I.MX RT1020 如何在 IAR 中 Relocate 代码和数据到指定 RAM 区间

--Constyu@20180115

I.MXRT 是 NXP 推出的一款性价比很高的跨界处理器，可以让用户以 MCU 的开发方式和价格，实现接近 MPU 的处理性能。作为一款最大主频 600M 的 MCU，I.MXRT 与普通 MCU 在开发方式上基本一致，稍有区别处在于电源设计，Flash 存放以及内部 RAM 的配置，其中前两个点 NXP 官网有很多文档介绍，本文档基于 RT1020 芯片就第三个点展开讨论。

I.MXRT1020 芯片的 RAM 空间分为四种类型：ITCM，DTCM，OCRAM 以及外部 SDRAM，其中前面三个属于芯片内部 RAM，合计 256K，支持用户静态分配，SDRAM 属于外置 RAM，最大支持到 1.5G 扩展空间。ITCM 和 DTCM 是直接挂在芯片内核总线，速度可以达到与内核同频的 528M，OCRAM 挂在 Sys AXI 64 位总线，速度只能到达 132M，外部 SDRAM 速度则可达到 266M，而同时 RT1020 内又有各 16K 的指令 cache 和数据 cache，用于提高代码在外部 Nor Flash 中 XIP 执行的效率。从速度的角度看，将所有的用户代码分配在 ITCM/DTCM，能够发挥到最大性能，从存储空间大小的角度看，代码存放在 SDRAM 或者外部 Flash 最简单，而从 USB/DMA 使用的角度来看，RAM 空间分配在 OCRAM 空间最为方便。所以这些不同 RAM 类型速度/大小的差异和 cache 的存在，就决定了要想让 RT1020 性能发挥到最大，就需要用户根据客户实际应用手动修改 RT1020 内部 RAM 空间中 ITCM/DTCM/OCRAM 的大小分配，并定位关键代码和数据到指定 RAM 空间中运行。

对于 RT 而言，在当前很多文档都会提到建议对执行速度有要求的代码或者数据分别存放在 ITCM 和 DTCM，如一些核心的处理算法，而对一些对速度要求不高的非关键代码，数据以及一些常量参数存储在 OCRAM，外部 SDRAM(如果有外扩 SDRAM 的话)或者内部 Flash 中(RT 支持外部 Nor Flash XIP)。但具体如何实现这个功能，却没有好的例子可供参考。因为这里面牵涉到 IAR 启动过程，ICF 文件的语法，RT 内部 RAM 空间分布以及启动流程，所以比较复杂，尤其是和 IAR 有关的前面两项，非常玄妙。本文结合一个具体应用，描述两种 RT 实际使用过程中如何灵活的 Reloacte 代码到不同的 RAM 空间，以最大程度的发挥 RT 的计算性能。

1. IAR 中通常 M0/M3/M4 Reloacte 代码到不同的 RAM 空间的方法和问题

通常 M0/M3/M4 Reloacte 代码到不同的 RAM 空间的方法有两种：一种是使用__ramfunc 关键词，一种是使用#pragama location 关键词，前者的缺点是需要针对每个需要定位到 RAM 的函数分别手动添加该关键词，步骤繁琐，不太适合有很多子函数层级调用的函数，并且无法指定代码到绝对地址段，使用起来不太方便。而后者则可以借助 #pragma default_variable_attributes 和 #pragma default_function_attributes 的方法实现对单个函数，连续多个函数，甚至整个文件.o 的 RAM 定向分配，但两种方式实际在 RT 上使用客户依然遇到各种各样的问题。(**注：**以下关于问题如果用户没有实际操作过这一点，可能会不知所云，可以直接跳过本节问题的描述，查看第 2 节的两种解决方法，照葫芦画瓢。)

问题 1: RT 的 RAM 类型比较多，不能直接使用__ramfunc 分配代码到不同 RAM 区域

对于 M0/M3/M4 而言，大部分芯片的存储区域只包含 Flash 和一种类型的 RAM(可能会分有几块，但速度没有差别)。默认代码存储在 Flash 中，如果需要 Reloacte 代码到 RAM 空间，只需要加一个关键词__ramfunc，代码便会编译到 RAM 空间。其实现原理是：__ramfunc 定义的函数在编译时会存放到.textrw_init 段(flash 地址)，对应的 RAM 空间存放在.textrw 段(RAM 地址)，IAR 代码启动后由__iar_program_start 函数自动从.textrw_init 段拷贝到.textrw 段，从而实现代码运行在 RAM 区间中。

但这种方式并不能完全适用于 RT，因为 M0/M3/M4 只有一种 RAM 类型，而 RT 包括三种 RAM 类型 ITCM/DTCM/OCRAM，甚至是 SDRAM，如果使用__ramfunc 只能指定代码到其中一种 RAM 类型，不够灵活。

```
        PUBWEAK Reset_Handler
        SECTION .text:CODE:REORDER:NOROOT(2)
Reset_Handler
        CPSID   I               ; Mask interrupts
        LDR     R0, =0xE000ED08
        LDR     R1, =__vector_table
        STR     R1, [R0]
        LDR     R2, [R1]
        MSR     MSP, R2
        LDR     R0, =SystemInit
        BLX     R0
        CPSIE   I               ; Unmask interrupts
        LDR     R0, =__iar_program_start
        BX      R0
```

问题 2：#pragama location= address+ICF 文件中定义存放 section 方法，会对定义中断 ISR 函数以及中断 ISR 中调用的#pragama location 函数无效。

按照 IAR 如下链接的方法，笔者做了在 M4 芯片和 RT 分别作了尝试，发现存在同样的问题，会在使用#pragama location="xxx section "定义中断 ISR 函数以及中断 ISR 中调用的#pragama location=定义的函数，使用时均无效，对变量的操作不影响。
https://www.iar.com/support/tech-notes/linker/how-do-i-place-a-group-of-functions-or-variables-in-a-specific-section/

以下两张截图是在中断 ISR 中调用的#pragama location=定义的函数的例子，第一张是 ICF 文件的修改，第二张是使用#pragama location=声明了一个 delay_ms 函数到 DTCM 的 RAM 区间，并在中断 ISR 函数 SysTick_Handler 中调用该函数。从右下角图可以看到 delay_ms 分配的地址 0x20000001 确实位于 DTCM 区域，但是下载时会出现 verify 错误，而且代码无法正常运行。而如果不在中断 ISR 函数 SysTick_Handler 中调用 delay_ms，而在 main 函数中调用，程序运行正常。

```
initialize by copy { readwrite, section .textrw, section CODE_IN_ITCM };
do not initialize  { section .noinit };

place at address mem: m interrupts start    { readonly section .intvec };

place at address mem:m boot hdr conf start { section .boot hdr.conf };
place at address mem:m boot hdr ivt start { section .boot hdr.ivt };
place at address mem:m boot hdr boot data start { readonly section .boot hdr.boot data };
place at address mem:m boot hdr dcd data start { readonly section .boot hdr.dcd data };

keep{ section .boot hdr.conf, section .boot hdr.ivt, section .boot hdr.boot data, section .boot hdr.dcd data };

place in DATA region                        { section CODE_IN_ITCM };
place in TEXT region                        { readonly };
place in DATA region                        { block RW };
```

```
#pragma location = "CODE_IN_ITCM"
void delay_ms(uint16_t ms)
{
  volatile uint16_t iii,jjj;
  for(iii=0;iii<ms; iii++)
  {
    for ( jjj=0;jjj<20000; jjj++)
    {    }
  }
}
void SysTick_Handler(void)
{
    if (g_systickCounter++>1000U)
    {
      g_systickCounter = 0;
      delay_ms(1);
      GPIO_PortToggle(GPIO1, 1<<5);
    }
}
```

```
520  boot data                  0x6000'1020   0x1
521  dcd data                   0x6000'4994   0x
522  delay_ms                   0x2000'0001   0x4
523  enetPllConfig BOARD_BootClockRUN
524                             0x6000'47a8   0x
```

```
9, 2019 15:32:34: Reset: Reset device via AIRCR.VECTRESET.
9, 2019 15:32:34: Hardware reset with strategy 1 was performed
9, 2019 15:32:35: 11357 bytes downloaded into FLASH and verified (7.17 Kbytes/sec)
9, 2019 15:32:35: Warning:
9, 2019 15:32:35: Verify error at address 0x20000000, target byte: 0x00, byte in file: 0x81
9, 2019 15:32:35: Warning:
9, 2019 15:32:35: Verify error at address 0x20000001, target byte: 0x65, byte in file: 0xB0
9, 2019 15:32:35: Warning:
9, 2019 15:32:35: Verify error at address 0x20000002, target byte: 0xCD, byte in file: 0x00
9, 2019 15:32:35: Warning:
9, 2019 15:32:35: Verify error at address 0x20000003, target byte: 0x1D, byte in file: 0x21
```

笔者在此问题上花了很多时间去分析原因，分别在 M4 芯片和 RT 分别作了尝试，发现存在同样的问题。总结下来根本原因在于 IAR startup 启动过程的链接保护机制，见如下截图。也就是说 IAR 提供了一种 Linker 机制，可以保护 startup 代码被 ICF 文件的'initialize by

copy'所影响，任何 startup 代码所涉及到的函数，包括__low_level_init 函数本身，startup 代码所调用的函数以及与 startup 代码放到同一个.c 文件的其他函数代码，都不会被'initialize by copy'自动搬移到用户定义的区间，只有在 copy 初始化完成后才被调用的代码才会被自动 copy 到 RAM 空间。结合到上面笔者遇到的问题，因为 SysTick_Handler 是在 startup 代码中定义的，这也就意味着 SysTick_Handler 函数本身和其调用的 delay_ms 都不会被自动 copy 到想要 Relocated 的 RAM 区间，需要用户自己去实现 startup 代码所调用的函数 copy 到 RAM 这一点，否则调用时就会出现上面提到的校验错误，导致程序运行出错。

Note A -- Linker protection of start up code

The linker protects sections that are referenced from the startup code from being affected by an 'initialize by copy' directive.

This includes

- __low_level_init and all functions called and/or defined in the same compilation unit (.c file)
- global (statically linked) C/C++ symbols

So the linker ensures that only code that runs after copy initialization has been finished will be copied to RAM. For this reason it is safe to add readonly in the
initialize by copy { readonly, readwrite }; command.
The linker log (option --log sections) is extended in IAR Embedded Workbench for ARM 6.10 with information of symbols marked as 'needed for init'.

同样的表述和提醒，在 IAR 的开发手册 EWARM_DevelopmentGuide.ENU.pdf 也有描述。

Running all code from RAM

If you want to copy the entire application from ROM to RAM at program startup, use the `initilize by copy` directive, for example:

```
initialize by copy { readonly, readwrite };
```

The `readwrite` pattern will match all statically initialized variables and arrange for them to be initialized at startup. The `readonly` pattern will do the same for all read-only code and data, except for code and data needed for the initialization.

Because the function `__low_level_init`, if present, is called before initialization, it and anything it needs, will not be copied from ROM to RAM either. In some circumstances—for example, if the ROM contents are no longer available to the program after startup—you might need to avoid using the same functions during startup and in the rest of the code.

回想一个问题，为何使用问题 1 中使用__ramfunc 定义的 delay_ms 函数同样也被 SysTick_Handler 函数调用过，运行正常的。原因在于，.textrw_init 和.textrw 对于 IAR 来说是 IAR 默认既定的 section 段，__ramfunc 定义的函数会被自动放在.textrw_init(拷贝源地址)和.textrw(拷贝目标地址) section 区域，然后在 init by copy 时拷贝到 RAM 区域。而#pragama location= 用户自定义 section 这种方式定义的函数在 flash 中的存储是随机的，IAR 只知道其要拷贝到的 RAM 目的地址，并不知道要从 Flash 的那个地址去拷贝，而且也不会去拷贝。

```
initialize by copy { readwrite, section .textrw, section CODE IN ITCM };
do not initialize  { section .noinit };
```

更近一步，既然 IAR 不会去拷贝用户自己定义的 section 段，那是不是无解了呢？答案是 No。有两种解决问题的思路：

第一种：initialize by copy 既然受限于 Linker 保护，不能手动拷贝，那就手动去干。参见 IAR 的开发手册 EWARM_DevelopmentGuide.ENU 中的如下截图，initialize manually 表示手动去拷贝，MYSECTION 表示要拷贝到的 RAM 区间，然后重点来了，MYSECTION_init 是什么呢？实际上其表示代码在 Flash 的存放区域，也就是在运行时拷贝到 RAM 区间的源地

址。DoInit 函数很好理解，是从 Flash 拷贝到 RAM 的过程。其中，__section_begin，__section_size 是 IAR 中预定义的获取 section 起始地址和大小的操作运算符。

Simple copying example with an implicit block

Assume that you have some initialized variables in `MYSECTION`. If you add this directive to your linker configuration file:

```
initialize manually { section MYSECTION };
```

you can use this source code example to initialize the section:

```
#pragma section = "MYSECTION"
#pragma section = "MYSECTION_init"

void DoInit()
{
  char * from = __section_begin("MYSECTION_init");
  char * to   = __section_begin("MYSECTION");
  memcpy(to, from, __section_size("MYSECTION"));
}
```

第二种： 参见以下链接中 IAR TN27158，如下截图是笔者在 RT1020 上做的修改，其思路是在 startup 启动代码中建立第二个中断向量表，第一个向量表仅保留几个 system 中断相关的中断 ISR，负责告知 SP 和 PC，并运行到__low_level_init 函数(最关键的是里面不会包含实际中断服务函数的名称，从而绕过对 ISR 中断服务函数的声明)。而第二个中断向量表则直接定位到 RAM，会包含所有的内核和外设 ISR，这样第二个中断向量表中所调用的任何函数就不会受到前面提到的 Linker 保护的限制。代码会在 initial by copy 阶段自动从 Flash 中拷贝 relocate 到 RAM 的代码。

https://www.iar.com/support/tech-notes/general/copy-interrupt-vector-arm7-core-from-flash-to-ram-at-startup-v.5.30/

以下截图中，绿色框体部分是新添加的代码，一方面为存放在 section .invec Flash 区间的函数填满内核相关的 ISR 函数，此处填充的函数名称为 DefaultISR (注意此处的名字很讲究，不要和__vector_table_RAM 中定义的 ISR 的名称相冲突)，另一方面重新申请了一段存放在 section .intvec_RAM 区间的新的中断向量表__vector_table_RAM，可以看到__vector_table 和__vector_table_RAM 区间都包含了 SP 和 PC 指针。

除此之外，还需要在 ICF 文件中定义中断向量表__vector_table_RAM 要存放的区域，见如下，这里只是提一下，后续会有更详细介绍。

```
initialize by copy { readwrite, readonly, section .textrw }     //YNN
        except{
                section .intvec,       /* Don't copy interrupt table */
                section .init_array,     /* Don't copy C++ init table */
                readonly section .boot_hdr.conf,
                ……
        };
do not initialize  { section .noinit };

place at address mem: m_interrupts_start    { readonly section .intvec };
place at start of ITCM_region               {section .intvec_RAM };  //YNN
```

2. IAR 中 I.MXRT1020 Reloacte 代码到不同的 RAM 空间的方法

基于上面提出的两种解决办法，尽管都可以去绕过 startup 启动代码的 linker 保护机制，但使用场景不太一样，各有优劣。对于第一种方式：程序代码和中断向量表默认运行在 Flash，只有使用#pragama location="xxx section "定义的函数会运行在 RAM 中。对于第二种方式: 程序代码和中断向量表默认运行在 RAM 中，只有使用 except 排除在外的函数或者.o 文件会运行在 Flash 中。两者相比，前者优点在于节省 RAM，效率略差，后者由于代码大都是在 RAM 中，其优点在于效率很高，缺点就是 RAM 占用大。

以上找到问题点，有了思路，那还是回到文章开始部分，具体怎么去干，去修改？依然是兵分两路，各表一枝。两者都以 RT1020 SDK 2.5.0 的 iled_blinky 代码的 flexspi_nor_debug 配置为例。看到这里读者可能会觉得太复杂，其实我想说，的确十分复杂，复杂在去找到这个问题点，找到症结之后，修改就简单了。

方案 1: 程序代码和中断向量表默认运行在 Flash，手动拷贝#pragama location 定义代码段到 RAM。

步骤 1：修改链接配置文件 MIMXRT1021xxxxx_flexspi_nor.icf，定义手动拷贝区域的源地址和目的地址，

```
initialize by copy { readwrite, section DATA_IN_DTCM}; //自动初始化变量
initialize manually { , section .textrw };                    //强制手动初始化__ramfunc 定义的函数
initialize manually { section CODE_IN_ITCM };          //强制手动初始化定义到 ITCM 的函数
initialize manually { section CODE_IN_SDRAM };                //强制手动初始化定义到 SDRAM 的函数
do not initialize  { section .noinit };

define block CodeRelocate { section .textrw_init};                //定义__ramfunc 定义的函数在 Flash 中的存放地址
define block CodeRelocateRam { section .textrw };       //定义__ramfunc 定义的函数要拷贝到的 RAM 地址
define block CodeRelocate1 { section CODE_IN_ITCM_init, };       //定义 section CODE_IN_ITCM 在 Flash 的地址
define block CodeRelocateRam1 { section CODE_IN_ITCM, };//定义 section CODE_IN_ITCM 在 RAM 的地址
define block CodeRelocate2 { section CODE_IN_SDRAM_init};//定义 section CODE_IN_SDRAM 在 Flash 地址
define block CodeRelocateRam2 { section CODE_IN_SDRAM};};//定义 sectionCODE_IN_SDRAM 在 RAM 地址

place at address mem: m_interrupts_start    { readonly section .intvec };
place at address mem:m_boot_hdr_conf_start { section .boot_hdr.conf };
place at address mem:m_boot_hdr_ivt_start { section .boot_hdr.ivt };
place at address mem:m_boot_hdr_boot_data_start { readonly section .boot_hdr.boot_data };
place at address mem:m_boot_hdr_dcd_data_start { readonly section .boot_hdr.dcd_data };

keep{ section .boot_hdr.conf, section .boot_hdr.ivt, section .boot_hdr.boot_data, section .boot_hdr.dcd_data };

place in TEXT_region                { readonly };
place in DTCM_region                { block RW };
place in DTCM_region                { block ZI };
place in DTCM_region                { last block HEAP };
place in NCACHE_region              { block NCACHE_VAR };
place in CSTACK_region              { block CSTACK };

place in DTCM_region                { section DATA_IN_DTCM};
place in ITCM_region                { block CodeRelocateRam}; //指定各个 section 实际存放地址
place in TEXT_region                { block CodeRelocate};
place in ITCM_region                { block CodeRelocateRam1};
place in TEXT_region                { block CodeRelocate1};
place in SDRAM_region               { block CodeRelocateRam2};
place in TEXT_region                { block CodeRelocate2};
```

步骤 2：找到 system_MIMXRT1021.c，在文件起始部位添加变量声明，为下一步拷贝过程做准备。

```
#pragma section = ".data"
#pragma section = ".data_init"
#pragma section = ".bss"
#pragma section = "CodeRelocate"
#pragma section = "CodeRelocateRam"
#pragma section = "CodeRelocate1"
#pragma section = "CodeRelocateRam1"
#pragma section = "CodeRelocate2"
#pragma section = "CodeRelocateRam2"
extern uint32_t __VECTOR_TABLE[];
extern uint32_t __VECTOR_RAM[];
extern uint32_t __RAM_VECTOR_TABLE_SIZE;
```

```
volatile uint32_t n,m;
```

步骤 3：在 system_MIMXRT1021.c 的 SystemInit 函数结尾处添加手动拷贝的代码，以下拷贝过程和步骤 1 中 ICF 文件配置是一一对照的，其实这个步骤和__iar_program_start 拷贝数据的原理一样。

```
#if 0
   if (__VECTOR_RAM != __VECTOR_TABLE)    /* Copy the vector table to RAM */

   {
     for (n = 0; n < 0x3ff; n++){
        __VECTOR_RAM[n] = __VECTOR_TABLE[n];
        if(n>0x300)
        {
          m=2;
        }
     }
   }
   /* Point the VTOR to the new copy of the vector table */
   SCB->VTOR = (uint32_t)__VECTOR_RAM;    //重定向中断向量表到 RAM 中
#endif
#if 1
   uint8_t* code_relocate_ram = __section_begin("CodeRelocateRam"); //拷贝 section textrw 段到 RAM
   uint8_t* code_relocate = __section_begin("CodeRelocate");                //参见上一步骤 ICF 的配置
   uint8_t* code_relocate_end = __section_end("CodeRelocate");

   n = code_relocate_end - code_relocate;      /* Copy functions from ROM to RAM */
   while (n--)
     *code_relocate_ram++ = *code_relocate++;
#endif
#if 1
   uint8_t* code_relocate_ram1 = __section_begin("CodeRelocateRam1");//拷贝 section CODE_IN_ITCM 段到 RAM 地址
   uint8_t* code_relocate1 = __section_begin("CodeRelocate1");//参见上一步骤 ICF 的配置
   uint8_t* code_relocate_end1 = __section_end("CodeRelocate1");

   n = code_relocate_end1 - code_relocate1;   /* Copy functions from ROM to RAM */
   while (n--)
     *code_relocate_ram1++ = *code_relocate1++;
#endif
#if 1
  uint8_t* code_relocate_ram2 = __section_begin("CodeRelocateRam2");");//拷贝 section CODE_IN_SDRAM 段到 RAM 地址
  uint8_t* code_relocate2 = __section_begin("CodeRelocate2");
  uint8_t* code_relocate_end2 = __section_end("CodeRelocate2");

  n = code_relocate_end2 - code_relocate2;    /* Copy functions from ROM to RAM */
  while (n--)
    *code_relocate_ram2++ = *code_relocate2++;
#endif
#endif
  SystemInitHook();
```

步骤 4：为打算 reloacte 到指定 RAM 区域的函数添加#pragma location =操作。以下是一个实例。

```
#pragma location = "DATA_IN_DTCM"          //手动定位变量数组到 DTCM
uint8_t TestArray[1024*1];

#pragma location = "CODE_IN_ITCM"          //定位函数到 ITCM
```

```
void delay_ms(uint16_t ms)
{
  volatile uint16_t iii,jjj;
  for(iii=0;iii<ms; iii++)
  {
    for ( jjj=0;jjj<20000; jjj++)
    {
      asm("nop");
    }
  }
}
#pragma location = "CODE_IN_ITCM"                    //定位函数到 ITCM
void SysTick_Handler(void)
{
    static uint32_t ii=0;
    if (g_systickCounter++>1000U)
    {
      g_systickCounter = 0;
      delay_ms(1);
      GPIO_PortToggle(GPIO1, 1<<5);
      PRINTF("\r\nToggle LED in SysTick_Handler =%d.\r\n", TestArray[ii]);
      ii++;
      if(ii==1024*32){
        ii=0;
      }
    }
}
```

本实例中，都是使用#pragma location 对单个函数进行 relocate，其实#pragma location 支持对多个连续函数进行 relocate，可以参考以下链接，此处不再赘述。

https://www.iar.com/support/tech-notes/linker/how-do-i-place-a-group-of-functions-or-variables-in-a-specific-section/

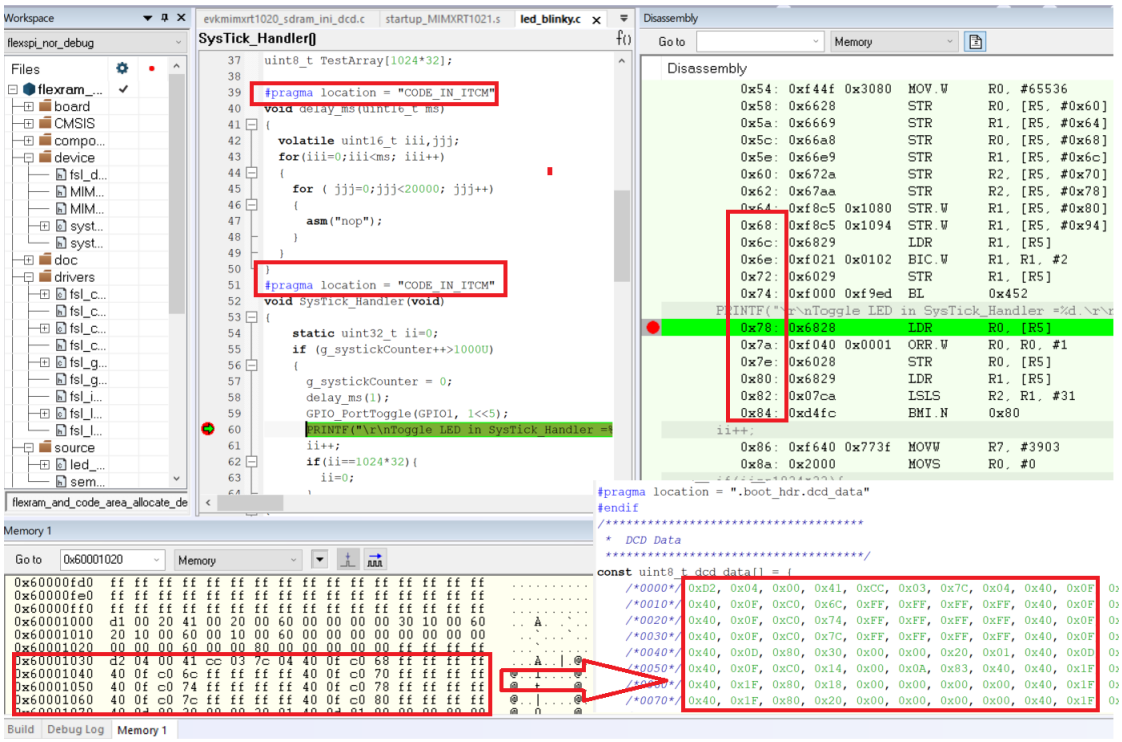
步骤 5：查看生成的 map 文件和代码运行结果。

从 map 文件可以看出，大部分代码都是运行在 0x6000xxxx 的 Flash 中，在步骤 4 中通过#pragma location = "CODE_IN_ITCM"定义的 SysTick_Handler 和 delay_ms 都位于 ITCM 中，而通过#pragma location = "DATA_IN_DTCM"定义的数组 TestArray 位于 DTCM 区间，同时也能看到 main 函数是存放在 Flash 区间的，完全符合预期。

```
Entry                    Address    Size  Type      Object
-----                    -------    ----  ----      ------
Serial_UartInit        0x6000'2ea9   0x68  Code  Gb  serial_port_uart.o [1]
Serial_UartWrite       0x6000'2f11   0x52  Code  Gb  serial_port_uart.o [1]
StrFormatPrintf        0x6000'2c8d   0x21c Code  Gb  fsl_str.o [1]
SysTick_Config         0x6000'3f89   0x34  Code  Lc  led_blinky.o [1]
SysTick_Handler          0x53   0x46  Code  Gb  led_blinky.o [1]
SysTick_Handler::ii    0x2000'0074    0x4  Data  Lc  led_blinky.o [1]
SystemCoreClock        0x2000'0000    0x4  Data  Gb  system_MIMXRT1021.o [1]
SystemCoreClockUpdate  0x6000'38fb   0xe4  Code  Gb  system_MIMXRT1021.o [1]
SystemInit             0x6000'3811   0xea  Code  Gb  system_MIMXRT1021.o [1]
TestArray              0x2000'007c 0x8000  Data  Gb  led_blinky.o [1]
.....
delay_ms                 0x11   0x42  Code  Gb  led_blinky.o [1]
.....
main                   0x6000'3fc3   0x5a  Code  Gb  led_blinky.o [1]
n                    0x2000'0078    0x4  Data  Gb  system_MIMXRT1021.o [1]
qspiflash_config       0x6000'0000  0x200  Data  Gb  evkmimxrt1020_flexspi_nor_config.o [1]
```

编译代码，运行到中断服务函数 SysTick_Handler，从汇编可以看到代码运行在 ITCM 区域，

左下角 0x60001030 是 DCD 数据的存放信息，对照代码中 DCD 的数组，可以看到完全一致。重新上电代码运行正常。



方案 2: 程序代码和中断向量表默认运行在 RAM 中，使用 except 排除函数或者.o 文件运行在 Flash 中。

步骤 1：找到 startup_MIMXRT1021.s，添加如下红色部分代码，建立第二个中断向量表；

```
        SECTION .intvec:CODE:NOROOT(2)
        EXTERN  __iar_program_start
        EXTERN  SystemInit
                ……
        DATA
__vector_table
        DCD     sfe(CSTACK)
        DCD     Reset_Handler
/*-------------------------------YNN-------------------------------------------*/
        DCD     DefaultISR      ; NMI Handler
        DCD     DefaultISR      ; Hard Fault Handler
        DCD     DefaultISR      ; MPU Fault Handler
        DCD     DefaultISR      ; Bus Fault Handler
        DCD     DefaultISR      ; Usage Fault Handler
        DCD     0                 ; Reserved
        DCD     0                 ; Reserved
        DCD     0                 ; Reserved
        DCD     0                 ; Reserved
        DCD     DefaultISR      ; SVCall Handler
        DCD     DefaultISR      ; Debug Monitor Handler
        DCD     0                 ; Reserved
        DCD     DefaultISR      ; PendSV Handler
        DCD     DefaultISR      ; SysTick Handler

        SECTION .intvec_RAM:CODE:ROOT(2)
        PUBLIC  __vector_table_RAM
```

```
        DATA
__vector_table_RAM
        DCD     sfe(CSTACK)
        DCD     Reset_Handler
/*---------------------------------YNN-----------------------------------------*/
        DCD     NMI_Handler                     ;NMI Handler
        DCD     HardFault_Handler               ;Hard Fault Handler
        DCD     MemManage_Handler               ;MPU Fault Handler
```

步骤 2：修改链接配置文件 MIMXRT1021xxxxx_flexspi_nor.icf，将步骤 1 中声明的第二个中断向量表放在 ITCM 区域，并使所有代码都放在 RAM，然后再排除掉不希望运行在 RAM 中的文件。

```
define block CSTACK    with alignment = 8, size = __size_cstack__   { };
define block HEAP      with alignment = 8, size = __size_heap__     { };
define block RW        { readwrite };
define block ZI        { zi };
define block NCACHE_VAR    { section NonCacheable , section NonCacheable.init };

initialize by copy { readwrite, readonly, section .textrw }  //YNN 添加 readonly，使所有代码都放在 RAM
          except{                                                                    //排除不希望从 RAM 运行的代码
和数据
                section .intvec,       /* Don't copy interrupt table */
                section .init_array,      /* Don't copy C++ init table */
                readonly section .boot_hdr.conf,          //防止 XIP 启动配置也被放在 RAM 区域
                readonly section .boot_hdr.ivt,
                readonly section .boot_hdr.boot_data,
                readonly section .boot_hdr.dcd_data,
                readonly object fsl_gpio.o,        //避免把 fsl_gpio.c 的所有函数放在 RAM 中运行
                //readonly object fsl_lpuart.o,  //将 fsl_lpuart.c 的所有函数放在 RAM 中运行
             };
do not initialize  { section .noinit };

place at address mem: m_interrupts_start   { readonly section .intvec }; //第一个中断向量表放在 Flash 区域
place at start of ITCM_region    {section .intvec_RAM };  //YNN 将第二个中断向量表放在 ITCM 区域

place at address mem:m_boot_hdr_conf_start {section .boot_hdr.conf };
place at address mem:m_boot_hdr_ivt_start { section .boot_hdr.ivt };
place at address mem:m_boot_hdr_boot_data_start { readonly section .boot_hdr.boot_data };
place at address mem:m_boot_hdr_dcd_data_start { readonly section .boot_hdr.dcd_data };

keep{ section .boot_hdr.conf, section .boot_hdr.ivt, section .boot_hdr.boot_data, section .boot_hdr.dcd_data };

place in TEXT_region                    { readonly };
place in ITCM_region                    { block RW };
place in DTCM_region                    { block ZI };
place in DTCM_region                    { last block HEAP };
place in DTCM_region                    { block NCACHE_VAR };
place in CSTACK_region                  { block CSTACK };
```

注 1：具体 ICF 的语法，读者可以从 IAR 相关文档查看。说实话，真是博大精深，笔者曾 N 多次掉入坑中，就一个 readonly object fsl_gpio.o，readonly code object fsl_gpio.o，object fsl_gpio.o 实际产生的区别，就花了好长时间去验证和理解，请参见笔者另外一个文档，IAR 连接配置文件 ICF 中 readonly code object fsl_lpuart.o,和 readonly object fsl_lpuart.o 区别。

注 2：以下关于 RT1020 XIP 部分的配置一定要配置 except，否则会出现代码重新上电后无法启动的情况。

```
                Except{
```

```
                readonly section .boot_hdr.conf,      //防止 XIP 启动配置也被放在 RAM 区域
                readonly section .boot_hdr.ivt,
                readonly section .boot_hdr.boot_data,
                readonly section .boot_hdr.dcd_data,
                    }
```

步骤 3：在 main 函数第一句修改 SCB->VTOR 的值，以匹配新的中断向量表的地址

```
int mm;
int main(void)
{
    SCB->VTOR = 0x00001000;      //YNN
    /* Define the init structure for the output LED pin*/
    gpio_pin_config_t led_config = {kGPIO_DigitalOutput, 0, kGPIO_NoIntmode};

    /* Board pin init */
    BOARD_InitPins();
    BOARD_BootClockRUN();
    BOARD_InitDebugConsole();
```

具体赋予 SCB->VTOR 的值取决于步骤 2 中的定义，对于笔者的代码而言，新的中断向量表是放在 ITCM 的起始地址的，也就是 0x00001000。

```
define symbol m_data1_start           = 0x00001000; //YNN ITCM 64K
define symbol m_data1_end             = 0x0000FFFF;
define region ITCM_region = mem:[from m_data1_start to m_data1_end];
place at start of ITCM_region    {section .intvec_RAM };
```

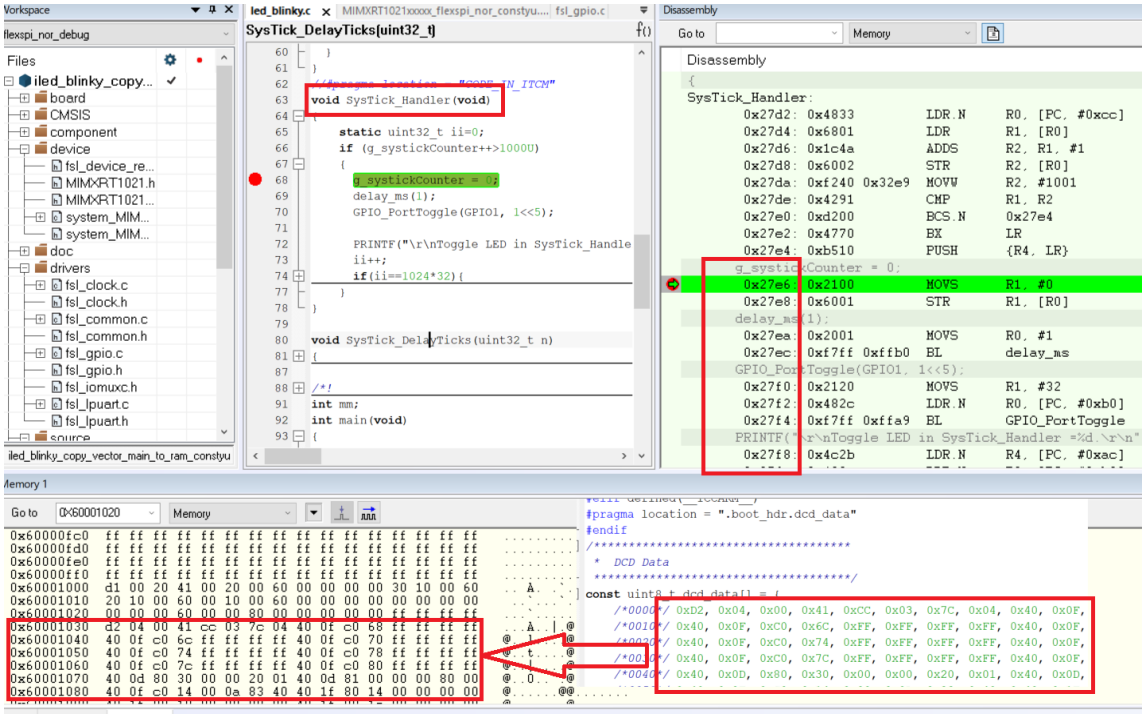
步骤 4：查看生成的 map 文件和代码运行结果。

从下图可以看到，用户函数，main 代码和__vector_table_RAM 都定位在 RAM 中了，只有 except 的 fsl_gpio.c 文件包含的函数存放在 RAM 中，符合预期。

```
Entry                  Address    Size  Type      Object
-----                  -------    ----  ----      ------
DbgConsole_Printf          0x22bb    0x2c  Code  Gb  fsl_debug_console.o [1]
DbgConsole_SendData        0x2199    0x44  Code  Gb  fsl_debug_console.o [1]
GPIO_GetInstance           0x6000'2905    0x2c  Code  Lc  fsl_gpio.o [1]
GPIO_PinInit               0x6000'2931    0x52  Code  Gb  fsl_gpio.o [1]
GPIO_PinSetInterruptConfig
                           0x6000'29dd    0x80  Code  Gb  fsl_gpio.o [1]
GPIO_PinWrite              0x6000'2983    0x3a  Code  Gb  fsl_gpio.o [1]
GPIO_PortToggle            0x274b    0x6  Code  Lc  led_blinky.o [1]
GPIO_SetPinInterruptConfig
                           0x6000'2903    0x2  Code  Lc  fsl_gpio.o [1]
HAL_UartGetStatus          0x28c1    0xe  Code  Lc  lpuart_adapter.o [1]
HAL_UartInit               0x28cf    0xd6  Code  Gb  lpuart_adapter.o [1]
.....................................................
__low_level_init       0x6000'2c3b    0x4  Code  Gb  low_level_init.o [2]
__vector_table         0x6000'2000         Data  Gb  startup_MIMXRT1021.o [1]
__vector_table_0x1c        0x101c         Data  Gb  startup_MIMXRT1021.o [1]
__vector_table_RAM         0x1000         Data  Gb  startup_MIMXRT1021.o [1]
_call_main             0x6000'2c29         Code  Gb  cmain.o [4]
.....................................................
main                       0x2819    0x6c  Code  Gb  led_blinky.o [1]
mm                     0x2000'8058    0x4  Data  Gb  led_blinky.o [1]
qspiflash_config       0x6000'0000   0x200  Data  Gb  evkmimxrt1020_flexspi_nor_config.o [1]
```

编译代码，运行到中断服务函数 SysTick_Handler，从汇编可以看到代码运行在 ITCM 区域，左下角 0x60001030 是 DCD 数据的存放信息，对照代码中 DCD 的数组，可以看到完全一

致。重新上电代码运行正常。



总结：从以上步骤描述，两种方法都能实现 relocate 代码到指定 RAM 区域，但从实现步骤上来看，第二种方法操作更简单一些，不需要对每个函数分别进行处理，尤其是在很多层级代码调用的场合，缺点是对 RAM 占用会变大。而第一种方法，对认识代码搬运的实质更清晰一些，最大程度的节省 RAM 空间，考虑到 RT1020 有 256K RAM 空间，应该足以应付大部分应用，所以建议用户使用第二种办法。