

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: 5

Выполнил студент гр. 3530901/90002 \_\_\_\_\_ Е. В. Бурков  
(подпись)

Принял преподаватель \_\_\_\_\_ Д. С. Степанов  
(подпись)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2021 г.

Санкт-Петербург  
2021

## Формулировка задачи

1. На языке C разработать функцию, реализующую определенную вариантом задания функциональность. Поместить определение функции в отдельный исходный файл, оформить заголовочный файл. Разработать тестовую программу на языке C.
2. 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 исполняемом файле.
3. 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.

## Вариант задания

По варианту номер 5 необходимо реализовать сортировку обменом чисел in-place. Сортировка обменом является простым алгоритмом. Алгоритм состоит из повторяющихся проходов по сортируемому массиву. За каждый проход элементы последовательно сравниваются попарно и, если порядок в паре неверный, выполняется обмен элементов. Проходы по массиву повторяются  $N - 1$  раз или до тех пор, пока на очередном проходе не окажется, что обмены больше не нужны, что означает — массив отсортирован. При каждом проходе алгоритма по внутреннему циклу, очередной наибольший элемент массива ставится на своё место в конце массива рядом с предыдущим «наибольшим элементом», а наименьший элемент перемещается на одну позицию к началу массива («всплывает» до нужной позиции, как пузырёк в воде — отсюда и название алгоритма).

## 1. Написание программы на языке C

Согласно заданию, была написана программа, сортирующая массив пузырьком. Функция помещена в отдельный файл, оформлен заголовочный файл.

Листинг 1.1 Заголовочный файл bubble.h

```
#ifndef BUBBLE_H
#define BUBBLE_H

void bubble_sort(unsigned *array, size_t size);

#endif
```

В заголовочном файле отображаем функцию сортировки для её использования в тестовой программе.

Листинг 1.2 Файл тестовой программы main.c

```
#include <stddef.h>
#include <stdio.h>
#include "bubble.h"

static unsigned array[] = {
    1337, 1488, 228, 42, 2048, 0
};

static const size_t array_length =
    sizeof(array) / sizeof(array[0]);

int main() {
    for (size_t i = 0; i < array_length; i++) {
        printf("%u ", array[i]);
    }
    printf("\n");
    bubble_sort(array, array_length);

    for (size_t i = 0; i < array_length; i++) {
        printf("%u ", array[i]);
    }
}
```

Были импортированы стандартные библиотеки “`stddef.h`” и “`stdio.h`”. Первая требуется для определения типа `size_t`. Вторая используется для вывода на

Листинг 1.3 Функция сортировки

```
#include <stdio.h>
#include "bubble.h"

void bubble_sort(unsigned *array, size_t size) {

    static unsigned f = 0;

    for (size_t i = 0; i < size - 1; i++) {
        if (f == 1) {
            return;
        }
        f = 1; // If array sorted - quit
        for (size_t j = 0; j < size - i - 1; j++) {
            if (array[j] > array[j + 1]) {
                const unsigned temp = array[j];
                array[j] = array[j + 1];
                array[j + 1] = temp;
                f = 0;
            }
        }
    }
}
```

Произведём компиляцию программы и посмотрим на результат исполнения:

```
D:\projects\lowlevelprog\lowlevelprog\lab4\app>untitled.exe
1337 1488 228 42 2048 0
0 42 228 1337 1488 2048
```

Рис. 1.1 Вызов программы

На первой строчке указан неотсортированный массив, а на второй уже отсортированный.

## 2. Сборка программы “по шагам”

### Препроцессирование<sup>1</sup>

Используя пакет разработки “SiFive GNU Embedded Toolchain” для RISC-V выполним препроцессирование файлов. Для этого выполним следующие команды:

```
riscv64-unknown-elf-gcc -march=rv32i -mabi=ilp32 -O1 -E main.c -o main.i -v -E  
>log_main_pre.txt 2>&1  
riscv64-unknown-elf-gcc -march=rv32i -mabi=ilp32 -O1 -E bubble.c -o bubble.i -v -E  
>log_bubble_pre.txt 2>&1
```

Посмотрим на результаты препроцессирования. Результат имеет достаточно много строк, которые при написании явно не указывались. Эти строки связаны с файлами стандартной библиотеки языка C, которые мы указывали в нашей программе.

Листинг 2.1 Файл main.i (часть)

```
# 1 "main.c"  
# 1 "<built-in>"  
# 1 "<command-line>"  
# 1 "main.c"  
.....  
# 5 "bubble.h"  
void bubble_sort(unsigned *array, size_t size);  
# 4 "main.c" 2  
  
static unsigned array[] = {  
    1337, 1488, 228, 42, 2048, 0  
};  
  
static const size_t array_length =
```

---

<sup>1</sup> Препроцессирование (в языке Си/Си++). Механизм, просматривающий входной ".c/.cpp" файл, исполняющий в нём директивы препроцессора, включающий в него содержимое других файлов, указанных в директивах #include и прочее. В результате получается файл, который не содержит директив препроцессора, все используемые макросы раскрыты, вместо директив #include подставлено содержимое соответствующих файлов. Файл с результатом препроцессирования обычно имеет суффикс ".i". Результат препроцессирования называется единицей трансляции.

```

        sizeof(array) / sizeof(array[0]);

int main() {
    for (size_t i = 0; i < array_length; i++) {
        printf("%u ", array[i]);
    }
    printf("\n");
    bubble_sort(array, array_length);

    for (size_t i = 0; i < array_length; i++) {
        printf("%u ", array[i]);
    }
}

```

## Листинг 2.2 Файл bubble.i (часть)

```

# 5 "bubble.h"
void bubble_sort(unsigned *array, size_t size);
# 3 "bubble.c" 2

void bubble_sort(unsigned *array, size_t size) {

    static unsigned f = 0;

    for (size_t i = 0; i < size - 1; i++) {
        if (f == 1) {
            return;
        }
        f = 1;
        for (size_t j = 0; j < size - i - 1; j++) {
            if (array[j] > array[j + 1]) {
                const unsigned temp = array[j];
                array[j] = array[j + 1];
                array[j + 1] = temp;
                f = 0;
            }
        }
    }
}

```

Видно, что в данных файлах содержится информация из заголовочного файла.

## Компиляция

Для компиляции препроцессированных файлов используем следующие команды:

```
riscv64-unknown-elf-gcc -march=rv32i -mabi=ilp32 -O1 -v -S -fpreprocessed main.i -  
o main.s >log_s_main.txt 2>&1  
riscv64-unknown-elf-gcc -march=rv32i -mabi=ilp32 -O1 -v -S -fpreprocessed  
bubble.i -o bubble.s >log_s_bubble.txt 2>&1
```

Ниже приведены файлы – результаты компиляции:

Листинг 2.3 Файл main.s

```
.file "main.c"  
.option nopic  
.text  
.align 2  
.globl main  
.type main, @function  
main:  
    addi    sp,sp,-32  
    sw      ra,28(sp)  
    sw      s0,24(sp)  
    sw      s1,20(sp)  
    sw      s2,16(sp)  
    sw      s3,12(sp)  
    lui     s0,%hi(.LANCHOR0)  
    addi    s1,s0,%lo(.LANCHOR0)  
    addi    s2,s1,24  
    addi    s0,s0,%lo(.LANCHOR0)  
    lui     s3,%hi(.LC0)  
.L2:  
    lw      a1,0(s0)  
    addi    a0,s3,%lo(.LC0)  
    call    printf  
    addi    s0,s0,4  
    bne     s0,s2,.L2  
    li      a0,10  
    call    putchar  
    li      a1,6  
    lui     a0,%hi(.LANCHOR0)  
    addi    a0,a0,%lo(.LANCHOR0)  
    call    bubble_sort  
    lui     s0,%hi(.LC0)  
.L3:
```

```

lw    a1,0(s1)
addi  a0,s0,%lo(.LC0)
call  printf
addi  s1,s1,4
bne   s1,s2,.L3
li    a0,0
lw    ra,28(sp)
lw    s0,24(sp)
lw    s1,20(sp)
lw    s2,16(sp)
lw    s3,12(sp)
addi  sp,sp,32
jr    ra
.size  main,.-main
.data
.align 2
.set   .LANCHOR0,. + 0
.type  array, @object
.size  array, 24
array:
.word 1337
.word 1488
.word 228
.word 42
.word 2048
.word 0
.section .rodata.str1.4,"aMS",@progbits,1
.align 2
.LC0:
.string "%u "
.ident "GCC: (SiFive GCC 8.2.0-2019.05.3) 8.2.0"

```

#### Листинг 2.4 Файл bubble.s

```

.file  "bubble.c"
.option nopic
.text
.align 2
.globl bubble_sort
.type  bubble_sort, @function
bubble_sort:
addi  t3,a1,-1
beqz  t3,.L1
lui   a5,%hi(f.2552)
lw    a4,%lo(f.2552)(a5)
li    a5,1

```



```

    beq    a4,a5,.L1
    slli   a2,a1,2
    add    a2,a0,a2
    li     a7,0
    li     t1,1
    li     a6,0
    j      .L3
.L11:
    lui    a5,%hi(f.2552)
    li     a4,1
    sw     a4,%lo(f.2552)(a5)
    ret
.L5:
    addi   a5,a5,4
.L4:
    beq    a5,a2,.L9
    lw     a4,-4(a5)
    lw     a3,0(a5)
    bleu   a4,a3,.L5
    sw     a3,-4(a5)
    sw     a4,0(a5)
    mv     a1,a6
    j      .L5
.L9:
    addi   a7,a7,1
    beq    a7,t3,.L10
    addi   a2,a2,-4
    beq    a1,t1,.L11
.L3:
    addi   a5,a0,4
    mv     a1,t1
    j      .L4
.L10:
    lui    a5,%hi(f.2552)
    sw     a1,%lo(f.2552)(a5)
.L1:
    ret
.size    bubble_sort,.-bubble_sort
.section .sbss,"aw",@nobits
.align   2
.type    f.2552, @object
.size    f.2552, 4
f.2552:
    .zero 4
    .ident "GCC: (SiFive GCC 8.2.0-2019.05.3) 8.2.0"

```

Наиболее интересные куски кода выделены красным цветом.

Можно заметить, как реализуется цикл for через инструкции RISC-V. Заметим, что тестовая программа действительно вызывает bubble\_sort через псевдоинструкцию call. Так же снизу имеем метку на наш массив array. В файле bubble.s видно, как программа меняет элементы местами.

## Объектный файл<sup>2</sup>

Выполним ассемблирование для получения объектных файлов программы.

```
riscv64-unknown-elf-gcc -march=rv32i -mabi=ilp32 -v -c main.s -o main.o >log_o.txt 2>&1
riscv64-unknown-elf-gcc -march=rv32i -mabi=ilp32 -v -c bubble.s -o bubble.o >log_o.txt 2>&1
```

На выходе получаем файлы “bubble.o” и “main.o”. Данные файлы являются бинарными, поэтому используем программу из пакета разработки для их прочтения.

### Листинг 2.5 Хедер файла main.o

```
riscv64-unknown-elf-objdump -h main.o
```

main.o: file format elf32-littleriscv

#### Sections:

Idx	Name	Size	VMA	LMA	File off	Algn
0	.text	000000a0	00000000	00000000	00000034	2**2
	CONTENTS, ALLOC, LOAD, RELOC, READONLY, CODE					
1	.data	00000018	00000000	00000000	000000d4	2**2
	CONTENTS, ALLOC, LOAD, DATA					
2	.bss	00000000	00000000	00000000	000000ec	2**0
	ALLOC					
3	.rodata.str1.4	00000004	00000000	00000000	000000ec	2**2
	CONTENTS, ALLOC, LOAD, READONLY, DATA					
4	.comment	00000029	00000000	00000000	000000f0	2**0
	CONTENTS, READONLY					
5	.riscv.attributes	0000001a	00000000	00000000	00000119	2**0
	CONTENTS, READONLY					

<sup>2</sup> Объектный файл— файл с промежуточным представлением отдельного модуля программы, полученный в результате обработки исходного кода компилятором. Объектный файл содержит в себе особым образом подготовленный код (часто называемый двоичным или бинарным), который может быть объединён с другими объектными файлами при помощи редактора связей (компоновщика) для получения готового исполнимого модуля либо библиотеки.

```
riscv64-unknown-elf-objdump -h bubble.o
```

```
bubble.o:      file format elf32-littleriscv
```

```
Sections:
```

Idx	Name	Size	VMA	LMA	File off	Algn
0	.text	0000008c	00000000	00000000	00000034	2**2
	CONTENTS, ALLOC, LOAD, RELOC, READONLY, CODE					
1	.data	00000000	00000000	00000000	000000c0	2**0
	CONTENTS, ALLOC, LOAD, DATA					
2	.bss	00000000	00000000	00000000	000000c0	2**0
	ALLOC					
3	.sbss	00000004	00000000	00000000	000000c0	2**2
	ALLOC					
4	.comment	00000029	00000000	00000000	000000c0	2**0
	CONTENTS, READONLY					
5	.riscv.attributes	0000001a	00000000	00000000	000000e9	2**0
	CONTENTS, READONLY					

Вся информация размещается в секциях.

Секция	Назначение
.text	секция кода, в которой содержатся коды инструкций
.data	секция инициализированных данных
.bss	секция данных, инициализированных нулями
.comment	секция данных о версиях размером 12 байт

Так же в начале выводе пишут о формате файла “elf” и о том, что использует архитектура little-endian RISC-V. Рассмотрим некоторые секции поближе.

### Листинг 2.7 Дизассемблированный файл main.o

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

```
main.o:      file format elf32-littleriscv
```

Disassembly of section .text:

00000000 <main>:

```

0:  fe010113      addi    sp,sp,-32
4:  00112e23      sw      ra,28(sp)
8:  00812c23      sw      s0,24(sp)
c:  00912a23      sw      s1,20(sp)
10: 01212823      sw      s2,16(sp)
14: 01312623      sw      s3,12(sp)
18: 00000437      lui     s0,0x0
1c: 00040493      addi    s1,s0,0 # 0 <main>
20: 01848913      addi    s2,s1,24
24: 00040413      addi    s0,s0,0
28: 000009b7      lui     s3,0x0
```

0000002c <.L2>:

```

2c: 00042583      lw      a1,0(s0)
30: 00098513      addi    a0,s3,0 # 0 <main>
34: 00000097      auipc   ra,0x0
38: 000080e7      jalr    ra,0(ra) # 34 <.L2+0x8>
3c: 00440413      addi    s0,s0,4
40: ff2416e3      bne     s0,s2,2c <.L2>
44: 00a00513      addi    a0,zero,10
48: 00000097      auipc   ra,0x0
4c: 000080e7      jalr    ra,0(ra) # 48 <.L2+0x1c>
50: 00600593      addi    a1,zero,6
54: 00000537      lui     a0,0x0
58: 00050513      addi    a0,a0,0 # 0 <main>
5c: 00000097      auipc   ra,0x0
60: 000080e7      jalr    ra,0(ra) # 5c <.L2+0x30>
64: 00000437      lui     s0,0x0
```

00000068 <.L3>:

```

68: 0004a583      lw      a1,0(s1)
6c: 00040513      addi    a0,s0,0 # 0 <main>
70: 00000097      auipc   ra,0x0
74: 000080e7      jalr    ra,0(ra) # 70 <.L3+0x8>
```

78:	00448493	addi	s1,s1,4
7c:	ff2496e3	bne	s1,s2,68 <.L3>
80:	00000513	addi	a0,zero,0
84:	01c12083	lw	ra,28(sp)
88:	01812403	lw	s0,24(sp)
8c:	01412483	lw	s1,20(sp)
90:	01012903	lw	s2,16(sp)
94:	00c12983	lw	s3,12(sp)
98:	02010113	addi	sp,sp,32
9c:	00008067	jalr	zero,0(ra)

Можно заметить комбинации инструкций `auipc` + `jalr`, которые на самом деле являются одной псевдоинструкцией `call`. Так же наблюдается выход из метода `main`.

Листинг 2.7 Содержание секции <code>.comment</code>	
<code>riscv64-unknown-elf-objdump -s -j .comment main.o</code>	
<code>main.o:</code>	<code>file format elf32-littleriscv</code>
Contents of section <code>.comment</code> :	
0000 00474343 3a202853 69466976 65204743 .GCC: (SiFive GC	
0010 4320382e 322e302d 32303139 2e30352e C 8.2.0-2019.05.	
0020 33292038 2e322e30 00 3) 8.2.0.	

Тут ничего особенного не наблюдается, всё как в `main.s`.

Рассмотрим таблицу символов:

Листинг 2.8 Таблица символов	
<code>riscv64-unknown-elf-objdump -t bubble.o main.o</code>	
<code>bubble.o:</code>	<code>file format elf32-littleriscv</code>
SYMBOL TABLE:	
00000000 l	df *ABS* 00000000 bubble.c
00000000 l	d .text 00000000 .text
00000000 l	d .data 00000000 .data
00000000 l	d .bss 00000000 .bss
00000000 l	O .sbss 00000004 f.2552
00000000 l	d .sbss 00000000 .sbss
00000088 l	.text 00000000 .L1
00000074 l	.text 00000000 .L3
00000064 l	.text 00000000 .L9
00000040 l	.text 00000000 .L5
00000080 l	.text 00000000 .L10

```

00000030 l      .text 00000000 .L11
00000044 l      .text 00000000 .L4
00000000 l      d .comment      00000000 .comment
00000000 l      d .riscv.attributes 00000000 .riscv.attributes
00000000 g      F .text 0000008c bubble_sort

```

```
main.o:      file format elf32-littleriscv
```

#### SYMBOL TABLE:

```

00000000 l      df *ABS* 00000000 main.c
00000000 l      d .text 00000000 .text
00000000 l      d .data 00000000 .data
00000000 l      d .bss 00000000 .bss
00000000 l      .data 00000000 .LANCHOR0
00000000 l      O .data 00000018 array
00000000 l      d .rodata.str1.4 00000000 .rodata.str1.4
00000000 l      .rodata.str1.4 00000000 .LC0
0000002c l      .text 00000000 .L2
00000068 l      .text 00000000 .L3
00000000 l      d .comment      00000000 .comment
00000000 l      d .riscv.attributes 00000000 .riscv.attributes
00000000 g      F .text 000000a0 main
00000000      *UND* 00000000 printf
00000000      *UND* 00000000 putchar
00000000      *UND* 00000000 bubble_sort

```

В таблице символов “main.o” имеется интересная запись: символ “zero” типа “\*UND\*” (undefined – не определен). Эта запись означает, что символ “zero” 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.

Информация обо всех «неоконченных» инструкциях передается ассемблером компоновщику посредством **таблицы перемещений**:

Листинг 2.9 Таблица перемещений

```
riscv64-unknown-elf-objdump -r bubble.o main.o
```

```
bubble.o:      file format elf32-littleriscv
```

#### RELOCATION RECORDS FOR [.text]:

OFFSET	TYPE	VALUE
00000008	R_RISCV_HI20	f.2552
00000008	R_RISCV_RELAX	*ABS*
0000000c	R_RISCV_LO12_I	f.2552

```

0000000c R_RISCV_RELAX    *ABS*
00000030 R_RISCV_HI20     f.2552
00000030 R_RISCV_RELAX    *ABS*
00000038 R_RISCV_LO12_S   f.2552
00000038 R_RISCV_RELAX    *ABS*
00000080 R_RISCV_HI20     f.2552
00000080 R_RISCV_RELAX    *ABS*
00000084 R_RISCV_LO12_S   f.2552
00000084 R_RISCV_RELAX    *ABS*
00000004 R_RISCV_BRANCH   .L1
00000014 R_RISCV_BRANCH   .L1
0000002c R_RISCV_JAL      .L3
00000044 R_RISCV_BRANCH   .L9
00000050 R_RISCV_BRANCH   .L5
00000060 R_RISCV_JAL      .L5
00000068 R_RISCV_BRANCH   .L10
00000070 R_RISCV_BRANCH   .L11
0000007c R_RISCV_JAL      .L4

```

main.o: file format elf32-littleriscv

#### RELOCATION RECORDS FOR [.text]:

OFFSET	TYPE	VALUE
00000018	R_RISCV_HI20	.LANCHOR0
00000018	R_RISCV_RELAX	*ABS*
0000001c	R_RISCV_LO12_I	.LANCHOR0
0000001c	R_RISCV_RELAX	*ABS*
00000024	R_RISCV_LO12_I	.LANCHOR0
00000024	R_RISCV_RELAX	*ABS*
00000028	R_RISCV_HI20	.LC0
00000028	R_RISCV_RELAX	*ABS*
00000030	R_RISCV_LO12_I	.LC0
00000030	R_RISCV_RELAX	*ABS*
00000034	R_RISCV_CALL	printf
00000034	R_RISCV_RELAX	*ABS*
00000048	R_RISCV_CALL	putchar
00000048	R_RISCV_RELAX	*ABS*
00000054	R_RISCV_HI20	.LANCHOR0
00000054	R_RISCV_RELAX	*ABS*
00000058	R_RISCV_LO12_I	.LANCHOR0
00000058	R_RISCV_RELAX	*ABS*
0000005c	R_RISCV_CALL	bubble_sort
0000005c	R_RISCV_RELAX	*ABS*
00000064	R_RISCV_HI20	.LC0
00000064	R_RISCV_RELAX	*ABS*
0000006c	R_RISCV_LO12_I	.LC0
0000006c	R_RISCV_RELAX	*ABS*
00000070	R_RISCV_CALL	printf
00000070	R_RISCV_RELAX	*ABS*
00000040	R_RISCV_BRANCH	.L2
0000007c	R_RISCV_BRANCH	.L3

В таблице перемещений для main.o наблюдаем вызов метода bubble\_sort. Записи типа “R\_RISCV\_RELAX” заносятся в таблицу перемещений в дополнение к записям типа “R\_RISCV\_CALL” (и некоторым другим) и сообщают компоновщику, что пара инструкций, обеспечивающих вызов подпрограммы, может быть оптимизирована.

### Компоновка

Выполним компоновку следующей командой:

```
riscv64-unknown-elf-gcc -march=rv32i -mabi=ilp32 -v main.o bubble.o -o main.out
>log_out.txt 2>&1
```

В результате выполнения команды получаем main.out – исполняемый бинарный файл. Изучим его секцию кода.

#### Листинг 2.10 Исполняемый файл (часть)

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

```
00010188 <main>:
 10188: fe010113      addi    sp,sp,-32
 1018c: 00112e23      sw      ra,28(sp)
 10190: 00812c23      sw      s0,24(sp)
 10194: 00912a23      sw      s1,20(sp)
 10198: 01212823      sw      s2,16(sp)
 1019c: 01312623      sw      s3,12(sp)
 101a0: 00022437      lui     s0,0x22
 101a4: 0c040493      addi    s1,s0,192 # 220c0 <__DATA_BEGIN__>
 101a8: 01848913      addi    s2,s1,24
 101ac: 0c040413      addi    s0,s0,192
 101b0: 000219b7      lui     s3,0x21
 101b4: 00042583      lw      a1,0(s0)
 101b8: 31898513      addi    a0,s3,792 # 21318 <__clzsi2+0x50>
101bc: 344000ef      jal     ra,10500 <printf>
 101c0: 00440413      addi    s0,s0,4
 101c4: ff2418e3      bne     s0,s2,101b4 <main+0x2c>
 101c8: 00a00513      addi    a0,zero,10
 101cc: 38c000ef      jal     ra,10558 <putchar>
 101d0: 00600593      addi    a1,zero,6
 101d4: 00022537      lui     a0,0x22
 101d8: 0c050513      addi    a0,a0,192 # 220c0 <__DATA_BEGIN__>
101dc: 03c000ef      jal     ra,10218 <bubble_sort>
 101e0: 00021437      lui     s0,0x21
 101e4: 0004a583      lw      a1,0(s1)
 101e8: 31840513      addi    a0,s0,792 # 21318 <__clzsi2+0x50>
101ec: 314000ef      jal     ra,10500 <printf>
 101f0: 00448493      addi    s1,s1,4
 101f4: ff2498e3      bne     s1,s2,101e4 <main+0x5c>
```



101f8:	00000513	addi	a0,zero,0
101fc:	01c12083	lw	ra,28(sp)
10200:	01812403	lw	s0,24(sp)
10204:	01412483	lw	s1,20(sp)
10208:	01012903	lw	s2,16(sp)
1020c:	00c12983	lw	s3,12(sp)
10210:	02010113	addi	sp,sp,32
10214:	00008067	jalr	zero,0(ra) # 10174 <frame_dummy+0x20>
00010218 <bubble_sort>:			
10218:	fff58e13	addi	t3,a1,-1
1021c:	060e0c63	beq	t3,zero,10294 <bubble_sort+0x7c>
10220:	1e41a703	lw	a4,484(gp) # 22aa4 <_edata>
10224:	00100793	addi	a5,zero,1
10228:	06f70663	beq	a4,a5,10294 <bubble_sort+0x7c>
1022c:	00259613	slli	a2,a1,0x2
10230:	00c50633	add	a2,a0,a2
10234:	00000893	addi	a7,zero,0
10238:	00100313	addi	t1,zero,1
1023c:	00000813	addi	a6,zero,0
10240:	0440006f	jal	zero,10284 <bubble_sort+0x6c>
10244:	00100713	addi	a4,zero,1
10248:	1ee1a223	sw	a4,484(gp) # 22aa4 <_edata>
1024c:	00008067	jalr	zero,0(ra)
10250:	00478793	addi	a5,a5,4
10254:	02c78063	beq	a5,a2,10274 <bubble_sort+0x5c>
10258:	ffc7a703	lw	a4,-4(a5)
1025c:	0007a683	lw	a3,0(a5)
10260:	fee6f8e3	bgeu	a3,a4,10250 <bubble_sort+0x38>
10264:	fed7ae23	sw	a3,-4(a5)
10268:	00e7a023	sw	a4,0(a5)
1026c:	00080593	addi	a1,a6,0
10270:	fe1ff06f	jal	zero,10250 <bubble_sort+0x38>
10274:	00188893	addi	a7,a7,1
10278:	01c88c63	beq	a7,t3,10290 <bubble_sort+0x78>
1027c:	ffc60613	addi	a2,a2,-4
10280:	fc6582e3	beq	a1,t1,10244 <bubble_sort+0x2c>
10284:	00450793	addi	a5,a0,4
10288:	00030593	addi	a1,t1,0
1028c:	fc9ff06f	jal	zero,10254 <bubble_sort+0x3c>
10290:	1eb1a223	sw	a1,484(gp) # 22aa4 <_edata>
10294:	00008067	jalr	zero,0(ra)

Адресация для вызовов функций изменилась на абсолютную.

### 3. Создание статической библиотеки<sup>3</sup>

Выделим функция `bubble_sort` в отдельную статическую библиотеку. Для этого надо получить объектный файл `bubble.o` и собрать библиотеку.

```
riscv64-unknown-elf-gcc -march=rv32i -mabi=ilp32 -O1 -c bubble.c -o bubble.o  
riscv64-unknown-elf-ar -rsc libBubble.a bubble.o
```

Рассмотрим список символов библиотеки:

Листинг 3.1 Список символов libBubble.a
<pre>riscv64-unknown-elf-nm libBubble.a  bubble.o: 00000088 t .L1 00000080 t .L10 00000030 t .L11 00000074 t .L3 00000044 t .L4 00000040 t .L5 00000064 t .L9 00000000 T bubble_sort 00000000 s f.2552</pre>

В выводе утилиты “nm” кодом “T” обозначаются символы, определенные в соответствующем объектном файле. Используя собранную библиотеку, произведём исполняемый файл тестовой программы.

```
riscv64-unknown-elf-gcc -march=rv32i -mabi=ilp32 -O1 main.c libBubble.a -o  
main.out
```

---

<sup>3</sup> Статическая библиотека (static library) является, по сути, архивом (набором, коллекцией) объектных файлов, среди которых компоновщик выбирает «полезные» для данной программы: объектный файл считается «полезным», если в нем определяется еще не разрешенный компоновщиком символ.

Посмотрим таблицу символов исполняемого файла и убедимся, что там находится наша функция.

Листинг 3.2 Таблица символов main.out					
riscv64-unknown-elf-objdump -t main.out >main.ds					
321	00023b84	g	.bss	00000000	_end
322	0001a3bc	g	F .text	00000114	__fputwc
323	00010278	g	F .text	00000080	bubble_sort
324	00017020	g	F .text	00000084	__swrite
325	00023b20	g	O .sdata	00000004	malloc trim thre

В состав нашей программы вошло содержание объектного файла bubble.o.

### Создание make-файлов

Чтобы автоматизировать процесс сборки библиотеки и приложения напишем make-файлы. Используя пример с сайта курса, были написаны следующие файлы:

make_lib
CC=riscv64-unknown-elf-gcc AR=riscv64-unknown-elf-ar CFLAGS=-march=rv32i -mabi=ilp32  all: lib  lib: bubble.o \$(AR) -rsc libBubble.a bubble.o del -f *.o bubble.o: bubble.c \$(CC) \$(CFLAGS) -c bubble.c -o bubble.o
make_app
TARGET=main CC=riscv64-unknown-elf-gcc CFLAGS=-march=rv32i -mabi=ilp32  all: make -f make_lib \$(CC) \$(CFLAGS) main.c libBubble.a -o \$(TARGET) del -f *.o *.a

Для создания библиотеки необходимо выполнить make\_lib, а для приложения make\_app.

```

Содержимое папки D:\projects\lowlevelprog\lowlevelprog\lab4\lib
16.04.2021  19:49    <DIR>          .
16.04.2021  19:49    <DIR>          ..
16.04.2021  17:38             530 bubble.c
16.04.2021  17:39             99 bubble.h
16.04.2021  17:42            978 main.c
16.04.2021  19:48            175 make_app
16.04.2021  19:45            236 make_lib
                5 файлов                2 018 байт
                2 папок   906 127 167 488 байт свободно

D:\projects\lowlevelprog\lowlevelprog\lab4\lib>make -f make_lib
riscv64-unknown-elf-gcc -march=rv32i -mabi=ilp32 -c bubble.c -o bubble.o
riscv64-unknown-elf-ar -rsc libBubble.a bubble.o
del -f *.o

D:\projects\lowlevelprog\lowlevelprog\lab4\lib>dir
Том в устройстве D не имеет метки.
Серийный номер тома: 9242-2F94

Содержимое папки D:\projects\lowlevelprog\lowlevelprog\lab4\lib
16.04.2021  19:51    <DIR>          .
16.04.2021  19:51    <DIR>          ..
16.04.2021  17:38             530 bubble.c
16.04.2021  17:39             99 bubble.h
16.04.2021  19:51             1 588 libBubble.a
16.04.2021  17:42            978 main.c
16.04.2021  19:48            175 make_app
16.04.2021  19:45            236 make_lib
                6 файлов                3 606 байт
                2 папок   906 127 163 392 байт свободно

D:\projects\lowlevelprog\lowlevelprog\lab4\lib>

```

```

D:\projects\lowlevelprog\lowlevelprog\lab4\lib>make -f make_app
make -f make_lib
make[1]: Entering directory 'D:/projects/lowlevelprog/lowlevelprog/lab4/lib'
riscv64-unknown-elf-gcc -march=rv32i -mabi=ilp32 -c bubble.c -o bubble.o
riscv64-unknown-elf-ar -rsc libBubble.a bubble.o
del -f *.o
make[1]: Leaving directory 'D:/projects/lowlevelprog/lowlevelprog/lab4/lib'
riscv64-unknown-elf-gcc -march=rv32i -mabi=ilp32 main.c libBubble.a -o main
del -f *.o *.a

D:\projects\lowlevelprog\lowlevelprog\lab4\lib>dir
Том в устройстве D не имеет метки.
Серийный номер тома: 9242-2F94

Содержимое папки D:\projects\lowlevelprog\lowlevelprog\lab4\lib
16.04.2021  19:51    <DIR>          .
16.04.2021  19:51    <DIR>          ..
16.04.2021  17:38             530 bubble.c
16.04.2021  17:39             99 bubble.h
16.04.2021  19:51            218 864 main
16.04.2021  17:42            978 main.c
16.04.2021  19:48            175 make_app
16.04.2021  19:45            236 make_lib
                6 файлов            220 882 байт
                2 папок   906 126 946 304 байт свободно

D:\projects\lowlevelprog\lowlevelprog\lab4\lib>

```

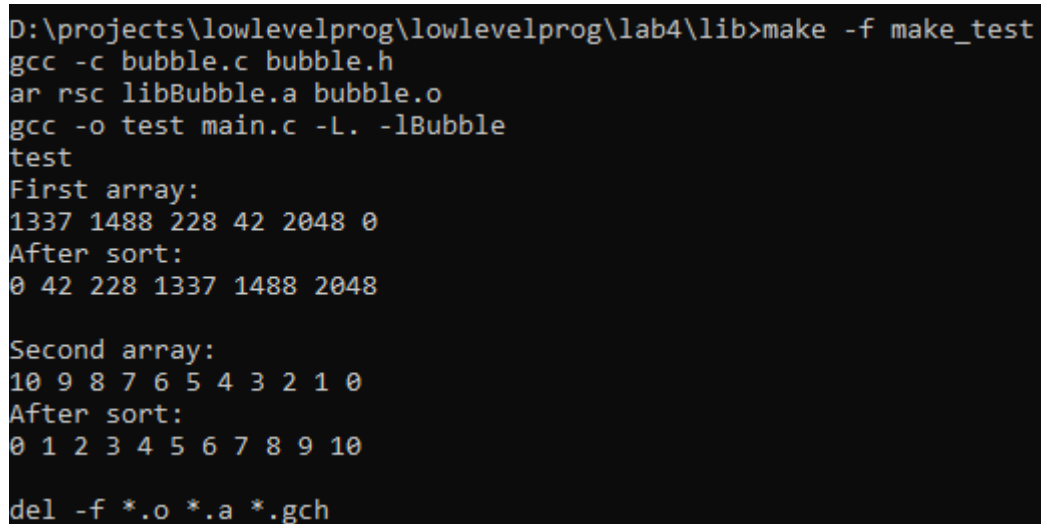
Рис. 3.1 Выполнение make-файлов

Для проверки программы была выполнена сборка статической библиотеки и исполняемого файла на архитектуре x86. Для это использовался GNU GCC. Был написан следующий make-файл:

```
all:

    gcc -c bubble.c bubble.h
    ar rsc libBubble.a bubble.o
    gcc -o test main.c -L. -lBubble
    test
    del -f *.o *.a *.gch
```

В результате выполнения которого на консоли выводился пример работы нашей программы:



```
D:\projects\lowlevelprog\lowlevelprog\lab4\lib>make -f make_test
gcc -c bubble.c bubble.h
ar rsc libBubble.a bubble.o
gcc -o test main.c -L. -lBubble
test
First array:
1337 1488 228 42 2048 0
After sort:
0 42 228 1337 1488 2048

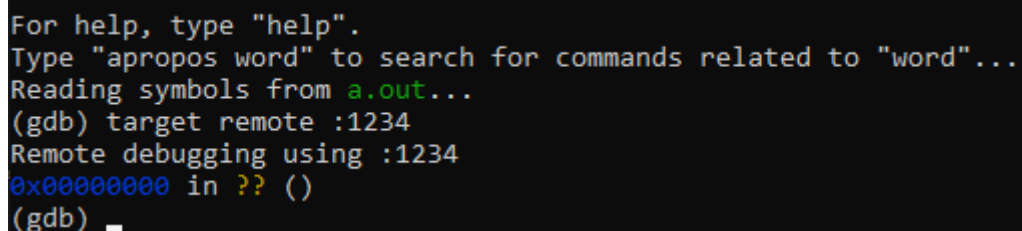
Second array:
10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0
After sort:
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
del -f *.o *.a *.gch
```

Рис. 3.2 Проверка работы программы

## 4. Bonus: Запуск выполняемых файлов

Попробуем запустить исполняемые файлы для архитектуры RISC-V32 на процессоре x86. Для начала необходимо установить пакет для эмуляции аппаратного обеспечения QEMU. Запустим QEMU с GDB сервером на localhost:1234, а после подключимся к нему. Делается это следующими командами:

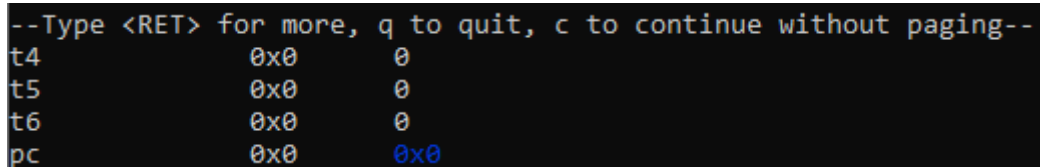
<pre>qemu-system-riscv32 -machine virt -m 128M -gdb tcp::1234 -kernel a.out -bios none</pre>
<pre>riscv64-unknown-elf-gdb a.out</pre>



```
For help, type "help".
Type "apropos word" to search for commands related to "word"...
Reading symbols from a.out...
(gdb) target remote :1234
Remote debugging using :1234
0x00000000 in ?? ()
(gdb) _
```

Рис. 4.1 Результат работы программы

Программа, к сожалению, не сработала. Посмотрим где находится счётчик инструкций.



```
--Type <RET> for more, q to quit, c to continue without paging--
t4          0x0      0
t5          0x0      0
t6          0x0      0
pc          0x0      0x0
```

Рис. 4.2 Значение регистра pc

Можно заметить, что GDB не может разобраться в строке, на которой надо выполнить инструкции и program counter указывает на “нулевой адрес”. Опираясь на данные из интернета можно предположить что дело тут в настройке стека. Для решения проблемы следует выполнить компоновку чуть другим образом.

## Настройка машины

Для начала разберёмся с виртуальной машиной -virt (по дефолту qemu использует RV32). Сбросим данные о машине в dtb файл и после отредактируем его.

```
qemu-system-riscv32 -machine virt -machine dumpdtb=riscv32-virt.dtb
```

На выходе получаем dtb файл. Он является бинарным, поэтому с помощью утилиты командной строки откроем этот файл как текст.

```
sudo apt-get install -y device-tree-compiler  
dtc -I dtb -O dts -o riscv32-virt.dts riscv32-virt.dtb
```

В открывшемся файле можно увидеть много информации о виртуальной машине. Нам необходима секция связанная с памятью.



```
/dts-v1/;  
/  
{  
    #address-cells = <0x2>;  
    #size-cells = <0x2>;  
    compatible = "riscv-virtio";  
    model = "riscv-virtio,qemu";  
  
    fw-cfg@10100000 {  
        dma-coherent;  
        reg = <0x0 0x10100000 0x0 0x18>;  
        compatible = "qemu,fw-cfg-mmio";  
    };  
  
    chosen {  
        bootargs = [00];  
        stdout-path = "/soc/uart@10000000";  
    };  
  
    memory@80000000 {  
        device_type = "memory";  
        reg = <0x0 0x80000000 0x0 0x80000000>;  
    };  
  
    cpus {
```

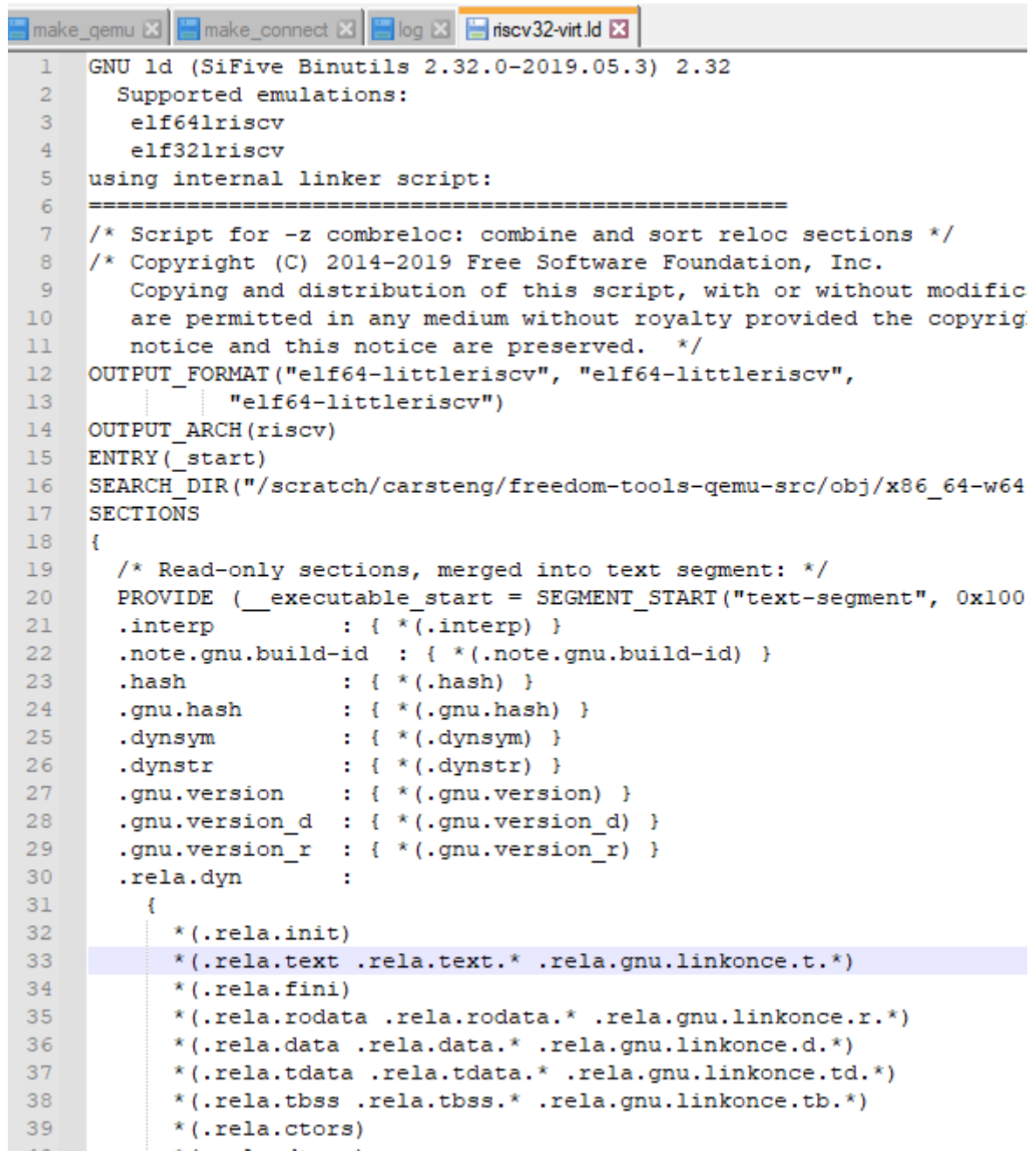
Рис 4.3 Секция memory

Теперь мы можем сказать откуда начинается банк памяти. В свойстве reg указано,

что память начинается с адреса 0x80000000 и занимает 0x80000000 байт (128 мегабайт, как мы и указывали в параметрах машины). Когда мы знаем где начинается память, не составляет труда указать компоновщику её местоположение. Скопируем скрипт компоновщика в отдельный файл.

```
riscv64-unknown-elf-ld -march=rv32i -mabi=ilp32 --verbose > riscv32-virt.ld
```

Откроем его при помощи текстового редактора и посмотрим на содержание.



```
1 GNU ld (SiFive Binutils 2.32.0-2019.05.3) 2.32
2 Supported emulations:
3   elf64liriscv
4   elf32liriscv
5 using internal linker script:
6 =====
7 /* Script for -z combreloc: combine and sort reloc sections */
8 /* Copyright (C) 2014-2019 Free Software Foundation, Inc.
9    Copying and distribution of this script, with or without modifc
10 are permitted in any medium without royalty provided the copyrig
11 notice and this notice are preserved.  */
12 OUTPUT_FORMAT("elf64-littleriscv", "elf64-littleriscv",
13              "elf64-littleriscv")
14 OUTPUT_ARCH(riscv)
15 ENTRY(_start)
16 SEARCH_DIR("/scratch/carsteng/freedom-tools-gemu-src/obj/x86_64-w64
17 SECTIONS
18 {
19   /* Read-only sections, merged into text segment: */
20   PROVIDE (__executable_start = SEGMENT_START("text-segment", 0x100
21   .interp          : { *(.interp) }
22   .note.gnu.build-id : { *(.note.gnu.build-id) }
23   .hash            : { *(.hash) }
24   .gnu.hash        : { *(.gnu.hash) }
25   .dynsym          : { *(.dynsym) }
26   .dynstr          : { *(.dynstr) }
27   .gnu.version     : { *(.gnu.version) }
28   .gnu.version_d   : { *(.gnu.version_d) }
29   .gnu.version_r   : { *(.gnu.version_r) }
30   .rela.dyn        :
31   {
32     *(.rela.init)
33     *(.rela.text .rela.text.* .rela.gnu.linkonce.t.*)
34     *(.rela.fini)
35     *(.rela.rodata .rela.rodata.* .rela.gnu.linkonce.r.*)
36     *(.rela.data .rela.data.* .rela.gnu.linkonce.d.*)
37     *(.rela.tdata .rela.tdata.* .rela.gnu.linkonce.td.*)
38     *(.rela.tbss .rela.tbss.* .rela.gnu.linkonce.tb.*)
39     *(.rela.ctors)
40     /* ... */
41   }
```

Рис 4.4 Часть файла компоновщика



```

OUTPUT_ARCH(riscv)
MEMORY
{
    RAM (rwx) : ORIGIN = 0x80000000, LENGTH = 128M
}

```

Рис. 4.5 Добавленные строки

Этой конструкцией мы задали блок памяти с доступом на чтение запись и хранения инструкций. Так же определили его начало и размер, который мы узнали ранее. Далее определяем символ “\_\_stack\_top”.

```

PROVIDE(__stack_top = ORIGIN(RAM) + LENGTH(RAM));

```

Теперь перейдём к сборке исполняемого файла:

```

riscv64-unknown-elf-gcc -march=rv32i -mabi=ilp32 -g -ffreestanding -O0 -Wl,--gc-
sections -nostartfiles -Wl,-T,elf32.ld crt0.s main.c bubble.c

```

Тут мы указали свой “crt0.s” который имеет следующее содержание:

Листинг 4.1 crt0.s

```

.section .init, "ax"
.global _start
_start:
    .cfi_startproc
    .cfi_undefined ra
    .option push
    .option norelax
    la gp, __global_pointer$
    .option pop
    la sp, __stack_top
    add s0, sp, zero
    jal zero, main
    .cfi_endproc
.end

```

Несмотря на настройку приложения под виртуальную машину не удалось достичь её запуска. Регистр pc не может установиться на 0x80000000...

## Вывод

В ходе выполнения лабораторной работы была написана программа на языке C с заданной функциональностью. После была выполнена сборка этой программы по шагам для архитектуры команд RISC-V. Были проанализированы выводы препроцессора, компилятора и линковщика отдельно друг от друга. Была создана своя статически линкуемая библиотека libBubble.a. Были написаны make-файлы для её сборки, а также сборки тестовой программы с использованием библиотеки. Были произведены попытки запуска исполняемого файла, но что-то пошло не так.