10. NOVA System call

NOVA – Systémová volání a správa paměti

Na tomto cvičení se seznámíte s jádrem miniaturního OS NOVA a implementujete do něj systémové volání `nbrk` . NOVA je mikrohypervizor původně vyvíjený na Drážďanské univerzitě, později ve firmě Intel a nyní firmami GENODE labs, BedRock Systems a Cyberus Technology. Na cvičeních však nebudete pracovat s kompletní verzí jádra NOVA, ale se zjednodušenou verzí pro výuku, která má pouze dva tisíce řádek kódu.

Domácí příprava

Pro toto cvičení se vám bude hodit:

- aspoň trochu rozumět kódu v C++ (viz také 7. přednáška) a inline assembleru (viz 8. cvičení),
- vědět, co to jsou systémová volání a proč/k čemu se používají (viz přednášky),
- vědět, co dělá systémové volání brk v Linuxu (budete implementovat podobnou, ale ne stejnou, funkcionalitu),
- vědět, jak CPU překládá virtuální adresy na fyzické (i386 používá dvoustupňové mapování 10-10-12), viz přednášky OSY, APO, tuto přednášku na YouTube, případně další,
- projít si slidy NOVA Introduction,
- stáhnout si, rozbalit a ideálně i vyzkoušet (`make run`) operační systém NOVA
  - na vlastním PC (Debian/Ubuntu) budete potřeboval balíčky:
    - `libc6-dev-i386`

        - `qemu-system-i386` nebo `qemu-system-x86`
    - přečíst hlavní `Makefile`
    - přečíst funkci `Ec::syscall_handler`
    - přečíst funkci `Ptab::insert_mapping` (byla probírána i na přednáškách)
    - podívat se na třídu `Kalloc`
    - při práci přes vzdálený přístup použijte

```
ssh -X «login»@postel.felk.cvut.cz
```

    přepínač `-X` umožní spouštět i grafické aplikace (QEMU)

- popis instrukce sysenter a sysexit,
- rozumět rozdílu mezi uživatelským prostorem a prostorem jádra (viz přednášky).

Zadání úlohy

V jádře OS Nova implementujte systémové volání `nbrk` s prototypem:

```
void *nbrk(void *address)
```

Toto systémové volání nastaví konec datového segmentu v adresním prostoru procesu (tzv. *program break* nebo jen *break*) na adresu danou parametrem `address`. Tím se zvětší nebo zmenší množství alokované paměti, které může program využívat ke svému běhu. Break je první adresa za koncem namapovaného datového segmentu.

Vaše řešení by mělo splňovat následující požadavky:

- Po úspěšném návratu ze systémového volání je break nastaven na hodnotu `address`. To znamená, že uživatelský program může používat paměť od adresy `0x1000` do adresy o jedna menší než `address`.
- Přístup na stránky začínající na adrese vyšší či rovné `address` nebude programu dovolen.
- Break nesmí jít nastavit na nižší hodnotu, než je jeho hodnota při spuštění programu. Tím by se program připravil o část svého kódu nebo dat.
- Break nesmí jít nastavit na vyšší hodnotu než `0xBFFFF000`. Tím by aplikace mohla přepsat svůj zásobník nebo dokonce jádro, které je namapováno od adresy `0xC0000000` výš.
- Při úspěšném dokončení je vrácena původní hodnota break před vykonáním

systémového volání. Při chybě je vrácena hodnota `0`.
- Pokud je `address` rovno `NULL` (`0`), nejedná se o chybu a hodnota break se nemění. Toto volání slouží pouze ke zjištění aktuální hodnoty break.
- Při žádném volání `nbrk` nesmí dojít k „pádu“ systému.
- *ABI* systémového volání bude následující:
  - vstup: `AL=3, ESI=address,`
  - výstup: `EAX=návratová hodnota.`
- Nově alokovaná paměť bude inicializována na nulu.
- Při snižování hodnoty break bude nepřístupná paměť dealokována (a odmapována), aby mohla být opět alokována později.
- Při chybě alokace paměti v průběhu systémového volání nebude adresní prostor uživatelské aplikace změněn a částečně alokovaná paměť bude dealokována.
- Při kompilaci nevypisuje kompilátor žádná varování.

Odevzdává se archiv se souborem `ec_syscall.cc` obsahující vaši implementaci, ideálně vytvořený pomocí:

```
make hw10
```

Nápověda

- Operační systém NOVA s testovací aplikací `user/hello.c` můžete nabootovat buď na fyzickém počítači pomocí zavaděče podporujícího specifikaci multiboot (např. GRUB 2), ale pravděpodobně bude efektivnější ho pouštět jako virtuální stroj například v emulátoru Qemu. Pro to stačí spustit příkaz:

  ```
  make run
  ```

- Pokud se vám při spuštění qemu zobrazuje hláška:

  ```
  Unable to init server: Could not connect: Connection refused
  gtk initialization failed
  ```

  znamená to, že nemůžete spouštět grafické aplikace. V tom případě můžete spustit qemu bez podpory grafického rozhraní:

```
qemu-system-i386 -nographic -kernel kern/build/hypervisor -initrd user/
```

- Pokud úlohu vyvíjíte na Windows ve WSL, je několik možností jak OS NOVA spustit.

  1. Nejjednodušší možnost je instalovat Qemu do WSL a využít toho, že aktuální verze WSL podporuje grafické aplikace. Po instalaci Qemu spusťte příkaz `make run` a pokud selže s chybou (viz výše), aktualizujte WSL pomocí příkazu `wsl --update` (je třeba spustit z Windows, ne z WSL).
  2. Alternativní varianta je nainstalovat Qemu do Windows a následně přidat jeho instalační složku (typicky `C:\Program Files\qemu`) do environment proměnné `PATH` – třeba přes GUI (Start Menu -> vyhledejte `PATH` -> vyberte `Edit the system environment variables` -> dole tlačítko `Environment variables`, a pak v části `System variables` upravte `Path`. Pokud vám hledání `PATH` nedá žádné relevantní výsledky (pravděpodobně kvůli neanglické lokalizaci Windows), vyhledejte místo `PATH` přímo program `SystemPropertiesAdvanced`. Poté zavřete a znovu otevřete WSL terminal, aby se změna v environmentu promítla (program si drží prostředí, které dostal při spuštění).

  Následně spusťte příkaz `make run`. Výstup seriové linky by se měl zobrazovat v terminálu, a zároveň by se mělo otevřít GUI okno Qemu. Virtualní stroj můžete ukončit buď zavřením Qemu okna, nebo stisknutím `Ctrl-c` v původním WSL terminalu.

- Vaše řešení musí změnit funkci `Ec::syscall_handler()`. Buď vše implementuje v této funkci, nebo vytvořte novou funkci, kterou z `Ec::syscall_handler()` zavoláte a předáte jí všechny potřebné parametry.

- Při zvětšování hodnoty „program break“ musíte v jádře alokovat paměť a namapovat ji do adresního prostoru uživatelské aplikace modifikováním stránkovacích tabulek. Inspirací vám může být funkce `Ec::root_setup()`, která připravuje paměť pro spouštěný program. Funkce čte hlavičky z binárky aplikace, které si můžete zobrazit příkazem `readelf --program-headers hello`.

  Na konci funkce nastaví proměnné `Ec::break_min` a `Ec::break_current`, které pravděpodobně budete potřebovat ve své implementaci.

- Při snižování hodnoty „program break“ naopak musíte mapování zrušit a paměť dealokovat.

- Při startu uživatelského programu (např. `hello`) je jeho paměťová mapa následující (trochu zjednodušeno):

Adresy	Obsah
`0x00001000 – 0xXXXXX000-1`	kód programu, viz `.text` ve výstupu příkazu `readelf --sections hello`
`0xXXXXX000 – 0xYYYYY000-1`	data programu, viz `.data` a `.bss` ve výstupu příkazu `readelf --sections hello`
`0xYYYYY000`	program break
`0xBFFFF000 – 0xC0000000-1`	zásobník (4 kB); počáteční hodnota registru `ESP` je `0xC0000000`

- Ke kódu jádra NOVA není podrobná dokumentace, ale části, které budete potřebovat, nejsou složité, a měli byste být schopni jim porozumět na základě čtení kódu a komentářů (např. zde). Pokud však i přes vaší snahu něčemu nerozumíte, klidně se zeptejte.

Ladění

Při vývoji operačního systému nelze používat debugger tak jednoduše, jak jste zvyklí při vývoji aplikací. Ladit váš kód můžete přidáváním příkazů `printf()` na potřebná místa v kódu. Pokud vám to nestačí můžete použít parametr `-gdb` (případně zkratku `-s`) emulátoru Qemu.

Abychom vám ladění usnadnili, v hlavním `Makefile` jsou připravena pravidla jak pro spouštění Qemu se zmiňovanými parametry, tak pro spouštění debuggeru `gdb` tak, aby šel ladit kód běžící v Qemu:

- V jednom okně spusťte příkaz

  ```
  make rd
  ```

  který spustí Qemu, které po startu počká na připojení debuggeru.

- V druhém okně pak spusťte

  ```
  make du
  ```

  (pokud chcete ladit uživatelský program (nápř. `hello')) nebo

```
make dk
```

pokud chcete ladit jádro.

Můžete v `Makefile` změnit argument příkazu `break` tak, aby se vykonávání programu zastavilo na funkci (či řádku), který potřebujete odladit.

Užitečné příkazy `gdb`

Příkazy se většinou dají zkrátit na první znak.

- Běh programu: `next` (`n`), `step` (`s`), `continue` (`c`)
- Výpis proměnných: `print` (např. `p initialized_var` nebo hexadecimálně: `p/x initialized_var`)
- Výpis paměti: `x` (např: `x/16 0x2000` vypíše 16 slov od adresy `0x200`, `x/16 &initialized_var` vypíše 16 slov začínající na adrese proměnné `initialized_var`.
- Informace: `info registers` vypíše hodnoty registrů, `info locals` vypíše hodnoty lokálních proměnných atd.
- Zobrazení: `layout src` zobrazí zdrojový kód i příkazové okno, `Ctrl-L` překreslí obrazovku, `tui disable` vypne zobrazování zdrojového kódu.

Monitorovací konzole Qemu

Pro ladění můžete používat i monitorovací konzoli Qemu, která umožňuje zobrazit stav emulovaného CPU.

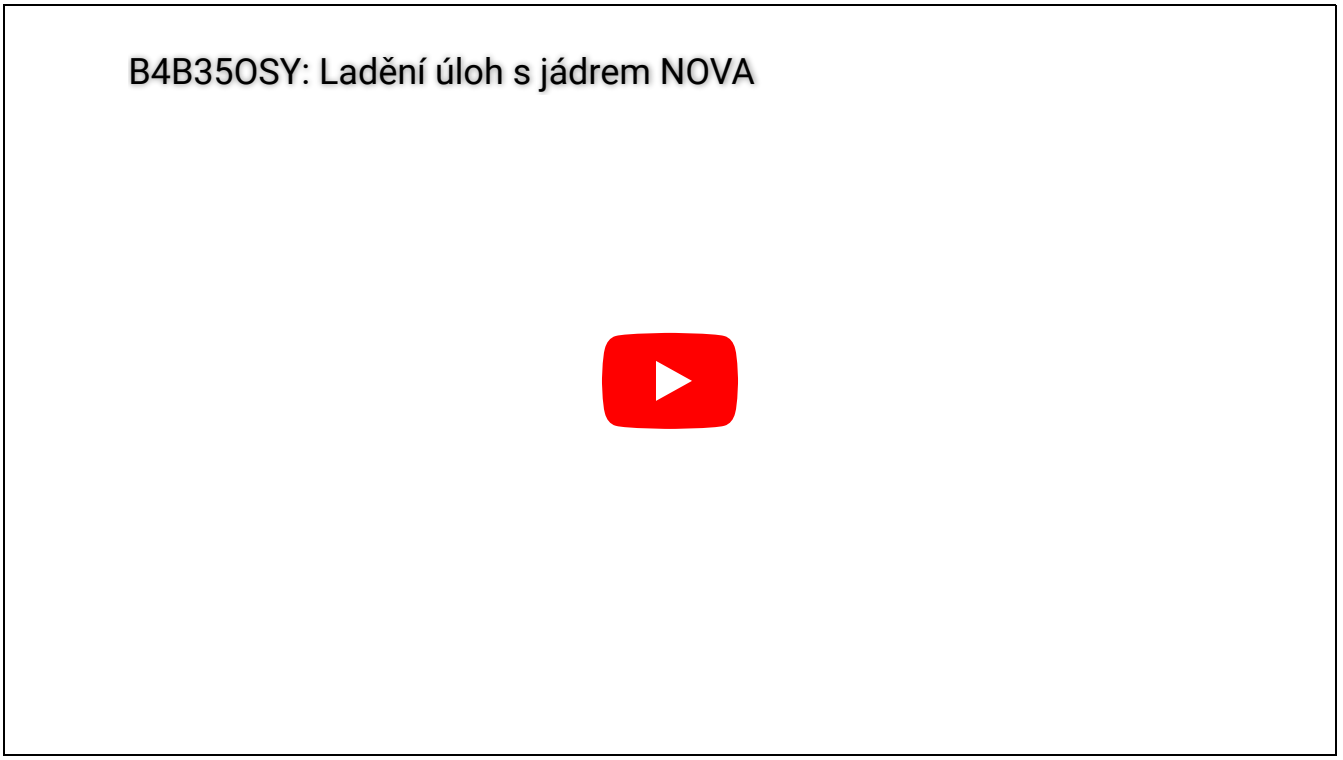
- Do konzole se přepnete stiskem `Ctrl-Alt-2` v grafickém okně (nebo stiskem `Ctrl-a c` pokud spouštíte `qemu` s přepínačem `-nographic`)
- Příkazy `info mem` nebo `info tlb` vypíší informace o mapování virtuálních adres na fyzické (tj. stránkovací tabulku).
- `info registers` vypíše hodnoty registrů

Video

Video níže ukazuje, tak používat debugger GDB pro ladění této a následující úlohy. Začneme ukázkou textového rozhraní gdb a pak použijeme gdb v rámci grafického vývojového prostředí Qt Creator.

Obsah videa:

- 00:00 Úvod
- 01:14 Ladění s GDB
- 04:57 Ladění jádra NOVA v QtCreatoru
- 07:58 Použití Qemu monitoru
- 10:55 Ladění NOVA user space v QtCreatoru



Příklad

- Předpokládejme, že `break_start` je na začátku Vašeho procesu nastaven na `0x5000`.
- Při volání funkce `nbrk(0x9000)` dojde k alokování stránek `0x5000-0x5FFF`, `0x6000-0x6FFF`, `0x7000-0x7FFF` a `0x8000-0x8FFF`.
- Při dalším volání `nbrk(0x7555)` dojde k uvolnění a odmapování stránky `0x8000-0x8FFF`.
- Při dalším volání `nbrk(0x7666)` se neprovádí žádná alokace, ale vynuluje se paměť `0x7555-0x7665`.
- Při dalším volání `nbrk(0xA000)` se alokuje nová stránka pro `0x8000-0x8FFF` a `0x9000-0x9FFF`, a vynuluje se paměť `0x7666-0x7FFF` (předpokládáme, že nově alokované stránky jsou už vynulované).

Další materiály

- Testovací programy kterými BRUTE testuje vaše řešeni
- Zdrojové kódy OS NOVA
- Automaticky generovaná dokumentace jádra NOVA