, с паспортом. Крепление обеспечивается при установке платы MicroPC на общую плату, при этом разъём закрепляется по периметру контрящей краской или прижимается к общей плате.

Сравнительная оценка производительности (табл. 2) проводилась с использованием программы Speed.tst

Таблица 1. Платы MicroPC, перспективные для применения в ОБК

№№	Тип платы	MTBF (лет)	Потребление (мА)
1	6024	44,5	230-350
3	4020	19,57	530
4	6030	15	440/175
5	5805	112,5	45
6	PC-FD-16-V	280,0	600/1300

Таблица 2. Сравнительные данные по производительности процессоров MicroPC

Тип	PC-XT	PC-AT 286	PC-AT 386	MicroPC 6024	MicroPC 4020 (5025A)
Тактовая частота (МГц)	4,77	6,0	16,0	12,0	25,0
Относительное быстродействие	1,0	3,4	12,5	3,1	18,8

Таблица 3. Время выполнения отдельных операций

Операция	PC-AT 286	PC-AT 386	MicroPC 6024	MicroPC 4020 (5025A)
Тактовая частота (МГц)	6,0	16,0	12,0	25,0
MOV AX,BX	0,5	0,13	0,7	0,069
ADD AX,BX	0,55	0,13	0,72	0,085
SUB AX,BX	0,57	0,12	0,73	0,10
IMUL BX	2,98	1,07	2,99	0,87
DIV BX	2,35	1,40	1,9	0,61
MOV AX,MEM	2,24	0,52	2,4	0,44
ADD AX,MEM	2,47	0,37	2,6	0,41
SUB AX,MEM	2,48	0,38	2,7	0,43
IMUL MEM	4,61	1,64	5,2	1,46
DIV MEM	4,26	1,78	4,2	1,102

(C) 1998 СТА Тел.: (095) 234-0635 Факс: (095) 330-3650 http://www.cta.ru

(Benchamark program 1/14 Agababyan Robert Association). Проверялось также время выполнения (мкс) по отдельным операциям (табл. 3).

При оценке возможностей ОБК рассматриваемого типа необходимо учитывать время работы программы поддержки отказоустойчивости и затраты на поддержание сети (до 10%).



Резервирование плат и массивов ЗУ на уровне прибора нужно не только для обеспечения необходимой вероятности безотказной работы в течение длительных сроков (5-7лет) активного существования КА, но и для парирования неизбежных сбоев в ОЗУ и флэш-памяти при воздействии радиации.

Радиационная стойкость была проверена при наземных испытаниях [2] и соответствует радиационной стойкости контроллеров, выполненных на отечественной элементной базе и находящихся в эксплуатации на «тяжёлых» орбитах и в дальнем космосе. В 1998-99 годах планируется выполнение специальной программы по оценке эффективности предлагаемых мер защиты во время проведения испытаний на орбите.

Применяемые материалы плат, микросхем и кабелей по результатам проходящих в настоящее время испытаний обеспечивают возможность использования аппаратуры как в термоконтейнере, так и в открытом космосе (по уровню газовыделения и потери массы за время активного существования).

Возможности нарушения поставок, по нашему мнению, мало вероятны. В то же время архитектура БВК, структура и конструкция ОБК позволяют использовать платы других производителей или компьютеры собственной разработки. Кроме того, в АО НПП «Система» создается запас паспортизованных узлов MicroPC для оперативной поставки.

Платы MicroPC требуют деликатного обращения и соблюдения всех правил работы с КМОП-компонентами. Были случаи статического пробоя, тиристорного эффекта, «насасывания» напряжения через RS-232 в процессорных платах, приводившие к невозможности прохождения сигнала Reset.

Недостатки MicroPC в структуре БК обусловлены тем, что эти средства не разрабатывались специально для применения в условиях бортовой аппаратуры КА. В процессорной плате хотелось бы видеть

- максимально высокую надёжность, которая не должна резко ухудшаться с ростом производительности (табл. 1) Это может быть достигнуто, например, за счёт диагностического входного контроля комплектующих перед сборкой;
- подтверждённые техническими условиями развёрнутые эксплуатационные требования;
- радиационно стойкое ПЗУ для хранения системного и части целевого ПО (до 256 кбайт), совместимое с флэш-памятью. Общий объём ЗУ на твёрдых дисках процессорной платы достаточен;
- внешние твёрдые диски на статическом ОЗУ объёмом до 16 Мбайт;
- возможность применения аппаратной поддержки операций с плавающей точкой;
- буфер в последовательном канале до 256 байт при скорости обмена по RS-485 до 0,75-1,0 Мбод;
- возможность технологической прокачки вторичного напряжения питания;
- исключение «лишних» узлов (батарей, клавиатуры, порта спикера) и за счёт этого размещение системного узла поддержки отказоустойчивости.

Возможно, какую-то часть пожеланий такого рода можно было бы согласовать с руководством фирмы, если бы отечественные пользователи выставили согласованные требования и обеспечили достаточный уровень продаж для фирмы.

Сеть на основе интерфейса RS-485 имеет следующие преимущества по отношению к МКО по ГОСТ 26765.52-87:

- RS-485 (RS-232) поддерживается практически всеми средствами широкого применения и встраивается в СБИС микроконтроллеров;
- встраиваемые контроллеры не только реализуют сетевой протокол и обеспечивают буферизацию, но и выполняют функции управления и первичной обработки в системе;
- снимают жесткие требования реального времени с высокопроизводительной машины БВК;
- повышают живучесть БВК за счёт распределённой обработки.

Недостаток сети на RS-485 при использовании MicroPC — более низкая скорость передачи — компенсируется наличием дополнительной обработки в ВК и, по нашим сведениям, в последних разработках будет увеличена. Однако, учитывая ориентацию ряда потребителей на использование разработанных средств, имеющих МКО, в некоторых проектах мы рассматривали использование в составе ОБК отечественных модулей фирмы «Элкус», выполненных в стандарте MicroPC (TXIMP) или введение в состав БВК преобразователя RS-485 — МКО.

Применение MicroPC в составе аппаратуры КА без средств обеспечения отказоустойчивости предусматривающих горячее резервирование, восстановление ОЗУ, флэш-памяти, защиту от тиристорного пробоя и т. п., по нашему мнению, приведёт к печальным результатам и полностью дискредитирует саму идею.

Сообщение об использовании коммерчески доступных компонентов в КА Clementine (США) при сокращении затрат в 5 раз приводится в [3].

В заключение можно отметить, что до последнего времени нам не удалось найти серьёзную альтернативу MicroPC и, судя по общению с другими пользователями, в ближайшее время это не произойдёт. Однако последние сомнения в части применения в условиях КА, безусловно, рассеют только натурные испытания, которые, к сожалению, задержались по традиционным для нашего времени причинам. ●

Литература

1. Douglas McKinnon. A2100, Спутник будущего, здесь и сегодня.— American Institute of Aeronautics and Astronautics
2. Гобчанский О.П. Применение MicroPC в вычислительных комплексах специального назначения// СТА.— 1997.— №1
3. Clementine demonstrates latest technologies// Military & Aerospace Electronics.— 1994, April

(C) 1998 СТА Тел.: (095) 234-0635 Факс: (095) 330-3650 http://www.cta.ru