UNIVERZITET U BEOGRADU
MATEMATIČKI FAKULTET

Đorđe Todorović

PODRŠKA ZA NAPREDNU ANALIZU PROMENLJIVIH LOKALNIH ZA NITI POMOĆU ALATA GNU GDB

master rad

Beograd, 2019.

Mentor:

dr Milena Vujošević-Janičić, redovan profesor
Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet

Članovi komisije:

dr Filip Marić, redovan profesor
Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet

dr Miroslav Marić, redovan profesor
Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet

Datum odbrane: _____

Daretu

Sadržaj

Glava 1

Uvod

Arhitektura ugrađenih uređaja se najčešće ne poklapa sa arhitekturom ličnih računara. Poznato je da se programi koji su prevedeni za jednu arhitekturu računara ne mogu izvršavati na računarima koji poseduju drugačiju arhitekturu. Greške u programima koji se izvršavaju na ugrađenim uređajima najčešće otklanjamo koristeći alate na ličnim računarima. GNU GDB alat, između ostalog, omogućava analiziranje i otklanjanje grešaka u programima koji se izvršavaju na drugim arhitekturama. Načini kroz koje se to može ostvariti jesu korišćenje GDB servera, uz korišćenje posebnih protokola, ili korišćenje datoteka jezgara. Datoteka jezgra može biti kreirana iz korisničkog nivoa, npr. baš uz pomoć GDB alata, ili prilikom neregularnog prekida izvršavanja programa samo jezgro operativnog sistema može krerati istu. Ona sadrži stanje radne memorije procesa prilikom rušenja ili prekidanja na neki drugi nestandardni način. Preciznije, one sadrže informacije o vrednostima promenljivih, vrednosti procesorskih registara, programske brojače, informacije o samom procesu, informacije o nitima itd. Tako kreiranu datoteku jezgra na gostujućoj arhitekturi učitavamo u GNU GDB alat na računaru sa arhitekturom domaćina i otklanjanje grešaka i analiza mogu da počnu. Ovaj rad, pored implementacije poboljšanja alata, opisuje i postupak korišćenja GNU GDB alata prilikom dobijanja vrednosti TLS promenljivih, koje predstavljaju promenljive lokalne za niti. Svaka nit ima svoju kopiju TLS promenljive i prilkom analiziranja programa značajno je pročitati vrednosti iz svih niti. Ključna reč, programskih jezika C i C++, koja se dodaje ispred definicije ili deklaracije promenljive je `__thread`. Jeadan od slučajeva upotrebe takve promenljive je predstavljanje jedinstvenog broja koji označava grešku koju je prijavio program, pa ima smisla da je u različitim nitima ova promenljiva imala drugačiju vrednost. Različite arhitekture mogu imati različitu implementaciju

TLS-a, te je njihovo čitanje iz alata GNU GDB dodatno otežano. Glavni doprinos rada predstavlja omogućavanje dohvatanja vrednosti TLS promenljive za sve procesorske arhitekture podržane u GNU GDB alatu na arhitekturi domaćina, čime se proširuju dostupne informacije za analizu programa drugih arhitektura. Rad se pored prvog uvodnog, sastoji još iz pet poglavlja. Drugo poglavlje opisuje motivacionu ideju. Treće poglavlje pruža informacije o zahtevanim karakteristikama samog programa koji se analizira. Četvrto poglavlje prikazuje detalje implementacije. U petom poglavlju je opisan precizan postupak prevođenja GNU GDB alata, dok je u šestom poglavlju predstavljen zaključak.

Glava 2

Kako rade debageri?

Greške su sastavni deo svakog rada koji obavlja čovek, te ih i programeri prave. Greške mogu biti hardverske i softverske. One mogu imati razne poslednice. Neke su manje važne, kao npr. korisnički interfejs aplikacije ima neočekivanu boju pozadine. Postoje i greške koje mogu imati daleko veće posledice, pa čak i ugroziti živote drugih, kao npr. greške u softveru ili hardveru uređaja i aplikacija avio industrije. Faza testiranja je veoma važna u ciklusu razvoja softvera. Nakon faze testiranja obično sledi faza analize i otklanjanja grešaka.

Debager (eng. *debagger*) je softverski alat koji koriste programeri za testiranje, analizu i otklanjanje grešaka u programima. Sam proces korišćenja takvih alata nazivamo debagovanjem (eng. *debugging*). Debageri mogu pokrenuti rad nekog procesa ili se „nakačiti" na proces koji je već u fazi rada. U oba slučaja, debager preuzima kontrolu nad procesom. To mu mogućava da izvršava proces instrukciju po instrukciju, do postavlja tačke prekida (eng. *brakpoints*) itd. Proces izvršavanja programa od strane debagera sekvencijalno, instrukciju po instrukciju ili liniju po liniju, nazivamo koračanje. Tačke prekida su mogućnost debagera da zaustavi izvršavanje programa na određenoj tački. To može biti trenutak kada program izvrši određenu funkciju, liniju koda itd. Neki debageri imaju mogućnost izvršavanja funkcija programa koji se debaguje, uz ograničenje da program pripada istoj procesorskoj arhitekturi kao i domaćinski sistem na kojem se debager izvršava. Čak i struktura programa može biti promenjena, prateći propratne efekte.

Podršku debagerima, u opštem slučaju, daju operativni sistemi, kroz sistemske pozive koji omogućavaju tim alatima da pokrenu i preuzmu kontrolu nad nekim drugim procesom. Za neke naprednije tehnike debagovanja poželjna je podrška od strane hardvera. U radu će detaljno biti obrađen rad UNIX-olikih, posebno Linux

debagera. Windows debageri i programski prevodioci ne prate standard DWARF [4] prilikom baratanja sa debag informacijama namenjene za taj operativni sistem. Alati za debagovanje u okviru operativnog sistema Windows koriste standard *Majkrosoft CodeView*. Više informacija o ovom standardu može se pronaći u literaturi [10].

2.1 Prevođenje programa

Programi koji se debaguju se prevode uz pomoć odgovarajuće opcije programskih prevodioca (za prevodioce GCC i LLVM/Clang, to je opcija `-g`) koja obezbeđuje generisanje pomoćnih debag informacija. Ukoliko je program koji se analizira preveden bez optimizacija, debag informacije koje prate program su potpune. Programi koji se puštaju u produkciju, da bi bili brži i zauzimali manje memorije, se prevode uz pomoć optimizacija. Nivoi optimizacija produkcijskih programa su „-O2" i „-O3". Prilikom optimizacija se gube razne debag informacije. Neke promenljive i funkcije programa neće biti predstavljene debag informacijama. Npr. promenljiva programa može biti živa samo u nekim određenim delovima programa, pa programski prevodioci generišu debag informacije o njenim lokacijama samo u tim određenim delovima koda. Prilikom optimizacija na nivou mašinskog koda život promenljive može biti skraćen, pa čitanje vrednosti promenljive iz debagera u nekim sitacijama neće biti moguće, iako gledajući izvorni kod očekujemo da je ona živa u tom trenutku.

2.2 Fajl format DWARF

DWARF je debag fajl format koji se koristi od strane programskih prevodioca (kao npr. GCC ili LLVM/Clang) i debagera (kao npr. GNU GDB) da bi se omogućilo debagovanje na nivou izvornog koda. Omogućava podršku za razne programske jezike kao što su C/C++ i Fortran, ali je dizajniran tako da se lako može proširiti na ostale jezike. Arhitekturalno je nezavisan i predstavlja „most" između izvornog koda i izvršnog fajla. Trenutno je poslednji realizovani standard verzija 5 formata DWARF.

Debag fajl format DWARF se odnosi na Unix-olike operativne sisteme, kao što su Linux i MacOS. Generisane debag informacije, prateći DWARF standard, su podeljene u nekoliko sekcija sa prefiksom `.debug_`. Neke od njih su `.debug_line`, `.debug_loc` i `.debug_info` koje redom predstavljaju informacije o linijama izvornog koda, lokacijama promenljivih i ključna debag sekcija koja sadrži debag informacije koje referišu na informacije iz ostalih debag sekcija. DWARF je predstavljen kao drvolika struktura, smeštena u `.debug_info` sekciju, koja razne entitete programskog jezika opisuje osnovnom debag jedinicom DIE (eng. Debug Info Entry). Osnovna debag jedinica može opisivati lokalnu promenljivu programa, formalni parametar, funkciju itd. Svaka od njih je identifikovana DWARF tagom koji predstavlja informaciju o toj jedinici, gde je npr. tag za lokalne promenljive predstavljen sa `DW_TAG_local_variable`, ili tag za funkciju je obeležen sa `DW_TAG_subprogram`. Svaka debag jedinica je opisana određenim DWARF atributima sa prefikosm `DW_AT_`. Oni mogu ukazivati na razne informacije o entitetu kao sto su ime promenljive ili funkcije, liniju deklaracije, itd. Koren svakog DWARF stabla je predstavljen debag jedinicom, sa tagom `DW_TAG_compile_unit`, koja predstavlja kompilacionu jedinicu, tj. izvorni kod programa.

```
1  #include <stdio.h>
2
3  int main()
4  {
5    int x;
6    x = 5;
7
8    printf ("The value is %d\n", x);
9
10   return 0;
11 }
```

Primer dela DWARF stabla za prethodno navedeni primer programa napisanog u C programskom jeziku:

```
1  <1><73>: Abbrev Number: 4 (DW_TAG_subprogram)
2    <74> DW_AT_external : 1
3    <74> DW_AT_name : (indirect string, offset: 0x68): main
4    <78> DW_AT_decl_file : 1
5    <79> DW_AT_decl_line : 3
6    <7a> DW_AT_type : <0x57>
7    <7e> DW_AT_low_pc : 0x400526
8    <86> DW_AT_high_pc : 0x2a
9    <8e> DW_AT_frame_base : 1 byte block: 9c (
         DW_OP_call_frame_cfa)
10   <90> DW_AT_GNU_all_tail_call_sites: 1
11 <2><90>: Abbrev Number: 5 (DW_TAG_variable)
12   <91> DW_AT_name : x
13   <93> DW_AT_decl_file : 1
14   <94> DW_AT_decl_line : 5
15   <95> DW_AT_type : <0x57>
16   <99> DW_AT_location : 2 byte block: 91 6c (DW_OP_fbreg: -20)
```

Funkcija `main` je predstavljena DWARF tagom `DW_TAG_subprogram`. Atribut te debag jedinice predstavljen sa `DW_AT_name` ima vrednost imena funkcije. Atributi `DW_AT_low_pc` i `DW_AT_high_pc` redom predstavljaju adresu prve mašinske instrukcije te funkcije u memoriji programa i ofset na kojem se nalazi poslednja mašinska instrukcija te funkcije. Sledeći čvor drveta predstavlja promenljivu `x` istog test primera. Ta debag jedinica je dete čvora koji predstavlja funkciju `main` i ukazuje da se promenljiva `x` nalazi unutar funkcije `main`. Promenljiva `x` je predstavljena DWARF tagom `DW_TAG_variable`. Atribut `DW_AT_name` predstavlja ime promenljive, `DW_AT_type` referiše na debag jedinicu koja predstavlja tip promenljive, dok `DW_AT_location` atribut predstavlja lokaciju promenljive u memoriji programa.

Debag promenljive

Svaka promenljiva programa prevedenog sa debag informacijama, ukoliko se ne radi o optimizovanom programu, je predstavljena DWARF tagom `DW_TAG_variable`. Atribut `DW_AT_location` ukazuje na lokaciju promenljive. Lokacija može biti predstavljena DWARF izrazom, kao npr. lokacija promenljive `x` prikazana sledećim pri-

merom. DWARF izraz te promenljive ukazuje da se ona nalazi na ofsetu -20 trenutnog stek okvira `main` funkcije. U neoptimizovanom kodu sve promenljive imaju lokacije zadate DWARF izrazom. Njihove vrednosti su dostupne debagerima u bilo kom delu koda u kom su definisane.

U optimizovanom kodu lokacija promenljive može sadržati referencu na informaciju o lokaciji u `.debug_loc` sekciji. Lokacije u toj sekciji su predstavljene listama lokacija. Jedna promenljiva u optimizovanom kodu može biti smeštena na raznim memorijskim lokacijama ili registrima. Elementi liste opisuju lokacije promenljive na mestima u kodu gde je ona živa. Ukoliko promenljiva nije živa u nekom delu koda, programski prevodioci u optimizovanom kodu neće pratiti njenu lokaciju. Naredni primer predstavlja lokaciju promenljive u optimizovanom kodu:

```
1 <2><90>: Abbrev Number: 5 (DW_TAG_variable)
2 <91> DW_AT_name : x
3 <93> DW_AT_decl_file : 1
4 <94> DW_AT_decl_line : 5
5 <95> DW_AT_type : <0x5e>
6 <99> DW_AT_location : 0x0 (location list)
```

Lokacijska lista promenljive `x` je predstavljena sledećim primerom. U ovom konkretnom primeru, promenljiva živi samo na jednom mestu. Potencijalno je mogla imati još elemenata lokacijske liste. `Offset` predstavlja informaciju gde se lokacijska lista određene promenljive nalazi u `.debug_loc` sekciji. `Begin` i `End` predstavljaju informaciju od koje do koje adrese u programu važi data lokacija, tj. od koje do koje instrukcije je određena promenljiva živa. `Expression` predstavlja DWARF izraz koji opisuje lokaciju promenljive.

```
1 Contents of the .debug_loc section:
2
3         Offset Begin End Expression
4         00000000 400450 40046a (DW_OP_fbreg: -20)
5         0000001c <End of list>
```

2.3 Fajl format ELF

ELF (eng. *Executable and Linkable Format*) [3] je format izvršnih fajlova, deljenih biblioteka, objektnih fajlova i datoteka jezgara.

ELF sadrži razne informacije o samom fajlu. Podeljen je u dva dela: ELF zaglavlje i podaci fajla. ELF zaglavlje sadrži informacije o arhitekturi za koju je program preveden i definiše da li program koristi 32-bitni ili 64-bitni adresni prostor. Zaglavlje 32-bitnih programa je dužine 52 bajta, dok kod 64-bitnih programa zaglavlje je dužine 64 bajta. Podaci fajla mogu sadržati programsku tabelu zaglavlja (eng. *Program header table*), sekcijsku tabelu zaglavlja (eng. *Section header table*) i ulazne tačke prethodne dve tabele. Naredni primer prikazuje ELF fajl format počitan alatom *readelf*:

```
1 ELF Header:
2 Magic: 7f 45 4c 46 02 01 01 00 00 00 00 00 00 00 00 00
3 Class: ELF64
4 Data: 2's complement, little endian
5 Version: 1 (current)
6 OS/ABI: UNIX - System V
7 ABI Version: 0
8 Type: EXEC (Executable file)
9 Machine: Advanced Micro Devices X86-64
10 Version: 0x1
11 Entry point address: 0x400480
12 Start of program headers: 64 (bytes into file)
13 Start of section headers: 8992 (bytes into file)
14 Flags: 0x0
15 Size of this header: 64 (bytes)
16 Size of program headers: 56 (bytes)
17 Number of program headers: 9
18 Size of section headers: 64 (bytes)
19 Number of section headers: 38
20 Section header string table index: 35
21
22 Section Headers:
23 ...
```

2.4 Sistemski poziv `ptrace`

Operativni sistem GNU Linux pruža sistemski poziv `ptrace` [5] koji debagerima omogućava rad. Ovaj sistemski poziv omogućava jednom procesu kontrolu nad izvršavanjem nekog drugog procesa i menjanje memorije i registara istog. Potpis ove funkcije je:

```
long ptrace
(enum __ptrace_request request, pid_t pid, void *addr, void *data);
```

Prvi argument sistemskog poziva predstavlja informaciju kojom operativnom sistemu jedan proces, ne nužno debager, ukazuje na nameru preuzimanja kontrole drugog procesa. Ukoliko taj argument ima vrednost `PTRACE_TRACEME` to ukazuje na nameru praćenja (eng. *tracing*) određenig procesa, `PTRACE_PEEKDATA` i `PTRACE_POKEDATA` redom ukazuju na nameru čitanja i pisanja memorije, `PTRACE_GETREGS` i `PTRACE_SETREGS` se odnose na čitanje i pisanje registara. To su samo neki osnovni slučajevi korišćenja, za više informacija pogledati [5]. Drugi argument sistemskog poziva `pid` ukazuje na identifikacioni broj ciljanog procesa. Treći i četvrti argument se po potrebi koriste u zavisnosti od namere korišćenja sistemskog poziva `ptrace` za čitanje ili pisanje sa adrese datom trećim argumentom, pri tom baratajući podacima na adresi zadatoj četvrtim argumentom. To znači ukoliko se koristi `PTRACE_TRACEME` poslednja tri argumenta sistemskog poziva se ignorišu. Ukoliko se koristi `PTRACE_GETREGS` sa adrese `addr` se čita jedna reč iz memorije. Navodimo par osnovnih primera korišćenja `ptrace` sistemskog poziva, a u nastavku će biti navedeno još primera.

Primer 1 *Program inicira da će biti praćen od strane roditeljskog procesa:*

```
ptrace(PTRACE_TRACEME, 0, NULL, NULL);
```

Primer 2 *Čitanje vrednosti registara procesa sa identifikatorom `8845` i upisivanje tih vrednosti na adresu promenljive `regs`:*

```
ptrace(PTRACE_GETREGS, 8845, NULL, &regs);
```

2.5 Realizacija osnovnih elemenata upotrebe debagera

Tačke prekida

Postoje dve vrste tačaka prekida (eng. *breakpoints*): softverske i hardverske [8].

Osvrnimo se prvo na softverske tačke prekida. Postavljanje tačaka prekida predstavlja jednu od najkorišćenijih mogućnosti debagera, te stoga navedimo par smernica kako je ista realizovana, u opštem slučaju. Ali takođe treba napomenuti da ne postoji jedinstveni poziv nekog sistemskog poziva za postavljanje tačke prekida, već se ista obavlja kao kombinacija više mogućnosti sistemskog poziva `ptrace`. Opišimo ceo postupak na jednostavnom primeru.

Program je preveden za procesorsku arhitekturu Intel x86-64 i asemblerski kôd `main` funkcije primera:

```
0000000000400450 <main>:
400450:        48 83 ec 08           sub    $0x8,%rsp
400454:        ba 05 00 00 00        mov    $0x5,%edx
400459:        be 04 06 40 00        mov    $0x400604,%esi
40045e:        bf 01 00 00 00        mov    $0x1,%edi
400463:        31 c0                 xor    %eax,%eax
400465:        e8 c6 ff ff ff        callq  400430 <printf>
40046a:        31 c0                 xor    %eax,%eax
40046c:        48 83 c4 08           add    $0x8,%rsp
400470:        c3                    retq
400471:        66 2e 0f 1f 84        nopw   %cs:0x0(%rax,%rax,1)
400478:        00 00 00
40047b:        0f 1f 44 00 00        nopl   0x0(%rax,%rax,1)
```

Primera radi, želimo da postavimo tačku prekida na treću po redu instrukciju funkcije `main`:

```
be 04 06 40 00 mov $0x400604, %esi
```

Da bismo to uradili, menjamo prvi bajt instrukcije sa posebnom magičnom vrednošću, obično `0xcc`, i kada izvršavanje dostigne do tog dela koda ono će se zaustaviti na tom mestu.

Pošto `0xbe` menjamo sa `0xcc` i na tom mestu u kodu dobijamo instrukciju:

```
cc 04 06 40 00 int3
```

Ukoliko korisnik želi da nastavi dalje, instrukcija prekida se zamenjuje sa originalnom instrukcijom koja se izvršava i nastavlja se sa radom programa.

Instrukcija `int3` je posebna instrukcija procesorske arhitekture Intel x86-64, koja izazva softverski prekid. Kada registar programski brojač (eng. *CPU register pc*) stigne do `int3` instrukcije izvršavanje se zaustavalja na toj tački. Debager je već upoznat od strane korisnika da je tačka prekida postavljena te on čeka na signal koji ukazuje na to da je program dostigao do instrukcije prekida. Operativni sistem prepoznaje instrukciju `int3`, poziva se specijalni obrađivač tog signala (na Linux sistemima `do_int3()`), koji dalje obaveštava debager šaljući mu signal sa kodom `SIGTRAP` koji on obrađuje na željeni način. Treba napomenuti da ovo važi za procesorsku arhitekturu Intel x86-64, instrukcija prekida za arhitekture kao što su ARM, MIPS, PPC itd., se drugačije kodira, ali postupak implementacije tačaka prekida je isti.

Ukoliko želimo da stavimo tačku prekida eksplicitno na funkciju `main`, za to koristimo posrednika u vidu DWARF debag informacija. U tom slučaju debager traži element DWARF stabla koji ukazuje na informacije o `main` funkciji, i odatle dohvata informaciju na kojoj adresi u memoriji se nalazi prva mašinska instrukcija date funkcije. Na narednom primeru vidimo DWARF element koji opisuje funkciju uz pomoć atributa. Debager će pročitati `DW_AT_low_pc` atribut i na tu adresu postaviti `int3` instrukciju. Napomenimo da DWARF debag simbole generišemo uz pomoć `-g` opcije kompajlera.

```
1 <1><73>: Abbrev Number: 4 (DW_TAG_subprogram)
2   <74> DW_AT_external : 1
3   <74> DW_AT_name : (indirect string, offset: 0x68): main
4   <78> DW_AT_decl_file : 1
5   <79> DW_AT_decl_line : 3
6   <7a> DW_AT_type : <0x57>
7   <7e> DW_AT_low_pc : 0x400526
8   <86> DW_AT_high_pc : 0x2a
9   <8e> DW_AT_frame_base : 1 byte block: 9c
10  <90> DW_AT_GNU_all_tail_call_sites: 1
```

Hardverske tačke prekida su direktno povezane sa hardverom u vidu specijalnih registara. Postavlja se na određenu adresu i hardverski *watchpoint* monitori za zadatu adresu mogu signalizirati razne promene, npr. čitanje, pisanje ili izvršavanje, što im daje prednost u odnosu na softverske tačke prekida. Mane u odnosu na softverske tačke prekida su performanse, koje su neuporedivo sporije, i takođe neophodna hardverska podrška za korišćenje hardverskih tačaka prekida.

Koračanje

Pod procesom koračanja (eng. *stepping*) kroz program podrazumevamo izvršavanje programa sekvencu po sekvencu. Sekvenca može biti jedna procesorska instrukcija, linija koda ili pak neka funkcija programa koji se debaguje [8].

Instrukcijsko koračanje na platformi Intel x86-64 je direktno omogućeno kroz sistemski poziv `ptrace`:

```
ptrace(PTRACE_SINGLESTEP, debuggee_pid, nullptr, nullptr);
```

Operativni sistem će poslati debageru signal `SIGTRAP` kada je korak izvršen.

Pored instrukcijkog koračanja pomenućemo još jednu vrstu koračanja u neku funkciju koja je pozvana `call` ili `jump` instrukcijom. Komanda debagara GNU GDB koja nam to omogućava jeste `step in`.

Treba napomenuti da postoje arhitekture za koje ovo ne važi, kao npr. platforma ARM, koja nema hardversku podršku za instrukcijsko koračanje i za njih se koračanje implementira na drugačiji način, uz pomoć emulacije instrukcija, ali u ovom radu neće biti reči o tome.

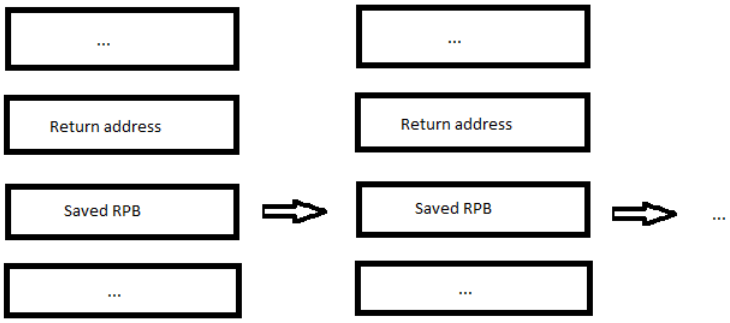
Izlistavanje pozivanih funkcija

Objasnimo komandu izlistavanje pozivanih funkcija (eng. *backtrace*) posmatrajući organizaciju stek okvira (eng. *stack frames*) na platformi Intel x86-64 [8].

Na slici 2.1 navedeni su stek okviri za dva funkcijska poziva. Pre povratne vrednosti funkcije obično se ređaju argumenti funkcije. Sačuvana adresa u registru `RBP` jeste adresa stek okvira svog pozivaoca. Prateći sve okvire kao elemente povezane liste dolazimo do svih pozivanih funkcija do zadate tačke. Ako se pitamo kako debager ima informaciju o imenu funkcije odgovor je u tome što pretražuje DWARF stablo sa debag informacijama, tražeći `DW_TAG_subprogram` sa odgovarajućom povratnom adresom, pritom čitajući `DW_AT_name` atribut tog elementa.

Čitanje vrednosti promenljivih

Za čitanje vrednosti promenljivih u programu, debager pretražuje DWARF stablo tražeći promenljivu sa zadatim imenom. U slučaju lokalnih promenljivih, traži se `DW_TAG_variable` element čiji `DW_AT_name` odgovara navedenoj promenljivoj. Kada



Slika 2.1: Primer ređanja stek okvira na x86-64 platformi.

se ista pronađe konsultuje se `DW_AT_location`, koji ukazuje na lokaciju gde se vrednost promenljive nalazi. Ukoliko ovaj atribut nije naveden debager će vrednost takve promenljive smatrati kao optimizovanu prijavljujući informaciju o tome [8].

Glava 3

Alat GNU GDB

GNU GDB je alat koji omogućava uvid u događanja unutar drugog programa koji se nalazi u fazi izvršavanja, ili u slučaju neregularnog prekida izvršavanja programa uvid u to šta se dešavalo pa je do toga došlo. GDB debager takođe omogućava uvid u to šta se dešavalo sa programima i na platformama koje imaju različitu arhitekturu od domaćinske arhitekture (eng. *host architecture*). Da bi se to realizovalo koriste se GDB server, što se naziva udaljeno debagovanje, ili *Multiarch* GNU GDB koji koristi biblioteke namenjene ciljanim arhitekturama. Programi koji mogu biti analizirani mogu biti napisani u raznim programskim jezicima, kao što su Ada, C, C++, Objective-C, Pascal. GNU GDB alat se može pokrenuti na najpopularnijim operativnim sistemima UNIX i Microsoft Windows varijanti. U radu se podrazumeva korišćenje UNIX-olikog operativnog sistema.

3.1 Istorija alata

Izvorni kod alata GDB je originalno napisan od strane Ričarda Stolmana 1986. godine kao deo GNU sistema [13]. GDB je slobodan i besplatan softver realizovan pod *GNU General Public License (GPL)*. Od 1990. do 1993. godine alat je održavao Džon Gilmor, a trenutno za održavanje alata je zadužena *GDB Steering Committee* grupa, odobrena od strane FSF (eng. *Free Software Foundation*) [6].

Poslednja realizovana verzija alata GNU GDB je 8.2.1.

3.2 Šta je *arhitektura* za GNU GDB?

Za alat GNU GDB arhitektura je veoma labav koncept. Može se posmatrati kao bilo koje svojstvo programa koji se debaguje, ali obično se misli na procesorsku arhitekturu. Za debager su bitna dva svojstva procesorske arhitekture:

- Skup instrukcija (eng. *Instruction Set Architecture - ISA*) predstavlja specifičnu kombinaciju registara i mašinskih instrukcija.
- ABI (eng. *Application Binary Interface*) predstavlja spisak pravila koja propisuju pravilan način korišćenja skupa instrukcija.

Domaćinski GNU GDB

Domaćinski GNU GDB alat je preveden za istu procesorsku arhitekturu kao i računar na kome se alat izvršava. Korišćenje domaćinskog alata GNU GDB nad nekim programom ima ograničenje. Program koji se debaguje mora biti iste procesorske arhitekture kao i arhitektura domaćina.

Prevođenje domaćinskog GNU GDB alata

Preuzimanje izvornog koda alata se radi sledećim komandama:

```
1 mkdir gdb
2 cd gdb
3 git pull http://gnu.org/gnu/gdb.git
```

Prva komanda pravi direktorijum u kome se izgrađuje (prevodi) alat. Druga komanda vrši pozicioniranje trenutne putanje u taj direktorijum. Trećom komandom se preuzima izvorni kod alata.

Prvi korak prevođenja je konfiguracija direktorijuma u kome se prevođenje izvršava. Ovim komandama kreiramo `Makefile`:

```
1 mkdir build
2 cd build
3 ../configure
```

Prva komanda pravi direktorijum u kome se izgrađuje (prevodi) alat. Druga komanda vrši pozicioniranje trenutne putanje u taj direktorijum. Trećom komandom se kreira `Makefile`. `configure` *skripte na UNIX-olikim operativnim sistemima kao*

ulaz parsiraju `Makefile.in` *skriptu podešavajući okruženje (putanje do deljenih biblioteka, programski prevodilac, itd.) prilikom čega je krajnji izlaz fajl* `Makefile` *kojim se izgrađuje (prevodi) softver.*

Nakon konfiguracije direktorijuma prevođenje alata se vrši komandom:

```
1 make
```

Pokretanje domaćinskog GNU GDB alata

GNU GDB očekuje kao argument komandne linije program koji je preveden za istu procesorsku arhitekturu. Ukoliko je trenutna putanja pozicionirana u direktorijum gde je izgrađen alat, pokretanje alata nad programom pod imenom *test* se vrši sledećom komandom:

```
1 ./gdb/gdb test
```

Korišćenje domaćinskog GNU GDB alata

Pokažimo neke od osnovnih komandi alata GNU GDB.

Postavljanje tačke prekida

Postavljanje tačke prekida na funkciju programa koji se debaguje se vrši komandom `break`. Program koji se debaguje se zaustavlja kada dostigne do određene funkcije. Primer korišćenja postavljanja tačke prekida na funkciju (u ovom slučaju `fn1`):

```
1 (gdb) break fn1
2 Breakpoint 1 at 0x4005fe: file test.c, line 4.
3 (gdb) r
4 Starting program: /master_examples/x86_arch/test
5 7
6 Breakpoint 1, fn1 (arg=0x7fffffffdbf4) at test.c:4
7 4  (*arg)++;
```

Izvršavanje programa sekvencu po sekvencu

Izvršavanje programa sekvencu po sekvencu se radi pomoću tehnike koračanja. Komanda u okviru alata GNU GDB koja nam omogućava izvršavanje instrukciju po instrukciju je `stepi`. Primer korišćenja `stepi` komande, uz

pomoć korišćenja `disassemble` komande koja nam prikazuje asemblerski kod programa koji se debaguje:

```
(gdb) disassemble
Dump of assembler code for function fn1:
0x00000000004005f6 <+0>: push %rbp
0x00000000004005f7 <+1>: mov %rsp,%rbp
0x00000000004005fa <+4>: mov %rdi,-0x8(%rbp)
=> 0x00000000004005fe <+8>: mov -0x8(%rbp),%rax
0x0000000000400602 <+12>: mov (%rax),%eax
0x0000000000400604 <+14>: lea 0x1(%rax),%edx
0x0000000000400607 <+17>: mov -0x8(%rbp),%rax
0x000000000040060b <+21>: mov %edx,(%rax)
0x000000000040060d <+23>: mov -0x8(%rbp),%rax
0x0000000000400613 <+29>: cmp $0x5,%eax
0x0000000000400616 <+32>: jle 0x400627 <fn1+49>
0x0000000000400628 <+38>: pop %rbp
0x0000000000400629 <+42>: retq
End of assembler dump.
(gdb) stepi
0x0000000000400602 4  (*arg)++;
(gdb) disassemble
Dump of assembler code for function fn1:
0x00000000004005f6 <+0>: push %rbp
0x00000000004005f7 <+1>: mov %rsp,%rbp
0x00000000004005fa <+4>: mov %rdi,-0x8(%rbp)
0x00000000004005fe <+8>: mov -0x8(%rbp),%rax
=> 0x0000000000400602 <+12>: mov (%rax),%eax
0x0000000000400604 <+14>: lea 0x1(%rax),%edx
0x0000000000400607 <+17>: mov -0x8(%rbp),%rax
0x000000000040060b <+21>: mov %edx,(%rax)
0x000000000040060d <+23>: mov -0x8(%rbp),%rax
0x0000000000400613 <+29>: cmp $0x5,%eax
0x0000000000400616 <+32>: jle 0x400627 <fn1+49>
0x0000000000400628 <+38>: pop %rbp
0x0000000000400629 <+42>: retq
End of assembler dump.
```

Izvršavanje sledeće linije programa se radi korišćenjem komande `next`. Primer korišćenja `next` komande:

```
1 (gdb) r
2 The program being debugged has been started already.
3 Start it from the beginning? (y or n) y
4 Starting program: /master_examples/x86_arch/test
5 4
6 Breakpoint 1, fn1 (arg=0x7fffffffdbf4) at test.c:4
7 4  (*arg)++;
8 (gdb) next
9 5 if ((*arg) > 5)
```

3.3 Datoteke jezgra

Datoteka jezgra (eng. *core dump file*) je snimak (eng. *snapshot*) memorije programa, registara i ostalih sistemskih informacija u trenutku neočekivanog prekida rada programa. Veoma važnu ulogu ima u procesu debagovanja programa sa uređaja sa ugrađenim računarom koji često pripadaju različitoj procesorskoj arhitekturi u odnosu na lični računar. Ugrađeni uređaji obično imaju ograničene resurse, pa često na takvim platformama ne postoji debager. Najčešća procedura debagovanja ovakvih programa jeste prebacivanje datoteke jezgra i programa na lični računar na kome se analiza problema odvija koristeći debager.

Struktura datoteke jezgra

Datoteke jezgra sadrže razne informacije iz memorije programa uključujući i vrednosti lokalnih promenljivih, globalnih promenljivih, podatke lokalne za niti itd. Takođe sadrži vrednosti registara u trenutku prekida programa. U to spadaju i programski brojač i stek pokazivač.

Sadržaj datoteke jezgra je organizovan sekvencijalno sledećim redosledom:

Zaglavlje. Sadrži osnovne informacije o datoteci jezgra i pomeraje (eng. *offset*) kojima se lociraju ostale informacije iz nje.

`ldinfo` **strukture.** Definiše informacije relevantne za dinamički loader.

`mstsave` **strukture.** Definiše informacije relevantne za sistemske niti.

Korisnički stek. Sadrži kopiju korisničkog steka u trenutku pucanja programa.

Segment podataka. Sadrži kopiju segmenta podataka u trenutku pucanja programa.

Memorijski mapirani regioni i `vm_info` strukture. Sadrži informacije o pomerajima i dužinama mapiranih regiona.

Generisanje datoteke jezgra

Datoteke jezgra se generišu ukoliko dođe do nepredviđenog prekida programa. To je podrazumevana akcija prilikom pojave signala operativnog sistema koji ukazuju na prekid rada programa. Jezgra UNIX-olikih operativnih sistema podrazumevano postavljaju dužinu datoteka jezgara na 0. To je razlog zašto na našim sistemima nemamo datoteku jezgra nakon npr. prekidanja programa uz poruku *Segmentation fault*. Da bi se datoteke jezgra generisale, potrebno je eksplicitno promeniti dužinu datoteka jezgara koristeći komandu:

```
1 ulimit -c unlimited
```

Datoteka jezgra se može generisati i iz korisničkog nivoa koristeći alat GNU GDB komandom `gcore`.

3.4 *Multiarch* GNU GDB

Multiarch GNU GDB je verzija alata koja može da debaguje programe sa platformi različitih arhitektura. Alat na korisničkom nivou emulira instrukcije i registre ciljanih platformi. Potrebne su mu i deljene biblioteke za tu ciljanu platformu koje koristi program koji se debaguje. Skup komandi alata je limitiran u odnosu na domaćinski GDB.

Prevođenje *Multiarch* GNU GDB

Prvi korak je pozicioniranje u direktorijum sa izvornim kodom alata:

```
1 cd gdb
```

Sledeći korak je konfiguracija direktorijuma u kome se prevođenje izvršava. Ovim komandama kreiramo `Makefile` kojim odobravamo debagovanje svih podržanih ar-

hitektura u alatu GBD (kao npr. MIPS32, MIPS64, ARM, AARCH64, x86_64, i386, SPARC):

```
1 mkdir build_multi
2 cd build_multi
3 ../configure --enable-targets=all
```

Prva komanda pravi direktorijum u kome se izgrađuje (prevodi) alat. Druga komanda vrši pozicioniranje trenutne putanje u taj direktorijum. Trećom komandom se kreira `Makefile`*. Pošto je prilikom konfiguracije navedena opcija* `-enable-targets=all` *time je omogućeno prevođenje alata za sve podržane arhitekture. Takođe je moguće konfigurisati prevođenje za samo određene arhitekture navodeći eksplicitno opciju kojom se navode ciljane procesorske arhitekture, npr.* `-enable-targets=mips-linux-gnu` *za arhitekturu MIPS ili* `-enable-targets=arm-linux-gnu` *za arhitekturu ARM. Osnovna razlika između* `Makefile`*-ova domaćinske i* `Multiarch` *verzije debagera je ta što je za domaćinski alat potrebno okruženje (deljene biblioteke, programski prevodilac, itd.) samo za domaćinsku arhitekturu. Za* `Multiarch` *verziju alata potrebno je pronaći putanje do programskog prevodioca i deljenih biblioteka za ciljane platforme navedene opcijom* `-enable-targets=`*. Ukoliko konfiguracione skripte ne pronađu ciljano okruženje za neku od navedenih arhitektura, ta će biti ignorisana.*

Pokretanje *Multiarch* GNU GDB

Ukoliko je trenutna putanja pozicionirana u direktorijum gde je izgrađen alat, pokretanje alata *Multiarch* GDB nad programom pod imenom *test* se vrši na isti način kao i domaćinska verzija alata komandom:

```
1 ./gdb/gdb test
```

Korišćenje *Multiarch* GNU GDB

Spisak komandi koje se mogu koristiti korišćenjem *Multiarch* verzije alata GNU GDB je limitiran. To se odnosi na izvršavanje programa koji se debaguje, jer program pripada drugačijem adresnom prostoru. Neke od komandi koje mogu biti upotrebljene su izlistavanje vrednosti registara programa, izlistavanje instrukcija, analiza stek okvira pozivanih funkcija, itd. Najčešće se ova verzija alata koristi tako što se učita datoteka jezgra koja je generisana na ciljanoj platformi kada je program

koji se debaguje neočekivano prekinuo sa radom. To obično prati analiza uzroka greške.

Primer učitavanja datoteke jezgra u GNU GDB alat

U primeru ispod je prikazano učitavanje datoteke jezgra programa čije izvršavanje je prekinuto od strane jezgra operativnog sistema. Komandom alata `core-file` se učitava datoteka jezgra u debager. Da bi se izazvalo generisanje datoteke jezgra u izvornom kodu programa napisanog u C ili C++ programskom jeziku može se koristiti `abort()` funkcija iz standardne C biblioteke. U primeru ispod je pozvana ta funkcija koja je izazvala prekid programa uz signal `SIGABRT`. Tom prilikom jezgro operativnog sistema je napravilo datoteku jezgra sa imenom *core*.

```
1 (gdb) core-file core
2 [New LWP 20586]
3 [Thread debugging using libthread_db enabled]
4 Using host libthread\_db library "/lib/x86-linux-gnu/libthread_db.so.1".
5 Core was generated by `./test.core'.
6 Program terminated with signal SIGABRT, Aborted.
7 #0 0x00007fb229164428 in raise (sig=6) at raise.c:54
```

U primeru ispod je prikazana upotreba komande alata GNU GDB `bt`. Ona se koristi za izlistavanje pozivanih funkcija programa. Stek okviri programa koji su prikazani na primeru potvrđuju da je u funkciji `main()` došlo do poziva `abort()` funkcije. Što je izazvalo prekid rada programa.

```
1 (gdb) bt
2 #0 0x00007fb229164428 in raise (sig=6) at raise.c:54
3 #1 0x00007fb22916602a in abort () at abort.c:89
4 #2 0x0000000000400605 in main () at tls.c:18
```

Analiza datoteke jezgra

U primeru ispod je prikazan primer korišćenja alata *Multiarch* GNU GDB. Vrši učitavanje datoteke jezgra generisane na uređaju sa ugrađenim računarom arhitekture MIPS. Uz datoteku jezgra učitavaju se izvršni fajl i deljene biblioteke koje izvršni fajl koristi na ciljanoj platfomi.

```
(gdb) set solib-search-path ~/master_examples/mips_arch/
(gdb) core-file ~/master_examples/mips_arch/core
[New LWP 21808]
[New LWP 21813]
[New LWP 21810]
[New LWP 21809]
[New LWP 21811]
[New LWP 21812]
Core was generated by 'example'.
Program terminated with signal SIGABRT, Aborted.
#0 0x00000000 in ?? ()
[Current thread is 1 (LWP 21808)]
```

Komanda `set solib-search-path` *`dir`* alata GNU GDB korišćena u prethodnom primeru služi za navođenje direktorijuma iz kojeg debager treba da koristi deljene biblioteke za učitani program. Ta komanda je veoma bitna za debagovanje programa sa platformi drugih arhitektura, jer ukoliko putanja nije navedena debager koristi biblioteke na domaćinskoj mašini.

Na primeru ispod je prikazana upotreba komande `info registers`. *Multiarch* GNU GDB čita informaciju o arhitekturi programa koji se debaguje iz datoteke jezgra. Nakon toga čita vrednosti registara iz datoteke i ispisuje ih na standardni izlaz.

```
(gdb) info registers
          zero       at       v0       v1       a0       a1
R0    00000000 00005530 00000000 00005530 00000000 00005530
          t0       t1       t2       t3       t4       t5
R8    00000000 00000000 00000000 7fcf4ca0 00000000 00000000
          s0       s1       s2       s3       s4       s5
R16   00000000 7719a684 00000000 00000000 00000000 00000002
          k0       k1       gp       sp       s8       ra
R24    00000000 771c6490 00000000 77160634  00000000 7fcf4c20
          sr       lo       hi      bad      cause       pc
       00000000 00000000 77165000 00000000 00b24608 00000000
          fsr      fir
       00000000 00000000
```

Glava 4

TLS

Pisanje višenitnih programa predstavlja fudamentalan i neibežan koncept savremenog programiranja. Gotovo nijedan kompleksan korisnički program ne može biti napisan bez korišćenja niti. Preciznije, niti podižu performanse i brzinu programa, te se sve češće koriste u pisanju softvera. Promenljive lokalne za niti (eng. *TLS-Thread Local Storage*) su takođe važan mehanizam koga pružaju programski jezici kao što su C i C++. Prirodno je da nekada imamo potrebu da definišemo promenljivu koja će imati različitu vrednost u svakoj niti. Jedan primer je promenljiva koja jednoznačno identifikuje grešku koja je nastala u programu. Ona može biti izazvana u svakoj posbnoj niti iz različitog razloga, te promenljiva koja je opisuje ima različitu vrednost u svakoj niti.

4.1 Motivacija

Povećanje korišćenja niti u programiranju dovelo je do potrebe programera za boljim načinom rukovanja podacima lokalnih za niti. POSIX [11], skup interfejsa za rukovanje nitima, definiše nove interfejse koji omogućavaju kreiranje jednog istog `void *` objekata posebno za svaku nit. Taj interfejs je nezgrapan za korišćenje, pa se ispostavilo da postoji potreba za efikasnijim rešenjem. Ključ za taj objekat mora da bude alociran dinamčki u vremenu izvršavanja programa. Ako se ključ ne koristi više mora biti oslobođen. Celokupan proces zahteva dosta posla programera. Pored toga je podložan greškama. Iz tih razloga postao je ozbiljan problem kada se kombinuje sa dinamičko učitanim kodom.

Da bi se odgovorilo na sve opisane probleme, odlučeno je da se programski jezici prošire i tako prepuste težak posao programskim prevodiocima.

Za jezike C i C++ ključna reč `__thread` se koristi za deklaraciju i definiciju promenljivih lokalnih za niti. Neki primeri deklaracija promenljivih lokalnih za niti:

```
1 __thread int j;
2 __thread struct state s;
3 extern __thread char *p;
```

Prednost TLS-a nije ograničena samo na korisničke programe. Okruženje izvršavanja programa, između ostalih standardna biblioteka, takođe koristi pogodnosti ovog mehanizma. Npr. globalne promenljive `errno`, koje jednoznačno označavaju nastalu grešku u programu, moraju biti lokalne za niti, jer u različitim nitima može doći do različite greške. Napomenimo da navođenje `__thread` pri deklaraciji ili definiciji neke automatske promenljive nema smisla i to nije dozvoljeno, jer automatske promenljive su uvek lokalne za niti. Promenljive statičkih funkcija su takođe kandidati za korišćenje TLS promenljivih.

Osnovne operacije nad promenljivama lokalnih za niti se ponašaju intuitivno. Npr. adresni operator vraća adresu promenljive za trenutnu nit. Memorija alocirana za promenljivu lokalnu za nit u dinamički učitanom modulu se oslobađa kada se taj modul oslobodi iz memorije.

Implementacija ovog mehanizma zahteva promenu okruženja izvršavanja programa. Format izvršnih fajlova je proširen kako bi definisao promenljive lokalne za niti odvojeno od normalnih promenljivih. Dinamički punilac (eng. *dynamic loader*) je nadograđen kako bi ispravno inicijalizovao te nove sekcije. Takođe, standardna biblioteka koja rukuje nitima je promenjena kako bi alocirala nove podatke lokalne za niti za svaku novu nit. U nastavku poglavlja su opisane izmene u fajl formatu ELF i detaljniji opis izvršavanja programa koji sadrže TLS promenljive.

4.2 Definisanje novih podataka u ELF-u

Izmene u fajl formatu izvršnih fajlova, potrebne za emitovanje TLS objekata su minimalni. Umesto smeštanja inicijalizovanih promenljivih u sekciju `.data` ili neinicijalizovanih promenljivih u `.bss` sekciju, TLS promenljive se smeštaju u `.tdata` i `.tbss` sekcije [16]. Nove sekcije se od originalnih razlikuju u samo jednom dodatnom sekcijskom flegu. Sekcijaska tabela koja opisuje nove sekcije je prikazana na 4.1. Kao što se može primetiti jedina razlika u odnosu na normalne sekcije podataka jeste fleg `SHF_TLS`.

Polje	*.tbss*	*.tdata*
sh_name	.tbss	.tdata
sh_type	SHT_NOBITS	SHT_PROGBITS
sh_flags	SHF_ALLOC + SHF_WRITE + SHF_TLS	SHF_ALLOC + SHF_WRITE + SHF_TLS
sh_addr	Virtualna adresa sekcije	Virtualna adresa sekcije
sh_offset	0	Pomeraj inicijalizacione slike
sh_size	Veličina sekcije	Veličina sekcije
sh_link	SHN_UNDEF	SHN_UNDEF
sh_info	0	0
sh_addralign	Poravnanje sekcije	Poravnanje sekcije
sh_entsize	0	0

Tabela 4.1: Tabela vrednosti polja koji opisuju nove TLS sekcije.

Imena novih sekcija, kao ni ostalih u fajl formatu ELF, nisu bitna. Linker će svaku sekciju tipa SHT_PROGBITS sa dodatnim flegom SHF_TLS tretirati kao .tdata, dok će sekcije tipa SHT_NOBITS sa dodatnim SHF_TLS tretirati kao .tbss sekciju. Odgovornost proizvođača ovakvih sekcija, obično programskih prevodioca, je da pravilno generiše sva polja prikazana u tebeli 4.1.

Za razliku od normalnih .data sekcija program koji se izvršava ne koristi .tdata sekciju direktno. Ta sekcija je moguće modifikovana u vreme pokretanja programa, od strane dinamičkog punilaca. Prilikom pokretanja programa, prva akcija jeste realokacija koju izvršava dinamički punilac. Nakon toga podaci lokalni za niti se smeštaju u deo koji se naziva inicijalizaciona slika (*eng. initialization image*) i ona se ne modifikuje više nakon toga. Za svaku nit, uključujući i inicijalnu, nova memorija se alocira gde se kopira inicijalizaciona slika. Ovim se omogućava da svaka nit ima identičan početni sadržaj. Kako ne postoji samo jedna adresa koja ukazuje na simbol TLS promenljive, normalna tabela simbola ne može biti iskorišćena. U izvršnom fajlu polje st_value ne sadrži apsolutnu adresu promenljive prilikom izvrašavanja programa, jer apsolutna adresa nije poznata prilikom prevođenja programa. Iz tog razloga je uveden novi tip simbola (STT_TLS). Svaki simbol koji referiše na TLS ima takav tip simbola. Izvršni fajlovi u polju st_value imaju vrednost pomeraja promenljive u TLS inicijalizacionoj slici. Nijedna realokacija ne sme pristupati simbolima tipa STT_TLS, osim onih koji su uvedene za rukovanje TLS-om. Takođe, te nove realokacije ne smeju koristi simbole ostalih tipova.

Polje	*Vrednost*
`p_ptype`	`PT_TLS`
`p_offset`	Pomeraj TLS inicijalizacione slike
`p_vaddr`	Virtualna adresa TLS inicijalizacione slike
`p_paddr`	Rezervisano
`p_filesize`	Veličina TLS inicijalizacione slike
`p_memsz`	Ukupna veličina TLS šablona
`p_flags`	`PF_R`
`p_aligment`	Poravnanje TLS šablona

Tabela 4.2: Tabela koja predstavlja nove vrednosti programskog zaglavlja.

Da bi dinamički linker mogao da izvrši inicijalizaciju inicijalizacione slike, njena pozicija koja će biti prilkom izvršavanja programa mora biti zapisana negde. Originalno zaglavlje programa nije korisno, pa je novo zaglavlje definisano. To proširenje je prikazano u tabeli 4.2.

Svaka TLS promenljiva je identifikovana pomoću pomeraja od početka TLS sekcije. U memoriji, `.tbss` sekcija je alocirana odmah nakon `.tdata` sekcije. Nijedna virtualna adresa ne može biti izračunata prilikom povezivanja (*eng. link time*).

4.3 Rukovanje TLS-om tokom izvršavanja programa

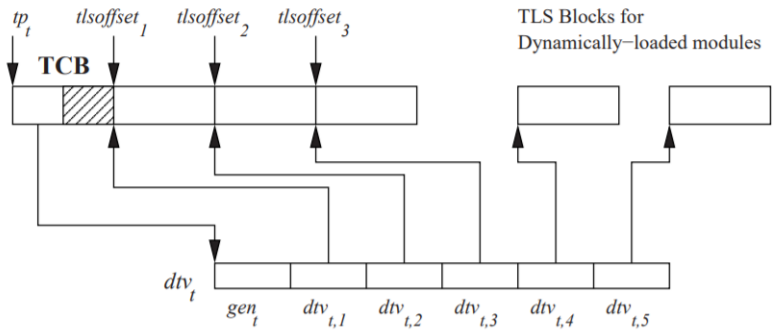
Kao što je napomenuto, obrada podataka lokalnih za niti nije prosta kao obrada normalnih podataka. Segment podataka ne može biti samo napravljen i dat procesu na korišćenje. Umesto toga, nekoliko kopija jednog istog podatka mora biti kreirano, svi inicijalizovani iz iste inicijalizacione slike.

Mehanizami koji potpomažu izvršavanje programa bi trebalo da zaobiđu kreiranje podataka lokalnih za niti ako to nije neophodno. Npr. učitani modul može biti korišćen samo od strane jedne niti, od više kreiranih koje čine taj određeni proces. Bilo bi samo uzaludno gubljenje memorije i vremena za alociranje tih podataka za sve niti. Lenji metod je poželjan za ovakve situacije.

Nije samo alociranje memorije problem za korišćenje TLS-a. Pravila potrage za simbolima (*eng. symbol lookup*) u izvršnim fajlovima sa ELF formatom ne dozvoljavaju određivanje objekta koji sadrži korišćenu definiciju u vremenu povezivanja. I ako taj objekat nije poznat, pomeraj od te promenljive unutar prostora lokalnog

za niti za taj objekat ne može biti određen takođe. Prema tome, normalan proces povezivanja ne može biti korišćen za ovakve situacije.

Promenljiva lokalna za nit je identifikovana sa referencom na objekat i pomerajem te promenljive unutar prostora lokalnog za niti. Da bi mapirali ove vrednosti u virtualne adrese, mehanizam izvršavanja programa zahteva strukture podataka koje nisu postojale do tada. One moraju biti sposobne da mapiraju referencu objekta u neku adresu u određenom prostoru lokalnog za niti. Da bi se to omogućilo definisane su dve varijante struktura podataka. Različite procesorske arhitekture mogu odabrati jedan od ova dva pristupa, ali to mora biti propisano ABI-jem za tu arhitekturu. Jedan od razloga za korišćenje druge varijante modela je istorijski. Neke arhitekture su dizajnirale sadržaj nitne memorije na koju pokazuje nitni registar tako da nisu kompatibilne za korišćenje prve varijante TLS strukture.



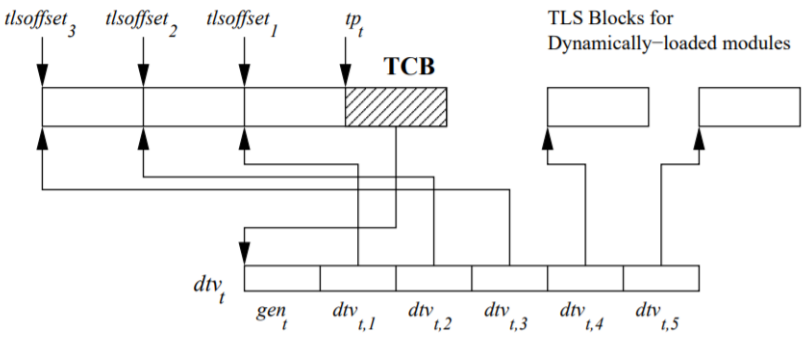
Slika 4.1: TLS struktura podataka. Varijanta 1.

Na slici 4.1 je prikazan primer prve varijante TLS strukture podataka. Nitni registar za nit `t` je označen sa tp_t. On pokazuje na nitni kontrolni blok `TCB` (*eng. Thread Control Block*), koji na pomeraju nula sadrži pokazivač na nitni dinamički vektor dtv_t za tu određenu nit.

Nitni dinamički vektor kao svoje prvo polje sadrži generacioni broj gen_t koji se koristi pri promeni veličine dtv_t i alokacije TLS blokova. Ostala polja sadrže pokazivače na TLS blokove za različite učitane module. TLS blokovi za module koji se učitavaju pri pokretanju programa su smeštena direktno nakon TCB-a i stoga ima arhitekturalno specifičan, fiksni pomeraj od adrese na nitni pokazivač. Za sve inicijalno dostupne module pomeraj svakog TLS bloka, s'tim i pomeraj TLS promenljive, u odnosu na TCB mora biti fiksan nakon pokretanja programa.

Druga varijanta TLS strukture podataka ima sličnu strukturu kao prva. Pri-

kazana je na slici 4.2. Jedina razlika je ta što nitni pokazivač pokazuje na nitni kontrolni blok za koji je nepoznata veličina i sadržaj. Negde svakako taj nitni kontrolni blok sadrži pokazivač na dinamički nitni vektor, ali nije navedeno gde. To je kontrolisano od strane mehanizma za izvršavanje programa. Napomenimo da je programskim prevodiocima zabranjeno da emituju kod koji direktno pristupa elementima dtv_t vektora.



Slika 4.2: TLS struktura podataka. Varijanta 2.

U trenutku pokretanja programa TCB, zajedno sa dinamičkim nitnim vektorom, se kreira za glavnu nit. Pozicija tog TLS bloka, za svaki pojedinačan modul, se računa koristeći arhitekturalno specifične formule, zasnovane na veličini i poravnanju TLS bloka propisanih ABI-jem za tu specifičnu procesorsku arhitekturu.

4.4 Pokretanje i izvršavanje procesa

Za programe koji koriste TLS promenljive kôd koji služi za pokretanje procesa mora podesiti memoriju za inicijalnu nit pre nego što preda kontrolu tog procesa drugim mehanizmima operativnog sistema. Podrška za TLS u statičko povezanim programima je limitirana. Neke procesorske arhitekture (kao npr. IA-64) ne definišu uopšte statičko linkvoanje (iako je podržano to je nestandardizovano). Neke druge platforme obeshrabruju korišćenje statičkog povezivanja pružanjem samo određenog broja funkcionalnosti. U oba slučaja dinamičko učitavanje modula u statičko povezanim programima je ozbiljno limitirano ili potpuno nemoguće. Prema tome, rukovanje TLS-om je prosto, zbog postojanja samo jednog modula, tj. samo taj program.

Zanimljiviji je slučaj rukovanja TLS-om u dinamičko povezanom kodu. U ovom slučaju dinamički povezivač mora uključiti podršku za rukovanje takvih segmenata podataka. U nastavku teksta je opisano učitavanje i pokretanje dinamičkog koda.

Da bi se podesila memorija za TLS, dinamički povezivač čita sve potrebne informacije o svakom modulu, i o njegovim TLS blokovima, iz `PT_TLS` polja tabele TLS programskog zaglavlja prikazanog u tabeli 4.2. Informacije o svim modulima moraju biti prikupljene. Ovaj proces se ostvaruje koristeći povezanu listu čiji element sadrži:

- pokazivač na TLS inicijalizacionu sliku
- veličinu TLS inicijalizacione slike
- TLS pomeraj ($tlsoffset_m$) za module `m`
- fleg koji daje informaciju o tome da li modul koristi statički TLS model

Ove informacije će biti proširene kada se učitaju dodatni dinamički moduli. Te informacije će biti korišćene od strane standardne biblioteke za rukovanje nitima kako bi podesila TLS blokove za novokreiranu nit.

Kao što je napomenuto, promenljiva unutar lokalnog prostora za nit, TLS, je identifikovana po referenci na modul i pomeraju u okviru tog TLS bloka. Ukoliko imamo strukturu podataka dinamički nitni vektor, možemo definisati referencu na neki modul kao ceo broj (*eng. integer*), počevši od broja 1. To može biti korišćeno kao indeks u dtv_t nizu. Identifikacione brojeve koji svaki modul dobija određuje mehanizam izvršavanja programa, obično neki modul standardne biblioteke za rukovanje nitima. Samo izvršni fajl dobija fiksan broj, 1, a svi ostali učitani moduli dobijaju različite brojeve.

Računanje specifične adrese neke TLS promenljive je prosta operacija koja može biti izvršena ukoliko je programski prevodilac koji je preveo kôd korsitio varijantu 1 TLS strukture podataka. Ali to ne može biti tako lako odrađeno u kodu koji je generisan od strane kompajlera za procesorske arhitekture koje koriste varijatnu 2 TLS strukture podataka.

Umesto toga, definisana je funkcija `__tls_get_addr`, koja je implementirana na sledeći način:

```
void *
__tls_get_addr (size_t m, size_t offset)
{
  char *tls_block = dtv[thread_id][m];
  return tls_block + offset;
}
```

To kako je vektor `dtv[thread_id]` smešten u memoriji je arhitekturalno specifično. `m` is identifikacioni broj modula, koji mu je dodeljen od strane dinamičkog punionca kada je učitavan. Korišćenje `__tls_get_addr` funkcije ima i dodatne prednosti kako bi se olakšala implementacija dinamičkog modela, gde je alokacija nekog TLS bloka odložena do njegove prve upotrebe. Da bi se to podržalo potrebno je popuniti `dtv[thread_id]` vektor sa specijalnom vrednošću kojom će biti prepoznate situacije kada je taj vektor trenutno prazan, tj. da u datom trenutku određeni blok nije u upotrebi. Da bi se to podržalo, potrebna je mala promena u izvornom kodu `__tls_get_addr` funkcije:

```
void *
__tls_get_addr (size_t m, size_t offset)
{
  char *tls_block = dtv[thread_id][m];
  if (tls_block == UNALLOCATED_BLOCK)
    tls_block = dtv[thread_id][m] = allocate_tls(m);
  return tls_block + offset;
}
```

Funkcija `allocate_tls` mora da odredi memorijske zahteve za TLS modula `m` i inicijalizuje ga ispravno. Kao što je i napomenuto, postoje dva tipa podataka: inicijalizovani i neinicijalizovani. Inicijalizovani podaci moraju biti kopirani iz inicijalizacione nitne slike, podešenih prilikom učitavanja modula `m`. Neinicijalizovani podaci se postavljaju na vredosti 0. Jedan primer implementacije može biti:

```
void *
allocate_tls (size_t m)
{
  void *mem = malloc (tlssize[m]);
  memset (memcpy (mem, tlsinit_img[m], tlsinit_size[m]), '\0',
          tlssize[m] - tlsinit_size[m]);
  return mem;
}
```

`tlssize[m]`, `tlsinit_size[m]` i `tlsinit_img[m]` su poznati nakon učitavanja modula `m`. Primetimo da se ista inicijalizaciona slika `tlsinit_img[m]` koristi za sve niti modula, bilo kada da se one kreiraju. Novonapravljena nit ne nasleđuje podatke od svog roditelja (*eng. parent*), već dobija samo kopiju inicijalnih podataka.

4.5 TLS Modeli pristupa

Svako referisanje TLS promenljive prati jedan od dva modela pristupa: dinamički ili statički. Različite arhitekture ABI-jem propisuju koji od modela pristupa će koristiti kao podrazumevani. Razni modeli pristupa se mogu sresti, ali tri najpoznatija pristupa su opisana u nastavku teksta.

Generalni dinamički TLS model

Generalni model pristupa TLS promenljivoj dozvoljava referisanje svih TLS promenljivih, bilo da je to iz deljene biblioteke ili dinamičkog izvršnog fajla. Ovaj model takođe podržava odloženo alociranje TLS bloka do trenutka kada se prvi put taj blok referiše iz specifične niti.

Lokalni dinamički TLS model

Lokalni dinamički model pristupa TLS promenljivoj predstavalja optimizaciju generalnog dinamičkog modela. Programski prevodilac može odrediti da je neka promenljiva definisana samo lokalno, ili zaštićeno (*eng. protected*) u objektu koji je napravljen u programu. U tom slučaju, programski prevodilac daje instrukcije linkeru da statički poveže dinamički TLS pomeraj i da korsiti ovaj model. Iz tog razloga predstavlja hibridnu kombinaciju statičkog i dinamičkog modela pristupa, te prema tome predstavlja model koji diže performanse u odnosu na generalni dinamički model. Samo jedan poziv `tls_get_addr()` po funkciji je potreban za određivanje adrese $dtv_{0,m}$.

Statički TLS model sa dodeljenim ofsetima

Ovaj model pristupa dopušta referisanje samo na one TLS promenljive koje su dostupne kao deo inicijalnog statičkog TLS šablona (*eng. template*). Ovaj šablon je sastavljen od svih TLS blokova koji su sačinjeni prilikom pokretanja procesa. U

ovom modelu, relativni pomeraj pokazivača na nit date promenljive `x` je smešten u polju GOT-a (*eng. Global offset table*) za promenljivu `x`.

Deljene biblioteke uobičajeno koriste dinamički model pristupa, jer statičkim modelom mogu referisati samo na određeni broj TLS promenljivih.

Statički TLS model

Ovaj model pristupa dopušta referisanje samo na one TLS promenljive koje su dostupne kao deo TLS bloka od tog dinamičkog izvršnog fajla. Linker računa relativni pomeraj pokazivača na nit statički, bez potrebe za dinamičkim realokacijama ili dodatnih inforamcija iz GOT-a. Ovaj model pristupa ne dopušta referisanje TLS promenljivih izvan tog dinamički povezanog izvršnog fajla.

Glava 5

Implementacija rešenja

Kao što je napomenuto, TLS može biti različito implementiran za različite procesorske arhitekture. Može se smeštati u posebne registre, u određene delove memorije itd. GNU GDB alat mora poznavati sve arhitekturne razlike i anulirati ih na neki način. Implementacija ovog proširenja alata se upravo i zasniva na prethodnoj pretpostavci, te upravo to i realizuje. Istražene su implementacije TLS-a raznih arhitektura, kako u funkcijama GNU C biblioteke (poznatije kao *glibc*) [15], tako i karakteristike koje su ABI-jem propisane. Poboljšanje alata koje je uspešno realizovano se odnosi na verziju *Multiarch*. Ukoliko je program koji je učitan u *Multiarch* GNU GDB alat iste arhitekture kao arhitektura domaćina, zadržava se način dohvatanja vrednosti TLS promenljive kao u slučaju GNU GDB alata arhitekture domaćina, jer je ta funkcionalnost već implementirana. Treba napomenuti da je u razvoju i alternativno rešenje od strane programera iz kompanije *Red Hat* [12] u vidu projekta *Infinity*[9]. Taj projekat ima ideju da obuhvati rešenja za razne probleme o debagovanju niti, ne samo obradu TLS-a. Prednost rešenja koji se predstavlja u ovom master radu jeste svakako ta što je cela funkcionalnost prepuštena samom GNU GDB alatu, te nema potrebe za instalacijom ili prevođenjem eksternih projekata. Sa tim u vidu se svakako dobija na uštedi korisničkog napora pri korišćenju debagera. Izvorni kôd alata i instrukcije za prevođenje i upotrebu debagera sa pobljšanjem za dohvatanje vrednosti TLS promenljive se može pronaći na strani [7].

5.1 Detalji implementacije

Izmena sistema izgradnje alata

Fajlovi *gdb/configure* i *gdb/Makefile.in* su zaduženi za izgradnju alata. U najopštijem slučaju na UNIX-olikim operativnim sistemima, *configure* skripta je zadužena za pravljenje konačnog *Makefile* od ulaznog *gdb/Makefile.in*.

Izvorni kôd koji u sebi sadrži funkcije za čitanje TLS-a (*gdb/linux-thread-db.c*) se prevodio samo za domaćinsku verziju GNU GDB alata, pa stoga u proširenju za *Multiarch* GNU GDB takođe treba uvrstiti pomenuti fajl prilikom prevođenja. Pored toga, postojeće funkcije koje su zadužene za dohvatanje vrednosti TLS promenljivih je trebalo izmeniti na neki način te je u projekat dodat direktorijum *gdb/glibc-dep/* koji sadrži funkcije koje barataju sa TLS-om različite procesorske arhitekture od arhitekture domaćina. Da bi se ti fajlovi prevodili samo u slučaju *Multiarch* verzije definisan je makro pod imenom `CROSS_GDB` koji se definiše prilikom kreiranja *Makefile*. Da bi se ispratila konvencija pisanja skripti za izgradnju alata, u direktorijum *gdb/config/* je dodat fajl *glibc.mh* koji definiše spisak objektnih fajlova koji služe sa dohvatanje vrednosti TLS promenljive u tom slučaju i takođe u tom fajlu se definiše gore pomenuti makro `CROSS_GDB`.

Sadržaj *gdb/config/glibc.mh* fajla izgleda na sledeći način:

```
1 # GLIBC fragment comes in here
2 GLIBCFILES = td_symbol_list.o \
3        fetch-value.o gdb_td_ta_new.o \
4        td_thr_tlsbase.o td_thr_tls_get_addr.o \
5        td_ta_map_lwp2thr.o native_check.o
6 INTERNAL_CFLAGS += -DCROSS_GDB
```

Da bi sadržaj iz novokreiranog *gdb/config/glibc.mh* fajla bio ispisan u krajnji *Makefile* trebalo je uvesti promenljivu koja proverava da li je u prilikom navođenja opcija *gdb/configure* skripti navedena opcija *–enable_ targets*, koja zapravo označava da korisnik ima nameru da alat prevede kao *Multiarch* verziju. Vrednost promenljive `cross_makefile_frag` u *gdb/configure* skripti postaje putanja do *gdb/config/glibc.mh* fajla ukoliko je pomenuta opcija navedena, a u suprotnom ona ostaje prazna.

Deo koda u *gdb/configure* skripti kojim se to postiže je:

```
if test "${gdb_native}" = "no" ||
   test "${enable_targets}" != ""; then
  cross_makefile_frag=${srcdir}/config/glibc.mh
else
  cross_makefile_frag=/dev/null
fi
```

Implementacija funkcija za dohvatanje TLS-a

U direktorijumu *gdb/glibc-dep/* se nalazi srž funkcopnalnosti dohvatanja vrednsoti TLS promenljive iz datoteke jezgara sa platformi drugih procesorskih arhitektura. Kako standardna C biblioteka već ima implementirane svaku arhitekturalnu zavisnost u vezi TLS-a za svaku procesorsku arhitekturu podržanu u alatu GNU GDB, potrebno je na neki način izopštiti tu funkcionalnost iz same biblioteke unutar alata. Preciznije, za baratanjem nitima GDB koristi *libthread_db* biblioteku iz standardne biblioteke. Funkcije `td_ta_new()`, `td_thr_tls_get_addr()` i `td_th_tlsbase()`, koje se služe za dohvatanje TLS promenljivih, očekuju da se na arhitekturi domaćina prirodno barata sa programima iste arhitekture. Izbegavanje modifikacije *libthread_db* biblioteke moguće je izbeći tako što se pomenute funkcije implementiraju u GNU GDB-u, na isti način kao u *glibc* biblioteci, s' tim što se sve arhitekturno zavisne vrednosti promenljivih i makroa koje primaju te funkcije postave na vrednosti koje bi trebalo da imaju u slučaju da je ta ciljna arhitektura zapravo arhitektura domaćina.

Prvi korak ovog dela implementacije je izmeštanje funkcija iz standardne biblioteke unutar GDB projekta. Unutar *gdb/glibc-dep/* je kreiran direktorijum *nptl_db* koji sadrži pomenute funkcije. Zapravo, ukoliko alat koristi bilo koju verziju standardne biblioteke do 2.22 funkcije iz *nptl_db* nisu ni potrebne za dohvatanje vrednosti TLS promenljive. Sve potrebne informacije za dohvatanje vrednosti TLS promenljive se mogu pročitati iz same datoteke jezgra. Ukoliko alat koristi verziju standardne biblioteke 2.22 i ili veću, funckcije iz *nptl_db* direktorijuma su neophodne kako bi se anulirale novonastale izmene prilikom baratanja TLS-om. Ta funkcionalnost je dodata u funkciji `gdb_td_thr_tlsbase()` koja je dodata u fajl `gdb/glibc-dep/nptl_db/td_thr_tlsbase.c`. Sve funkcije koje bi trebalo da emuliraju ponašanje TLS funkcija standardne biblioteke koje su dodate u projekat GNU GDB imaju prefiks u imenu `gdb_`. Npr. GDB pandam funckiji `td_ta_new()` je

`gdb_td_ta_new()`. Pomenuta funkcija je promenjena da bi alat GNU GDB imao inforamciju o tačnoj verziji standardne biblioteke koju je program koji se debaguje koristio na platformi na kojoj se izvršavao, jer kao što je napomenuto od verzije 2.22 TLS se drugačije dohvata. Nije novo da za debagovanje višenitnih programa GDB alatom, čak i upotrebom domaćinske verzije, je neophodno da GDB koristi istu veriziju *libthread_db* biblioteke kao i program koji se debaguje. To znači ako je program preveden sa verzijom 2.x standardnom bibliotekom, alat mora korsiti istu verziju 2.x tokom svog debagovanja. To se postiže eksplicitnim navođenjem putanje do *libthread_db* biblioteke komandom `set libthread-db-search-path`. Ukoliko se verzije *libthread_db* biblioteke ne poklapaju debager će ispisati upozorenje.

Takođe u `gdb_td_ta_new()` funkiji se poziva funkija `init_target_dep_constants()`, zadužena za inicijalizaciju arhitekturalno zavisnih osobina o TLS-u.

Deo kojim se različite osobine inicijalizuju za arhitekture MIPS i ARM u funkciji `init_target_dep_constants()` izgleda:

```
1  case bfd_arch_mips:
2    tls_tcb_at_tp = 0;
3    tls_dtv_at_tp = 1;
4    forced_dynamic_tls_offset = -2;
5    no_tls_offset = -1;
6    tcb_alignment = 16;
7    break;
8  case bfd_arch_arm:
9    tls_tcb_at_tp = 0;
10   tls_dtv_at_tp = 1;
11   forced_dynamic_tls_offset = -2;
12   no_tls_offset = -1;
13   tcb_alignment = 0;
14   break;
```

U ovom konkretnom slučaju sve TLS osobine su identične, osim poravnanja nitnog kontrolnog bloka.

Funkcija `native_check()` definisana u fajlu *gdb/glibc-dep/native-check.c* daje informaciju da li se *Multiarch* verzijom alata debaguje program domaćinske arhitekture. Ako je to slučaj, dohvatanje vrednosti TLS promenljive se vrši kao do sada uz pomoć funkcija iz standardne C biblioteke. Ukoliko to nije slučaj, pozovaju se novokreirane funkcije iz direktorijuma *gdb/glibc-dep/*.

Cela funkcionalnost se zapravo dodaje u *gdb/linux-thread-db.c* fajl u funkciju koja je zadužena za dohvatanje vrednosti TLS promenljive. Izmena nije direktno u funk-

ciji `thread_db_get_thread_local_address` koja vraća adresu TLS promenljive. Naime, promena je izvedena u funkciji `try_thread_db_load_1()` koja uspostavlja konekciju između alata GDB i *libthread_db* biblioteke. Promenjeni su pokazivači na TLS funkcije u slučaju nedomaćinskih datoteka jezgara.

Deo koda koji implementira pomenutu funkcionalnost je:

```
#ifdef CROSS_GDB
 if (native_check(arch) != 0) {
  info->td_thr_tls_get_addr_p=gdb_td_thr_tls_get_addr;
  info->td_thr_tlsbase_p=gdb_td_thr_tlsbase;
 } else {
  //if it's host we want to keep old way of counting tls address
  TDB_DLSYM (info, td_thr_tls_get_addr);
  TDB_DLSYM (info, td_thr_tlsbase);
 }
#else
  TDB_DLSYM (info, td_thr_tls_get_addr);
  TDB_DLSYM (info, td_thr_tlsbase);
#endif
```

Kao što je i napomenuto, iako je u pitanju *Multiarch* verzija alata, ako je datoteka jezgra kreirana na domaćinskoj platformi zadržava se normalno dohvatanje TLS-a.

5.2 Alternativno rešenje

Drugi način implementacije je modifikacija *libthread_db* funkcija eksplicitno u standardnoj biblioteci, modifikujući ih tako da rade sa različitim arhitekturama. Naime, formula koja služi za dohvatanje TLS promenljive se računala u vremenu prevođenja biblioteke, sada bi se računala u vremenu izvršavanja programa, i u zavisnosti od arhitekture promenljive koje učestvuju u pomenutoj formuli će dobiti odgovarajuće vrednosti. Ukoliko se radi o programu arhitekture domaćina u funkciji `td_ta_new()` promenljive dobijaju vrednosti koje odgovaraju arhitekturi domaćina, dok ako se radi o programu ciljne arhitekture, tj. različite od arhitekture domaćina, iz GNU GDB-a će biti pozvana nova funckija u standardnoj biblioteci `td_ta_init_target_consts()` koja će postaviti vrednosti promenljivih koje odgovaraju ciljnoj arhitekturi. Ideja je upisati ove vrednosti u datoteku jezgra na ciljnoj arhitekturi i kasnije ih pročitati na arhitekturi domaćina korišćenjem GNU GDB alata. U ovom slučaju izmena u samom GNU GDB-u bi bila minorna, te zahteva

samo proveru da li je učitani program arhitekture domaćina ili ne, i u zavisnosti od toga se poziva `td_ta_init_target_consts()` ili ne.

5.3 Unapređenje GNU GDB alata prilikom čitanja/pisanja datoteke jezgra za MIPS procesorsku arhitekturu

Kako bi funkcionalnost bila moguća za svaku podržanu procesorsku arhitekturu, potrebno je da alat GNU GDB ima potpunu podršku za čitanje informacija iz datoteka jezgara. Podrška je za sve arhitekrure potpuna, ali u trenutku razvoja ove funkcionalnosti uočeno je da alat nema potpunu podršku za čitanje identifikacionog broja procesa (eng. *Process ID*) iz datoteke jezgra za MIPS arhitekture, neophodnog za dohvatanje bazičnih informacija o nitima. Kao što je napomenuto, koristeći komandu alata `gcore` moguće je kreirati datoteku jezgra i sa korisničkog nivoa, gde je takođe uočeno da alat nema potpunu podršku za ispisivanje nekih informacija o procesu za MIPS procesorsku arhitekturu. Te izmene su odrađene i prihvaćene od strane GNU zajednice. Takođe treba napomenuti da su te izmene ušle u izvršnu verziju alata.

Deo izvornog koda (u fajlu *bfd/elf32-mips.c*) izmene za čitanje informacija o procesu iz datoteke jezgra:

```
1
2 case 128:                 /* Linux/MIPS elf_prpsinfo */
3   elf_tdata (abfd)->core->pid
4    = bfd_get_32 (abfd, note->descdata + 16);
5   elf_tdata (abfd)->core->program
6    = _bfd_elfcore_strndup (abfd, note->descdata + 32, 16);
```

Deo izvornog koda (u fajlu *bfd/elf32-mips.c*) izmene za pisanje inforamcija o procesu u datoteku jezgra:

```
...
  case NT_PRPSINFO:
    BFD_FAIL ();
    return NULL;

  case NT_PRSTATUS:
    {
     char data[256];
     va_list ap;
     long pid;
     int cursig;
     const void *greg;

     va_start (ap, note_type);
     memset (data, 0, 72);
     pid = va_arg (ap, long);
     bfd_put_32 (abfd, pid, data + 24);
     cursig = va_arg (ap, int);
     bfd_put_16 (abfd, cursig, data + 12);
     greg = va_arg (ap, const void *);
     memcpy (data + 72, greg, 180);
     memset (data + 252, 0, 4);
     va_end (ap);
     return elfcore_write_note (abfd, buf, bufsiz,
                                "CORE", note_type, data,
                                   sizeof (data));
    }
...
```

Primeri izvornog koda izmena su prikazani samo za MIPS 32-bitnu verziju. Napomenimo da izmena obuhvata i MIPS 64-bitnu verziju procesorske arhitekture.

5.4 Testiranje

Faza testiranja je jako važan deo životnog ciklusa razvoja softvera, te je veliki značaj pridodat ovoj sekvenci. Testiranje je izvršeno na raznim verzijama platformi ARM i MIPS procesorskih arhitektura.

Takođe, implementirani su *DejeGNU* [1] testovi koji testiraju dohvatanje vredno-

sti TLS promenljive iz datoteka jezgara razniih arhitektura. Zbog prirode problema koji se testira datoteke jezgra su generisane na različitim platformama i kompresovane zajedno sa izvršnim fajlom u *gdb/testsuite/gdb.multi/*, te se prilikom izvršavanja konkretnih testova ti fajlovi raspakuju i učitavaju u debager. Testovi obuhvataju izvršne fajlove sa TLS-om generisanih sa 2.19 i 2.22 verzijama standardne biblioteke.

Komanda alata kojom pokrećemo testove, ukoliko smo pozicionirani u direktorijumu gde je alat izrađen:

```
make check
```

Pre izmene koja dodaje TLS funkcionalnost, rezultati izvršavanja testova *Multiarch* GNU GDB verzije alata:

```
                === gdb Summary ===
                # of expected passes  33715
                # of expected failures  196
                # of known failures  66
                # of unresolved testcases 5
                # of untested testcases  67
                # of unsupported tests  219
```

Posle izmene koja dodaje TLS funkcionalnost, rezultati izvršavanja testova *Multiarch* GNU GDB verzije alata:

```
                === gdb Summary ===

                # of expected passes  33718
                # of expected failures  196
                # of known failures  66
                # of unresolved testcases 5
                # of untested testcases  67
                # of unsupported tests  219
```

5.5 Upotreba alata

Kao što je i napomenuto, da bi GNU GDB uspešno koristio naprednije tehinke analize višenitnih programa, uključujući i analizu TLS-a, potrebno je da mu se prosledi putanja do *libthread_db* biblioteke koja pripada istoj verziji standardne biblioteke kao i program koji se debaguje. To isto važi i za *Multiarch* GNU GDB

verziju alata. Nakon toga potrebno je zadati putanju do biblioteka koje je program koristio na tom na uređaju sa ugrađenim računarom na kome se program izvršavao. Primetimo da te biblioteke pripadaju toj ciljanoj platformi. Debager neće izvršavati program koji se debaguje, već će samo rekonstruisati sliku stanja tog procesa kada je neočekivano prekinuo sa radom, čitajući inforamcije iz datoteke jezgra i deljenih biblioteka.

Izvorni kod višenitnog programa koji se debaguje u primeru je napisan u programskom jeziku C i izgleda:

```
1  #include <stdio.h>
2  #include <stdlib.h>
3  #include <unistd.h>
4  #include <pthread.h>
5
6  __thread int foo=0xdeadbeef;
7  pthread_t threads[5];
8
9  void* thread(void *e) {
10   int *i = (int*)e;
11   foo+=*i;
12   printf("foo is %x\n", foo);
13   sleep(10);
14   return (void*)0;
15 }
16
17 int main()
18 {
19   printf("init %x\n", foo);
20   int i;
21   for (i=0; i<5; i++) {
22     pthread_create(&threads[i], NULL, thread, &i);
23   }
24
25   for (i=0; i<5; i++) {
26     pthread_join(threads[i], NULL);
27   }
28
29   sleep(5);
30   abort();
31 }
```

Prikaz korišćenja alata pre implementacije dohvatanja vrednosti TLS promen-

ljive iz datoteke jezgra generisane na nekom uređaju sa ugrađenim računarom:

```
1 (gdb) add-auto-load-safe-path /home/glibc/build_22/INSTALL/lib
2 (gdb) set libthread-db-search-path /home/glibc/build_22/INSTALL/lib
3 (gdb) set solib-search-path ~/master_examples/mips_arch
4 (gdb) file ~/master_examples/mips_arch/example222
5 Reading symbols from ~/master_examples/mips_arch/example...done.
6 (gdb) core-file ~/master_examples/mips_arch/core
7 [New LWP 21808]
8 [New LWP 21813]
9 [New LWP 21810]
10 [New LWP 21809]
11 [New LWP 21811]
12 [New LWP 21812]
13 [Thread debugging using libthread_db enabled]
14 Using host libthread_db library "/home/glibc/build_22/INSTALL/lib/
       libthread_db.so.1".
15 Core was generated by `./example'.
16 Program terminated with signal SIGABRT, Aborted.
17 #0 0x00000000 in ?? ()
18 [Current thread is 1 (LWP 21808)]
19 (gdb) p/x foo
20 Cannot find user-level thread for LWP 21808: generic error
```

Prvom i drugom komandom alata se podešavaju putanje do standardne biblioteke za debagovanje niti koja ima istu verziju kao i izvršni fajl koji se debaguje. Trećom komandom se zadaje putanja do deljenih biblioteka koje je izvršni fajl koji se debaguje korsitio na uređaju sa ugrađenim računarom. Četvrta komanda učitava izvršni fajl koji se debaguje. Petom komandom se učitava datoteka jezgra koja je generisana prilikom neočekivanog prekidanja izvršavanja fajla koji se debaguje. Poslednjom komandom se pokušava čitanje vrednosti TLS promenljive.

Prikaz korišćenja alata nakon implementacije dohvatanja vrednosti TLS promenljive iz datoteke jezgra generisane na nekom uređaju sa ugrađenim računarom:

```
1 (gdb) add-auto-load-safe-path /home/glibc/build_22/INSTALL/lib
2 (gdb) set libthread-db-search-path /home/glibc/build_22/INSTALL/lib
3 (gdb) set solib-search-path ~/master_examples/mips_arch
4 (gdb) file ~/master_examples/mips_arch/example222
5 Reading symbols from ~/master_examples/mips_arch/example...done.
6 (gdb) core-file ~/master_examples/mips_arch/core
7 [New LWP 21808]
8 [New LWP 21813]
9 [New LWP 21810]
10 [New LWP 21809]
11 [New LWP 21811]
12 [New LWP 21812]
13 [Thread debugging using libthread_db enabled]
14 Using host libthread_db library "/home/glibc/build_22/INSTALL/lib/
       libthread_db.so.1".
15 Core was generated by `./example'.
16 Program terminated with signal SIGABRT, Aborted.
17 #0 0x00000000 in ?? ()
18 [Current thread is 1 (LWP 21808)]
19 (gdb) p/x foo
20 $1 = 0xdeadbeef
```

Prvom i drugom komandom alata se podešavaju putanje do standardne biblioteke za debagovanje niti koja ima istu verziju kao i izvršni fajl koji se debaguje. Trećom komandom se zadaje putanja do deljenih biblioteka koje je izvršni fajl koji se debaguje korsitio na uređaju sa ugrađenim računarom. Četvrta komanda učitava izvršni fajl koji se debaguje. Petom komandom se učitava datoteka jezgra koja je generisana prilikom neočekivanog prekidanja izvršavanja fajla koji se debaguje. Poslednjom komandom se uspešno čita vrednosti TLS promenljive.

Glava 6

Zaključak

Oba predloga implementacije su poslata GNU zajednici i u toku je pregled i analiza implementacije, čija se diskusija može videti na [2]. I prvi i drugi način imaju svoje prednosti i mane. Mana prvog načina jeste ta što svaka promena arhitekturno zavisnih vrednosti promenljivih koje učestvuju u računanju lokacije TLS promenljive u *glibc*-u zahteva izmenu i u GNU GDB-u što dodatno otežava održavanje koda. Drugi način zahteva izmene i u izvornom kodu GNU GDB-a i *glibc*-a, ali ukoliko želimo da na sistemima arhitekture domaćina baratamo sa programima koji su prevedeni i izvršavani na nekim ciljnim arhitektura, što je za arhitekturu domaćina neprirodno, kompromisi jesu neophodni.

Literatura

[1] *DejaGNU*. on-line at: https://www.gnu.org/software/dejagnu/.

[2] *Diskusija GNU zajednice*. on-line at: https://www.gnu.org/software/dejagnu/.

[3] *ELF Format*. on-line at: http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/academic/class/15213-s00/doc/elf.pdf. 1992.

[4] Free Software Foundation. *DWARF Format*. on-line at: http://dwarfstd.org/. 1992.

[5] Linux Foundation. *ptrace*. on-line at: http://man7.org/linux/man-pages/man2/ptrace.2.html.

[6] *Free Software Foundation)*. on-line at: https://www.fsf.org/.

[7] *GDB sa Multiarch TLS funkcionalnosti*. on-line at: https://github.com/djolertrk/gdb_tls.

[8] *GNU GDB*. on-line at: https://www.gnu.org/software/gdb/.

[9] *Infinity*. on-line at: https://gbenson.net/.

[10] Reid Kleckner. *CodeView*. on-line at: https://llvm.org/devmtg/2016-11/Slides/Kleckner-CodeViewInLLVM.pdf.

[11] *POSIX*. on-line at: http://www.csc.villanova.edu/~mdamian/threads/posixthreads.html.

[12] *RedHat*. on-line at: https://www.redhat.com/en/.

[13] Richard Stallman. *The GNU GDB documentation)*. on-line at: https://www.gnu.org/software/gdb/documentation/.

[14] *TELFOR*. on-line at: https://www.telfor.rs/.

[15] *The GNU C Library (glibc)*. on-line at: https://www.gnu.org/software/libc/.

[16] Red Hat Inc. Ulrich Drepper. *ELF Handling For Thread-Local Storage*. on-line at: `https://www.uclibc.org/docs/tls.pdf`.

Biografija autora

Đorđe Todorović, (*Užice, 12. Avgust 1993.*) Rođen je u Užicu. Završio je Gimnaziju u Požegi, Informatički smer, 2012. godine i iste godine upisao Matematički fakultet u Beogradu. 2016. godine je završio osnovne studije Matematičkog fakulteta i iste upisao master studije. Položio je sve ispite master studija u septembru 2018.godine. Od novembra 2015. pa do sada radi kao inženjer u Naučno-istraivačkom institutu RT-RK. Do sada je objavio nekoliko naučnih radova iz oblasti debagera i generisanja debag informacija od strane programskih prevodilaca. Na ovu temu opisanu u master radu je objavio rad za naučnu konferenciju TELFOR [14]. Trenutno radi na LLVM projektu, tačnije na poboljšanju tog prevodioca prilikom generisanja debag informacija.