Проектиране на вградени автомобилни електронни системи
Лабораторно упражнение №20

Работа с Xilinx Vivado и Vitis. Работа с кросдебъгер GDB и сървърно приложение XSCT. Дебъгване на вградени системи през Интернет.

==========

1. Превключете джъмпера вдясно на платката на позиция JTAG. Свържете µUSB кабел към PROG/UART USB куплунга. Включете платката от ключа ON/OFF. Включете USB-към-UART конвертор към сигнали JB1_P (T20), отговарящ на Uartlite_TxD, и JB1_N (U20), отговарящ на Uartlite_RxD. Модулът Uartlite ще бъде свързан към един MicroBlaze.

2. Стартирайте две копия на Cutecom (или gtkterm) и отворете портовете, отговарящи на printf канала на дебъгера и на Uartlite. Стартирайте терминал с CTRL + ALT + t и изпълнете командите:

```
cd /home/user/workspaces/xilinx_workspace
source /home/user/programs/Xilinx/Vitis/2022.2/settings64.sh
```

3. Сървърното приложение XSCT има за цел да уеднакви протоколите за комуникация на няколко дебъг интерфейса и да предостави дебъг достъп на потребителя до неговата система посредством стандартен TCP/IP терминал или софтуерния дебъгер GDB.

В терминала, отворен в миналата точка (№1), стартирайте сървърното приложение XSCT:

```
xsct
connect
```

а в друг терминал (№2) се свържете към него отново с XSCT, но в режим на клиент. За целта изпълнете командите:

```
xsct
connect -url TCP:127.0.0.1:3121
```

Програмирайте битстриймът на FPGA и фърмуерните файлове на двата процесора от клиентския терминал (№2) със следните команди:

```
targets
targets 4
fpga
```

```
/home/user/workspaces/xilinx_workspace/20_3/boot/bitstream.bit
targets 2
dow /home/user/workspaces/xilinx_workspace/20_3/boot/fsbl.elf
con
dow /home/user/workspaces/xilinx_workspace/20_3/boot/cortex.elf
con
targets 6
dow /home/user/workspaces/xilinx_workspace/20_3/debug/main.elf
con
```

Ако всичко е минало успешно, в терминалът на MicroBlaze трябва да се видят съобщенията от последната точка на миналото упражнение.

4. Изпълнете програмата стъпка по стъпка. За целта трябва първо да спрете и рестартирате изпълнението на програмата с командите:

```
stop
rst
```

и след това да напишете командата няколко пъти:

```
nxt 1
```

която ще ви изписва следната информация:

```
xsct% nxt 1
Info: MicroBlaze #0 (target 6) Stopped at 0x50 (Step)
XIntc_RegisterFastHandler() at xintc_l.c: 540
540:        if (CurrentIER & Mask) {
xsct% nxt 1
Info: MicroBlaze #0 (target 6) Stopped at 0x58 (Step)
408:             CfgPtr = Xintc_LookupConfig(InterruptId/32);
```

Това е start-up кода на MicroBlaze. Ако MicroBlaze започне да изпълнява код без дебъгерна информация (обектов файл, който не е компилиран с -g аргумента), XSCT ще изпише съобщение за грешка:

```
Info: MicroBlaze #0 (target 6) Stopped at 0x23c (Step)
_crtinit() at crtinit.S: 91
91:   couldn't   open   "/usr/src/debug/libmblebspmfpd-libgloss/4.1.0-r0/newlib-
4.1.0/libgloss/microblaze/crtinit.S": no such file or directory
```

което е очакван резултат.
След няколко стъпки можете да пуснете отново програмата да се изпълнява до край с командата:

```
con
```

5. С команди на XSCT може да се четат и записват регистри на микроконтролера. Това са командите:

`mrd [опции] [адрес] [n]` – чете *n* брой думи от *адрес* в паметта
`mwr [опции] [адрес] [стойности] [n]` – записва *n стойности* с начален *адрес* в паметта

Прочетете първите 32 32-битови думи от началото на BRAM паметта, реализираща локалната памет на микропроцесора MicroBlaze (0x0000.0000):

```
mrd 0x00000000 32
```

6. Пуснете светодиода от предишното лабораторно да свети без да използвате микропроцесорът MicroBlaze. За целта първо спрете захранването на платката, след това го пуснете и инициализиращите команди до пускането на FSBL. След това изберете MicroBlaze с команда targets 6. На този етап хардуерът на PL частта ще работи, но MicroBlaze няма да има зареден фърмуерен файл (.elf). С mrd и mwr командите модифицирайте съответните регистри:

```
//GPIO_TRI, Set all as outputs
0x40000004 0x00000000
//GPIO_DATA, Set output 3 to logic 1, clear others
0x40000000 0x00000008
```

7. Програмирайте фърмуерите на ARM Cortex A9 и MicroBlaze. Затворете терминал 2 на XSCT. В Линукс терминал влезте в debug директорията на проекта ви от миналото упражнение и стартирайте софтуерната дебъг програма GDB [1], която е клиентско приложение:

```
mb-gdb
```

Така ще се стартира нова дебъг сесия. Свържете GDB с XSCT с помощта на командата:

```
target remote 127.0.0.1:3002
```

където всеки порт отговаря за различна архитектура:
*порт 3000 е за Arm
*порт 3001 е за AARCH64
*порт 3002 е за MicroBlaze [2]
*порт 3003 е за MicroBlaze64 [3]

Вместо remote може да се напише extended аргументът, който оказва, че ще се дебъгва многоядрен микропроцесор. В настоящото лабораторно такъв е ARM

Cortex A9. Тогава може да се използват командите add-infe, infe, attach и detach, с които се оказва кое ядро се дебъгва в момента.

ВНИМАНИЕ! GDB дебъг сървърът се пуска автоматично от XSCT след въвеждане на командите xsct и connect. Програмата xsct съдържа драйвер за JTAG интерфейса на Zybo и тя е отговорна за конвертирането на GDB команди в команди за хардуерния дебъг модул на MicroBlaze. Ако XSCT не е стартиран, GDB няма да може да осъществи връзка (това е софтуерен дебъгер от високо ниво).

Заредете програмата ви за изчисляване на RMS стойност посредством GDB командата:

```
load main.elf
```

Заредете символната и дебъгерната информация от .elf файла в GDB, за да можете да дебъгвате със съответните команди:

```
file main.elf
```

Клиентската програма GDB позволява да се предават команди директно на сървърната програма посредством командата monitor. Например следните команди са команди на XSCT сървъра:

```
monitor ps
monitor info
monitor help
```

За съжаление, към днешна дата това са единствените команди, които може да се предадат към XSCT.

Поставете точка на прекъсване в началото на main( ) функцията ви посредством (действието се нарича set breakpoint):

`break main` (или само `b main`)

Аналогично можете да сложите точки и в други места на програмата ви:

```
break led_set
break led_clear
```

Точка на прекъсване може да се сложи на произволен ред така:

```
break <номер на ред>
```

```
break <име на файл : номер на ред>
```

Списък с всички активни точки може да се покаже с командата:

```
info break
```

Премахване на всички точки или само на някои от тях може да стане с :

```
delete breakpoints
delete breakpoint <номер на точката от списъка “info break”>
```

Поставете даннова точка на прекъсване (watchpoint) на някоя от променливите във вашата програма с:

```
watch <име-на-променлива>
rwatch <име-на-променлива>
awatch <име-на-променлива>
```

където програмата ще бъде прекъсната при съответно запис на нова стойност в променливата, променливата бъде прочетена, променливата бъде записана или прочетена.

Списък с всички даннови точки на прекъсване може да се види с

```
info watchpoints
```

Премахване на даннова точка става с:

```
delete <номер на точката от списъка “info break”>
```

Пуснете програмата да се изпълнява, до безкрай или докато не срещне точка на прекъсване (действието се нарича resume):

`continue` (или съкратено `c`)

Ако всичко е минало успешно в терминала ви ще се изпише:

```
(gdb) c
Continuing.

Breakpoint 3, led_clear () at led.c:46
46        XGpio_DiscreteWrite(&output, 1, 0x00);
```

Сега можете да изпълнявате програмата стъпка по стъпка, т.е. ред по ред във вашата C програма посредством командата:

`step` (или съкратено `s`)

След всяка стъпка дебъгерът ще ви показва информация за програмния брояч (не забравяйте, че програмният брояч нараства в зависимост от размера на изпълняваните инструкции, както и от размера на конвейера на съответния микропроцесор). С тази команда, ако срещнете функция в сорс кода ви ще влезете в нея да я дебъгвате (действието се нарича **step into**).
Възможно е стъпките да са на ниво Асемблер, тогава трябва да се използва:

```
stepi
```

Ако е излишно дебъгването на всяка срещната функция, може да се използва командата:

`next` (или съкратено `n`)

която срещайки функция, ще изпълни кода ѝ и ще предаде контрол обратно на програмиста на излизане от функцията (действието се нарича **step over**).
Ако сте влезли в много голяма функция и искате да излезете на ниво функцията, която я извикала първоначално, използвайте командата (действието се нарича **step out**):

```
finish
```

Ако е необходимо, паметта на микроконтролера може да се прочита с командата:

```
x <адрес>
```

Разгледайте първите две думи в началото на LMB (Local Memory Bus, реализирана в BRAM) паметта, както направихте в предходните точки:

```
x 0x00000000
x 0x00000004
```

Докато е спряно изпълнението на програмата ви, разгледайте променливите ѝ с помощта на командата:

```
p <име на променлива>
p <име на файл :: име на променлива>
p <име на функция :: име на променлива>
```

Командата p може да приема и форматиращи спецификатори (подобно на printf)

като се сложи наклонена черта и буква (виж таблицата на следващата страница):

`p/<форматиращ спецификатор> <име на променлива>`

Съдържанието на регистрите на ядрото може да бъде показано с командата:

`info registers`

8. Дебъгерната програма GDB може да чете стекови извадки (stack frame). За да тествате тази команда, напишете във вашия main.c файл три функции, всяка от която извършва някакви изчисления и вика следващата, например:

main → my_func_1 → my_func_2 → my_func_3

Спрете дебъг сесията, компилирайте и заредете програмата, стартирайте нова дебъг сесия. Сложете точка на прекъсване в най-вътрешната функция (my_func_3) и напишете някоя от командите:

Форматиращ спецификатор	**Детайли**
x	Целочислена стойност в шестнадесетичен вид
d	Целочислена стойност в десетичен вид със знак
u	Целочислена стойност в десетичен вид без знак
o	Целочислена стойност в осмичен вид
t	Целочислена стойност в двоичен вид
a	Адрес на променливата в паметта + отместване от най-близкия символ
c	Символ + числен еквивалент на символа
f	Число с плаваща запетая
s	Символен низ
z	Същото като 'x', но стойността ще бъде предшествана от нули в зависимост от размера ѝ в паметта
r	Python pretty-printer

`backtrace` (или само `bt`)

```
backtrace full
```

Втората команда показва всички локални променливи, които се съхраняват в стек паметта (SRAM) в дадения момент от програмата ви.

9. Дебъгерната програма GDB може да работи в мрежи с отдалечени target-и. За да изпробвате тази възможност нека една от работните маси да бъде Xilinx hw_server сървър с демо платка, а друга маса да бъде GDB клиент с фърмуер и bitstream, който ще се дебъгва.

На сървърното PC стартирайте терминал и напишете:

```
ifconfig
```

Оттам ще разберете IP адреса на въпросното PC. Стартирайте hw_server по следния начин (в терминал, в който е бил изпълнен скриптът settings64.sh на Vitis):

```
hw_server
```

като имате предвид, че Xilinx hw_server стартира дебъг сървър, обвързан с два мрежови интерфейса:

*127.0.0.1:3002 (виртуален)
*xxxx.xxxx.xxxx.xxxx (физически)

където xxxx.xxxx.xxxx.xxxx е IP на компютърът, работещ като сървър. В настоящето лабораторно IP-тата започват с 192.168.0.xxx.

На клиентското PC стартирайте XSCT и се свържете с hw_server на сървърното PC. Програмирайте bitstream-ът и всички .elf файлове без mb.elf. Затворете клиентското XSCT. Стартирайте GDB на клиентското PC и на командата target remote напишете IP- то на сървъра на вашите колеги. Например, ако IP-то на сървъра е 192.168.1.143, то изпълнете следните команди:

```
mb-gdb
target remote 192.168.1.143:3002
```

Тествайте командите от предишните задачи.

ВНИМАНИЕ: Примерът работи в локална мрежа. На практика, ако двата компютъра са отдалечени, със свои реални IP адреси, ще е необходимо да настроите т.нар. Port Forwarding на вашия рутер, свързан към компютъра, който ще има сървърна роля (т.е. там където ще е FPGA). Фиксирайте едно IP от

DHCP pool-а за вашия MAC адрес, след което с това IP и порт 3002 направете Port Forwarding. Когато трябва да се свържете с клиента GDB, укажете реалното IP (т.е. WAN адреса на рутера), а не локалното, което ви е дадено от DHCP.

10. Настройка на развойната среда Eclipse за работа с GDB и XSCT. Развойната среда с отворен код Eclipse поддържа toolchain-а GCC и е добре интегриран с него. Вземете архивния файл на Eclipse и го разархивирайте (най-новата версия може да бъде свалена от [4], от раздела “Eclipse IDE for C/C++ Developers”). Влезте в новосъздадената папка “eclipse” и натиснете два пъти върху файла “eclipse”. Укажете работна директория на Desktop-а и натиснете OK.

За да отворите вашия проект, изберете File → Import → C/C++ → Existing Code as Makefile Project → Next → Existing Code Location → Browse → укажете пътя до вашия проект от миналите задачи, в същия прозорец изберете Cross GCC, задайте примерно име на проекта в полето Project Name → Finish. Изтрийте изходните файлове с Project → Clean → отметка на Clean all projects и маха се отметката на Start a build immediately. Ако сега натиснете бутона за build-ване (иконка на чук) в таб-а Console ще ви излезе грешката:

```
make[1]: mb-gcc: Command not found
```

Това е нормално, защото в средата (environment) на операционната система може да не е указан пътя до GCC. Това може да бъде направено от Eclipse по следния начин: десен бутон на top-level директорията на току-що импортнатия ви проект → Properties → C/C++ Build → Environment → изберете променливата PATH → Edit → в края на полето Value добавете двуеточие и укажете пътя до GCC → OK → OK → Build. Сега не би трябвало да излязат грешки, а в конзолата ще видите това, което досега виждахте в терминала на Линукс.

Забележка: за да разберете пътя до компилатора, в Линукс терминал напишете which mb-gcc .

За да може Eclipse да използва графичен front-end за GDB в режим на TCP/IP комуникация първо трябва да се инсталира Java Plug-in наречен “GDB Hardware Debugging”. Първо проверете дали плъгинът не е вече инсталиран Help → About Eclipse → Installation Details → type filter text → GDB. Ако се покаже поле “C/C++ GDB Hardware Debugging”, значи плъгинът е инсталиран. Ако това поле липсва, плъгинът трябва да се инсталира изрично [5]. Това може да стане от Help → Install New Software → Work with → Изберете от падащото меню версията на Eclipse, например по-старите версии са с имена като Kepler - http://download.eclipse.org/releases/kepler , а по-новите са с имена [година]-[месец], когато е излязла средата → в полето “Type filter text” напишете “C/C++ GDB

Hardware Debugging” (или изберете Work with: --All Available Sites-- → Mobile and device development → C/C++ GDB Hardware Debugging) и натиснете Enter → Ще се появи категория (за конкретната версия името ѝ е “Mobile and Device Development”), която трябва да отворите и да сложите тикче върху “C/C++ GDB Hardware Debugging” → натиснете Next и следвайте указанията за инсталацията. Когато инсталацията приключи, средата ще се рестартира.

За да се настрой дебъг сесия трябва да се избере Run → Debug Configurations → кликнете два пъти върху GDB Hardware Debugging → ще ви се отвори таб New Configuration, който можете да конфигурирате от десния панел.

Най-важните полета, които трябва да попълните са:
*C/C++ Application – път до изпълнимия файл с дебъгерна информация main.elf
*Project – директория, в която се намират сорс файловете на проекта;
*Debugger → GDB Command – да се укаже точния префикс на GDB командата – в случая mb-gdb;
*Use remote target – това тикче трябва да е сложено, за да укажем TCP/IP връзка;
*JTAG Device – избира се Generic TCP/IP;
*Host name or IP address – указва се IP адреса на сървъра, т.е. на компютъра, на който върви вече пуснат Xilinx hw_server; Port number – номер на порт, на който се очакват връзки от сървъра, за hw_server видяхме, че това е 3002;
*Startup → Load Image и Load Symbols – и двете трябва да сочат към изпълнимия файл, т.е. “Use project binary” (тези радио бутони са еквивалентни на командите load и file от GDB, които тествахме по-рано);
*Set breakpoint at – пише се main, аналогично на командата breakpoint main;
*Run commands – добре е да се запишат monitor init и monitor reset halt, за да започваме винаги от ресет хендлера.

След като сме готови с всички настройки по менютата може да натиснем debug, което ще програмира BRAM паметта на FPGA през мрежата и ще изкара графичен интерфейс на GDB, с помощта на който може да се дебъгне програмата. Забележете, че сега за всяка команда си има по един бутон, с който лесно можете да дебъгвате.

*Тествайте различните бутони на графичния дебъгер. Сложете точки на прекъсване, наблюдавайте локални и глобални променливи, и т.н.

Забележка: дебъг режимът може да бъде използван и само на един компютър, но въпреки това отново дебъгването се нарича “remote”, защото протоколът си остава TCP/IP. Ако желаете да дебъгвате на един компютър, вместо IP на сървър напишете IP на виртуалния ви мрежови интерфейс 127.0.0.1 (също известен като localhost), като не забравяйте преди това да стартирате OpenOCD на същия този компютър.

Забележка: в последните години се появиха много Plugin-и за Eclipse, които са специално оптимизирани и с повече възможности за конкретни GDB сървъри, например за работа с OpenOCD. Такъв е проектът GNU MCU on Eclipse [6].

11. Тествайте командата за извличане на символи от .elf файл [7]. Под символи се разбират имена на всички функции и глобални променливи в обектовия файл. С Линукс терминал влезте в директорията с main.elf файла на вашия пример и изпълнете командата:

```
mb-nm -a -l main.elf
```

което ще принтира адрес в паметта, където ще се намира символа при изпълнението на програмата, буква-спецификатор, която указва вида на символа, името на символа, така както е дадено от програмиста и накрая (най-дясна колонка) файлът, в който е деклариран символът. Таблицата на другата страница показва обобщение на символните спецификатори. Главна буква указва външен (глобален) символ, докато с малка буква се указва локален символ. Ако желаете, можете да подредите символите по адреси, а не по азбучен ред на имената им. Това става с аргумента -n, или -v, или - -numberic-sort.

12. Тествайте командата за статичен анализ на използваната памет mb-size [8]. С нейна помощ може да се определи размера на .text, .data и .bss регионите. Регионите stack и heap зависят от изпълнението на програмата и техния размер може да бъде определен приблизително със симулация. Поради сложността на проблема, GCC няма програма, която да е способна на това. Изпълнете програмата с аргумент main.elf файла на вашия проект:

```
mb-size main.elf
```

В миналото лабораторно упражнение беше споменато, че байтовете, които ще се запишат в програмната памет на MicroBlaze са:

FLASH total = text + data

По подразбиране командата използва форматът Berkeley за изобразяване на данните. По-детайлна разбивка на секциите от паметта дава форматът System V:

```
mb-size --format=sysv main.elf
```

където по-горната формула може да се разшири:

Символен спецификатор	Значение
A	Абсолютна стойност на символа.
B, b	Символът ще се намира в .bss региона на паметта.
C	Неинициализиран символ.
D, d	Символът ще се намира в .data региона на паметта.
G, g	Символът ще се намира в .data региона за малки обекти (глобална int променлива е малък обект, глобален масив с int е голям обект).
i	Символът се намира в специална секция от DLL. Адресът е условен и ще бъде известен едва по време на изпълнението на програмата.
I	Символът е указател към друг символ.
N	Символът е за подпомагане на дебъгването.
n	Символът е в .const data региона на паметта
p	Символът се намира в stack unwinding региона на паметта (C++ деструктори).
R, r	Същото като n.
S, s	Символът ще се намира в .bss региона за малки обекти.
T, t	Символът ще се намира в .text региона на паметта.
U	Символът е неуточнен.
u	Символът е уникален глобален символ. Линкерът ще се погрижи в цялото адресно поле да няма други символи с такова име.
V, v	Символ, деклариран като weak.
W, w	Същото като V.
?	Символът е неуточнен или специфичен за дадения обектов файл.

FLASH total = isr_vector + text + rodata + ARM.extab + ARM + preinit_array + init_array + fini_array + data

Разучете линкерния флаг, който генерира подобна информация:

-Wl,--print-memory-usage

13. Програмата mb-objcopy копира съдържанието на един обектов файл в друг [9]. В процеса на копиране може да се приложат трансформации на данните. Именно заради това тази програма се използва често. Най-широкото ѝ използване е за преобразуване на обектови файлове с дебъгерна информация в обектови файлове без дебъгерна информация (“чисти” двоични файлове). Или накратко казано – с нейна помощ от .axf (.elf) файл се прави .bin файл.

Направете от .elf файлът един .bin, един .hex и един .rec файл като знаете аргументите на командата:

```
mb-objcopy -O [вид-изходен-файл] [име-на-входния-файл] [име-на-изходния-файл]
```

където “вид-изходен-файл” може да бъде binary, srec, ihex и др. (всички видове можете да видите с аргумента –info).

ВНИМАНИЕ: първо направете .bin файлът, след това от него направете другите два, като изрично укажете вид-входен-файл да е binary:

```
mb-objcopy -I [вид-входен-файл] -O [вид-изходен-файл] [име-на-входния-файл] [име-на-изходния-файл]
```

* * *

Приложение 1 – Анализ на стековата памет

==========

a. Размерът на използваната стековата памет зависи от фактори на околната среда. Пример – програма с много разклонения и дълбочина на внедряване на функциите една в друга, чийто ход зависи от стойностите на АЦП, свързан към датчик за осветеност. По друг начин казано – изпълнението на програмата зависи от осветеността в околната среда. Затова по време на компилация няма как да се предскаже размера на стека, но е възможен worst-case анализ [10]. Ако има рекурсивни функции, или извикване на функции с указатели, или внедрени прекъсвания (nested interrupts), или самомодифициращ се код, worst-case анализът е невъзможен.

Добавете в Makefile-а на вашата програма

```
-fstack-usage
```

това ще генерира файл с разширение .su, съдържащ най-дългия път в програмата (най-дълбокото внедряване). Структурата на файла е:

```
<име-на-файл>:<име-на-функция> <брой-байтове-на-локалните-променливи> <квалификатор>
```

Тук квалификатор е поле съдържащо една от три ключови думи:
*static – променливите са с фиксирана дължина и числата от файла .su са достоверни;
*dynamic – някои от променливите са с динамично променяща се дължина и на числата от .su не може да се вярва;
*bounded - някои от променливите са с динамично променяща се дължина, чийто максимум е предварително известен и числата от .su са достоверни.

Примерно съдържание на main.su:

```
main.c:9:6:my_func_3     20   static
main.c:15:6:my_func_2    20   static
main.c:23:6:my_func_1    20   static
main.c:31:5:main         56   static
```

b. Добавете флаг за предупреждение по време на компилация при увеличаване на стековата група (стековия фрейм) на коя-да-е функция в компилираният файл над определена стойност. За целта, на компилатора предайте следния аргумент:

```
-Wstack-usage=<брой-байтове>
```

За примерът от миналата точка, main( ) функцията има стеков фрейм от 56 байта, т.е. следното ограничение ще активира предупредителното съобщение:

mb-gcc -fstack-usage **-Wstack-usage=32** -mhard-float -mxl-float-convert -mxl-float-sqrt -g -O0 -S -I./led -I./uart -I./print -I./include -mlittle-endian -mxl-barrel-shift -mxl-pattern-compare -mcpu=v11.0 -mno-xl-soft-mul main.c -o ./debug/main.s

и в терминала трябва да се види:

```
mb-gcc -fstack-usage -Wstack-usage=32 -mhard-float -mxl-float-convert -mxl-float-sqrt -g -O0 -S -I./led -I./uart -I./print -I./include -mlittle-endian -mxl-barrel-shift -mxl-pattern-compare -mcpu=v11.0 -mno-xl-soft-mul main.c -o ./debug/main.s
main.c: In function 'main':
main.c:31:5: warning: stack usage is 56 bytes [-Wstack-usage=]
   31 | int main(void){
      |     ^~~~
```

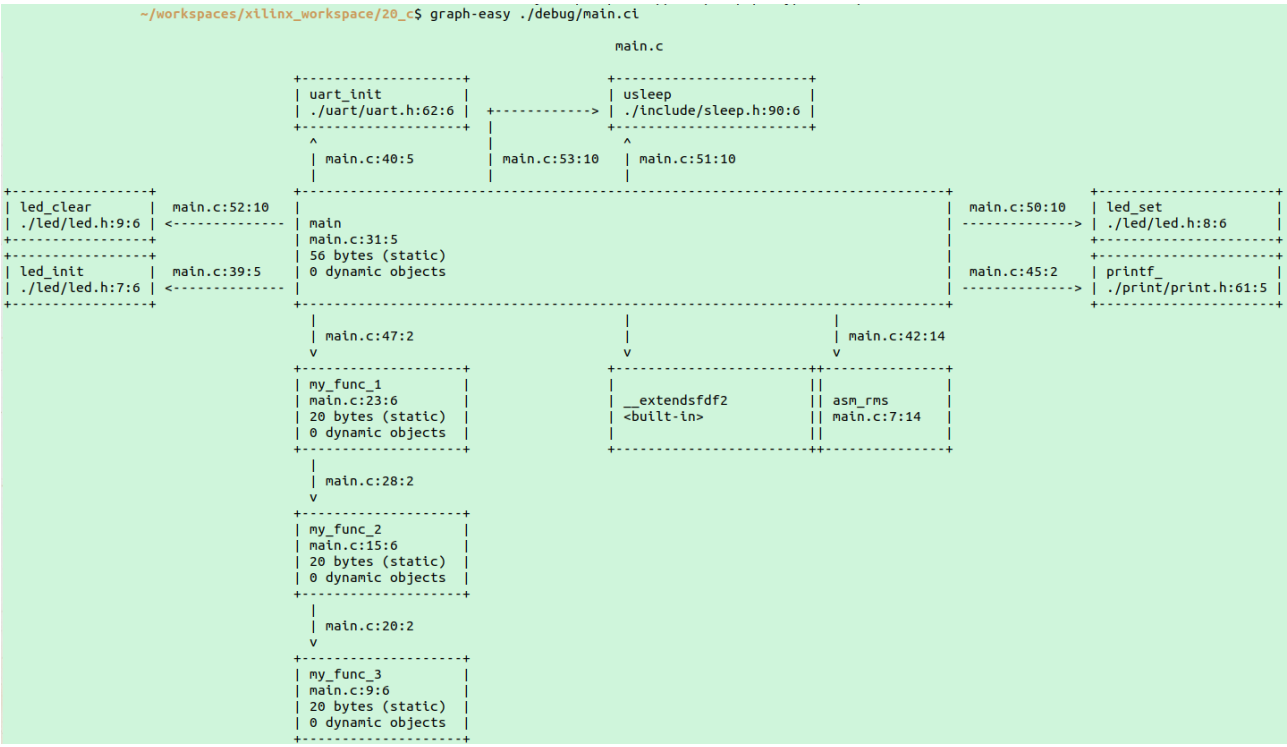
c. Добавете флаг, който да генерира дърво на извикванията на функциите от .su файлът. За целта, на компилатора предайте следните аргументи [11]:

```
-fcallgraph-info -fcallgraph-info=su -fcallgraph-info=da
```

който трябва да генерира .ci файл. Последният може да бъде прочетен с:

```
graph-easy main.ci
```

(при нова инсталация на Линукс, скриптът graph-easy трябва да бъде инсталиран с sudo apt install libgraph-easy-perl)



d. GCC има възможност да поставя код, който да проверява за препълване на стека по време на изпълнение на програмата [12]. Това става, като в края на стековата памет се запълни защитна страница (guard page) с известни стойности. В случай, че при извикване на функция или при влизане във функция с много локални променливи се задмине размера на стека (дефиниран в линкерния скрипт), ще се генерира Storage_Error изключение. Такъв вид защита, обаче, забавя програмата, защото се добавят допълнителни инструкции за проверка целостта на защитната страница.

ВНИМАНИЕ: тази защита не работи в два случая:
* ако локалната променлива, предизвикваща стековото препълване, задмине (“прескочи”) границата на защитната страница без да модифицира нейните данни;
* при настъпване в защитната страница, може да не е останало стеково пространство, с което да се изпълни успешно кода на Storage_Error изключението.

Модифицирайте кода от миналото упражнение, така че функция #3 да нарушава цялостта на стека:

```
void my_func_3(void){
	volatile int a = 3, b = 30, c;
	int arr[20];

	c = a + b;
```

```
	for(int i = 0; i < 30; i++){ //Corrupt the stack on purpose
		arr[i] = 0x33;
	}
}
```

ВНИМАНИЕ: не използвайте софтуерното закъснение usleep( ) с -fstack-check, защото този компилаторен флаг засяга inline асемблера и прави закъснението много голямо. Затова в main( ) напишете:

```
while (1){
	led_set();
	//usleep(1000000);
	for(volatile int i = 0; i < 1000000; i++){ }
	led_clear();
	//usleep(1000000);
	for(volatile int i = 0; i < 1000000; i++){ }
}
```

Изчистете проекта, компилирайте и заредете програмата във FPGA. Би трябвало програмата на MicroBlaze да зацикли при връщане в main( ) и да не мига светодиода.

В същия проект добавете -fstack-check флаг на GCC:

```
mb-gcc -fstack-usage -Wstack-usage=32 -fcallgraph-info -fcallgraph-info=su -fcallgraph-info=da -fstack-check -mhard-float -mxl-float-convert -mxl-float-sqrt -g -O0 -S -I./led -I./uart -I./print -I./include -mlittle-endian -mxl-barrel-shift -mxl-pattern-compare -mcpu=v11.0 -mno-xl-soft-mul main.c -o ./debug/main.s
```

Изчистете проекта, компилирайте и заредете програмата отново. Би трябвало да работи както се очаква, без нарушение на стека.

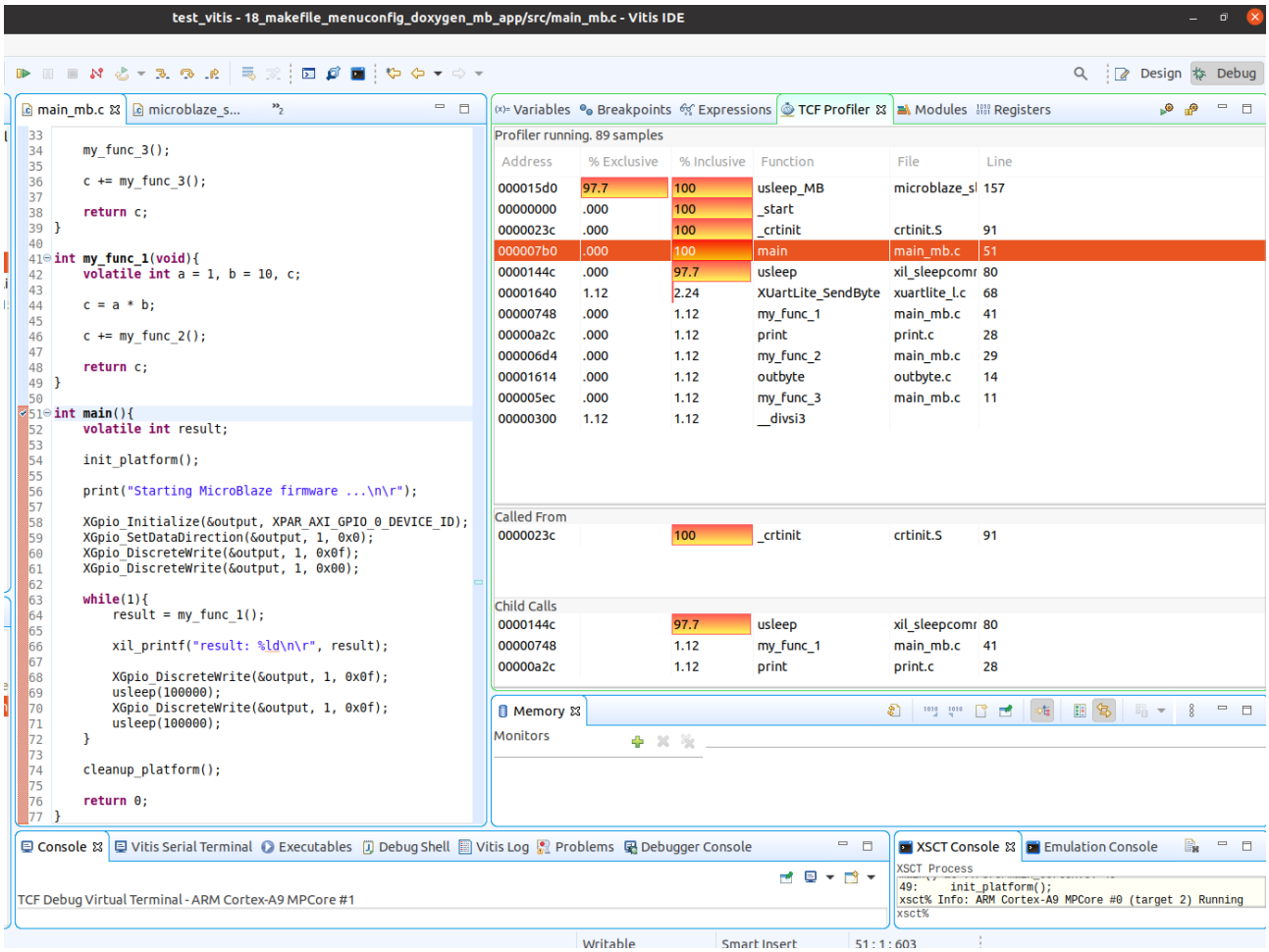
Разучете компилаторния флаг `-fdump-tree-all-graph`.

Приложение 2 – Анализ на бързодействието на програмата (code coverage) – интрузивно и неинтрузивно профилиране

==========

е. Неинтрузивно профилиране. Отворете проект във Vitis, стартирайте дебъг сесия. Изберете от таб Debug микропроцесора ARM Cortex A9, ядро 0, и натиснете Resume.

Изберете от таб Debug микропроцесора MicroBlaze. От главното меню на Vitis изберете → Window → Show view → Debug → TCF Profiler → Open → вдясно на таб TCF Profiler → бутон Start → отметка на “Aggregate per function”, View update interval (msec): 4000 → бутон Resume → бутон Suspend. Би трябвало да се видят данни, подобни на тези във фигурата по-долу:



Опциите от TCF старт бутона са:

*Aggregate per function – групира измерванията от различни адреси на една функция в един ред от TCF прозореца.
*Enable stack tracing – прави профилирането интрузивно, разрешава

проследяване на извикванията на функциите (прозорци Called From, Child Calls)
*Max stack frames count – максимален брой внедрени функции, които да бъдат проследени и показани в прозорци Called From и Child Calls.
*View update interval – период на опресняване на графиките от TCF Profiler таб

f. Интрузивно профилиране. GCC включва програма за генериране на статистика относно бързодействието на изпълнимия файл в различните му клонове [13]. Тази програма се казва gcov и работи само с изпълними файлове, направени с GCC. **Към днешна дата, развойната среда на Xilinx не поддържа gcov за baremetal фърмуер на MicroBlaze[17]**.

Изпълнимият код трябва да бъде модифициран (instrumented) с допълнителни инструкции, които записват статистиката. Това става чрез флаговете на компилатора:

```
-fprofile-arcs -ftest-coverage
```

Горните два флага може да се заместят от еквивалентния:

```
--coverage
```

За да може да се използват тези флагове, на линкера трябва да се укаже библиотеката:

```
-lgcov
```

За всеки файл, компилиран с -ftest-coverage, ще се създаде файл със същото име, но с разширение **.gcno** [14]. Това е двоичен файл, съдържащ блокови диаграми на потребителския код и номера на редове от сорс кода, съответстващи на всеки един блок.

За всеки файл, компилиран с -fprofile-arcs, ще се създаде още един файл с име като сорс файла, но с разширение **.gcda** [14]. Този файл се създава, след като се изпълни програмата веднъж и е двоичен файл. Той съдържа брой трансфери по арките от блоковата схема, статистически стойности, както и обобщаваща информация.

Информацията от двоичните файлове .gcno и .gcda се извлича и се преобразува в текстови вид чрез командата:

```
gcov -b <име-на-сорс-файл>.c
```

където <име-на-сорс-файл>.c е името на файлът, компилиран с -fprofile-arcs -ftest-coverage и той трябва да се намира в същата директория, в която се

намират .gcno и .gcda файловете. Като изходен продукт ще се създаде файлът:

`<име-на-сорс-файл.c>.gcov`

и той съдържа статистическата информация от изпълнението на програмата. Ето един пример:

```
        -:    0:Source:../src/main.c
        -:    0:Graph:main.gcno
        -:    0:Data:main.gcda
        -:    0:Runs:2
        -:    1:#include <stdio.h>
        -:    2:#include <stdlib.h>
        -:    3:#include <stdint.h>
        -:    4:
function my_func_3 called 2 returned 100% blocks executed 100%
        2:    5:void my_func_3(void){
        2:    6:  volatile int a = 3, b = 30, c;
        -:    7:  int arr[20];
        -:    8:
        2:    9:  c = a + b;
        -:   10:
       42:   11:  for(int i = 0; i < 20; i++){
branch  0 taken 95%
branch  1 taken 5% (fallthrough)
       40:   12:        arr[i] = c+0x33;
        -:   13:  }
        2:   14:}
        -:   15:
function my_func_2 called 2 returned 100% blocks executed 100%
        2:   16:void my_func_2(void){
        2:   17:  volatile int a = 2, b = 20, c;
        -:   18:
        2:   19:  c = a + b;
        -:   20:
        2:   21:  my_func_3();
call    0 returned 100%
        2:   22:}
        -:   23:
function my_func_1 called 2 returned 100% blocks executed 100%
        2:   24:void my_func_1(void){
        2:   25:  volatile int a = 1, b = 10, c;
        -:   26:
        2:   27:  c = a + b;
        -:   28:
        2:   29:  my_func_2();
call    0 returned 100%
        2:   30:}
        -:   31:
function arr_process called 0 returned 0% blocks executed 0%
         #####:       32:void  arr_process(uint8_t  input_array[3][3],  uint8_t
output_array[3][3]){
    #####:   33:  uint8_t sum = 0;
        -:   34:
    #####:   35:  for(int i = 0; i < 3; i++){
```

```
branch  0 never executed
branch  1 never executed
    #####:   36:        for(int j = 0; j < 3; j++){
branch  0 never executed
branch  1 never executed
    #####:   37:              sum += input_array[i][j];
        -:   38:        }
    #####:   39:        output_array[i][0] = sum;
    #####:   40:        output_array[i][1] = sum;
    #####:   41:        output_array[i][2] = sum;
    #####:   42:        sum = 0;
        -:   43:  }
    #####:   44:}
        -:   45:
function main called 2 returned 100% blocks executed 100%
        2:   46:int main(void){
        2:   47:  my_func_1();
call    0 returned 100%
        -:   48:
        2:   49:  return EXIT_SUCCESS;
        -:   50:}
        -:   51:
```

Пускането на анализ на кода е малко по-сложно в системи без операционна и файлова система [15] [16][18].

Ето някои **насоки** за пускане на gcov на baremetal фърмуер за MicroBlaze (все още не се поддържа от Vitis):

Добавянето на -fprofile-arcs, -ftest-coverage, -lgcov ще доведе до грешки на линкера за функциите _sub_I_00100_0 и _sub_D_00100_1:

```
undefined reference to `__gcov_init'
undefined reference to `__gcov_exit'
undefined reference to `__gcov_merge_add'
```

Затова първата стъпка е да се добави още един флаг на компилатора:

```
-fprofile-info-section
```

което ще накара компилатора да разположи служебната информация за профилирането в сегмент от паметта, наречен .gcov_info [15], вместо във файл. Следващата стъпка е модификация на линкерния скрипт (lscript.ld) – след .rodata сегмента копирайте следния текст:

```
.gcov_info : {
    PROVIDE (__gcov_info_start = .);
    KEEP (*(.gcov_info))
    PROVIDE (__gcov_info_end = .);
}>
```

```
microblaze_0_local_memory_ilmb_bram_if_cntlr_Mem_microblaze_0_loca
l_memory_dlmb_bram_if_cntlr_Mem
```

Добавя се флагът към линкера:

```
-fprofile-arcs
```

Модифицира се main( ) функцията, за да принтира по UART данните на статистиката за gcov. За целта:

*добавя се хедърния файл #include <gcov.h>
*добавя се хедърния файл #include <stdlib.h>
*добавят се указатели, декларирани в линкерния скрипт, в глобалното пространство на сорс файла, който ще се анализира:

```
extern const struct gcov_info *const __gcov_info_start[];
extern const struct gcov_info *const __gcov_info_end[];
```

*добавят се няколко функции, чиято задача е да принтира в потока stderr байтовете на статистиката. Ако printf е пренасочен към UART, тези байтове може да бъдат приети от персонален компютър, да бъдат записани във файл и да бъдат конвертирани от mb-gcov [15]:

```
static const unsigned char char_a = 'a';

static inline unsigned char* encode(unsigned char c, unsigned char buf[2]){
  buf[0] = c % 16 + char_a;
  buf[1] = (c / 16) % 16 + char_a;
  return buf;
}

static void dump(const void *d, unsigned n, void *arg){
  (void)arg;
  const unsigned char *c = d;
  unsigned char buf[2];

  for (unsigned i = 0; i < n; ++i){
    fwrite (encode (c[i], buf), sizeof (buf), 1, stderr);
  }
}

static void filename(const char *f, void *arg){
  __gcov_filename_to_gcfn (f, dump, arg);
}

static void* allocate(unsigned length, void *arg){
  (void)arg;
  return malloc(length);
}

static void dump_gcov_info(void){
  const struct gcov_info *const *info = __gcov_info_start;
```

```
  const struct gcov_info *const *end = __gcov_info_end;

  // Obfuscate variable to prevent compiler optimizations.
  __asm__ ("" : "+r" (info));

  while (info != end){
    void *arg = NULL;
    __gcov_info_to_gcda (*info, filename, dump, allocate, arg);
    fputc ('\n', stderr);
    ++info;
  }
}
```

*След края на профилирането (обикновено в края на main( ) функцията), трябва да се извика функцията:

```
dump_gcov_info();
```

* * *

[1] https://www.gnu.org/software/gdb/documentation
[2]https://www.xilinx.com/htmldocs/xilinx2019_1/SDK_Doc/SDK_tasks/sdk_working_with_GDB.html
[3] https://docs.xilinx.com/r/en-US/ug1400-vitis-embedded/GDB-GNU-Project-Debugger
[4] https://www.eclipse.org
[5] https://eclipse-embed-cdt.github.io
[6] https://mcuoneclipse.com/2016/04/09/freertos-thread-debugging-with-eclipse-and-openocd
[7] https://sourceware.org/binutils/docs/binutils/nm.html
[8] https://embarc.org/man-pages/binutils/size.html
[9] https://sourceware.org/binutils/docs/binutils/objcopy.html
[10] https://gcc.gnu.org/onlinedocs/gnat_ugn/Static-Stack-Usage-Analysis.html
[11] https://gcc.gnu.org/legacy-ml/gcc-patches/2019-10/msg01881.html
[12] https://gcc.gnu.org/onlinedocs/gnat_ugn/Stack-Overflow-Checking.html
[13] https://gcc.gnu.org/onlinedocs/gcc/Gcov-Intro.html
[14] https://gcc.gnu.org/onlinedocs/gcc/Gcov-Data-Files.html
[15] https://gcc.gnu.org/onlinedocs/gcc/Freestanding-Environments.html
[16] https://docs.oracle.com/cd/E88353_01/html/E37839/g-plus--plus--1.html
[17] “Embedded System Tools Reference Manual EDK”, UG111 (v14.3), p.229, Xilinx, 2012.
[18] https://mcuoneclipse.com/2014/12/26/code-coverage-for-embedded-target-with-eclipse-gcc-and-gcov/

доц. д-р инж. Любомир Богданов, 2023 г.