

# Vláknové programování

## část I

Lukáš Hejmánek, Petr Holub  
{`xhejtman, hopet`}@ics.muni.cz



Laboratoř pokročilých síťových technologií

PV192  
2012-02-21

“For the past thirty years, computer performance has been driven by Moore’s Law; from now in, it will be driven by Amdahl’s Law. Writing code that effectively exploits multiple processors can be very challenging. . . ”

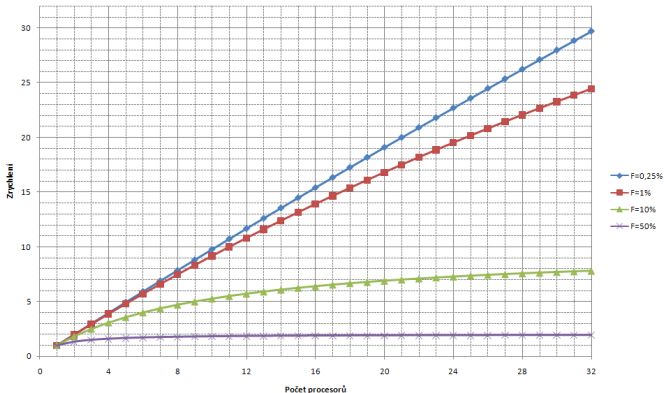
–*Doron Rajwan*, Research Scientist, Intel Corp.

# Amdahlův zákon

$$\text{zrychlení} \leq \frac{1}{F + \frac{1-F}{N}}$$

kde  $F$  je podíl sériově vykonávané práce a  $N$  je počet procesorů

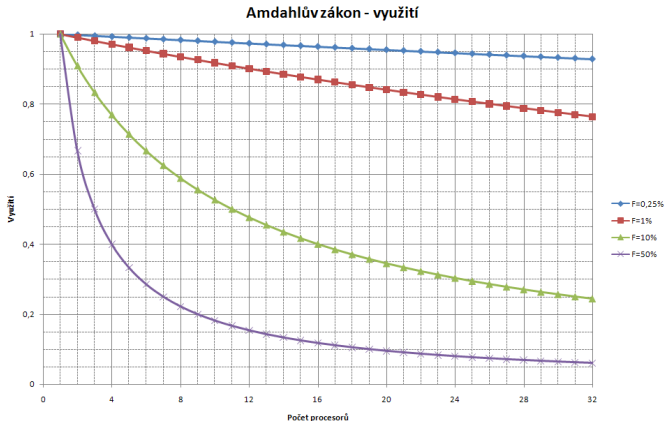
Amdahlův zákon - zrychlení



# Amdahlův zákon

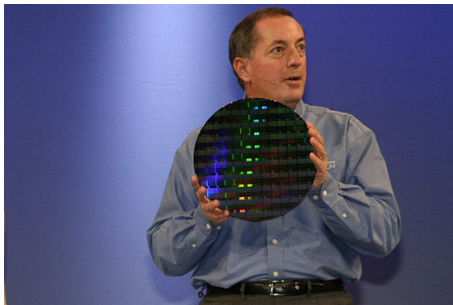
$$\text{zrychlení} \leq \frac{1}{F + \frac{1-F}{N}}$$

kde  $F$  je podíl sériově vykonávané práce a  $N$  je počet procesorů



## 80 jader na čipu

Intel na IDF 2006 předvedl prototyp procesoru s 80 jádry.  
Výkon  $\approx$  1 TFLOPS



Zdroje:

[http://www.news.com/Intel-shows-off-80-core-processor/2100-1006\\_3-6158181.html](http://www.news.com/Intel-shows-off-80-core-processor/2100-1006_3-6158181.html)

# Úvod do programování ve vláknech

- Programování v C s využitím Pthreads
- Programování v Javě
- Výlet do jiných jazyků: Ada
- Demonstrováno na praktických příkladech

# Úvod do programování ve vláknech

- Programování v C s využitím Pthreads
  1. Procesy, vlákna, přepínání kontextu, knihovna pthreads, vznik a ukončení vláken, základy ladění aplikací
  2. Základy synchronizace: zámky, semaforey, podmíněné proměnné, RCU struktury
  3. Pokročilé synchronizace: bariéry, rw zámky, pojmenované semaforey, futexy
  4. Afinita, Atributy vláken, režimy startu vlákna, priority, ukončování vláken, thread-specific data
  5. OpenMP
  6. Práce s pamětí
  7. GUI, OpenGL, Futures a TPE v C++

# Úvod do programování ve vláknech

- Programování v Javě
  1. Vlákna v jazyce Java, vytváření a ukončování. Viditelnost operací. Monitory a synchronizace. Signalizace a pozastavení.
  2. Paralelní datové struktury. Atomické typy. Ladění paralelních programů: uváznutí a jeho diagnostika, hladovění. Testování paralelních programů.
  3. Explicitní zamykání – RW zámky, vlastní typy zámků. Executors, thread pools, futures.
  4. Paměťový model Javy. Paralelismus a GUI.



# Úvod do programování ve vláknech

- Výlet do jiných jazyků: Ada
  1. Úvod k jazyku Ada: základní rysy jazyka, syntaxe, datové typy.
  2. Podpora paralelismu v jazyce Ada: úlohy, chráněné objekty, monitory, podpora systémů v reálném čase.

## Literatura

- Andrews, Gregory R. *Foundations of multithreaded, parallel, and distributed programming*. Addison-Wesley 2000.
- Ben-Ari M., *Principles of Concurrent and Distributed Programming*. 2nd Ed. Addison-Wesley, 2006
- Goetz B., Peierls T., Bloch J., Bowbeer J., Holmes D., Lea D. *Java Concurrency in Practice*. Addison Wesley Professional, 2006
- Butenhof D. R., *Programming with POSIX(R) Threads*. Addison-Wesley Professional, 1997
- Burns A., Wellings A. *Concurrency in Ada*. 2nd Ed. Cambridge University Press, 1998  
nebo  
Burns A., Wellings A. *Concurrent and Real-Time Programming in Ada*. Cambridge University Press, 2007

# Přehled přednášky

## Procesy a vlákna

Procesy

Vlákna

## Knihovna Pthreads

## Základy ladění aplikací

# Procesy

- Proces
  - Instance programu, která je sekvenčně prováděna.
  - Je to entita pro alokace zdrojů (procesor, paměť, atd)
  - Procesy tvoří stromovou hierarchii—vztah rodič potomek

Sex is not really common among processes—each process has just one parent.

# Procesy

- Typy procesů
  - Levný proces (Light Weight Process–LWP)
    - Levné procesy mezi sebou sdílí adresní prostor
    - Minimum privátních zdrojů
  - Drahý proces (Heavy Weight Process–HWP)
    - Drahé procesy jsou mezi sebou zcela izolované
    - Prakticky všechny zdroje jsou privátní

# Procesy

- Popisovač procesu
  - Obsahuje informace o
    - Signálech
    - Přidělené paměti
    - Otevřených souborech
    - Aktuálním adresáři
    - HW kontext (obsah registrů, zásobník, ...) – TSS
    - Terminálu
    - Prioritě
    - Stav
    - ...

# Procesy

- Vytvoření procesu
  - Proces vzniká rozštěpením rodiče
  - Po startu je potomek stejný jako rodič
    - Stejný obsah paměti (Copy on Write)
    - Vykonává stejný kód

# Procesy

- Běh procesu
  - Vykonávání kódu programu
  - Dva režimy běhu
    - User space–kód samotného programu
    - Kernel space–kód jádra
  - Stav procesu
    - Running
    - Interruptible
    - Uninterruptible  
(Nezpracovává signály)
    - Stopped
    - Traced
  - Konkurence vs. paralelismus
    - Konkurence–vykonávání stejného nebo různého kódu více procesy, nemusí probíhat ve stejný čas
    - Paralelismus–konkurence probíhající ve stejný čas



# Procesy

- Přepínání kontextu
  - Zásadní mechanismus multitaskingu
  - Mechanismus uložení a obnovení stavu CPU
  - Rozlišujeme přepnutí kontextu
    - Registrové (obsluha přerušení)
    - Vlákňové (přepnutí na jiné vlákno téhož procesu)
    - Procesové (přepnutí na jiný proces)

# Procesy

- Kroky při přepínání kontextu
  - Uložení stavu CPU, obvykle do TSS
    - Všechny běžné registry, deskriptory segmentu, příznaky
    - Stav a registry FPU
  - Obnova adresního prostoru
  - Načtení nového stavu CPU

# Procesy

- Softwarové vs. hardwarové přepínání kontextu
  - Kontext lze uložit a obnovit v softwaru (kopírování stavu)
  - Některé procesory podporují přepnutí kontextu v HW (architektura x86 od Intel 80386 a dál)
  - Linux od verze jádra 2.4 používá softwarové přepnutí kontextu
  - Softwarové i hardwarové přepnutí kontextu je velmi drahá operace!

# Procesy

- Komunikace mezi procesy
  - Soubory
  - Signály (signal(7))
  - Sockets (socket(2))
  - Fronty zpráv (mq\_overview(7))
  - Trubky (pipes), pojmenované vs. nepojmenované (pipe(2))
  - Semaforey (sem\_overview(7))
  - Sdílená paměť, paměťově mapované soubory (shm\_overview(7), mmap(2))
  - Message passing (MPI knihovny)

# Vlákna

- Proč vlákna?
  - Paralelismus
  - Výkon
  - Odezva
  - Komunikace

# Vlákna

- Vlákno
  - Podmnožina procesu
  - Vlákno nemá vlastní adresní prostor
  - Typicky sdílí stav ostatními vlákny daného procesu
  - Shared-memory model:
    - Komunikace mezi vlákny je možná stejně jako u procesů a navíc i přes jejich sdílenou paměť
    - Oproti procesu jsou běžně sdílené globální a statické proměnné

# Vlákna

- Vlákna stejného procesu sdílí
  - Kód programu
  - „Většinu“ dat
    - Novější koncepce vláken podporuje nesdílenou paměť–thread local storage (TLS)
  - Otevřené soubory (file descriptors)
  - Signály a obsluhu signálů
  - Současný pracovní adresář
  - Identifikaci uživatele a skupiny
  - Process ID (PID)
  - Pojmenované semaforey, fronty zpráv a další nástroje IPC

# Vlákna

- Každé vlákno má unikátní
  - Thread ID (identifikace vlákna)
  - Obsah registrů procesoru, ukazatel vrcholu zásobníku
  - Zásobník pro lokální proměnné a návratové adresy
  - Masku signálů
  - Prioritu
  - Hodnotu proměnné **errno** (dle POSIX.1c)



# Vlákna

- Implementace vláken v operačním systému je různá
  - proces a vlákno není rozlišeno  
(vlákno je tedy procesem – Linux bez NPTL)
  - proces a vlákno jsou rozlišeny  
(vlákno se liší od procesu – Windows, Linux s NPTL)
  - vlákna v uživatelském prostoru  
(vlákna si řídí sám proces – Java Green Threads (obsolete), Erlang)

# Vlákna

- Mapování vláken na plánovací entity v jádře
  - mapování vláken 1:1
    - současné produkční implementace
    - Linux, Windows, FreeBSD s libthr
  - mapování vláken N:M
    - + teoreticky nejefektivnější
    - příliš složité, problémy s invertováním priorit, atd.
      - FreeBSD s Kernel Scheduler Entities, experimenty i v Linuxu
  - mapování vláken N:1
    - zastaralý přístup, user-space threading
    - FreeBSD s libc\_r

# Vlákna

- Některé systémy mají „levné“ přepínání vláken a „drahé“ přepínání procesů (Windows NT, OS/2).
- Některé systémy příliš nerozlišují v přepnutí vlákna nebo procesu.
- Proč uvažujeme vlákna místo procesů?
  - Rychlejší přepnutí běžících vláken než běžících procesů.
  - Snadné sdílení paměti a dalších zdrojů mezi běžícími vlákny (někdy ovšem nevýhoda).

# Knihovna Pthreads

- POSIX Threads (Pthreads) je POSIX standard pro vlákna
- Vlákna v systémech na bázi jádra Linux
  - Linux threads – neúplná implementace POSIX Threads
    - Vlákno bylo obsluhováno stejně jako proces, mělo i vlastní PID (process ID).
    - Není nutná speciální podpora jádra, problémy s výkonem, pokud se vlákno samo nevzdá procesoru (yield()).
  - Nahrazena NPTL – Native POSIX threads library
    - Výrazně vyšší výkonnost
    - Vlákno je samo o sobě jednotkou plánování, tj. procesový plánovač plánuje i vlákna obvykle úplně stejně.
    - NPTL potřebuje speciální podporu jádra pro synchronizaci.
- Pthreads knihovna má implementaci pro řadu systémů: Linux, \*BSD, Windows, MacOS, ...

# Knihovna Pthreads

- Vytváření vláken a procesů v Linuxu
  - Vlákno vzniká systémovým voláním **clone(2)**
  - Proces vzniká systémovým voláním **fork(2)** (případně **vfork**)
    - Nejčastější použití **fork(2)** je pro spuštění nového programu
    - Po **fork(2)** dojde k rozštěpení rodiče, duplikaci adresního prostoru, atd.
    - Následně je pomocí **exec1(3)** zrušen obsah paměti a puštěn nový program
    - Jednodušší volání **system(3)**, nelze ale použít vždy
- Procesy se obvykle vytváří přímo voláním **fork(2)**, vlákna pomocí knihovny pthreads.

# Knihovna Pthreads

- Vytvoření procesu

```
1 #include <unistd.h>
2
3 void
4 run(char *name)
5 {
6     pid_t child;
7
8     if((child=fork())==0) {
9         /* child */
10        execlp(name, NULL);
11        return;
12    }
13    if(child < 0) {
14        perror("fork_error");
15    }
16    /* parent */
17    return;
18 }
```

## Vytváření vláken pomocí Pthreads

- Rukojeť vlákna **pthread\_t**, používá se pro pro takřka všechna volání týkající se vytváření a manipulace s vlákny.
- **int pthread\_create(pthread\_t \*thread, pthread\_attr\_t \*attr, void \*(\*start\_routine)(void\*), void\* arg);**

- Vytvoření vlákna v C

```
1 #include <pthread.h>
2
3 void *
4 runner(void *foo)
5 {
6     return NULL;
7 }
8
9 int
10 main(void)
11 {
12     pthread_t t;
13
14     pthread_create(&t, NULL, runner, NULL);
15     return 0;
16 }
```



- Nefunkční příklad pro C++

```
1 #include <pthread.h>
2
3 // not void*
4 void
5 runner(void *foo)
6 {
7     return;
8 }
9
10 int
11 main(void)
12 {
13     pthread_t t;
14
15     pthread_create(&t, NULL, runner, NULL);
16     return 0;
17 }
```

## Ukončování vláken

- Možnosti ukončení vlákna samotným vláknem:
  - Návrat z hlavní funkce startu vlákna (třetí argument funkce `pthread_create`).
  - Explicitní zavolání funkce `pthread_exit(void *value_ptr)`.
- Možnosti ukončení vlákna jiným vláknem:
  - „Zabití“ vlákna `pthread_kill(pthread_t thread, int sig)`.
  - Zasláním signálu `cancel` `pthread_cancel(pthread_t thread)`
  - Nedoporučovaná možnost, není jisté, kde přesně se vlákno ukončí.
- Ukončení vlákna ukončením celého procesu
  - Zavoláním `exit(3)`
  - Posláním signálu `SIGKILL`, `SIGTERM`, ...

- Co s návratovou hodnotou ukončeného vlákna?
- Pro zjištění návratové hodnoty  
`int pthread_join(pthread_t thread, void **value)`.

```
1 #include <pthread.h>
2 #include <signal.h>
3 #include <unistd.h>
4
5 void *
6 runner(void *foo)
7 {
8     sleep(10);
9     pthread_exit(NULL);
10 }
11
12 int
13 main(void)
14 {
15     pthread_t t;
16
17     pthread_create(&t, NULL, runner, NULL);
18
19     pthread_kill(t, SIGKILL);
20     return 0;
21 }
```

## Reentrantní funkce

- Vícenásobný běh programu má určitá úskalí.
- Kód funkcí musí počítat s tím, že může být prováděn několikrát najednou.
- Problematické jsou globální proměnné a statické lokální proměnné.

```
1 char buffer_2[200];
2
3 char *
4 fool(char * a)
5 {
6     static char buffer_1[200];
7
8     snprintf(buffer_1, 200, "Text:_%s\n", a);
9
10    return buffer_1;
11 }
12
13 char *
14 foo2(char *a)
15 {
16     snprintf(buffer_2, 200, "Text:_%s\n", a);
17
18    return buffer_2;
19 }
```

- *Reentrantní funkce* – funkce schopná násobného běhu.
- Příklad funkce **foo(char \*)** – implementace alokuje dynamický kus paměti.
- Makro **\_\_REENTRANT** – je-li definováno, říkáme překladači a hlavičkovým souborům, že funkce mohou být vykonávány násobně.
- Knihovní funkce:
  - Thread safe – lze používat z více vláken
  - Not thread safe – nelze používat z více vláken
  - Některé funkce nemohou být thread safe z podstaty věci – **strtok(3)**
  - POSIX.1c rozšiřuje množinu funkcí o thread safe varianty, např. **strtok\_r(3)**

# Kompilace

- Dvě možnosti kompilace:
  - `gcc -o foo foo.c -lpthread -D__REENTRANT`
  - `gcc -o foo foo.c -pthread -D__REENTRANT`
- Nezapomínáme na to, že záleží na pořadí knihoven a objektových souborů na příkazové řádce.



# Ladění aplikací

- Ladící výpisy
- Debugger

## Ladící výpisy

- Pozor na mixování výpisů jednotlivých vláken do sebe.
- Jeden print je obvykle atomický.
- `getpid()` vrací pro vlákna stejnou hodnotu.
- `pthread_self()` vrací identifikaci vlákna (`pthread_t` – lze vypsát jako integer).
- Ladící výpisy způsobují určitou synchronizaci!

# Debugger

- Použití *gdb*:
  - **info threads** – vypíše základní informace o běžících vláknech.
  - **thread ID** – přepnutí se na konkrétní vlákno.
- Debugger způsobuje velkou synchronizaci!

# Ladění aplikací

```
1 (gdb) info threads
2   2 Thread 0x40da4950 (LWP 12809) 0x00007f9f852c7b99 in
3 pthread_cond_wait@@GLIBC_2.3.2 () from /lib/libpthread.so.0
4 * 1 Thread 0x7f9f856de6e0 (LWP 12806) 0x00007f9f84ff8b81 in nanosleep ()
5   from /lib/libc.so.6
6 (gdb) thread 2
7 [Switching to thread 2 (Thread 0x40da4950 (LWP 12809))]#0 0x00007f9f852c7b99
8 in pthread_cond_wait@@GLIBC_2.3.2 () from /lib/libpthread.so.0
9 (gdb) where
10 #0 0x00007f9f852c7b99 in pthread_cond_wait@@GLIBC_2.3.2 ()
11   from /lib/libpthread.so.0
12 #1 0x0000000000400907 in worker (arg=0x0) at conditions.c:13
13 #2 0x00007f9f852c33f7 in start_thread () from /lib/libpthread.so.0
14 #3 0x00007f9f85032b2d in clone () from /lib/libc.so.6
15 #4 0x0000000000000000 in ?? ()
16 (gdb)
```

## Ladění aplikací

- **valgrind** – ladící nástroj
- **helgrind** – režim **valgrindu**
- Použití: **valgrind -tool=helgrind aplikace**
- Detekuje
  - Chybné použití knihovny pthreads
  - Nekonzistentní použití zámků
  - Některé nezamknuté přístupy ke sdíleným datům (data races)

# Ladění aplikací

```
1 ==20556== Possible data race during read of size 4 at 0x601040 by thread #3
2 ==20556==   at 0x400630: foo (critsecl.c:10)
3 ==20556==   This conflicts with a previous write of size 4 by thread #1
4 ==20556==   at 0x4006D9: main (critsecl.c:24)
5 ==20556==
6 ==20556== Possible data race during write of size 4 at 0x601040 by thread #3
7 ==20556==   at 0x40064C: foo (critsecl.c:12)
8 ==20556==   This conflicts with a previous write of size 4 by thread #1
9 ==20556==   at 0x4006D9: main (critsecl.c:24)
10 ==20556==
11 ==20556== Possible data race during read of size 4 at 0x601040 by thread #2
12 ==20556==   at 0x400643: foo (critsecl.c:12)
13 ==20556==   This conflicts with a previous write of size 4 by thread #4
14 ==20556==   at 0x40064C: foo (critsecl.c:12)
```