ARM64 U-BOOT 启动过程分析

Base on TI K3 platform

Linhai Zhou (David)

History：

我写作的水平不怎么样，毕竟我也不是文科毕业的。想尽量写清楚，但往往词不达意，望读者海涵。

啰啰嗦嗦写了这么多，我手上也没有K3的开发板，都是根据硬件手册+代码分析出来的，这里面有很多硬件知识，宏，驱动等并没有讲，希望有空时我能补上。当然我知道里面肯定有很多错误，希望能斧正。

Fixed1: 对u-boot进行编译，确定一些基本的地址信息说明。

U-boot SPL阶段：

编译K3 uboot命令：

make ARCH=arm64 CROSS\_COMPILE=aarch64-linux-gnu- am65x\_evm\_a53\_defconfig

make ARCH=arm64 CROSS\_COMPILE=aarch64-linux-gnu-

等待编译完毕后，u-boot目录下会多出一个spl的文件夹，里面是SPL阶段所需要的loader执行程序。

在.config里面可以看到CONFIG\_SPL=y，我们的K3需要SPL支持。K3的SPL镜像存储示意图：

+-----------------------+

| FIT HEADER |

| +-------------------+ |

| | A53 ATF | |

| +-------------------+ |

| | A53 OPTEE | |

| +-------------------+ |

| | A53 SPL | |

| +-------------------+ |

| | SPL DTB 1...N | |

| +-------------------+ |

+-----------------------+

可以看到SPL使用的Device Tree放在SPL镜像的后面。

为了搞清楚u-boot-spl的启动，我们首先来看一下u-boot的链接文件arch/arm/cpu/armv8/u-boot-spl.lds

MEMORY { .sram : ORIGIN = IMAGE\_TEXT\_BASE,

LENGTH = IMAGE\_MAX\_SIZE }

MEMORY { .sdram : ORIGIN = CONFIG\_SPL\_BSS\_START\_ADDR,

LENGTH = CONFIG\_SPL\_BSS\_MAX\_SIZE }

lds文件首先描述了两块内存空间。

第一块是在.sram里面，起始地址是IMAGE\_TEXT\_BASE，这个值定义在Makefile.spl下面。如果激活了CONFIG\_SPL，在u-boot顶层Makefile里面：

spl/u-boot-spl: tools prepare \

$(if $(CONFIG\_OF\_SEPARATE)$(CONFIG\_OF\_EMBED)$(CONFIG\_SPL\_OF\_PLATDATA),dts/dt.dtb) \

$(if $(CONFIG\_OF\_SEPARATE)$(CONFIG\_OF\_EMBED)$(CONFIG\_TPL\_OF\_PLATDATA),dts/dt.dtb)

$(Q)$(MAKE) obj=spl -f $(srctree)/scripts/Makefile.spl all

可以看到就是编译spl所需要使用Makefile.spl。这个文件位于u-boot/scripts下面：

KBUILD\_CPPFLAGS += -DCONFIG\_SPL\_BUILD

我们在文件里面经常会看到CONFIG\_SPL\_BUILD这个宏，这个宏就是在Makefile.spl定义的

ifneq ($(CONFIG\_$(SPL\_TPL\_)TEXT\_BASE),)

LDPPFLAGS += -DIMAGE\_TEXT\_BASE=$(CONFIG\_$(SPL\_TPL\_)TEXT\_BASE)

endif

CONFIG\_SPL\_TEXT\_BASE在.config文件里面已经定义：

CONFIG\_SPL\_TEXT\_BASE=0x80080000

IMAGE\_MAX\_SIZE 在Makefile.spl里面定义为：

ifneq ($(CONFIG\_$(SPL\_TPL\_)MAX\_SIZE),)

LDPPFLAGS += -DIMAGE\_MAX\_SIZE=$(CONFIG\_$(SPL\_TPL\_)MAX\_SIZE)

endif

那么CONFIG\_SPL\_MAX\_SIZE又是什么值呢？

这个值定义在am65x\_evm.h下面：

#define CONFIG\_SPL\_MAX\_SIZE CONFIG\_SYS\_K3\_MAX\_DOWNLODABLE\_IMAGE\_SIZE

CONFIG\_SYS\_K3\_MAX\_DOWNLOADABLE\_IMAGE\_SIZE即0x58000

所以：

MEMORY { .sram : ORIGIN = 0x80080000,

LENGTH = 0x58000 }

MEMORY { .sdram : ORIGIN = CONFIG\_SPL\_BSS\_START\_ADDR,

LENGTH = CONFIG\_SPL\_BSS\_MAX\_SIZE }

同理可以得出后面这块内存的范围：

MEMORY { .sram : ORIGIN = 0x80080000,

LENGTH = 0x58000 }

MEMORY { .sdram : ORIGIN = 0x80a00000,

LENGTH = 0x80000 }

那这个0x80080000又在哪里呢？



从硬件手册上可以看到，是处于DDR低2G的空间。当需要32bit的地址时候，MSMC会把内存底部的2G映射到0x80000000-0xffffffff地址空间，这样对与DDRHI，低2G不可访问。内存分为2 banks，低2G（32bit），高2G（64bit）。如果不需要32bit的时候，MSMC把所有的内存映射到0x800000000-0xfffffffff这32G空间中。

实际上0x80080000就是在内存的32K地址上。

lds文件后面的内容，其中比较重要的就是：

这节描述.text内容应该放到sram这个内存区域。指定\_image\_copy\_start变量，入口函数是CPUDIR/start.o。其他节分析一样。

.text : {

. = ALIGN(8);

\*(.\_\_image\_copy\_start)

CPUDIR/start.o (.text\*)

\*(.text\*)

} >.sram

有了这些基础，我们开始看u-boot-spl的执行过程：

首先K3是用armv8系列的架构，所以CPUDIR就是arch/arm/cpu/armv8。其中start.o就是start.s编译生成的目标文件。然后入口地址是\_start

start.S分析：

.globl \_start

\_start:

#if defined(CONFIG\_LINUX\_KERNEL\_IMAGE\_HEADER)

#include <asm/boot0-linux-kernel-header.h>

#elif defined(CONFIG\_ENABLE\_ARM\_SOC\_BOOT0\_HOOK)

#include <asm/arch/boot0.h>

#else

b reset

#endif

首先K3并没有定义CONFIG\_LINUX\_KERNEL\_IMAGE\_HEADER以及CONFIG\_ENABLE\_ARM\_SOC\_BOOT0\_HOOK。所以直接执行b reset，根据前面分析，此时的加载地址是0x80080000，入口地址也是0x80080000。

b save\_boot\_params，这是一个弱引用函数。K3并没有特别定义save\_boot\_params，执行start.s里面定义的save\_boot\_params，直接跳转到save\_boot\_param\_ret。由于K3也没有定义CONFIG\_POSITION\_INDEPENDENT（代码位置无关），所以运行下面代码:

switch\_el x1, 3f, 2f, 1f

3: set\_vbar vbar\_el3, x0

mrs x0, scr\_el3

orr x0, x0, #0xf /\* SCR\_EL3.NS|IRQ|FIQ|EA \*/

msr scr\_el3, x0

msr cptr\_el3, xzr /\* Enable FP/SIMD \*/

#ifdef COUNTER\_FREQUENCY

ldr x0, =COUNTER\_FREQUENCY

msr cntfrq\_el0, x0 /\* Initialize CNTFRQ \*/

#endif

b 0f

2: set\_vbar vbar\_el2, x0

mov x0, #0x33ff

msr cptr\_el2, x0 /\* Enable FP/SIMD \*/

b 0f

1: set\_vbar vbar\_el1, x0

mov x0, #3 << 20

msr cpacr\_el1, x0 /\* Enable FP/SIMD \*/

0:

isb

这段代码是为了开启ARM v8的EL3/EL2/EL1的运行级别，并配置相应的中断向量。

其中EL0: applications, EL1: OS kernel, EL2: Hypervisor, EL3: Secure monitor

bl apply\_core\_errata

bl lowlevel\_init

apply\_core\_errata，给CPU配置勘误表（打入补丁）。

lowlevel\_init同样也是一个弱引用。

弱引用：

如果有下列两个文件：

main.c

test.h

int hello\_world (void);

#include

#include "test.h"

int \_\_attribute\_\_((weak)) hello\_world (void)

{

printf ("weak hello world\n");

return 0;

}

int main (int ac, char \*\*av)

{

hello\_world();

return 0;

}

test.c

#include <stdio.h>

#include "test.h"

int hello\_world (void)

{

printf ("strong hello world\n");

return 0;

}

当我们用gcc test.c main.c得到a.out文件后，执行输出应该是“strong hello world”。

当我们用gcc main.c得到a.out文件后，执行输出“weak hello world”

这就是弱引用的一个范例。当系统中有其他同名函数存在，链接器就是使用没有weak定义的函数。如果没有，那就用weak定义的函数。

K3的lowlevel\_init是使用start.s下面的弱引用：  
从Make file里面看出mach-k3里面的需要定义CONFIG\_CPU\_V7R，而armv8里面是给sunxi使用的。

WEAK(lowlevel\_init)

mov x29, lr /\* Save LR \*/

2:

mov lr, x29 /\* Restore LR \*/

ret

ENDPROC(lowlevel\_init)

\_main:

这部分最重要的就是设置堆栈，C语言执行需要堆栈。

ENTRY(\_main)

#if defined(CONFIG\_TPL\_BUILD) && defined(CONFIG\_TPL\_NEEDS\_SEPARATE\_STACK)

ldr x0, =(CONFIG\_TPL\_STACK)

#elif defined(CONFIG\_SPL\_BUILD) && defined(CONFIG\_SPL\_STACK)

ldr x0, =(CONFIG\_SPL\_STACK)

#elif defined(CONFIG\_INIT\_SP\_RELATIVE)

#if CONFIG\_POSITION\_INDEPENDENT

adrp x0, \_\_bss\_start /\* x0 <- Runtime &\_\_bss\_start \*/

add x0, x0, #:lo12:\_\_bss\_start

#else

adr x0, \_\_bss\_start

#endif

add x0, x0, #CONFIG\_SYS\_INIT\_SP\_BSS\_OFFSET

#else

ldr x0, =(CONFIG\_SYS\_INIT\_SP\_ADDR)

#endif

bic sp, x0, #0xf /\* 16-byte alignment for ABI compliance \*/

mov x0, sp

K3会执行ldr x0, =(CONFIG\_SYS\_INIT\_SP\_ADDR)

#define CONFIG\_SYS\_INIT\_SP\_ADDR (CONFIG\_SPL\_TEXT\_BASE + \

CONFIG\_SYS\_K3\_NON\_SECURE\_MSRAM\_SIZE)

从前面知道CONFIG\_SPL\_TEXT\_BASE=0x80080000，而CONFIG\_SYS\_K3\_NON\_SECURE\_MSRAM\_SIZE定义在.config中，其值为：0x80000。故堆栈的起始位置为0x80100000。sp=0x80100000。

bl board\_init\_f\_alloc\_reserve

ulong board\_init\_f\_alloc\_reserve(ulong top)

{

/\* Reserve early malloc arena \*/

#if CONFIG\_VAL(SYS\_MALLOC\_F\_LEN)

top -= CONFIG\_VAL(SYS\_MALLOC\_F\_LEN);

#endif

/\* LAST: reserve GD (rounded up to a multiple of 16 bytes) \*/

top = rounddown(top-sizeof(struct global\_data), 16);

return top;

}

K3定义了CONFIG\_SPL\_SYS\_MALLOC\_F\_LEN=0x8000。函数参数是x0（即sp）的值：0x80100000。函数退出后，sp指针指向：0x800F8000 – sizeof(gd)。

接下来spl需要给gd分配一块空间，bl board\_init\_f\_reserve。其中的参数还是x0。

mov x18, x0

在整个spl阶段，gd的地址始终保存在x18寄存器中。

#define DECLARE\_GLOBAL\_DATA\_PTR register volatile gd\_t \*gd asm ("x18")

故执行完上面的mov以后，x18就已经是gd的开始地址了。

void board\_init\_f\_init\_reserve(ulong base)

{

struct global\_data \*gd\_ptr;

gd\_ptr = (struct global\_data \*)base;

memset(gd\_ptr, '\0', sizeof(\*gd));

#if !defined(CONFIG\_ARM)

arch\_setup\_gd(gd\_ptr);

#endif

if (CONFIG\_IS\_ENABLED(SYS\_REPORT\_STACK\_F\_USAGE))

board\_init\_f\_init\_stack\_protection\_addr(base);

base += roundup(sizeof(struct global\_data), 16);

#if CONFIG\_VAL(SYS\_MALLOC\_F\_LEN)

/\* go down one 'early malloc arena' \*/

gd->malloc\_base = base;

#endif

if (CONFIG\_IS\_ENABLED(SYS\_REPORT\_STACK\_F\_USAGE))

board\_init\_f\_init\_stack\_protection();

}

前面说过base就是x0的值，也是sp当前的指向0x800F8000。

gd为0x800F8000，初始化。

函数执行完，示意图如下：

+----------+ 0x80100000

+ +

+ +

+ +

+ +

+ +

+ +

+ +

+ +

+----------+0x800F8000 (malloc\_base)

+ + \

+ + the content of gd (size: 0x188)

+ + /

+----------+0x800F7E70 (gd, stack top)

+ +

+ +

+----------+0x80080000 (u\_boot spl)

执行boar\_init\_f，这个board\_init\_f是在SPL阶段所有，我们知道spl阶段能用的空间很小，所以board\_inif\_f不会用board\_f.c里面的函数。而是spl.c下面的弱引用函数。在K3上有自己的定义：arch/arm/mach-k3/am6\_init.c里面的函数：

u32 bootindex \_\_attribute\_\_((section(".data")));

static void store\_boot\_index\_from\_rom(void)

{

bootindex = \*(u32 \*)(CONFIG\_SYS\_K3\_BOOT\_PARAM\_TABLE\_INDEX);

}

为bootindex分配地址，bootindex在.data节。内容在地址0x41c7fbfc。这个地址在



MCU空间。C语言里面这个变量应该在.bss段，但是现在.bss段还没有分配空间，所以把这个变量放到.data段。

ctrl\_mmr\_unlock：解锁所有的WKUP\_CTRL\_MMR0，MCU\_CTRL\_MMR0及CTRL\_MMR0

setup\_am654\_navss\_northbridge：配置NAVSS北桥功能

spl\_early\_init：调用spl\_common\_init，设置GD\_FLG\_SPL\_EARLY\_INIT。

spl\_common\_init

static int spl\_common\_init(bool setup\_malloc)

{

int ret;

#if CONFIG\_VAL(SYS\_MALLOC\_F\_LEN)

if (setup\_malloc) {

gd->malloc\_limit = CONFIG\_VAL(SYS\_MALLOC\_F\_LEN);

gd->malloc\_ptr = 0;

}

#endif

我们从.config文件里面得知：CONFIG\_SPL\_SYS\_MALLOC\_F\_LEN=0x8000，是32K的空间。前面分配的高地址是0x80100000, malloc\_base=0x800F8000，刚好是32K空间。

K3定义了SYS\_MALLOC\_SIMPLE，所以这里用的malloc是定义在include/malloc.h

#define malloc malloc\_simple

void \*malloc\_simple(size\_t bytes)

{

void \*ptr;

ptr = alloc\_simple(bytes, 1);

if (!ptr)

return ptr;

log\_debug("%lx\n", (ulong)ptr);

return ptr;

}

即在前面32K处分配空间。

ret = bootstage\_init(u\_boot\_first\_phase());

if (ret) {

debug("%s: Failed to set up bootstage: ret=%d\n", \_\_func\_\_,

ret);

return ret;

}

bootstage\_mark\_name(spl\_phase() == PHASE\_TPL ? BOOTSTAGE\_ID\_START\_TPL :

BOOTSTAGE\_ID\_START\_SPL, SPL\_TPL\_NAME);

#if CONFIG\_IS\_ENABLED(LOG)

ret = log\_init();

if (ret) {

debug("%s: Failed to set up logging\n", \_\_func\_\_);

return ret;

}

#endif

K3没有定义CONFIG\_BOOTSTAGE，也没有定义CONFIG\_SPL\_LOG，此部分不执行。

K3定义了CONFIG\_SPL\_OF\_CONTROL，但没有定义OF\_PLATDATA。所以执行fdtdec\_setup，为了加载device tree的信息。

if (CONFIG\_IS\_ENABLED(OF\_CONTROL) && !CONFIG\_IS\_ENABLED(OF\_PLATDATA)) {

ret = fdtdec\_setup();

if (ret) {

debug("fdtdec\_setup() returned error %d\n", ret);

return ret;

}

}

加载的地址在gd->fdt\_blob，下面看函数fdtdec\_setup：

执行board\_fdt\_blob\_setup函数，这是一个弱函数。K3没有定义这个函数，使用lib/fdtdec.c定义的弱函数。

int fdtdec\_setup(void)

{

int ret;

#if CONFIG\_IS\_ENABLED(OF\_CONTROL)

# if CONFIG\_IS\_ENABLED(MULTI\_DTB\_FIT)

void \*fdt\_blob;

# endif

# if defined(CONFIG\_OF\_BOARD) || defined(CONFIG\_OF\_SEPARATE)

gd->fdt\_blob = board\_fdt\_blob\_setup();

# endif

# if CONFIG\_IS\_ENABLED(MULTI\_DTB\_FIT)

if (uncompress\_blob(gd->fdt\_blob, 0x1000000, &fdt\_blob) == 0)

gd->fdt\_blob = fdt\_blob;

fdt\_blob = locate\_dtb\_in\_fit(gd->fdt\_blob);

if (fdt\_blob) {

gd->multi\_dtb\_fit = gd->fdt\_blob;

gd->fdt\_blob = fdt\_blob;

}

# endif

#endif

ret = fdtdec\_prepare\_fdt();

if (!ret)

ret = fdtdec\_board\_setup(gd->fdt\_blob);

return ret;

}

我们来看下这个函数实现：

前面我们看到在K3镜像上dtb放在spl镜像的后面，所以只需要把\_image\_binary\_end赋值给fdt\_blob即可，后面的内容即为dtb的内容。

\_\_weak void \*board\_fdt\_blob\_setup(void)

{

void \*fdt\_blob = NULL;

#ifdef CONFIG\_SPL\_BUILD

/\* FDT is at end of BSS unless it is in a different memory region \*/

if (IS\_ENABLED(CONFIG\_SPL\_SEPARATE\_BSS))

fdt\_blob = (ulong \*)&\_image\_binary\_end;

else

fdt\_blob = (ulong \*)&\_\_bss\_end;

#else

/\* FDT is at end of image \*/

fdt\_blob = (ulong \*)&\_end;

#endif

return fdt\_blob;

}

K3的dtb不经过压缩，跳过uncompress\_blob。

locate\_dtb\_in\_fit，查找FIT的头部，计算真正的fdt地址。

fdtdec\_prepare\_fdt，检查dtb头部是否正确。

这里定义了CONFIG\_SPL\_DM，执行dm\_init\_and\_scan，OF\_PLATDATA并没有定义，所以参数为TRUE

if (CONFIG\_IS\_ENABLED(DM)) {

bootstage\_start(BOOTSTAGE\_ID\_ACCUM\_DM\_SPL,

spl\_phase() == PHASE\_TPL ? "dm tpl" : "dm\_spl");

/\* With CONFIG\_SPL\_OF\_PLATDATA, bring in all devices \*/

ret = dm\_init\_and\_scan(!CONFIG\_IS\_ENABLED(OF\_PLATDATA));

bootstage\_accum(BOOTSTAGE\_ID\_ACCUM\_DM\_SPL);

if (ret) {

debug("dm\_init\_and\_scan() returned error %d\n", ret);

return ret;

}

}

这函数主要是初始化硬件驱动。U-boot的驱动是以

int dm\_init\_and\_scan(bool pre\_reloc\_only)

{

int ret;

if (CONFIG\_IS\_ENABLED(OF\_PLATDATA))

dm\_populate\_phandle\_data();

ret = dm\_init(CONFIG\_IS\_ENABLED(OF\_LIVE));

if (ret) {

debug("dm\_init() failed: %d\n", ret);

return ret;

}

ret = dm\_scan\_platdata(pre\_reloc\_only);

if (ret) {

debug("dm\_scan\_platdata() failed: %d\n", ret);

return ret;

}

if (CONFIG\_IS\_ENABLED(OF\_CONTROL) && !CONFIG\_IS\_ENABLED(OF\_PLATDATA)) {

ret = dm\_extended\_scan\_fdt(gd->fdt\_blob, pre\_reloc\_only);

if (ret) {

debug("dm\_extended\_scan\_dt() failed: %d\n", ret);

return ret;

}

}

ret = dm\_scan\_other(pre\_reloc\_only);

if (ret)

return ret;

return 0;

}

Ll\_entry\_declare声明驱动的定义，放入.u\_boot\_list\_2这个专用段。

#define ll\_entry\_declare(\_type, \_name, \_list) \

\_type \_u\_boot\_list\_2\_##\_list##\_2\_##\_name \_\_aligned(4) \

\_\_attribute\_\_((unused, \

section(".u\_boot\_list\_2\_"#\_list"\_2\_"#\_name)))

驱动初始化后，配置串口的信息preloader\_console\_init：

void preloader\_console\_init(void)

{

gd->baudrate = CONFIG\_BAUDRATE;

serial\_init(); /\* serial communications setup \*/

gd->have\_console = 1;

}

int serial\_init(void)

{

gd->flags |= GD\_FLG\_SERIAL\_READY;

return get\_current()->start();

}

设置串口波特率gd->baudrate = 115200，打开串口时钟，激活当前串口。

K3没有定义CONFIG\_SYS\_ICACHE\_OFF和CONFIG\_SYS\_DCAHE\_OFF。 CONFIG\_SYS\_SDRAM\_BASE=0x80000000，硬件手册上已经描述了。这里值得注意的是dram\_init\_banksize函数。

int dram\_init\_banksize(void)

{

/\* Bank 0 declares the memory available in the DDR low region \*/

gd->bd->bi\_dram[0].start = CONFIG\_SYS\_SDRAM\_BASE;

gd->bd->bi\_dram[0].size = 0x80000000;

gd->ram\_size = 0x80000000;

#ifdef CONFIG\_PHYS\_64BIT

/\* Bank 1 declares the memory available in the DDR high region \*/

gd->bd->bi\_dram[1].start = CONFIG\_SYS\_SDRAM\_BASE1;

gd->bd->bi\_dram[1].size = 0x80000000;

gd->ram\_size = 0x100000000;

#endif

return 0;

}

void spl\_enable\_dcache(void)

{

#if !(defined(CONFIG\_SYS\_ICACHE\_OFF) && defined(CONFIG\_SYS\_DCACHE\_OFF))

phys\_addr\_t ram\_top = CONFIG\_SYS\_SDRAM\_BASE;

dram\_init\_banksize();

/\* reserve TLB table \*/

gd->arch.tlb\_size = PGTABLE\_SIZE;

ram\_top += get\_effective\_memsize();

/\* keep ram\_top in the 32-bit address space \*/

if (ram\_top >= 0x100000000)

ram\_top = (phys\_addr\_t) 0x100000000;

gd->arch.tlb\_addr = ram\_top - gd->arch.tlb\_size;

debug("TLB table from %08lx to %08lx\n", gd->arch.tlb\_addr,

gd->arch.tlb\_addr + gd->arch.tlb\_size);

dcache\_enable();

#endif

}

内存设置了两个bank， 第一个bank起始位置在0x80000000， 大小为2G。第二个bank起始位置在0x880000000，大小以为2G。总共内存大小4G。正好跟硬件手册上描述一下，bank[0]供32bit应用使用。Bank[1]只能是64bit应用使用。如果我们需要增加或减小内存的量，这个函数必须要修改。

为TLB table保留地址，arm64使用get\_page\_table\_size函数得到。

我们K3的memory size是0x100000000，所以tlb\_addr就在2G memory顶端处， 示意如下：

+----------+ 0xffffffff

+ +

+ +

+ +

+ +

+ +

+ +

+ +

+ +

+----------+ 0xfffff000 (gd->arch.tlb\_addr)

打开dcache支持。

执行完board\_init\_f后，继续回到crt0\_64.s

接下来执行spl\_relocate\_stack\_gd

ulong spl\_relocate\_stack\_gd(void)

{

#ifdef CONFIG\_SPL\_STACK\_R

gd\_t \*new\_gd;

ulong ptr = CONFIG\_SPL\_STACK\_R\_ADDR;

#if defined(CONFIG\_SPL\_SYS\_MALLOC\_SIMPLE) && CONFIG\_VAL(SYS\_MALLOC\_F\_LEN)

if (CONFIG\_SPL\_STACK\_R\_MALLOC\_SIMPLE\_LEN) {

ptr -= CONFIG\_SPL\_STACK\_R\_MALLOC\_SIMPLE\_LEN;

gd->malloc\_base = ptr;

gd->malloc\_limit = CONFIG\_SPL\_STACK\_R\_MALLOC\_SIMPLE\_LEN;

gd->malloc\_ptr = 0;

}

#endif

/\* Get stack position: use 8-byte alignment for ABI compliance \*/

ptr = CONFIG\_SPL\_STACK\_R\_ADDR - roundup(sizeof(gd\_t),16);

new\_gd = (gd\_t \*)ptr;

memcpy(new\_gd, (void \*)gd, sizeof(gd\_t));

#if CONFIG\_IS\_ENABLED(DM)

dm\_fixup\_for\_gd\_move(new\_gd);

#endif

return ptr;

#endif

}

这个函数为gd分配一个新的地址CONFIG\_SPL\_STACK\_R\_ADDR（0x82000000）。

为malloc分配0x100000的大小。接下来就是new gd的空间。

+----------+ 0x82000000

+ +

+ +

+----------+ 0x81fffe70 (new\_gd)

+ +

+ +

+----------+ 0x81f00000

前文说过sdram的地址就是0x80a00000，大小为512K

把新的new\_gd地址保存在x18中，然后清空BSS段。BSS段在0x80a00000的位置。

.bss\_start (NOLOAD) : {

. = ALIGN(8);

KEEP(\*(.\_\_bss\_start));

} >.sdram

.bss (NOLOAD) : {

\*(.bss\*)

. = ALIGN(8);

} >.sdram

.bss\_end (NOLOAD) : {

KEEP(\*(.\_\_bss\_end));

} >.sdram

+----------+ 0x82000000

+ +

+ +

+----------+ 0x81fffe70 (new\_gd)

+ +

+ +

+----------+ 0x81f00000

+ +

+ + 0x80a00880 (BSS end)

+ +

+----------+ 0x80a00000 (BSS)

调用board\_init\_r(common/spl.c)。

在board\_init\_r里面会通过spl\_boot\_device取得启动设备，K3 u-boot在MMC上，就返回BOOT\_DEVICE\_MMC1。

spl在board\_init\_f已经初始化了dm。这里就能够使用驱动了。在boot\_from\_devices里面：会使用已经声明在.uboot\_list\_2\_段的驱动。如果从MMC设备找镜像，那就使用spl\_mmc.c下面的spl\_mmc\_load\_image。

MMC镜像存储方式：

+----------+ 0x0 - tiboot3.bin

+ +

+ +

+----------+ 0x400 – tispl.bin

+ +

+ +

+----------+ 0x1400 – u-boot.img

+ +

+ +

+----------+ 0x3600 – ?

Board\_init\_r把u-boot镜像复制到0x80800000的位置，然后跳转到u-boot镜像。

u-boot spl结束。

U-boot阶段：

+----------+ 0x82000000

+ +

+ +

+----------+ 0x81fffe70 (new\_gd, assume gd size is 0x188)

+ +

+ +

+ + 0x80a00880 (spl BSS end)

+ +

+----------+ 0x80a00000 (spl BSS)

+ + \

+ + 2M memory spaces

+ + /

+----------+ 0x80800000 (U-boot)

这是U-boot在K3起来时的内存镜像。

spl已经结束，此时u-boot从0x80800000处开始运行。

又来到熟悉的start.s文件。这个阶段已经是完全体的u-boot了。

u-boot启动后加载.vectors中断向量表，arch/arm/cpu/armv8/exceptions.s。然后根据arm的运行级别（EL0,1,2,3）设置到相应的中断处理例程set\_vbar vbar\_el2, x0。

bl apply\_core\_errata 为core打入勘误表。

bl lowlevel\_init跟spl一样，什么都不干。

跳转到\_main，流程跟spl一样，同样这个时候堆栈其实也一样。

+----------+ 0x80100000

+ +

+ +

+ +

+ +

+ +

+ +

+ +

+ +

+----------+0x800F8000 (malloc\_base)

+ + \

+ + the content of gd

+ + /

+----------+0x800F7E70 (gd, stack top)

接下来要处理的就是u-boot的重头戏board\_init\_f以及board\_init\_r两个函数，为最后把控制权交给Linux kernel做准备。这时候的board\_init\_f是位于board\_f.c下面。

跳转过来的时候boot\_flags设置为0。故gd->flags=0。

void board\_init\_f(ulong boot\_flags)

{

gd->flags = boot\_flags;

gd->have\_console = 0;

if (initcall\_run\_list(init\_sequence\_f))

hang();

}

接下来就是执行init\_sequence\_f定义的函数。

static int setup\_mon\_len(void)

{

gd->mon\_len = (ulong)&\_\_bss\_end - (ulong)\_start;

return 0;

}

依编译结果：gd->mon\_len值为: 0xfaee8，1M不到。

int fdtdec\_setup(void)

{

int ret;

gd->fdt\_blob = board\_fdt\_blob\_setup(); -> fdt\_blob = (ulong \*)&\_end;

ret = fdtdec\_prepare\_fdt();

if (!ret)

ret = fdtdec\_board\_setup(gd->fdt\_blob);

return ret;

}

fdtdec\_setup跟spl处理一样，最终gd->fdt\_blob记录dt的地址。唯一的不同是这里的dt是从u-boot镜像\_end处得到的。

initf\_malloc设置malloc的长度。

arch\_cpu\_init 弱函数类型，直接return

mach\_cpu\_init 跟arch\_cpu\_init一样

initf\_dm 初始化驱动，跟spl阶段一样。

arch\_cpu\_init\_dm 弱函数，直接return。

timer\_init 弱函数，直接return。

env\_init 查找ENV的驱动，由U\_BOOT\_ENV\_LOCATION声明，同样定义在.uboot\_list\_2\_段。

env\_driver\_lookup查找驱动，K3在MMC上由CONFIG\_ENV\_IS\_IN\_MMC=y得到，

int env\_init(void)

{

struct env\_driver \*drv;

int ret = -ENOENT;

int prio;

for (prio = 0; (drv = env\_driver\_lookup(ENVOP\_INIT, prio)); prio++) {

if (!drv->init || !(ret = drv->init()))

env\_set\_inited(drv->location);

if (ret == -ENOENT)

env\_set\_inited(drv->location);

debug("%s: Environment %s init done (ret=%d)\n", \_\_func\_\_,

drv->name, ret);

}

if (!prio)

return -ENODEV;

if (ret == -ENOENT) {

gd->env\_addr = (ulong)&default\_environment[0];

gd->env\_valid = ENV\_VALID;

return 0;

}

return ret;

}

最后设置gd->env\_addr的地址为default\_environment

U\_BOOT\_ENV\_LOCATION(mmc) = {

.location = ENVL\_MMC,

ENV\_NAME("MMC")

.load = env\_mmc\_load,

#ifndef CONFIG\_SPL\_BUILD

.save = env\_save\_ptr(env\_mmc\_save),

#if defined(CONFIG\_CMD\_ERASEENV)

.erase = env\_mmc\_erase,

#endif

#endif

};

init\_baud\_rate 设置串口波特率，K3为115200，gd->baudrate

serial\_init 初始化串口。

console\_init\_f console初始化，gd->have\_console为1，因为K3没有定义PRE\_CONSOLE\_BUFFER，所以这里不输出buffer。

display\_text\_info 输出text\_base, bss\_start, bss\_end信息。text\_base 0x80800000。根据编译信息bss\_start: 0x808edec0, bss\_end: 0x808faee8。

print\_resetinfo

print\_cpuinfo

show\_board\_info, 打印reset，cpu，board的信息，不做具体深入分析。

K3 uboot没有定义看门狗？？？

K3有DM\_I2C，不执行init\_func\_i2c

很明显ram\_size是4G，K3硬件手册也是定义为4G。要更改内存，这个地方也是需要修改。

int dram\_init(void)

{

#ifdef CONFIG\_PHYS\_64BIT

gd->ram\_size = 0x100000000;

#else

gd->ram\_size = 0x80000000;

#endif

return 0;

}

setup\_dest\_addr

static int setup\_dest\_addr(void)

{

debug("Monitor len: %08lX\n", gd->mon\_len);

debug("Ram size: %08lX\n", (ulong)gd->ram\_size);

#ifdef CONFIG\_SYS\_SDRAM\_BASE

gd->ram\_base = CONFIG\_SYS\_SDRAM\_BASE;

#endif

gd->ram\_top = gd->ram\_base + get\_effective\_memsize();

gd->ram\_top = board\_get\_usable\_ram\_top(gd->mon\_len);

gd->relocaddr = gd->ram\_top;

debug("Ram top: %08lX\n", (ulong)gd->ram\_top);

return 0;

}

gd->ram\_base为0x80000000，经过计算后gd->ram\_top=0x100000000。刚好是4G DDR内存的最高位，但是我们base在0x80000000，所以严格意义上来说就是低2G内存的最高处。同时gd->relocaddr也在这个位置，这个地址是后面重新分配空间所需要用到。

reserve\_round\_4k 保留最高4K的地址，这里操作的是relocaddr，ram\_top值并没有改变。

+----------+ 0xffffffff

+ +

+ +

arm\_reserve\_mmu 设置MMU TLB表空间，假如大小为65536.

\_\_weak int arm\_reserve\_mmu(void)

{

gd->arch.tlb\_size = PGTABLE\_SIZE;

gd->relocaddr -= gd->arch.tlb\_size;

gd->relocaddr &= ~(0x10000 - 1);

gd->arch.tlb\_addr = gd->relocaddr;

return 0;

}

gd->relocaddr=0xfffe0000。

+----------+ 0xffffffff

+ +

+ +

+ +

+----------+ 0Xfffe0000 (gd->arch.tlb\_addr)

reserve\_uboot 给ubootreserve空间。

+----------+ 0xffffffff

+ +

+----------+

+ +

+----------+ 0xfffe0000 (gd->arch.tlb\_addr)

+ + \

+ + reserve to u-boot

+ + /

+----------+

+ + 4K reserve

+----------+ 0xffee5000 gd->start\_addr\_sp gd->relocaddr

继续下面reserve\_malloc， reserve\_board：

+----------+ 0xffffffff

+ +

+----------+

+ +

+----------+ 0xfffe0000 (gd->arch.tlb\_addr)

+ + \

+ + reserve to u-boot

+ + /

+----------+

+ + 4K reserve

+----------+ 0xffee5000

+ + malloc len

+----------+ 0xfdee5000

+ + bdinfo

+----------+ 0xfdee4f60 gd->start\_addr\_sp

reserve\_global\_data: 这里重新分配gd的空间。

static int reserve\_global\_data(void)

{

gd->start\_addr\_sp = reserve\_stack\_aligned(sizeof(gd\_t));

gd->new\_gd = (gd\_t \*)map\_sysmem(gd->start\_addr\_sp, sizeof(gd\_t));

debug("Reserving %zu Bytes for Global Data at: %08lx\n",

sizeof(gd\_t), gd->start\_addr\_sp);

return 0;

}

+----------+ 0xffffffff

+ +

+----------+

+ +

+----------+ 0xfffe0000 (gd->arch.tlb\_addr)

+ + \

+ + reserve to uboot

+ + /

+----------+

+ + 4K reserve

+----------+ 0xffee5000

+ + malloc len

+----------+ 0xfdee5000

+ + bdinfo

+----------+ 0xfdee4f60

+ + gd->new\_gd

+----------+ 0xfdee4dd0 gd->start\_addr\_sp

reserve\_fdt:

+----------+ 0xffffffff

+ +

+----------+

+ +

+----------+ 0xfffe0000 (gd->arch.tlb\_addr)

+ + \

+ + reserve to uboot

+ + /

+----------+

+ + 4K reserve

+----------+ 0xffee5000

+ + malloc len

+----------+ 0xfdee5000

+ + bdinfo

+----------+ 0xfdee4f60

+ + gd->new\_gd

+----------+ 0xfdee4dd0

+ + gd->new\_fdt

+----------+ gd->start\_addr\_sp

reserve\_stacks后：

+----------+ 0xffffffff

+ +

+----------+

+ +

+----------+ 0xfffe0000 (gd->arch.tlb\_addr)

+ + \

+ + BSS size

+ + /

+----------+

+ + 4K reserve

+----------+ 0xffee5118

+ + malloc len

+----------+

+ + bdinfo

+----------+

+ +

+----------+ gd->new\_gd

+ +

+----------+ gd->new\_fdt

+----------+ reserve 16 bytes gd->start\_addr\_sp (gd->irq\_sp)

这里设置了中断的堆栈。

dram\_init\_banksize

K3有两个bank。从0x80000000地址开始，大小2G，和0x880000000地址开始，大小2G

int dram\_init\_banksize(void)

{

gd->bd->bi\_dram[0].start = CONFIG\_SYS\_SDRAM\_BASE;

gd->bd->bi\_dram[0].size = 0x80000000;

gd->ram\_size = 0x80000000;

#ifdef CONFIG\_PHYS\_64BIT

/\* Bank 1 declares the memory available in the DDR high region \*/

gd->bd->bi\_dram[1].start = CONFIG\_SYS\_SDRAM\_BASE1;

gd->bd->bi\_dram[1].size = 0x80000000;

gd->ram\_size = 0x100000000;

#endif

return 0;

}

reloc\_fdt: 把fdt拷贝到new\_fdt的地址上面。

setup\_reloc： 这里计算u-boot到relocaddr的偏移，这里使用的是\_\_image\_copy\_start。这个值就是0x80800000。

计算结果保存到gd->reloc\_off。拷贝gd的内容到gd->new\_gd，图上的位置。

至此board\_init\_f执行完毕，回到crt0\_64.s下面。

#if !defined(CONFIG\_SPL\_BUILD)

ldr x0, [x18, #GD\_START\_ADDR\_SP] /\* x0 <- gd->start\_addr\_sp \*/

bic sp, x0, #0xf /\* 16-byte alignment for ABI compliance \*/

ldr x18, [x18, #GD\_NEW\_GD] /\* x18 <- gd->new\_gd \*/

adr lr, relocation\_return

ldr x9, [x18, #GD\_RELOC\_OFF] /\* x9 <- gd->reloc\_off \*/

add lr, lr, x9 /\* new return address after relocation \*/

ldr x0, [x18, #GD\_RELOCADDR] /\* x0 <- gd->relocaddr \*/

b relocate\_code

relocation\_return:

bl c\_runtime\_cpu\_setup /\* still call old routine \*/

#endif

这段汇编主要是把gd->start\_addr\_sp地址赋值给x0，前面说过这个地址也是中断堆栈的地址。把这个地址按16字节对齐后送入sp。设置new gd的地址给x18。

记录退回地址。前面计算的偏移量保存到x9。relocaddr送给x0。调用relocate\_code。

relocate\_code主要把u-boot整个镜像拷贝到relocaddr处：

+----------+ 0xffffffff

+ +

+----------+

+ +

+----------+ 0xfffe0000 (gd->arch.tlb\_addr)

+ + \

+ + u-boot

+ + /

+----------+

+ + 4K reserve

+----------+ 0xffee5118

+ + malloc len

+----------+

+ + bdinfo

+----------+

+ + gd->new\_gd

+----------+

+ + reserve 16 bytes

+----------+ gd->start\_addr\_sp (gd->irq\_sp)

最后清零bss段，准备board\_init\_r的两个参数gd和relocaddr。调用u-boot生命里面最后一个函数：

board\_init\_r，这个函数永远不会返回。成功后就开始运行kernel，不成功整个K3板子就此陷入死循环。

函数主要按顺序执行在init\_sequence\_r里面所定义的函数。

initr\_caches打开ICACHE和DCACHE支持。

static int initr\_reloc(void)

{

/\* tell others: relocation done \*/

gd->flags |= GD\_FLG\_RELOC | GD\_FLG\_FULL\_MALLOC\_INIT;

return 0;

}

static int initr\_caches(void)

{

/\* Enable caches \*/

enable\_caches();

return 0;

}

initr\_reloc\_global\_data这个函数主要是对一些全局变量的地址进行重新计算，因为前面u-boot已经搬过一次家了，所以这些地址就要加上reloc\_off。把gd的地址赋值给efi\_gd，配置\_\_efi\_runtime\_rel\_start段的地址。

initr\_malloc 分配malloc的空间。32M的空间，起始地址为0xfdee5000。

initr\_dm 驱动初始化。

efi\_memory\_init 给EFI内存初始化，不做具体深入，这是EFI boot需要用到，最终就是带起Linux kernel

接下来比较有趣的是我们要支持PCI/MMC？那么就相应地调用initr\_pci, initr\_mmc等特有的驱动函数。

initr\_env 这里比较重要的一点就是会增加fdtcontroladdr字段到dt，然后从环境变量里面读出loadaddr的值放到image\_load\_addr。这个地址是为了把操作系统镜像加载到内存的地方，注意只是加载，并不是说从这个地址开始执行。K3里面是0x82000000。

interrupt\_init，这个函数主要是为了设置中断堆栈：

int interrupt\_init(void)

{

IRQ\_STACK\_START\_IN = gd->irq\_sp + 8;

enable\_interrupts();

return 0;

}

IRQ\_STACK\_START\_IN设置为gd->irq\_sp这个地址，前面说了在0xfdee4dd0-fdt\_size-16处。

取得ethaddr，设置到bd（board infor）的bi\_enetaddr字段。

static int initr\_ethaddr(void)

{

struct bd\_info \*bd = gd->bd;

eth\_env\_get\_enetaddr("ethaddr", bd->bi\_enetaddr);

return 0;

}

余下一些函数并不是太重要，就不一一展开。执行完后就会跳到run\_main\_loop函数。

这是一个大循环函数，里面接受用户输入命令或执行已经定义命令。

K3定义的命令是

run findfdt; run envboot; run init\_${boot}; run boot\_rprocs; run get\_kern\_${boot}; run get\_fdt\_${boot}; run get\_overlay\_${boot}; run run\_kern

void main\_loop(void)

{

const char \*s;

bootstage\_mark\_name(BOOTSTAGE\_ID\_MAIN\_LOOP, "main\_loop");

if (IS\_ENABLED(CONFIG\_VERSION\_VARIABLE))

env\_set("ver", version\_string); /\* set version variable \*/

cli\_init();

if (IS\_ENABLED(CONFIG\_USE\_PREBOOT))

run\_preboot\_environment\_command();

if (IS\_ENABLED(CONFIG\_UPDATE\_TFTP))

update\_tftp(0UL, NULL, NULL);

s = bootdelay\_process();

if (cli\_process\_fdt(&s))

cli\_secure\_boot\_cmd(s);

autoboot\_command(s);

cli\_loop();

panic("No CLI available");

}

可以看到首先执行的是autoboot\_command。如果没有才会进入命令行，接受用户的输入。

首先拿到bootdelay，也就是u-boot启动kernel的时候有个倒计时，就是这个值。这个值如果在dt中定义了，那就优先使用dt里面的。

const char \*bootdelay\_process(void)

{

char \*s;

int bootdelay;

bootcount\_inc();

s = env\_get("bootdelay");

bootdelay = s ? (int)simple\_strtol(s, NULL, 10) : CONFIG\_BOOTDELAY;

if (IS\_ENABLED(CONFIG\_OF\_CONTROL))

bootdelay = fdtdec\_get\_config\_int(gd->fdt\_blob, "bootdelay",

bootdelay);

debug("### main\_loop entered: bootdelay=%d\n\n", bootdelay);

if (IS\_ENABLED(CONFIG\_AUTOBOOT\_MENU\_SHOW))

bootdelay = menu\_show(bootdelay);

bootretry\_init\_cmd\_timeout();

#ifdef CONFIG\_POST

if (gd->flags & GD\_FLG\_POSTFAIL) {

s = env\_get("failbootcmd");

} else

#endif /\* CONFIG\_POST \*/

if (bootcount\_error())

s = env\_get("altbootcmd");

else

s = env\_get("bootcmd");

if (IS\_ENABLED(CONFIG\_OF\_CONTROL))

process\_fdt\_options(gd->fdt\_blob);

stored\_bootdelay = bootdelay;

return s;

}

从环境变量中拿出bootcmd。位autoboot\_command函数做准备。

Command：

第一条命令是run findfdt

定义是：setenv name\_fdt k3-am654-base-board.dtb; setenv fdtfile ${name\_fdt}，简明说设置fdtfile的名字为k3-am654-base-board.dtb

run envboot：从MMC加载uEnv.txt文件。执行uenvcmd。

run init\_mmc：setenv optargs earlycon=ns16550a,mmio32,0x02800000 ${mtdparts} 设置optargs环境变量。其中mtdparts为mtdparts=47040000.spi.0:512k(ospi.tiboot3),2m(ospi.tispl),4m(ospi.u-boot),128k(ospi.env),128k(ospi.env.backup),1m(ospi.sysfw),57216k@8m(ospi.rootfs),128k(ospi.phypattern)，这里基本上可以看出MMC的格式分布。

run boot\_rprocs：如果有am65x-mcu-r5f0\_[0|1]-fw，就执行他。

run get\_kern\_mmc：展开命令就是load mmc 1:2 0x82000000 boot/Image，从MMC1中第2个分区中的/boot目录下，找到Image。加载到0x82000000。

run get\_fdt\_mmc：同get\_kern\_mmc，把fdt加载到0x88000000的地址。

run get\_overlay\_mmc：把fdt的地址扩大到0x100000大小。加载其他dtb或dtbo文件。

最后运行run\_kern，即booti ${loadaddr} ${rd\_spec} ${fdtaddr}，这条命令还会加载rootfs。

我们来看booti，这是由U\_BOOT\_CMD宏定义声明的。

这个函数就是为了启动Image进行最后的处理。

static int booti\_start(struct cmd\_tbl \*cmdtp, int flag, int argc,

char \*const argv[], bootm\_headers\_t \*images)

ret = do\_bootm\_states(cmdtp, flag, argc, argv, BOOTM\_STATE\_START,

images, 1);

int do\_booti(struct cmd\_tbl \*cmdtp, int flag, int argc, char \*const argv[])

{

int ret;

/\* Consume 'booti' \*/

argc--; argv++;

if (booti\_start(cmdtp, flag, argc, argv, &images))

return 1;

/\*

\* We are doing the BOOTM\_STATE\_LOADOS state ourselves, so must

\* disable interrupts ourselves

\*/

bootm\_disable\_interrupts();

images.os.os = IH\_OS\_LINUX;

images.os.arch = IH\_ARCH\_ARM64;

ret = do\_bootm\_states(cmdtp, flag, argc, argv,

BOOTM\_STATE\_RAMDISK |

BOOTM\_STATE\_OS\_PREP | BOOTM\_STATE\_OS\_FAKE\_GO |

BOOTM\_STATE\_OS\_GO,

&images, 1);

return ret;

}

这里会调用do\_bootm\_states函数，我们来看下这个函数，因为给出的参数是BOOTM\_STATE\_START，所以执行bootm\_start：

首先清空images这个image header结构体。然后初始化逻辑内存块（lmb）。lmb主要是根据bootm\_low和bootm\_size来设置。其中K3的bootm\_size是256M。退出后执行booti\_setup

ret = booti\_setup(ld, &relocated\_addr, &image\_size, false);

if (ret != 0)

return 1;

static int bootm\_start(struct cmd\_tbl \*cmdtp, int flag, int argc,

char \*const argv[])

{

memset((void \*)&images, 0, sizeof(images));

images.verify = env\_get\_yesno("verify");

boot\_start\_lmb(&images);

bootstage\_mark\_name(BOOTSTAGE\_ID\_BOOTM\_START, "bootm\_start");

images.state = BOOTM\_STATE\_START;

return 0;

}

ld是kernel加载的地址即0x82000000。这里涉及到Image的头部结构体：

struct Image\_header {

uint32\_t code0; /\* Executable code \*/

uint32\_t code1; /\* Executable code \*/

uint64\_t text\_offset; /\* Image load offset, LE \*/

uint64\_t image\_size; /\* Effective Image size, LE \*/

uint64\_t flags; /\* Kernel flags, LE \*/

uint64\_t res2; /\* reserved \*/

uint64\_t res3; /\* reserved \*/

uint64\_t res4; /\* reserved \*/

uint32\_t magic; /\* Magic number \*/

uint32\_t res5;

};

maigc是一个魔术数即：ARM64。我们来看一下kernel Image的内容：

0000000 4d 5a 00 91 ff 3f 3d 14 00 00 00 00 00 00 00 00

0000010 00 00 37 01 00 00 00 00 0e 00 00 00 00 00 00 00

0000020 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00

0000030 00 00 00 00 00 00 00 00 41 52 4d 64 40 00 00 00

注意这是LE的格式，所以：

Code0: 91005a4d

Code1: 143d3fff

Text\_offset: 0

Image\_size: 01370000

Flag: e

Res2,res3,res4: 0

Magic: 644d5241 -> 41 ‘A’ 52 ‘R’ 4D ‘M’ 64

这里注意了：如果image\_size为0的话，那么默认的text\_offset就是0x80000，也就是arm众所周知的加载地址。

Flag： e->1110，表示，bit0：kernel字节序，0 – LE， 1 – BE

Bit1-bit2: 内核pagesize

0 未指定

1 – 4k

2 – 16k

3 – 64k

Bit3：内核地址

0 – 2M对齐地址，应尽量在RAM的底部

1 – 2M对其地址，可以放在任何物理地址处。

Bit4-63： 保留

那么K3默认编译的内核就是小端编码，64K页大小，地址没有特别指定。

K3的text\_offset为0，所以计算得出的relocated\_addr就是ld的地址：0x82000000。Image\_size为0x1370000。从Image里面就可以看出: 1370000 B init\_pg\_end，最后一个符号地址就是1370000。

images->ep = relocated\_addr;

images->os.start = relocated\_addr;

images->os.end = relocated\_addr + image\_size;

lmb\_reserve(&images->lmb, images->ep, le32\_to\_cpu(image\_size));

if (bootm\_find\_images(flag, argc, argv, relocated\_addr, image\_size))

return 1;

如果重新映射地址跟加载地址不一样，那么把镜像拷贝到新的映射地址。一样则确定ep，entry point，入口地址。Reserve LMB内存。

从代码分析得知K3并没有移动kernel镜像。所以入口还是0x82000000，但是链接kernel时我们的地址是0x10000000。那如何才能让内核运行呢？等分析kernel的时候会提到这部分内容。

bootm\_find\_images，简单分析一下：

int bootm\_find\_images(int flag, int argc, char \*const argv[], ulong start,

ulong size)

{

int ret;

ret = boot\_get\_ramdisk(argc, argv, &images, IH\_INITRD\_ARCH,

&images.rd\_start, &images.rd\_end);

if (ret) {

puts("Ramdisk image is corrupt or invalid\n");

return 1;

}

if (images.rd\_start && (((ulong)images.rd\_start >= start &&

(ulong)images.rd\_start < start + size) ||

((ulong)images.rd\_end > start &&

(ulong)images.rd\_end <= start + size) ||

((ulong)images.rd\_start < start &&

(ulong)images.rd\_end >= start + size))) {

printf("ERROR: RD image overlaps OS image (OS=0x%lx..0x%lx)\n",

start, start + size);

return 1;

}

#if IMAGE\_ENABLE\_OF\_LIBFDT

ret = boot\_get\_fdt(flag, argc, argv, IH\_ARCH\_DEFAULT, &images,

&images.ft\_addr, &images.ft\_len);

if (ret) {

puts("Could not find a valid device tree\n");

return 1;

}

if (images.ft\_addr &&

(((ulong)images.ft\_addr >= start &&

(ulong)images.ft\_addr <= start + size) ||

((ulong)images.ft\_addr + images.ft\_len >= start &&

(ulong)images.ft\_addr + images.ft\_len <= start + size))) {

printf("ERROR: FDT image overlaps OS image (OS=0x%lx..0x%lx)\n",

start, start + size);

return 1;

}

if (CONFIG\_IS\_ENABLED(CMD\_FDT))

set\_working\_fdt\_addr(map\_to\_sysmem(images.ft\_addr));

#endif

#if IMAGE\_ENABLE\_FIT

/\* find all of the loadables \*/

ret = boot\_get\_loadable(argc, argv, &images, IH\_ARCH\_DEFAULT,

NULL, NULL);

if (ret) {

printf("Loadable(s) is corrupt or invalid\n");

return 1;

}

#endif

return 0;

}

首先取得ramdisk的镜像，也就是我们的rootfs。但是在K3的运行脚本里面rd\_spec是“-”，在

if (select && strcmp (select, “-“) == 0)这行判断成功，跳过ramdisk的初始化，ramdisk的加载在do\_bootm\_state里面处理。

如果rd\_spec不是“-”，则Loading ramdisk到指定的地址。

检查fdt是否加载，是否有提供加载地址，如果fit本身指定了加载地址，则拷贝到指定地址。检查是否跟OS image地址重叠。

设置fdtaddr环境变量。

如果上面都没有发生问题，实际上也不会有问题。那么接下来关闭所有中断bootm\_disable\_interrupts()。因为接下来是要启动内核了，是个相当神圣的时候，不容许任何外部的干扰，哪怕总统来了也不行。

images.os.os = IH\_OS\_LINUX;

images.os.arch = IH\_ARCH\_ARM64;

ret = do\_bootm\_states(cmdtp, flag, argc, argv,

BOOTM\_STATE\_RAMDISK |

BOOTM\_STATE\_OS\_PREP | BOOTM\_STATE\_OS\_FAKE\_GO |

BOOTM\_STATE\_OS\_GO,

&images, 1);

state是一个组合，前面do\_bootm\_states已经处理过BOOTM\_STATE\_START了。现在先进行处理的是：BOOTM\_STATE\_RAMDISK（按顺序来）

K3似乎没有rootfs，所以这里也不会去处理。

boot\_fn = bootm\_os\_get\_boot\_func(images->os.os);

#ifdef CONFIG\_SYS\_BOOT\_RAMDISK\_HIGH

if (!ret && (states & BOOTM\_STATE\_RAMDISK)) {

ulong rd\_len = images->rd\_end - images->rd\_start;

ret = boot\_ramdisk\_high(&images->lmb, images->rd\_start,

rd\_len, &images->initrd\_start, &images->initrd\_end);

if (!ret) {

env\_set\_hex("initrd\_start", images->initrd\_start);

env\_set\_hex("initrd\_end", images->initrd\_end);

}

}

#endif

取得启动kernel的函数，该函数由boot\_os函数数组指定，我们需要Linux的启动函数：

static boot\_os\_fn \*boot\_os[] = {

#ifdef CONFIG\_BOOTM\_LINUX

[IH\_OS\_LINUX] = do\_bootm\_linux,

#endif

};

前面已经指定了image.os.os为IH\_OS\_LINUX。这个得到do\_bootm\_linux

然后执行do\_bootm\_linux (BOOTM\_STATE\_OS\_PREP, argc, argv, images)-> boot\_prep\_linux(images);

这个函数相当重要。需要详细讲一下：

进入函数后实际上我们执行的是image.c下面的image\_setup\_linux函数。

image\_setup\_linux

|- boot\_fdt\_add\_mem\_rsv\_regions

|- boot\_relocate\_fdt

|- image\_setup\_libfdt

这三个函数最重要的是最后一个函数，前面两个简单来讲就是为了给dtb文件分配空间，搬移到新的空间。

限于篇幅，就不再深入了。我们重点讲下第三个函数image\_setup\_libfdt

fdt\_root

int image\_setup\_libfdt(bootm\_headers\_t \*images, void \*blob,

int of\_size, struct lmb \*lmb)

{

ulong \*initrd\_start = &images->initrd\_start;

ulong \*initrd\_end = &images->initrd\_end;

int ret = -EPERM;

int fdt\_ret;

if (fdt\_root(blob) < 0) {

printf("ERROR: root node setup failed\n");

goto err;

}

if (fdt\_chosen(blob) < 0) {

printf("ERROR: /chosen node create failed\n");

goto err;

}

if (arch\_fixup\_fdt(blob) < 0) {

printf("ERROR: arch-specific fdt fixup failed\n");

goto err;

}

fdt\_ret = optee\_copy\_fdt\_nodes(gd->fdt\_blob, blob);

if (fdt\_ret) {

printf("ERROR: transfer of optee nodes to new fdt failed: %s\n",

fdt\_strerror(fdt\_ret));

goto err;

}

fdt\_fixup\_ethernet(blob);

if (IMAGE\_OF\_BOARD\_SETUP) {

fdt\_ret = ft\_board\_setup(blob, gd->bd);

if (fdt\_ret) {

printf("ERROR: board-specific fdt fixup failed: %s\n",

fdt\_strerror(fdt\_ret));

goto err;

}

}

if (lmb)

lmb\_free(lmb, (phys\_addr\_t)(u32)(uintptr\_t)blob,

(phys\_size\_t)fdt\_totalsize(blob));

ret = fdt\_shrink\_to\_minimum(blob, 0);

if (ret < 0)

goto err;

of\_size = ret;

if (\*initrd\_start && \*initrd\_end) {

of\_size += FDT\_RAMDISK\_OVERHEAD;

fdt\_set\_totalsize(blob, of\_size);

}

if (lmb)

lmb\_reserve(lmb, (ulong)blob, of\_size);

fdt\_initrd(blob, \*initrd\_start, \*initrd\_end);

if (!ft\_verify\_fdt(blob))

goto err;

return 0;

err:

printf(" - must RESET the board to recover.\n\n");

return ret;

}

检查dtb头部是否正确，然后从环境变量读出serial#的值，写入dtb的serial\_number字段即串口号。

fdt\_chosen

这个函数比较有趣，我们来分析一下：

看了这个函数是不是觉得有种很熟悉的感觉？ 对,这个函数很重要的作用就是给kernel传递启动参数。在ARM64（不仅仅在K3）启动参数是写在dtb的chosen段。值就是bootargs。没有这个函数的处理，如果在device tree文件里面指定也可以。这里主要为了方便临时添加kernel boot parameters，比如在u-boot命令中输入参数。

int fdt\_chosen(void \*fdt)

{

int nodeoffset;

int err;

char \*str; /\* used to set string properties \*/

err = fdt\_check\_header(fdt);

if (err < 0) {

printf("fdt\_chosen: %s\n", fdt\_strerror(err));

return err;

}

nodeoffset = fdt\_find\_or\_add\_subnode(fdt, 0, "chosen");

if (nodeoffset < 0)

return nodeoffset;

str = env\_get("bootargs");

if (str) {

err = fdt\_setprop(fdt, nodeoffset, "bootargs", str,

strlen(str) + 1);

if (err < 0) {

printf("WARNING: could not set bootargs %s.\n",

fdt\_strerror(err));

return err;

}

}

return fdt\_fixup\_stdout(fdt, nodeoffset);

}

Kernel在early\_init\_dt\_scan\_chosen这里取出启动参数。

arch\_fixup\_fdt

这个函数最重要的就是把memory的信息写入dtb，上面我们分析过K3有两个bank。一个是0x80000000开始的2G，给32bit应用使用。 另一个是0x880000000开始的2G，只供64bit。Linux能够使用的内存信息就是从这个函数给出的。

接下来的一些函数没有太多分析意义，除了fdt\_initrd

fdt\_initrd：把ramdisk的信息写入chosen字段，供Kernel启动后能够找到自己的rootfs。明显K3没有指定。

好了，啰嗦了这么久，终于准备工作都完成了。接下来就是关闭MMU,ICACHE,DCACHE，这是linux的硬性要求，不然kernel起来后地址就全乱了。

armv8\_switch\_to\_el2((u64)images->ft\_addr, 0, 0, 0,

images->ep,

ES\_TO\_AARCH64);

X0即第一个参数，必须是dtb的地址。前面说过EL2级别是OS kernel运行的，所以arm64只需切换运行级别即可。

然后，u-boot就把控制权交给了linux kernel。一个伟大的系统就开始运行了。

附录一：

ifeq ($(CONFIG\_ARM64\_RANDOMIZE\_TEXT\_OFFSET), y)

TEXT\_OFFSET := $(shell awk 'BEGIN {srand(); printf "0x%03x000\n", int(512 \* rand())}')

else

TEXT\_OFFSET := 0x00080000

endif