

ARM-МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ ATMEL: ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ.

Часть 2. ARM9

Николай Королев, руководитель инженерного центра, ООО «АРГУССОФТ Компани»
Антон Шабынин, инженер, ООО «АРГУССОФТ Компани»

В предыдущей части статьи (часть 1 опубликована в «ЭК» №7, 2007) были рассмотрены микроконтроллеры на ядре ARM7.

Эти достаточно мощные микросхемы могут быть использованы в различных применениях, однако, всегда найдутся задачи, когда требуется еще большая вычислительная мощность и еще более развитая периферия. В таком случае внимание разработчиков обращается к контроллерам на ядре ARM9. В этой части статьи рассматриваются микросхемы ARM9 корпорации ATMEL, а также пример практической работы с этими микроконтроллерами.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ СЕМЕЙСТВА SAM9

Ядро ARM9TDMI является развитием ARM7TDMI и совместимо с ним на уровне исходных кодов. Поддерживается два набора команд, 32-битный набор ARM и 16-битный набор THUMB, являющийся подмножеством набора ARM. В ряде приложений использование набора команд THUMB приводит к уменьшению размера кода и более быстрому его выполнению. В отличие от микросхем ARM7, контроллеры на ядре ARM9, как правило, имеют на кристалле кэш-память команд и данных, что повышает общую про-

изводительность процессора. В таблице 1 представлены микроконтроллеры (МК) корпорации ATMEL на ядре ARM9.

Микросхемы имеют раздельное питание ядра (1,3 или 1,8 В) и периферийных модулей – 3,3 В. Причем, напряжение питания ядра можно варьировать в диапазоне 1,65...1,95 В (1,08...1,32 В), управляя потребляемой мощностью и максимальной тактовой частотой ядра контроллера. Такое сочетание параметров позволяет применять МК ARM9 в самых разных приложениях, в том числе для построения низкопотребляющих систем, работающих в реальном времени.

Для отладки программ используется внутрисхемный эмулятор AT91SAM-ICE, тот же, что и для микроконтроллеров AT91SAM7, либо Wiggler-совместимый гальванически развязанный эмулятор AS-JTAG.

Все микроконтроллеры ATMEL семейства ARM9 содержат модуль управления памятью (MMU, Memory Management Unit). Этот модуль необходим для полноценной работы операционных систем класса Linux или Windows.

В развитии интерфейсов наблюдается тенденция отказа от обмена по параллельной шине и переход к последовательным интерфейсам, обеспечивающим большую суммарную производительность. Эта тенденция хорошо видна на примере архитектуры персонального компьютера. Уже не встретишь принтер, у которого нет интерфейса USB или Ethernet, жесткие диски подключаются к системной плате через последовательный интерфейс SATA со скоростью 3 Мбит/с, а видеокарта получает данные через многоканальный последовательный интерфейс PCI Express. Да и мик-

Таблица 1. Краткие характеристики микроконтроллеров ARM9 корпорации ATMEL

	Частота ядра, MHz	ОЗУ, Кбайт	Флэш-ПЗУ, Кбайт	Кэш-память, Кбайт	Число USART/JART	Порт SPI	Порт TWI	Интерфейс SSC	Входной видеointерфейс	Интерфейс MCI	Контроллер CAN	Интерфейс USB Host	Интерфейс USB Device	Контроллер ШИМ	Системный таймер	16-bit таймер	Интервальный таймер	Каналы DMA	Схема сброса	RC-генератор	Число линий вв/выв.	Корпус									
91RM9200	180	16	-	32	5	1		3	-									20	-	-	122	QFP208									
91SAM9260	210	8	-	16	7	2	1	1	1	-	2	1	-	1	6	1	24	2	1	96	1										
91SAMXE128		16	128	24																											
91SAMXE256		32	256																												
91SAMXE512			512																												
91SAM9261	160	16	-	32	4	1	3	-	2	1	-	4	2	3	1	19	2	-	160	BGA217											
91SAM9261S																															
91SAM9263	240	96	-	8	1	1	2	1	2	1	-	-	HS	3	1	3	22	1	1	49	BGA324										
91SAM9R64	64	-	1																		1	2	-	-	-	4	1	18	1	118	BGA144
91SAM9RL65																															

Примечание: HS (High Speed) – интерфейс USB 2.0 device, скорость 480 Мбит/с.

росхема BIOS на современных платах стала 8-выводной, с интерфейсом SPI (кстати, для этого ATME163 работала микросхемы серии AT26). Пожалуй, единственное место, где не обойтись без параллельного интерфейса – это обмен с памятью программ/данных.

Отличительная особенность микроконтроллеров корпорации ATME163 (это касается практически любого семейства) – наличие на кристалле обширной периферии. Фирменная черта атмеловских МК – хорошо продуманная технология обмена данными между ядром и портами ввода/вывода. Обмен происходит под управлением многоканального периферийного контроллера прямого доступа к памяти (PDC – Peripheral DMA Controller), который напрямую осуществляет обмен данными между периферийными устройствами, внутренними регистрами и внешней памятью.

Как правило, периферийный модуль МК AT91 имеет два выделенных канала PDC, один для приема данных, другой – для передачи. Каждый канал периферийного контроллера PDC содержит 32-битный регистр-указатель адреса, 16-битный регистр-счетчик пересылок, 32-битный регистр для указателя следующего адреса памяти и 16-битный регистр-счетчик для следующих пересылок. Периферийные модули переключают потоки данных PDC, используя сигналы приема-передачи. По окончании пересылки первого программного блока данных соответствующий периферийный модуль

генерирует прерывание окончания пересылки. Автоматически начинается пересылка второго блока данных, а обработка данных первого блока может выполняться параллельно процессором ARM, тем самым обходясь без «медленных» прерываний в режиме реального времени, замедляющих обновление регистров-указателей в процессоре. Таким образом обеспечивается высокоскоростная пересылка данных в периферийный контроллер. PDC имеет выделенные регистры состояния, указывающие для каждого канала возможность или невозможность пересылки. В любой момент времени можно считать из памяти адрес размещения очередной пересылки и количество оставшихся пересылок.

Родоначальником семейства ARM9 у ATME163 является AT91RM9200, созданный на ядре ARM920TDMI. Этот МК выпускается уже несколько лет, и изделия на его основе производят многие российские компании. Отметим, значительное число в МК встроенных последовательных интерфейсов – USB Host Full Speed, USB device Full Speed, 100 Mbit Ethernet, а также «стандартные» интерфейсы – UART/USART/SPI/MCI/SSC/TWI (I²C). Микросхема имеет на кристалле мачное ПЗУ (ROM) объемом 128 Кбайт, в котором хранятся утилиты, обеспечивающие работу в терминальном режиме, а также поддерживающие обмен по интерфейсу Ethernet. Именно пример работы с микросхемой подробно AT91RM9200 рассматривается ниже. В качестве аппаратной плат-

формы использована плата AS-9200 производства инженерного центра Аргуссофт.

Последующие микросхемы семейства ARM9 построены на более совершенном ядре ARM926EJ-S с поддержкой DSP-команд и оснащенном JAVA-акселератором. Они имеют название Smart ARM9 или SAM9. Такое название подразумевает, что новые микросхемы наделены дополнительными функциями, расширяющими возможности и, одновременно, упрощающими работу с контроллерами. В частности, эти микросхемы имеют возможность загрузки внешней флэш-памяти прямо через микроконтроллер, используя его в качестве программатора. Для загрузки используется программа SAM-BA (Smart ARM Boot Assistance). Программа также позволяет просматривать содержимое оперативной памяти. Внешний вид главного окна программы представлен на рисунке 1.

Следующая микросхема – AT91SAM9260. У нее число внутренних шин увеличено до шести, при этом пиковая скорость обмена данными составляет 19,2 Гбит/с. На кристалле размещен модуль видеоинтерфейса ISI (Image Sensor Interface), работающий с цветной CMOS-матрицей. Основные технические параметры AT91SAM9260 приведены ниже.

- ядро – ARM926EJ-S™ ARM® Thumb®: DSP Instruction Extensions;
 - 6-слойная шинная матрица (32-разряда × 6);
 - производительность 230 MIPS на частоте 210 МГц;
 - 8 Кбайт кэш данных, 8 Кбайт кэш-команд, буфер записи;
 - интерфейс к внутрисхемному эмулятору (JTAG);
 - коммуникационный отладочным каналом (Debug UART);
 - быстродействующая память;
 - 8 Кбайт ОЗУ и 32 Кбайт мачное ПЗУ;
 - внешняя интерфейсная шина (EBI);
 - поддержка памяти SDRAM, Burst flash, Compactflash®, SmartMedia™ и NAND;
 - системная периферия;
 - расширенный тактовый генератор и контроллер управления энергопотреблением;
 - два встроенных осциллятора с ФАПЧ;
 - четыре программируемых источника тактирования.
- Таймеры:
- таймер часов реального времени с отдельным прерыванием;

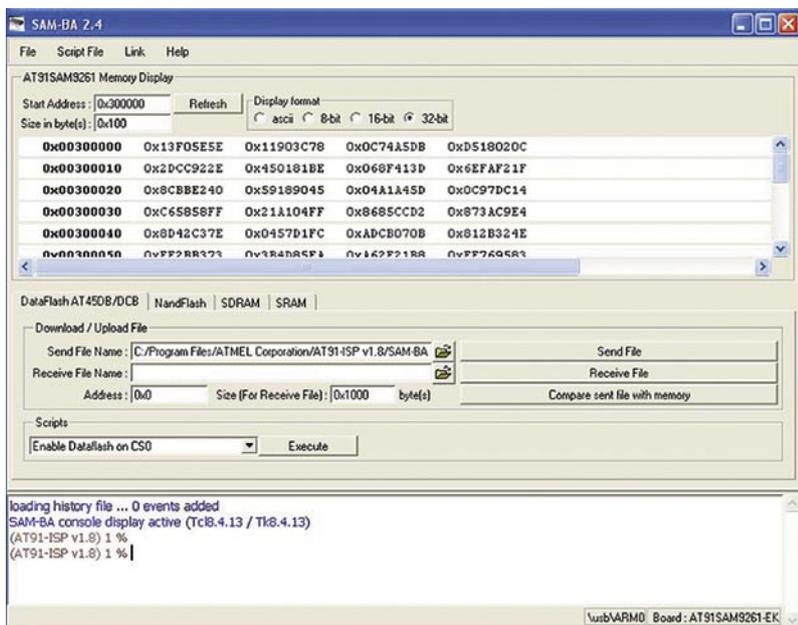


Рис.1. Главное окно программы SAM-BA

- интервальный таймер (20+12 разрядов);
 - два трехканальных 16-битных таймера/счетчика;
 - сторожевой таймер.
- Контроллер прерываний:
- 8 уровней маскируемых прерываний с приоритетом;
 - 7 внешних источников прерывания и 1 «скоростной» источник прерывания;
 - четыре 32-разрядных контроллера ввода/вывода с 122 программируемыми линиями ввода/вывода;
 - 22-канальный периферийный контроллер данных (DMA).
- Модуль Ethernet MAC 10/100 Base-T:
- режим MII или RMII;
 - буфер FIFO на 28 байт и выделенные каналы DMA на прием и передачу HOST-порт USB 2.0 (12 Мбит/с);
 - буфер FIFO и выделенные каналы DMA.
- Device-порт USB 2.0 (12 Мбит/с):
- буфер FIFO 2 Кбайт.

- Интерфейс мультимедиа карт (MCI):
- автоматическое управление протоколом;
 - совместимость с MMC, SD/SDIO-картами памяти, поддержка двух карт SD-Memory;
 - 10-разрядный 4-канальный АЦП.
- Отметим также:
- 3 синхронных последовательных контроллера (SSC), поддержка интерфейса I2S;
 - 6 универсальных синхронно-асинхронных интерфейса USART;
 - асинхронный интерфейс UART, который также можно использовать для отладки;
 - двухпроводный интерфейс TWI, (совместимый с I2C), поддержка режима Master Mode;
 - 2 последовательных интерфейса SPI (Master/Slave режим);
 - интерфейс ISI (Image Sensor Interface) ITU-R 601/656 для подключения источника видеосигнала;
 - корпус TQFP208, BGA217.

На основе микросхемы AT91SAM9260 разработаны микроконтроллеры AT91SAMXE, содержащие на кристалле флэш-ПЗУ объемом от 128 до 512 Кбайт. Интересно, что по типу корпуса (TQFP208 и BGA217) и цоколевке они совпадают с AT91SAM9260, то есть AT91SAMXE можно распаять на ту же печатную плату. Кристалл AT91SAM9XE отличается от AT91SAM9260 только наличием модуля флэш-ПЗУ. Структурная схема контроллера AT91SAM9XE512 представлена на рисунке 2.

В 2008 году будут выпущены микросхемы AT91SAM9260A. Индекс А означает, что кристалл изготавливается по технологическим нормам 90 нм. Сравнительные характеристики процессоров приведены в таблице 2.

В микросхеме AT91SAM9261 количество шин данных — пять, что позволяет увеличить пропускную способность до впечатляющих 14,4 Гбит/с. Эта микросхема интересна тем, что на кристалле размещен контроллер ЖК-дисплея, поддерживающий работу

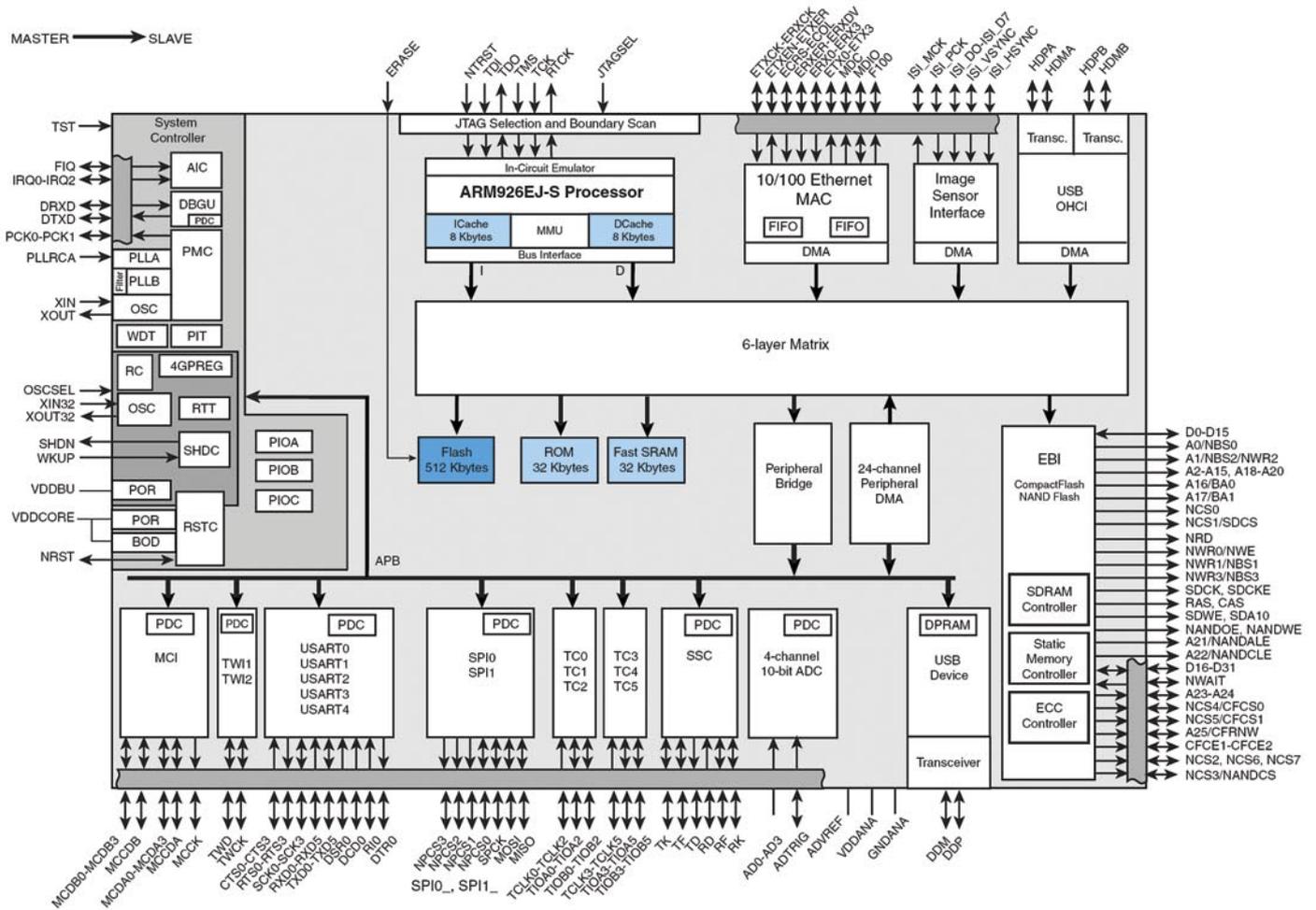


Рис. 2. Структурная схема AT91SAM9XE

как с пассивной (STN) так и с активной (TFT) матрицами. Максимальное разрешение — 2048 × 2048 точек, глубина цвета — до 24 бит на точку. Микросхема содержит на кристалле статическую оперативную память объемом 160 Кбайт, работающую на частоте шины. Если в качестве выходного устройства использовать матрицу с разрешением 320 × 240 точек при глубине цвета 16 бит, можно в качестве видеопамати использовать внутреннюю память контроллера.

Самой высокоинтегрированной микросхемой в семействе SAM9 является контроллер AT91SAM9263. Здесь присутствует практически вся периферия, которая в различных комбинациях использована в микросхемах SAM9 — все типы портов (причем для высокоскоростного обмена можно использовать два параллельных 32-разрядных порта), два типа памяти ОЗУ в дополнение к кэш-памяти команд и данных, контроллер ЖК-матрицы с 2D-ускорителем, контроллер CMOS-сенсора. В таблице 3 представлены данные по скорости обмена для последовательных интерфейсов контроллера AT91SAM9263.

Для организации передачи потоков данных внутри кристалла использована матрица из 9 шин данных. Естественным для столь насыщенной микросхемы является применение двух параллельных 32-разрядных

шин с частотой 100 МГц. Тип корпуса этой микросхемы BGA324.

НАСТРОЙКА ПРОЕКТА В IAR, СОХРАНЕНИЕ ГОТОВОЙ ПРОШИВКИ ВО ФЛЭШ-ПАМЯТИ, ВЫПОЛНЕНИЕ ИЗ SDRAM

Алгоритм загрузки контроллера AT91RM9200 на плате AS-9200 состоит из следующих шагов

1. Загружается ROM boot. Эта программа записана в ROM-память микросхемы и позволяет МК загружаться через SPI Dataflash-память AT45DB642D, установленной на плате.

2. Копируется загрузчик из AT45 в SDRAM. Первый «маленький» пользовательский загрузчик размещается в SRAM, которая разбита на блоки по 12 Кбайт кода и 4 Кбайт данных. Он нужен для инициализации периферии: PLL, SDRAM; UART и т.д. На плате AS-9200 используется Dataflash-loader, предложенный Atmel.

3. Запуск U-boot в SDRAM. Эту операцию выполняет «маленький» загрузчик. Если дополнительный функционал не требуется, то вместо U-boot может запускаться программа пользователя. U-boot достаточно мощный инструмент. Возможна работа с сетью, загрузка по протоколу tftp, работа с флэш, поддержка USB-Masstorage загрузка Linux и т.д.

4. Запуск Linux/программы пользователя. Основное назначение U-boot на плате AS-9200 — запуск Linux или «прошивки» и обновление содержимого флэш-памяти.

Проект для IAR

В состав среды IAR входят примеры для работы с микроконтроллерами AT91RM9200. К сожалению, в них не показано, как можно выполнять программу из SDRAM. За основу взят стандартный пример, который модифицирован для работы из SDRAM.

Работа с SDRAM

Перед использованием SDRAM необходимо инициализировать SDRAM-контроллер на кристалле. Во время инициализации содержимое SDRAM памяти сбрасывается. Поэтому при запуске программы из SDRAM память должна быть предварительно инициализирована.

При отладке в среде IAR эту функцию берет на себе эмулятор. В настройках проекта указывается мас-файл, который описывает процесс инициализации контроллера перед запуском программы.

Для выполнения пользовательской программы из SDRAM без эмулятора, используется загрузчик, который инициализирует PLL, SDRAM, и загружает в SDRAM саму программу. loader от Atmel — один из таких загрузчиков. Более функциональным загрузчиком является U-boot. Он позволяет работать с флэш-памятью, Ethernet, USB и портом UART. Основной задачей U-boot является загрузка и запуск Linux или пользовательской программы. Поддерживаются простейшие скрипты.

Первый, «маленький», загрузчик — Dataflash loader инициализирует PLL и SDRAM. Он выполняется из SRAM. U-boot выполняется уже из SDRAM. Соответственно, если необходимо настроить микроконтроллер или SDRAM для работы на другой частоте, требуется модификация кода в Dataflash loader.

Основные шаги.

1. Компиляция проекта.
2. Переход в U-boot.
3. Загрузка образа в SDRAM.
4. Сохранение образа во флэш.
5. Настройка U-boot для автоматической загрузки.
6. Запуск программы из SDRAM.

Компиляция проекта

Для компиляции проект необходимо открыть в IAR и выбрать SDRAM, среди вариантов компиляции. Далее

Таблица 2. Процессоры AT91SAM9260 и AT91SAM9260A

	SAM9260	SAM9260A
Тех. процесс, нм	180	90
Частота ядра, МГц	210	400
Объем кэш-памяти, Кбайт	2 × 8	2 × 32
Объем SRAM, Кбайт	2 × 4	2 × 8
EMAC FIFO, байт	28	128
Контроллер ПДП на TWI	нет	есть
Напряжение VDD_BU, VDD_CORE, В	1,65–1,95	0,9–1,1
Напряжение VDD_OSC, VDD_PLL, В		
Напряжение VDD_IOP, В	3,0–3,6	1,65–3,6
Напряжение VDD_IOM, В	1,65–1,95 (3,0–3,6)	1,65–1,95 (3,0–3,6)
Напряжение VDD_ANA, В	3,0–3,6	3,0–3,6

Таблица 3. Скорость последовательных интерфейсов контроллера AT91SAM9263

Интерфейс	Характеристики	Скорость, Мбит/с
Ethernet	Поддержка 10/100 MII/RMII	100
SPI	Режим Master/Slave. До 4 Chip Selects	50
SSC	Поддержка режима I2S	50
MCI	Поддержка SD-card, MMC-card, SDIO	25
USART	Асинхронный и синхронный обмен, IrDA, ISO7816, поддержка работы с модемом	12 (Асинхронный режим) 50 (Синхронный режим)
DBGU	Отладочный порт/дополнительный UART	12
USB	2.0 Full Speed интерфейс	12
CAN	Режимы 2.0A, 2.0B	1
TWI (I ² C)	Режимы Master, Slave, Multi-Master	0,4

проект компилируется командой Project-Make.

В папке run_from_SDRAM/SDRAM/EXE появится файл AT91RM9200-run_from_SDRAM.bin. Это образ программы, пригодный для выполнения из SDRAM, с адреса 0x21000000. В папке run_from_SDRAM/config есть два файла: первый – SDRAM_AT91RM9200.mac – макрос, используемый отладчиком для инициализации контроллера. Второй файл – SDRAM_AT91RM9200.xcl, определяет правила линковки, в том числе объем доступной памяти, размер стека и адрес, по которому должна начинаться программа в SDRAM для корректного выполнения.

Подготовка платы

Плата AS-9200 поставляется с запрограммированной ОС Linux. Если содержимое флэш-памяти не модифицировалось, то можно сразу перейти к Работе с U-boot.

Восстановление U-boot.

Подключить порт DBGU платы к компьютеру, и запустить терминал. Скорость 115200 Кбит/с, 8N1. Приводится алгоритм загрузки для наиболее общего случая; затем будут даны частные комментарии.

1. Подать питание или перезагрузить МК.

Если после перезагрузки платы на порт DBDU выводится приглашение X-Modem'a, это означает, что ROM-boot не нашел пригодного загрузчика, и пытается получить его по X-Modem.

2. Теперь необходимо передать по X-Modem файл DataflashBoot-AT91RM9200EK-1.05.bin или его более новую версию.

После окончания передачи в течение трех секунд необходимо в терминале нажать Enter, чтобы остановить процесс автоматической загрузки и перейти в меню загрузки.

Далее, в меню Dataflash loader необходимо выбрать первый пункт, путем ввода «1» и нажатия Enter. Меню показано ниже:

```
ATMEL Dataflash LOADER VER 1.05
Aug 15 2006 18:34:34
*-----*
```

```
Dataflash [4.24 Mhz]:AT45DB642
Nb pages: 008192
Page Size: 001056
Size=08650752 bytes
Logical address: 0xC0000000
*-----*
```

```
1: Program Dataflashboot.bin at .....
[C0000000]
2: Program U-Boot.bin at .....
[C0008400]
```

```
3: Load UBOOT from [C0008400]
to [0x21f00000]
```

```
4: Program Dataflash at .....[addr]
5: Read Memory .....[addr]
6: Erase Dataflash containing ...[addr]
*-----*
```

Enter:

После этого появится сообщение и приглашение X-Modem. Необходимо снова отправить по X-Modem файл DataflashBoot-AT91RM9200EK-1.05.bin:

```
ENTER: 1
Download DataflashBoot.bin to
[0xC0000000]
CC
```

После сохранения DataflashBoot во флэш-ПЗУ должно появиться сообщение о модификации вектора прерываний:

```
Modification of Arm Vector
6 :841a018
Write 12288 bytes in Dataflash
[0xc0000000]
Verify Dataflash: OK
Hit a Key!
```

После нажатия на любую клавишу снова появится меню загрузки из листинга 1. Для проверки того, что загрузчик записан и корректно работает, можно перезагрузить МК. На 3 секунды должно будет появиться меню загрузки, затем текст:

```
Load UBOOT from dataflash from
[0008400] to SDRAM[21f00000].
```

Более ничего выводится не должно. Это полностью соответствует состоянию флэш-памяти: U-boot в нее еще не загружен и выполняться просто нечему.

3. Для того, чтобы загрузить U-boot во флэш-память, необходимо в меню загрузки выбрать второй пункт. Появится приглашение на загрузку U-boot во флэш-память. Необходимо по X-modem передать образ U-boot, например файл u-boot-at91rm9200df-2006-08-20.bin. Для запуска пользовательской программы из SDRAM номер версии u-boot значения не имеет. После загрузки U-boot во флэш будет выведено сообщение о модификации вектора прерываний:

```
Modification of Arm Vector 6:21f00
Write 139008 bytes in
DataFlash[0xc0008400]
Verify Dataflash: OK
Hit a Key!
```

4. После загрузки U-boot в появившемся меню необходимо выбрать третий пункт: Запустить U-boot. В терминале появится текст о версии U-boot, флэш, SDRAM и приглашение командной строки U-boot.

Для того, чтобы проверить, что U-boot стартует при загрузке платы, контроллер можно перезагрузить. Через 3 секунды после появления меню DataFlashBoot, загружается U-boot. В терминале видна командная строка U-boot:

```
Load UBOOT from
dataflash[c0008400] to
SDRAM[21f00000]
PLLA[180MHz], MCK[60Mhz] ==>
Start UBOOT
Jumping...
U-Boot 1.1.4 (Aug 20 2006 –
21:33:18)
DRAM: 32 MB
Parallel flash ignored
flash: 0 kB
DataFlash:AT45DB642
Nb pages: 8192
Page Size: 1056
Size = 8650752 bytes
Logical address: 0xC0000000
Area 0: C0000000 to C00083FF (RO)
Bootstrap
Area 1: C0008400 to C003DDFF
(RO) U-Boot
Area 3: C003FF00 to C0041FFF
Environment
Area 4: C0042000 to C018BFFF OS
Area 5: C018C000 to C083FFFF FS
*** Warning – bad CRC, using
default environment
```

```
In: serial
Out: serial
Err: serial
U-Boot>
```

Работа с U-boot

5. Когда U-boot загружен, в нем доступна командная строка, через которую происходит настройка загрузки, выбор источника загрузки. Таким источником может быть, например, сеть или usb-masstorage носитель.

Для того, чтобы сохранить пользовательскую программу во флэш-памяти с помощью U-boot, необходимо в командную строку U-boot дать последовательно две команды. Ввод команды завершается нажатием Enter.

Команда loadb 0x20000000 принимает файл по протоколу Kermit и сохраняет его в SDRAM-память, начиная с указанного адреса. Передать необходимо bin файл с программой, который был скомпи-

Таблица 4. Карта флэш-памяти

Номер зоны	Начало	Конец	Размер зоны, Кбайт	Назначение
0	0xC0000000	0xC00083FF	33	DataflashBoot Loader
1	0xC0008400	0xC003DDFF	214	U-Boot
2	0xC003FF00	0xC0041FFF	16K	Настройки U-boot
3	0xC0042000	0xC083FFFF	8184	Доступно пользователю

Таблица 5. Карта SDRAM

Начало	Конец	Размер	Назначение
0x20000000	0x21FFFFFF	32Mbyte	Вся SDRAM
0x21F00000	0x21FFFFFF	1Mbyte	Выполнение U-Boot
0x20000000	0x21EFFFFF	31Mbyte	Доступно пользователю

лирован в IAR. Процесс передачи показан ниже:

```
U-Boot> loadb 0x20000000
## Ready for binary (kermit)
download to 0x20000000
at 115200 bps...
## Total Size = 0x00002d8b =
= 11659 Bytes
## Start Addr = 0x20000000
U-Boot>
```

```
Команда cp.b 0x20000000
0xC0042000 0x2d8b:
```

```
U-Boot> cp.b 0x20000000
0xC0042000 0x2d8b
Copy to DataFlash... done
U-Boot>
```

скопирует 11659 байт из SDRAM, начиная с адреса 0x20000000 во флэш-память по адресу 0xC0042000.

Для того, чтобы настроить автоматическую загрузку, необходимо дать команду: `setenv bootcmd №cp.b 0xC0042000 0x20000000 0x2d8b; go 0x20000000`; `saveenv`; Эта команда устанавливает в переменную среды `bootcmd` (команду выполняемую автоматически при загрузке U-boot), а затем сохраняет переменные окружения во флэш-памяти. Команда загрузки состоит из двух частей: первая копирует пользовательскую программу из флэш-памяти в SDRAM, а вторая передает ей управление.

6. U-boot настроен для автоматической загрузки, программа сохранена во флэш-память. Контроллер готов к работе. Для старта пользовательской программы можно или перезагрузить контроллер, или дать команду `boot`. Команда `boot` выполняет переменную окружения `bootcmd` идентично ее вводу в командной строке U-boot.

Данный пример пользовательской программы после получения управления: в цикле выводит в терминал данные о частоте ядра, системной шине, и с помощью PDC передает буфер, заполненный буквами «z».

Флэш-память в U-boot разделена на зоны (см. табл. 4, 5). Описание стандартных зон приведено в карте памяти. Перенастройка размеров и прав доступа для зон возможна, но требует перекомпиляции U-boot. Со стандартными настройками первые две зоны недоступны для записи. Это сделано, чтобы при работе из командной строки U-boot исключить возможность «затереть» `Dataflashloader` и сам U-boot. Вторая зона используется U-boot для хранения настроек и переменных окружения. Таким образом, пользовательская программа может располагаться в третьей зоне. Если программа занимает только часть доступной флэш-памяти, то остаток может быть использован на усмотрение пользователя, например для

хранения данных, накапливающихся во время работы программы

В рассматриваемом примере пользовательская программа хранится в начале третьей зоны флэш-памяти, откуда во время загрузки U-boot копирует ее в SDRAM, и передает управление. Поскольку U-boot выполняется из SDRAM, то пользовательская программа не должна с ним пересекаться. Обратимся к карте памяти. Проект в IAR настроен таким образом, что ему доступна вся память, но начинается она заполняться с адреса 0x20000000, то есть от начала SDRAM. U-boot занимает последний мегабайт SDRAM. После того, как управление будет передано пользовательской программе, память, занимаемая U-boot может быть использована как свободная.

Важным моментом является соответствие настроек U-boot и IAR. Если в IAR проект будет настроен для работы начиная с некоторого адреса, а U-boot загрузит бинарный образ по другому адресу, то корректно программа работать не будет. Таким образом, необходима тождественность адресов компиляции, загрузки и передачи управления.

Объем статьи не позволяет подробно остановиться на каждом микроконтроллере, однако, даже из краткого обзора видно, что спектр 32-разрядных МК производства корпорации ATMEЛ покрывает чрезвычайно широкий круг задач и имеет очень хорошие перспективы для развития.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Королев. 32-разрядные микроконтроллеры ATMEЛ на базе ядра ARM7//Компоненты и технологии, 2006, №6.
2. Н. Королев. Современные микроконтроллеры ATMEЛ: акцент на 32-разряда//Электронные компоненты, 2006, №12.
3. Н. Королев, А. Шабынин. ARM-микроконтроллеры ATMEЛ: практические аспекты применения.