KIV/OS - dodatek A - qemu

Martin Úbl

14. října 2022

1 Emulace

Ne každý má k dispozici svoje Raspberry Pi Zero, a ne každý se chce omezovat jeho dostupností v rámci cvičení nebo ve vyhrazených časech mimo něj. Nabízí se proto možnost nějakým způsobem zajistit, že spustíme kód určený pro toto zařízení v rámci virtuálního stroje na běžném PC.

Na přednáškách si představíte různé volby pro emulaci a virtualizaci: emulaci, paravirtualizaci, plnou/přímou virtualizaci, a tak podobně. V tomto případě je nutné sahnout po emulaci, jelikož se architektura simulovaného PC a hostitelského výrazně liší.

Při emulaci je veškerý binární kód interpretován v rámci virtuálního stroje. Tento proces si lze představit tak, jako kdyby samotný binární kód byl vlastně kódem zdrojovým. Emulátor pak tyto instrukce dekóduje a koná akce, které mění virtuální stav stroje s ekvivalentní architekturou, jako je ten, co bychom měli fyzicky v ruce.

Je tedy vytvořena emulovaná paměťová mapa, registry, sběrnice, periferie a další. Vše je ale čistě v rovině softwarové, a tedy je běh potenciálně hodně pomalý. Daleko lepší výkon poskytuje přímá virtualizace, kdy je kód spouštěn přímo na hostitelském CPU. To by ale vyžadovalo podporu pro danou architekturu v rámci našeho CPU a to nelze zajistit.

Do emulace pak lze z vnějšku v omezené míře zasahovat, dle dispozic emulátoru. Můžeme například vypisovat paměťové bloky, registry, zapisovat uměle do vybraných sektorů paměti a periferních registrů, ale občas můžeme i připojit debugger a program ladit, jako kdyby byl fyzicky spuštěn na našem CPU.

2 Emulátor qemu

Pro emulaci Raspberry Pi Zero budeme používat emulátor `qemu`, který je zdarma k dispozici pod licencí GPLv2. Pro běh qemu v součinnosti s tím, co sestavujeme na cvičení je potřeba menší patch, a tedy není možné „tak jak je“ použít balík z distribucí.

Patchované qemu lze stahnout z adresy: `https://github.com/MartinUbl/qemu`

Pokud i tak chcete použít qemu z distribucí např. v balíčkovacím systému apt v Debianu nebo jiném, je to možné pouze za předpokladu, že sestavovanou binární podobu vašeho jádra relokujete ne na adresu `0x8000`, ale na `0x10000`. To zajistíte v linker skriptu `link.ld`, který používáme.

Za předpokladu, že stahnete (doporučenou) distribuci qemu z odkazu výše, je třeba ji nejprve sestavit.

Stahněte tedy distribuci buď jako zip archiv, nebo použijte verzovací systém git:

```
git clone https://github.com/MartinUbl/qemu.git
cd qemu
```

Nyní vytvořte složku `build` a přesuňte se do ní:

```
mkdir build
cd build
```

V repozitáři je připraven `Makefile` a konfigurační skript. Za předpokladu, že máte nainstalovaný libovolný kompilátor jazyka C (gcc, clang) pro vaši architekturu, je možné qemu sestavit následujícími příkazy:

```
../configure --target-list="arm-softmmu"
make
```

Pozn.: může být třeba doinstalovat balíky `ninja-build`*,* `libpixman-1-dev`*,* `libglib2.0-dev` *a další, dle Vaší platformy.*

U skriptu `configure` vidíte přepínač, kterým jej instruujeme, aby sestavil pouze emulaci pro `arm-softmmu` architekturu. Je to jediná, která podporuje emulaci Raspberry Pi Zero, a tedy jediná užitečná pro naše potřeby.

Volitelně pak lze přidat k příkazu `make` i přepínač `-j` s počtem sestavovacích paralelních procesů, např. `make -j4`.

Proces sestavení trvá dlouhou dobu, do hodiny by ale na průměrném čtyřjádrovém CPU mělo být vše sestaveno.

2.1 Jiné platformy

Emulátor qemu podporuje širokou škálu platforem a architektur, od klasické x86, různé varianty ARM, až po PowerPC, MIPS a další.

Těmito platformami se zabývat nebudeme, je ale dobré vědět, že podpora v emulátoru je. Jde tedy o poměrně univerzální systém.

3 Emulace RPi0

Zkompilovaný kernel mějme dostupný na nějaké námi známé cestě. V tomto případě nebudeme používat náš UART bootloader, jelikož není třeba měnit SD kartu. Můžeme rovnou nahrát jádro, které kompilujeme a balíme do souboru s názvem `kernel.img`.

V podsložce `build` je nově vytvořen spustitelný soubor `qemu-system-arm`, kterým spustíme emulaci. Je ale potřeba dodat určitou sadu parametrů:

```
./qemu-system-arm -machine raspi0 -serial null -serial mon:stdio \
                        -kernel /home/dev/kernel.img -nographic
```

Parametry:

- `-machine raspi0` – vybírá konkrétní kombinaci CPU, GPU, obrazu ROM, periferií a dalších
- `-serial null` – první sériový port (UART) nechceme
- `-serial mon:stdio` – druhý sériový port (miniUART) chceme multiplexovat se standardním vstupem a výstupem
- `-kernel /home/dev/kernel.img` – chceme použít obraz jádra uložený na dané adrese
- `-nographic` – qemu podporuje i grafický výstup, který ale nevyužijeme; tímto zamezíme inicializaci okna, a mj. dovolíme fungování např. i pod WSL (Windows Subsystem for Linux)

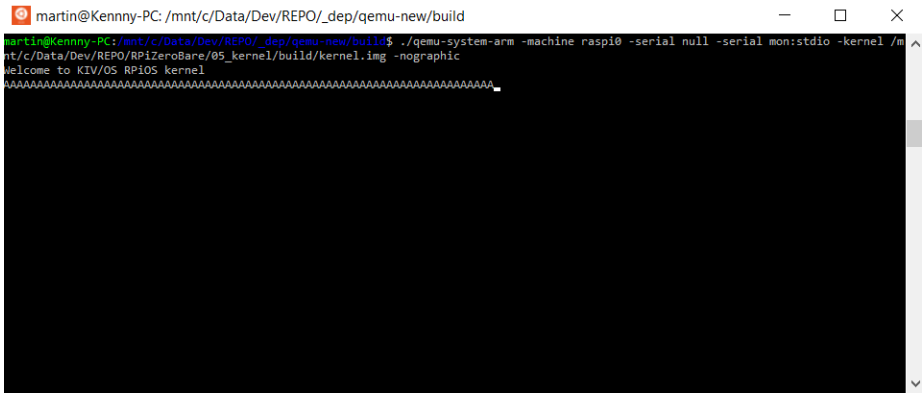
Zdvojením parametru `-serial` docílíme mapování více UART kanálů. Jelikož je miniUART mapován na UART1, musíme nejprve prvním `-serial null` říct qemu, že UART0 mapovat nechceme, a druhým `-serial mon:stdio`, že UART1 (miniUART) chceme multiplexovat se standardními proudy.

Multiplexing je nutný proto, že qemu má svou příkazovou řádku pro ovládání emulace. Tento parametr bude multiplexovat vstupy a výstupy s touto příkazovou řádkou. Implicitně se však ocitneme v režimu komunikace s hostovaným systémem. Pro přechod mezi tímto režimem a režimem konzole qemu stiskněte ctrl-A a C. Kdybychom použili pouze ctrl-C, byl by předán tento řídicí příkaz do hostovaného systému (který jej mj. momentálně ani neumí zpracovat).

4 Testování

Pro testování použijme kódy ze 3. cvičení, ve kterém jsme implementovali UART driver. Zkompilujme zdrojové soubory a obdržme tedy soubor `kernel.img`. V tomto příkladu jsme nechali vypisovat znak `A` s určitou periodou. Očekáváme tedy, že po spuštění začne konzoli zaplavovat znak `A`, dokud emulátor neukončíme.

Po stisknutí ctrl-A a C se přepne ovládání do konzole qemu, výstupy však pokračují dál. Pro ukončení napišme příkaz `quit`, který se nejspíš bude prolínat se zapisovanými znaky `A`, a potvrďme enterem.



5 Ladění

Pro ladění emulovaného kódu lze využít ladicí nástroj `gdb`. Pro debuggování jiné, než aktuální platformy je však nutné instalovat balíkovou verzi `gdb-multiarch`. Ta je dostupná ze standardních zdrojů vaší distribuce.

Emulátor qemu podporuje připojení debuggeru gdb. Je ale nutné dodat další parametry.

```
./qemu-system-arm -machine raspi0 -serial null -serial mon:stdio \
      -kernel /home/dev/kernel.img -nographic -S -gdb tcp::1234
```

Nově přibyly dva parametry:

- `-S` – po spuštění je emulace zastavena na první instrukci hostovaného systému, která by se provedla a bude čekat na spuštění z gdb
- `-gdb tcp::1234` – exportuje rozhraní pro gdb na TCP port `1234`

Volitelně lze vynechat přepínač `-S`, pak se systém spustí a dovolí pouze připojení gdb do již běžícího systému.

Do emulace se pak lze připojit následujícím příkazem:

```
gdb-multiarch -ex 'set architecture arm' \
              -ex 'file kernel' \
              -ex 'target remote tcp:localhost:1234' \
              -ex 'layout regs'
```

Přepínač `-ex` provede příkaz konzole gdb. My potřebujeme tyto příkazy:

- `set architecture arm` – pro přepnutí na architekturu a instrukční sadu ARM
- `file kernel` – pro propojení běžícího kódu se zkompilovaným binárním souborem

- `target remote tcp:localhost:1234` – pro připojení se k běžící instanci qemu na TCP portu 1234
- `layout regs` – volitelné – přepnutí do pohledu, ve kterém vidíme registry a aktuální kód

Jakmile se nám povede připojit, můžeme ovládat emulaci (a debugging) např. následujícími příkazy (základní sada):

- `continue` (nebo jen `c`) – pokračuje v provádění příkazů, popř. spustí emulaci, pokud jsme ji vytvořili s přepínačem `-S`
- `si` – krok o jednu instrukci
- `s` – krokuje tak dlouho, dokud neopustí aktuální funkci
- `print <spec>` (nebo jen `p <spec>`) – vypíše obsah paměti na dané adrese; `<spec>` může být:
  - identifikátor (např. `moje_promenna`)
  - adresa prefixovaná hvězdičkou (např. `*0x8000`)
  - a jiné
- `print/x <spec>` (nebo jen `p/x <spec>`) – totéž, ale pro výpis v hexadecimální podobě
- `break <spec>` – nastaví (instrukční) breakpoint na dané místo; `<spec>` může být opět identifikátor, adresa prefixovaná hvězdičkou, apod.
- `clear` – vymaže všechny breakpointy
- `clear <spec>` – vymaže zadaný breakpoint
- `quit` – odpojí se od laděné instance qemu

Seznam příkazů pochopitelně není úplný, kompletní dokumentaci lze nalézt zde: `https://ftp.gnu.org/old-gnu/Manuals/gdb/html_node/gdb_toc.html`

6 Známé problémy

Emulace pomocí qemu není zdaleka dokonalá. Určité věci chybí, nebo jednoduše nefungují jak mají:

- SYSTIMER – systémový časovač; efektivně zamezuje použití preemptivního multitaskingu pomocí tohoto druhu časovače
- bezdrátový adaptér – momentálně neexistuje oficiální cesta, jak virtualizovat/emulovat WiFi (pro variantu RaspberryPi Zero W)