Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт компьютерных наук и технологий
Высшая школа интеллектуальных систем и суперкомпьютерных технологий

Отчёт по лабораторной работе № 4

Дисциплина: Низкоуровневое программирование

Тема: Раздельная компиляция

Вариант: 4

Выполнил студент гр. 3530901/90002 _____Е.К. Борисов
(подпись)

Принял старший преподаватель _____Д.С. Степанов
(подпись)

“____” _____ 2021 г.

Санкт-Петербург

2021

Постановка задачи

1. Изучить методические материалы, опубликованные на сайте курса.
2. Установить пакет средств разработки “SiFive GNU Embedded Toolchain” для RISC-V.
3. На языке C разработать функцию, реализующую сортировку массива вставкой. Поместить определение функции в отдельный исходный файл, оформить заголовочный файл. Разработать тестовую программу на языке C.
4. Собрать программу «по шагам». Проанализировать выход препроцессора и компилятора. Проанализировать состав и содержимое секций, таблицы символов, таблицы перемещений и отладочную информацию, содержащуюся в объектных файлах и исполнимом файле.
5. Выделить разработанную функцию в статическую библиотеку. Разработать make-файлы для сборки библиотеки и использующей ее тестовой программы. Проанализировать ход сборки библиотеки и программы, созданные файлы зависимостей.

1.Программа на языке С:

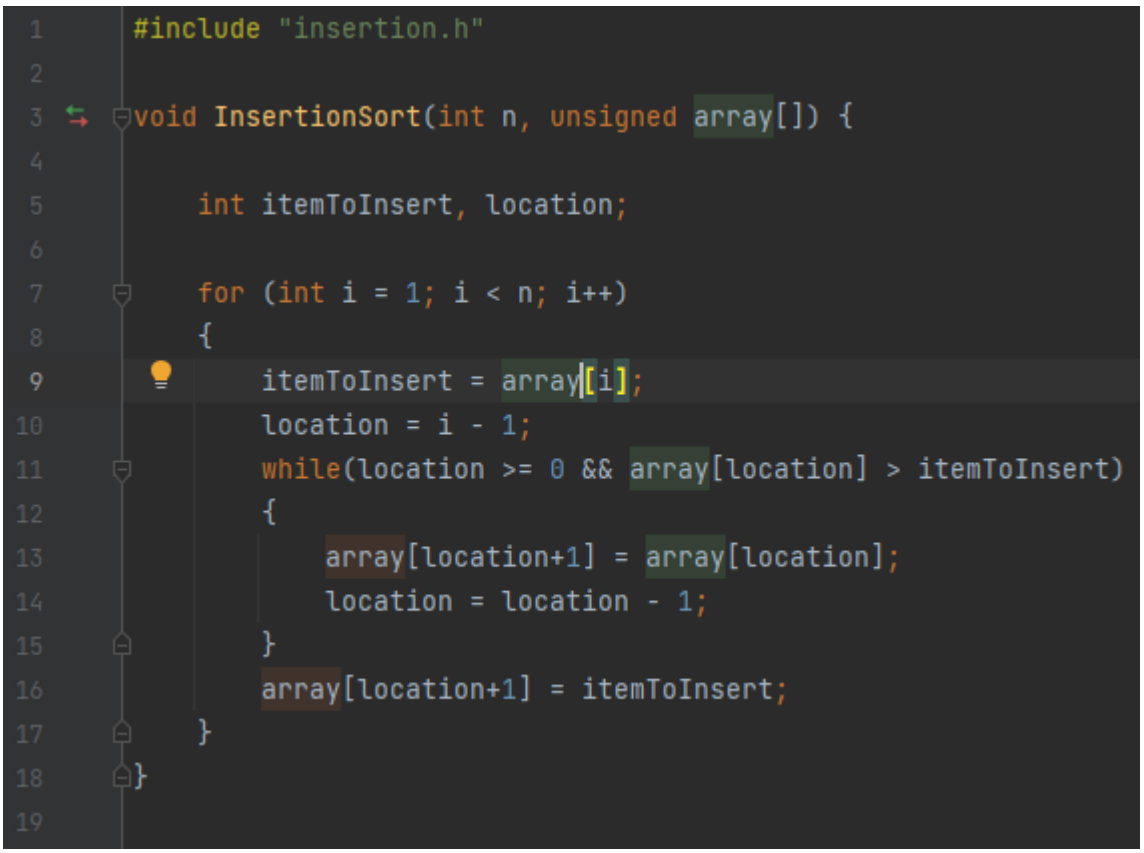
Алгоритм сортировки вставками - алгоритм, в котором элементы входной последовательности просматриваются по одному, и каждый новый поступивший элемент размещается в подходящее место среди ранее упорядоченных элементов Предполагается, что первый элемент списка отсортирован. Переходим к следующему элементу, обозначим его x. Если x больше первого, оставляем его на своём месте. Если он меньше, копируем его на вторую позицию, а x устанавливаем, как первый элемент.
Переходя к другим элементам несортированного сегмента, перемещаем более крупные элементы в отсортированном сегменте вверх по списку, пока не встретим элемент меньше x или не дойдём до конца списка. В первом случае x помещается на правильную позицию.

Напишем данный алгоритм на языке С, поместим функцию сортировки в отдельный файл и оформим заголовочный файл.

```
1  #ifndef LAB4_INSERTION_H
2  #define LAB4_INSERTION_H
3
4  void InsertionSort(int n, unsigned array[]);
5
6  #endif //LAB4_INSERTION_H
```

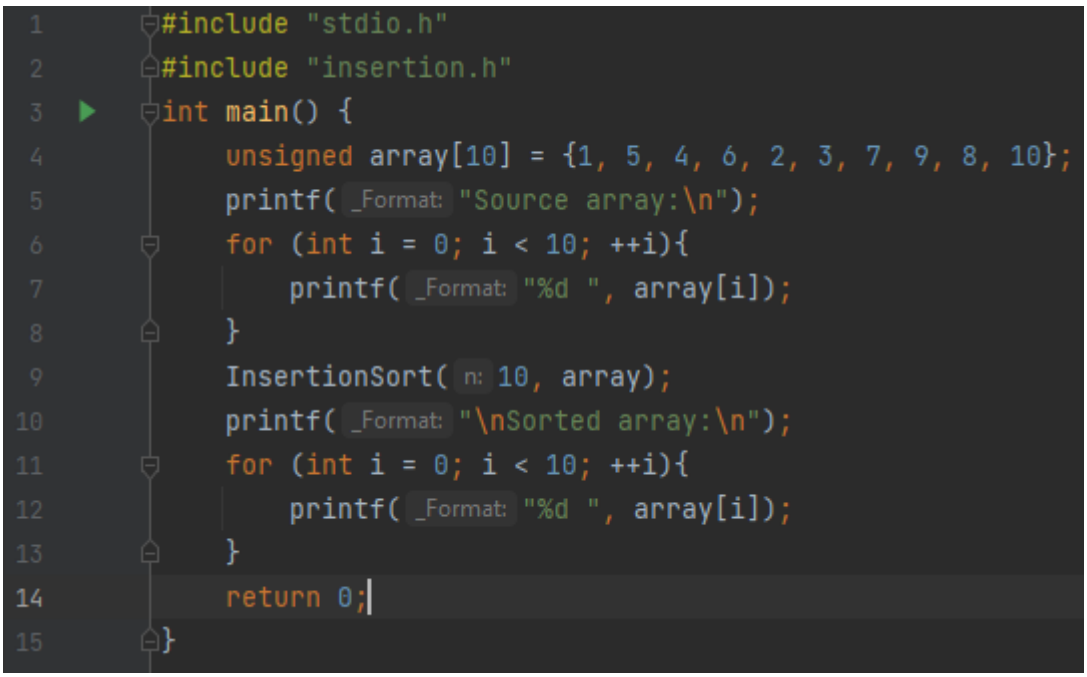
Рис 1.1 Заголовочный файл insertion.h

В заголовочном файле указана функция сортировки вставкой для дальнейшего использования ее в тестовой программе.



```c
#include "insertion.h"

void InsertionSort(int n, unsigned array[]) {

    int itemToInsert, location;

    for (int i = 1; i < n; i++)
    {
        itemToInsert = array[i];
        location = i - 1;
        while(location >= 0 && array[location] > itemToInsert)
        {
            array[location+1] = array[location];
            location = location - 1;
        }
        array[location+1] = itemToInsert;
    }
}

```

Рис 1.2 Файл функции сортировки вставкой insertion.c



```c
#include "stdio.h"
#include "insertion.h"
int main() {
    unsigned array[10] = {1, 5, 4, 6, 2, 3, 7, 9, 8, 10};
    printf( _Format: "Source array:\n");
    for (int i = 0; i < 10; ++i){
        printf( _Format: "%d ", array[i]);
    }
    InsertionSort( n: 10, array);
    printf( _Format: "\nSorted array:\n");
    for (int i = 0; i < 10; ++i){
        printf( _Format: "%d ", array[i]);
    }
    return 0;
}
```

Рис 1.3 Файл тестовой программы main.c

Сделаем компиляцию программы с помощью MinGW-w64 и посмотрим на результат работы программы.

```
D:\Users\judge\CLionProjects\lab4\cmake-build-debug\lab4.exe
Source array:
1 5 4 6 2 3 7 9 8 10
Sorted array:
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Process finished with exit code 0
```

Рис. 1.4 Результат работы программы

Как мы видим сортировка выполнена корректно, переходим к сборке программы “По шагам”

2. Сборка программы “по шагам”

Препроцессирование

Используя пакет разработки “SiFive GNU Embedded Toolchain” выполним препроцессирование файлов, используя следующие команды:

```
riscv64-unknown-elf-gcc.exe -march=rv64iac -mabi=lp64 -O1 -E main.c -o main.i

riscv64-unknown-elf-gcc.exe -march=rv64iac -mabi=lp64 -O1 -E insertion.c -o insertion.i
```

Параметр *-E* указывает на то, что обработка файлов должна происходить только препроцессором. Параметр *-o* отвечает за название результирующего файла, то есть результат препроцессирования содержится в файлах *main.i* и *insertion.i*. В связи с тем, что в файле тестовой программы мы использовали стандартную библиотеку языка С “stdio.h” для вывода на консоль значений массива, результирующий файл препроцессирования имеет много добавочных строк.

Листинг 2.1. Файл main.i (фрагмент)

```
# 1 "main.c"
# 1 "<built-in>"
# 1 "<command-line>"
# 1 "main.c"
-----------------------------------
# 4 "insertion.h"
void InsertionSort(int n, unsigned array[]);
# 3 "main.c" 2
int main() {
    unsigned array[10] = {1, 5, 4, 6, 2, 3, 7, 9, 8, 10};
    printf("Source array:\n");
    for (int i = 0; i < 10; ++i){
        printf("%d ", array[i]);
    }
    InsertionSort(10, array);
    printf("\nSorted array:\n");
    for (int i = 0; i < 10; ++i){
        printf("%d ", array[i]);
    }
    return 0;
}
```

Листинг 2.2. Файл insertion.i

```
# 1 "insertion.c"
# 1 "<built-in>"
# 1 "<command-line>"
# 1 "insertion.c"
# 1 "insertion.h" 1

void InsertionSort(int n, unsigned array[]);
# 2 "insertion.c" 2

void InsertionSort(int n, unsigned array[]) {

   int itemToInsert, location;

   for (int i = 1; i < n; i++)
   {
      itemToInsert = array[i];
      location = i - 1;
      while(location >= 0 && array[location] > itemToInsert)
      {
         array[location+1] = array[location];
         location = location - 1;
      }
      array[location+1] = itemToInsert;
   }
}
```

Появившиеся нестандартные директивы, начинающиеся с символа “#”, используются для передачи информации об исходном тексте из препроцессора в компилятор. Например, последняя директива «# 1 “main.c”» информирует компилятор о том, что следующая строка является результатом обработки строки 1 исходного файла “main.c”. Также мы видим, что в данных файлах содержится информация из заголовочного файла.

Компиляция

Компиляция осуществляется следующими командами:

```
riscv64-unknown-elf-gcc.exe -march=rv64iac -mabi=lp64 -O1 –S main.i -o main.s

riscv64-unknown-elf-gcc.exe -march=rv64iac -mabi=lp64 -O1 –S insertion.i -o insertion.s
```

Листинг 2.3. Файл main.s

```
        .file   "main.c"
        .option nopic
        .attribute arch, "rv64i2p0_a2p0_c2p0"
        .attribute unaligned_access, 0
        .attribute stack_align, 16
        .text
        .section        .rodata.str1.8,"aMS",@progbits,1
        .align  3
.LC1:
        .string "Source array:"
        .align  3
.LC2:
        .string "%d "
        .align  3
.LC3:
        .string "\nSorted array:"
        .text
        .align  1
        .globl  main
        .type   main, @function
main:
        addi    sp,sp,-96
        sd      ra,88(sp)
        sd      s0,80(sp)
        sd      s1,72(sp)
        sd      s2,64(sp)
        sd      s3,56(sp)
        lui     a5,%hi(.LANCHOR0)
        addi    a5,a5,%lo(.LANCHOR0)
        ld      a1,0(a5)
        ld      a2,8(a5)
        ld      a3,16(a5)
        ld      a4,24(a5)
        ld      a5,32(a5)
        sd      a1,8(sp)
        sd      a2,16(sp)
        sd      a3,24(sp)
        sd      a4,32(sp)
        sd      a5,40(sp)
        lui     a0,%hi(.LC1)
        addi    a0,a0,%lo(.LC1)
```

```
        call    puts
        addi    s0,sp,8
        addi    s2,sp,48
        mv      s1,s0
        lui     s3,%hi(.LC2)
.L2:
        lw      a1,0(s1)
        addi    a0,s3,%lo(.LC2)
        call    printf
        addi    s1,s1,4
        bne     s1,s2,.L2
        addi    a1,sp,8
        li      a0,10
        call    InsertionSort
        lui     a0,%hi(.LC3)
        addi    a0,a0,%lo(.LC3)
        call    puts
        lui     s1,%hi(.LC2)
.L3:
        lw      a1,0(s0)
        addi    a0,s1,%lo(.LC2)
        call    printf
        addi    s0,s0,4
        bne     s0,s2,.L3
        li      a0,0
        ld      ra,88(sp)
        ld      s0,80(sp)
        ld      s1,72(sp)
        ld      s2,64(sp)
        ld      s3,56(sp)
        addi    sp,sp,96
        jr      ra
        .size   main, .-main
        .section        .rodata
        .align  3
        .set    .LANCHOR0,. + 0
.LC0:
        .word   1
        .word   5
        .word   4
        .word   6
        .word   2
        .word   3
        .word   7
        .word   9
        .word   8
        .word   10
        .ident  "GCC: (SiFive GCC-Metal 10.2.0-2020.12.8) 10.2.0"
```

Листинг 2.4. Файл insertion.s

```
        .file   "insertion.c"
        .option nopic
        .attribute arch, "rv64i2p0_a2p0_c2p0"
        .attribute unaligned_access, 0
        .attribute stack_align, 16
        .text
        .align  1
        .globl  InsertionSort
        .type   InsertionSort, @function
InsertionSort:
        li      a5,1
        ble     a0,a5,.L1
        mv      a7,a1
        addiw   t1,a0,-1
        li      a6,0
        li      a0,-1
        j       .L6
.L4:
        addi    a4,a4,1
        slli    a4,a4,2
        add     a4,a1,a4
        sw      a2,0(a4)
        addiw   a6,a6,1
        addi    a7,a7,4
        beq     a6,t1,.L1
.L6:
        lw      a2,4(a7)
        sext.w  a4,a6
        mv      a5,a7
        blt     a6,zero,.L4
.L3:
        lw      a3,0(a5)
```

```
        bgeu    a2,a3,.L4
        sw      a3,4(a5)
        addiw   a4,a4,-1
        addi    a5,a5,-4
        bne     a4,a0,.L3
        j       .L4
.L1:
        ret
        .size   InsertionSort, .-InsertionSort
        .ident  "GCC: (SiFive GCC-Metal 10.2.0-2020.12.8) 10.2.0"
```

Файл *main.s:*

Красным цветом выделена часть кода, где мы можем увидеть обращение тестовой программы к функции сортировки с помощью псевдоинструкции call.

Фиолетовым цветом показаны участки кода, где мы видим реализацию двух циклов for тестовой программы.

Зеленым цветом помечена часть кода, содержащая наш исходный массив данных.

Файл *insertion.s:*

Красным цветом выделен фрагмент кода, отвечающий за цикл for функции сортировки, мы видим, как значение регистра *a6* увеличивается на 1 при каждой итерации до тех пор, пока оно не будет равно значению регистра *t1*, в котором хранится значение длинны массива.

Зеленым цветом же выделен внутренний цикл while, мы можем увидеть как происходит перестановка элементов массива и условие выхода из цикла.

Ассемблирование

Ассемблирование осуществляется следующими командами:

```
riscv64-unknown-elf-gcc.exe -march=rv64iac -mabi=lp64 -v -c main.s -o main.o

riscv64-unknown-elf-gcc.exe -march=rv64iac -mabi=lp64 -v -c insertion.s -o insertion.o
```

На выходе мы получаем два бинарных файла “main.o” и “ insertion.o”. Для их прочтения используем программу из пакета разработки.

Листинг 2.5. Заголовки секций файла main.o

```
riscv64-unknown-elf-objdump.exe -h main.o
main.o:     file format elf64-littleriscv

Sections:
Idx Name          Size      VMA               LMA               File off  Algn
  0 .text         0000009c  0000000000000000  0000000000000000  00000040  2**1
                  CONTENTS, ALLOC, LOAD, RELOC, READONLY, CODE
  1 .data         00000000  0000000000000000  0000000000000000  000000dc  2**0
                  CONTENTS, ALLOC, LOAD, DATA
  2 .bss          00000000  0000000000000000  0000000000000000  000000dc
                  ALLOC
  3 .rodata.str1.8 00000027  0000000000000000  0000000000000000  000000e0  2**3
                  CONTENTS, ALLOC, LOAD, READONLY, DATA
  4 .rodata       00000028  0000000000000000  0000000000000000  00000108  2**3
                  CONTENTS, ALLOC, LOAD, READONLY, DATA
  5 .comment      00000031  0000000000000000  0000000000000000  00000130  2**0
                  CONTENTS, READONLY
  6 .riscv.attributes 00000026  0000000000000000  0000000000000000  00000161  2**0
                  CONTENTS, READONLY
```

Листинг 2.6. Заголовки секций файла insertion.o

```
riscv64-unknown-elf-objdump.exe -h insertion.o
insertion.o:     file format elf64-littleriscv

Sections:
Idx Name          Size      VMA               LMA               File off  Algn
  0 .text         00000044  0000000000000000  0000000000000000  00000040  2**1
                  CONTENTS, ALLOC, LOAD, RELOC, READONLY, CODE
  1 .data         00000000  0000000000000000  0000000000000000  00000084  2**0
                  CONTENTS, ALLOC, LOAD, DATA
  2 .bss          00000000  0000000000000000  0000000000000000  00000084  2**0
                  ALLOC
  3 .comment      00000031  0000000000000000  0000000000000000  00000084  2**0
                  CONTENTS, READONLY
  4 .riscv.attributes 00000026  0000000000000000  0000000000000000  000000b5  2**0
                  CONTENTS, READONLY
```

Секции:

.text - скомпилированный машинный код;

.data - секция инициализированных данных;

.rodata - аналог .data для неизменяемых данных;

.bss - секция данных, инициализированных нулями;

.comment — информация о версии компилятора;

вывод objdump нам также сообщает, что RISC-V является little-endian архитектурой, произведем декодирование кода, чтобы рассмотреть секцию .text подробнее, с помощью команды:

```
riscv64-unknown-elf-objdump -d -M no-aliases -j .text main.o
```

Опция “-d” инициирует процесс дизассемблирования, опция “-M no-aliases” требует использовать в выводе только инструкции системы команд (но не псевдоинструкции ассемблера)

Листинг 2.7. Дизассемблированный файл main.o

```
main.o:     file format elf64-littleriscv
Disassembly of section .text:
0000000000000000 <main>:
   0:   711d                c.addi16sp      sp,-96
   2:   ec86                c.sdsp  ra,88(sp)
   4:   e8a2                c.sdsp  s0,80(sp)
   6:   e4a6                c.sdsp  s1,72(sp)
   8:   e0ca                c.sdsp  s2,64(sp)
   a:   fc4e                c.sdsp  s3,56(sp)
   c:   000007b7            lui     a5,0x0
  10:   00078793            addi    a5,a5,0 # 0 <main>
  14:   638c                c.ld    a1,0(a5)
  16:   6790                c.ld    a2,8(a5)
  18:   6b94                c.ld    a3,16(a5)
  1a:   6f98                c.ld    a4,24(a5)
  1c:   739c                c.ld    a5,32(a5)
  1e:   e42e                c.sdsp  a1,8(sp)
  20:   e832                c.sdsp  a2,16(sp)
  22:   ec36                c.sdsp  a3,24(sp)
  24:   f03a                c.sdsp  a4,32(sp)
  26:   f43e                c.sdsp  a5,40(sp)
  28:   00000537            lui     a0,0x0
  2c:   00050513            addi    a0,a0,0 # 0 <main>
  30:   00000097            auipc   ra,0x0
  34:   000080e7            jalr    ra,0(ra) # 30 <main+0x30>
  38:   0020                c.addi4spn      s0,sp,8
  3a:   03010913            addi    s2,sp,48
  3e:   84a2                c.mv    s1,s0
  40:   000009b7            lui     s3,0x0
```

```
0000000000000044 <.L2>:
  44:   408c                c.lw    a1,0(s1)
  46:   00098513              addi    a0,s3,0 # 0 <main>
  4a:   00000097              auipc   ra,0x0
  4e:   000080e7              jalr    ra,0(ra) # 4a <.L2+0x6>
  52:   0491                c.addi  s1,4
  54:   ff2498e3              bne     s1,s2,44 <.L2>
  58:   002c                c.addi4spn      a1,sp,8
  5a:   4529                c.li    a0,10
  5c:   00000097              auipc   ra,0x0
  60:   000080e7              jalr    ra,0(ra) # 5c <.L2+0x18>
  64:   00000537              lui     a0,0x0
  68:   00050513              addi    a0,a0,0 # 0 <main>
  6c:   00000097              auipc   ra,0x0
  70:   000080e7              jalr    ra,0(ra) # 6c <.L2+0x28>
  74:   000004b7              lui     s1,0x0

0000000000000078 <.L3>:
  78:   400c                c.lw    a1,0(s0)
  7a:   00048513              addi    a0,s1,0 # 0 <main>
  7e:   00000097              auipc   ra,0x0
  82:   000080e7              jalr    ra,0(ra) # 7e <.L3+0x6>
  86:   0411                c.addi  s0,4
  88:   ff2418e3              bne     s0,s2,78 <.L3>
  8c:   4501                c.li    a0,0
  8e:   60e6                c.ldsp  ra,88(sp)
  90:   6446                c.ldsp  s0,80(sp)
  92:   64a6                c.ldsp  s1,72(sp)
  94:   6906                c.ldsp  s2,64(sp)
  96:   79e2                c.ldsp  s3,56(sp)
  98:   6125                c.addi16sp      sp,96
```

```
 9a:   8082                c.jr    ra
```

Мы видим, как происходит выход из подпрограммы *“c.jr ra”,* также мы видим, как сочетание инструкций auipc и jalr заменяют псевдоинструкцию call.

Рассмотрим таблицу символов и таблицу перемещений с помощью команд:

```
riscv64-unknown-elf-objdump -t main.o insertion.o
riscv64-unknown-elf-objdump -r main.o insertion.o
```

Листинг 2.8. Таблица символов

```
main.o:     file format elf64-littleriscv

SYMBOL TABLE:
0000000000000000 l    df *ABS*  0000000000000000 main.c
0000000000000000 l    d  .text  0000000000000000 .text
0000000000000000 l    d  .data  0000000000000000 .data
0000000000000000 l    d  .bss   0000000000000000 .bss
0000000000000000 l    d  .rodata.str1.8 0000000000000000 .rodata.str1.8
0000000000000000 l    d  .rodata        0000000000000000 .rodata
0000000000000000 l      .rodata        0000000000000000 .LANCHOR0
0000000000000000 l      .rodata.str1.8 0000000000000000 .LC1
0000000000000010 l      .rodata.str1.8 0000000000000000 .LC2
0000000000000018 l      .rodata.str1.8 0000000000000000 .LC3
0000000000000044 l      .text  0000000000000000 .L2
0000000000000078 l      .text  0000000000000000 .L3
0000000000000000 l    d  .comment       0000000000000000 .comment
0000000000000000 l    d  .riscv.attributes      0000000000000000 .riscv.attributes
0000000000000000 g     F .text  000000000000009c main
0000000000000000         *UND*  0000000000000000 puts
0000000000000000         *UND*  0000000000000000 printf
0000000000000000         *UND*  0000000000000000 InsertionSort




insertion.o:     file format elf64-littleriscv
```

```
SYMBOL TABLE:
0000000000000000 l    df *ABS*  0000000000000000 insertion.c
0000000000000000 l    d  .text  0000000000000000 .text
0000000000000000 l    d  .data  0000000000000000 .data
0000000000000000 l    d  .bss   0000000000000000 .bss
0000000000000042 l      .text  0000000000000000 .L1
0000000000000022 l      .text  0000000000000000 .L6
0000000000000012 l      .text  0000000000000000 .L4
0000000000000030 l      .text  0000000000000000 .L3
0000000000000000 l    d  .comment       0000000000000000 .comment
0000000000000000 l    d  .riscv.attributes      0000000000000000 .riscv.attributes
0000000000000000 g     F .text  0000000000000044 InsertionSort
```

В таблице символов main.o имеется запись: символ “puts” типа *UND*. Эта запись означает, что символ “puts” использовался в ассемблерном коде, из которого был получен данный объектный файл, но не был определен; ассемблер сделал вывод о том, что символ должен быть определен где-то еще, и отразил это в таблице символов. То же самое относится и к символу “printf” и “InsertionSort”

Листинг 2.9. Таблица перемещений

```
main.o:     file format elf64-littleriscv


RELOCATION RECORDS FOR [.text]:
OFFSET           TYPE              VALUE
000000000000000c R_RISCV_HI20      .LANCHOR0
000000000000000c R_RISCV_RELAX     *ABS*
0000000000000010 R_RISCV_LO12_I    .LANCHOR0
0000000000000010 R_RISCV_RELAX     *ABS*
0000000000000028 R_RISCV_HI20      .LC1
0000000000000028 R_RISCV_RELAX     *ABS*
000000000000002c R_RISCV_LO12_I    .LC1
000000000000002c R_RISCV_RELAX     *ABS*
0000000000000030 R_RISCV_CALL      puts
0000000000000030 R_RISCV_RELAX     *ABS*
0000000000000040 R_RISCV_HI20      .LC2
```

```
0000000000000040 R_RISCV_RELAX     *ABS*
0000000000000046 R_RISCV_LO12_I    .LC2
0000000000000046 R_RISCV_RELAX     *ABS*
000000000000004a R_RISCV_CALL      printf
000000000000004a R_RISCV_RELAX     *ABS*
000000000000005c R_RISCV_CALL      InsertionSort
000000000000005c R_RISCV_RELAX     *ABS*
0000000000000064 R_RISCV_HI20      .LC3
0000000000000064 R_RISCV_RELAX     *ABS*
0000000000000068 R_RISCV_LO12_I    .LC3
0000000000000068 R_RISCV_RELAX     *ABS*
000000000000006c R_RISCV_CALL      puts
000000000000006c R_RISCV_RELAX     *ABS*
0000000000000074 R_RISCV_HI20      .LC2
0000000000000074 R_RISCV_RELAX     *ABS*
000000000000007a R_RISCV_LO12_I    .LC2
000000000000007a R_RISCV_RELAX     *ABS*
000000000000007e R_RISCV_CALL      printf
000000000000007e R_RISCV_RELAX     *ABS*
0000000000000054 R_RISCV_BRANCH    .L2
0000000000000088 R_RISCV_BRANCH    .L3



insertion.o:     file format elf64-littleriscv

RELOCATION RECORDS FOR [.text]:
OFFSET           TYPE              VALUE
0000000000000002 R_RISCV_BRANCH    .L1
0000000000000010 R_RISCV_RVC_JUMP  .L6
000000000000001e R_RISCV_BRANCH    .L1
```

```
000000000000002c R_RISCV_BRANCH    .L4
0000000000000032 R_RISCV_BRANCH    .L4
000000000000003c R_RISCV_BRANCH    .L3
0000000000000040 R_RISCV_RVC_JUMP  .L4
```

Здесь содержится информация обо всех «неоконченных» инструкциях.
Записи типа “R_RISCV_RELAX” заносятся в таблицу перемещений в дополнение к записям типа “R_RISCV_CALL” и сообщают компоновщику, что пара инструкций, обеспечивающих вызов подпрограммы может быть оптимизирована.

Компиляция

Выполним компоновку следующей командой:

```
riscv64-unknown-elf-gcc.exe -march=rv64iac -mabi=lp64 -v main.o insertion.o
```

Листинг 2.10. Фрагмент исполняемого файла

```
riscv64-unknown-elf-objdump -j .text -d -M no-aliases a.out >a.ds
```

```
0000000000010156 <main>:
   10156:       711d                    c.addi16sp    sp,-96
   10158:       ec86                    c.sdsp ra,88(sp)
   1015a:       e8a2                    c.sdsp s0,80(sp)
   1015c:       e4a6                    c.sdsp s1,72(sp)
   1015e:       e0ca                    c.sdsp s2,64(sp)
   10160:       fc4e                    c.sdsp s3,56(sp)
   10162:       67f5                    c.lui   a5,0x1d
   10164:       c1878793                addi    a5,a5,-1000 # 1cc18 <__clzdi2+0x62>
   10168:       638c                    c.ld    a1,0(a5)
   1016a:       6790                    c.ld    a2,8(a5)
   1016c:       6b94                    c.ld    a3,16(a5)
   1016e:       6f98                    c.ld    a4,24(a5)
   10170:       739c                    c.ld    a5,32(a5)
   10172:       e42e                    c.sdsp a1,8(sp)
   10174:       e832                    c.sdsp a2,16(sp)
   10176:       ec36                    c.sdsp a3,24(sp)
   10178:       f03a                    c.sdsp a4,32(sp)
   1017a:       f43e                    c.sdsp a5,40(sp)
   1017c:       6575                    c.lui   a0,0x1d
```

```
   1017e:	bf050513          	addi	a0,a0,-1040 # 1cbf0 <__clzdi2+0x3a>
   10182:	296000ef          	jal	ra,10418 <puts>
   10186:	0020              	c.addi4spn	s0,sp,8
   10188:	03010913          	addi	s2,sp,48
   1018c:	84a2              	c.mv	s1,s0
   1018e:	69f5              	c.lui	s3,0x1d
   10190:	408c              	c.lw	a1,0(s1)
   10192:	c0098513          	addi	a0,s3,-1024 # 1cc00 <__clzdi2+0x4a>
   10196:	1d6000ef          	jal	ra,1036c <printf>
   1019a:	0491              	c.addi	s1,4
   1019c:	ff249ae3          	bne	s1,s2,10190 <main+0x3a>
   101a0:	002c              	c.addi4spn	a1,sp,8
   101a2:	4529              	c.li	a0,10
   101a4:	030000ef          	jal	ra,101d4 <InsertionSort>
   101a8:	6575              	c.lui	a0,0x1d
   101aa:	c0850513          	addi	a0,a0,-1016 # 1cc08 <__clzdi2+0x52>
   101ae:	26a000ef          	jal	ra,10418 <puts>
   101b2:	64f5              	c.lui	s1,0x1d
   101b4:	400c              	c.lw	a1,0(s0)
   101b6:	c0048513          	addi	a0,s1,-1024 # 1cc00 <__clzdi2+0x4a>
   101ba:	1b2000ef          	jal	ra,1036c <printf>
   101be:	0411              	c.addi	s0,4
   101c0:	ff241ae3          	bne	s0,s2,101b4 <main+0x5e>
   101c4:	4501              	c.li	a0,0
   101c6:	60e6              	c.ldsp	ra,88(sp)
   101c8:	6446              	c.ldsp	s0,80(sp)
   101ca:	64a6              	c.ldsp	s1,72(sp)
   101cc:	6906              	c.ldsp	s2,64(sp)
   101ce:	79e2              	c.ldsp	s3,56(sp)
   101d0:	6125              	c.addi16sp	sp,96
   101d2:	8082              	c.jr	ra

000000000101d4 <InsertionSort>:
   101d4:	4785              	c.li	a5,1
   101d6:	04a7d063          	bge	a5,a0,10216 <InsertionSort+0x42>
   101da:	88ae              	c.mv	a7,a1
   101dc:	fff5031b          	addiw	t1,a0,-1
   101e0:	4801              	c.li	a6,0
   101e2:	557d              	c.li	a0,-1
   101e4:	a809              	c.j	101f6 <InsertionSort+0x22>
   101e6:	0705              	c.addi	a4,1
   101e8:	070a              	c.slli	a4,0x2
   101ea:	972e              	c.add	a4,a1
   101ec:	c310              	c.sw	a2,0(a4)
   101ee:	2805              	c.addiw	a6,1
   101f0:	0891              	c.addi	a7,4
   101f2:	02680263          	beq	a6,t1,10216 <InsertionSort+0x42>
   101f6:	0048a603          	lw	a2,4(a7)
```

```
101fa:  0008071b        addiw a4,a6,0
101fe:  87c6            c.mv  a5,a7
10200:  fe0843e3        blt   a6,zero,101e6 <InsertionSort+0x12>
10204:  4394            c.lw  a3,0(a5)
10206:  fed670e3        bgeu  a2,a3,101e6 <InsertionSort+0x12>
1020a:  c3d4            c.sw  a3,4(a5)
1020c:  377d            c.addiw       a4,-1
1020e:  17f1            c.addi a5,-4
10210:  fea71ae3        bne   a4,a0,10204 <InsertionSort+0x30>
10214:  bfc9            c.j   101e6 <InsertionSort+0x12>
10216:  8082            c.jr  ra
```

Мы видим, что адресация для вызовов функций изменилась на абсолютную.

3.Создание статической библиотеки

Выделим функцию InsertionSort в отдельную статическую библиотеку. Для этого надо получить объектный файл insetion.o и собрать библиотеку.

```
riscv64-unknown-elf-gcc -march=rv64iac -mabi=lp64 -O1 -c insertion.c -o insertion.o
riscv64-unknown-elf-ar -rsc lib.a insertion.o
```

Рассмотрим список символов библиотеки:

Листинг 3.1 Список символов lib.a

```
riscv64-unknown-elf-nm lib.a
insertion.o:
0000000000000042 t .L1
0000000000000030 t .L3
0000000000000012 t .L4
0000000000000022 t .L6
0000000000000000 T InsertionSort
```

В выводе утилиты “nm” кодом “T” обозначаются символы, определенные в соответствующем объектном файле.

Теперь, имея собранную библиотеку, создадим исполняемый файл тестовой программы *‘main.c”* с помощью следующей команды:

```
riscv64-unknown-elf-gcc -march=rv64iac -mabi=lp64 -O1 main.c lib.a -o main.out
```

Убедимся, что в состав программы вошло содержание объектного файла insertion.o, при помощи таблицы символов исполняемого файла

Листинг 3.1 Фрагмент списка символов main.out.

```
riscv64-unknown-elf-objdump -t main.out >main.ds
main.out:     file format elf64-littleriscv
SYMBOL TABLE:
---------------------------
0000000000019c9c g     F .text        0000000000000024 __ascii_wctomb
00000000000101d4 g     F .text        0000000000000044 InsertionSort
0000000000019f9a g     F .text        0000000000000020 _fiprintf_r
```

Процесс выполнения команд выше можно заменить make-файлами, которые произведут создание библиотеки и сборку программы.

Листинг 3.2. Makefile для создания статической библиотеки “makeLibrary”

```
CC=riscv64-unknown-elf-gcc
AR=riscv64-unknown-elf-ar
CFLAGS=-march=rv64iac -mabi=lp64

all: lib

lib: insertion.o
	$(AR) -rsc lib.a insertion.o
	del -f *.o
insertion.o: insertion’s
	$(CC) $(CFLAGS) -c insertion.c -o insertion.o
```

Листинг 3.3. Makefile для сборки исполняемого файла “makeApp”

```
TARGET=main.out
CC=riscv64-unknown-elf-gcc
CFLAGS=-march=rv64iac -mabi=lp64

all:
	make -f makeLibrary
	$(CC) $(CFLAGS) main.c lib.a -o $(TARGET)
	del -f *.0 *.a
```

Теперь с помощью GNU make выполним сначала makeLibrary, а затем makeApp, для создания библиотеки.

```
C:\Users\judge\Desktop\прога\lab4\lib>dir
 Том в устройстве C не имеет метки.
 Серийный номер тома: 82FB-19F5

 Содержимое папки C:\Users\judge\Desktop\прога\lab4\lib

20.04.2021  16:42    <DIR>          .
20.04.2021  16:42    <DIR>          ..
19.04.2021  23:30               438 insertion.c
19.04.2021  23:26               129 insertion.h
19.04.2021  23:34               369 main.c
20.04.2021  16:42               172 makeApp
20.04.2021  16:35               237 makeLibrary
               5 файлов          1 345 байт
               2 папок  42 897 309 696 байт свободно

C:\Users\judge\Desktop\прога\lab4\lib>make -f makeLibrary
riscv64-unknown-elf-gcc -march=rv64iac -mabi=lp64 -c insertion.c -o insertion.o
riscv64-unknown-elf-ar -rsc lib.a insertion.o
del -f *.o

C:\Users\judge\Desktop\прога\lab4\lib>dir
 Том в устройстве C не имеет метки.
 Серийный номер тома: 82FB-19F5

 Содержимое папки C:\Users\judge\Desktop\прога\lab4\lib

20.04.2021  16:45    <DIR>          .
20.04.2021  16:45    <DIR>          ..
19.04.2021  23:30               438 insertion.c
19.04.2021  23:26               129 insertion.h
20.04.2021  16:45             1 686 lib.a
19.04.2021  23:34               369 main.c
20.04.2021  16:42               172 makeApp
20.04.2021  16:35               237 makeLibrary
               6 файлов          3 031 байт
               2 папок  42 897 309 696 байт свободно

C:\Users\judge\Desktop\прога\lab4\lib>make -f makeApp
make -f makeLibrary
make[1]: Entering directory `C:/Users/judge/Desktop/прога/lab4/lib'
riscv64-unknown-elf-gcc -march=rv64iac -mabi=lp64 -c insertion.c -o insertion.o
riscv64-unknown-elf-ar -rsc lib.a insertion.o
del -f *.o
make[1]: Leaving directory `C:/Users/judge/Desktop/прога/lab4/lib'
riscv64-unknown-elf-gcc -march=rv64iac -mabi=lp64 main.c lib.a -o main.out
del -f *.0 *.a

C:\Users\judge\Desktop\прога\lab4\lib>dir
 Том в устройстве C не имеет метки.
 Серийный номер тома: 82FB-19F5

 Содержимое папки C:\Users\judge\Desktop\прога\lab4\lib

20.04.2021  16:45    <DIR>          .
20.04.2021  16:45    <DIR>          ..
19.04.2021  23:30               438 insertion.c
19.04.2021  23:26               129 insertion.h
19.04.2021  23:34               369 main.c
20.04.2021  16:45           143 200 main.out
20.04.2021  16:42               172 makeApp
20.04.2021  16:35               237 makeLibrary
               6 файлов        144 545 байт
               2 папок  42 897 170 432 байт свободно
```

Рис. 3.1 Выполнение make файлов.

Посмотрим таблицу символов полученного с помощью makefile исполняемого файла:

Листинг 3.3 Фрагмент списка символов main.out (makefile).

```
riscv64-unknown-elf-objdump -t main.out >main.ds
main.out:     file format elf64-littleriscv
SYMBOL TABLE:
----------------------------
0000000000019c9c g     F .text        0000000000000024 __ascii_wctomb
00000000000101d4 g     F .text        0000000000000044 InsertionSort
0000000000019f9a g     F .text        0000000000000020 _fiprintf_r
```

Мы видим, что исполняемый файл аналогичен созданному в терминале файлу.

Вывод

В ходе лабораторной работы изучена пошаговая компиляция программы на языке С. Также была создана статическая библиотека и произведена сборка программы с помощью Makefile.