

Structura sistemelor de calcul

Prof. Zoltan Francisc Baruch
Departamentul de Calculatoare
Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca

Informații despre disciplina SSC (1)

- Obiectivul general

- Cunoașterea structurii și proiectarea unor componente ale sistemelor de calcul

- Obiective teoretice

- Cunoașterea unor indicatori de performanță
- Cunoașterea diferitelor metode de implementare a operațiilor aritmetice
- Cunoașterea diferitelor tehnologii și tipuri de memorii: asociativă, *cache*, virtuală
- Cunoașterea unor arhitecturi paralele

Informații despre disciplina SSC (2)

● Objective practice

- Proiectarea și implementarea prin hardware a unor operații aritmetice
- Proiectarea unor sisteme ierarhice de memorie și memorii *cache*
- Proiectarea și implementarea unor module hardware utilizând limbajul VHDL și mediul de dezvoltare Xilinx Vivado Design Suite
- Simularea funcțională a unor module hardware

Informații despre disciplina SSC (3)

● Notare

- 10% Teste de verificare la curs
- 25% Laborator → evaluare pe parcurs
- 25% Proiect → evaluare pe parcurs; raport scris și susținere la final
- 40% Examen
- Nota minimă pentru fiecare activitate: 5
- Pagini web: <http://users.utcluj.ro/~baruch/ro/>
Cursuri → Structura sistemelor de calcul
- Teams: SSC_A_2020_2021, SSC_B_2020_2021

Informații despre disciplina SSC (4)

● Curs

- Teste de verificare a atenției (*Quiz*)
- Studenții care nu au media minimă 5 la testele de verificare nu vor fi admiși la examenul din sesiunea normală

● Examen

- Condiții de acceptare: media minimă 5 la testele de evaluare; promovarea laboratorului; promovarea a proiectului
- Schemele și diagramele trebuie explicate

Informații despre disciplina SSC (5)

● Laborator

- Sistemul de dezvoltare Xilinx Vivado 2020.1
- Prezența este obligatorie la toate lucrările
- Condiția suplimentară pentru consemnarea prezenței: finalizarea unor aplicații minimale
- Se evaluează rezolvarea temelor propuse
- Studenții care au toate prezențele, dar nu au media minimă 5: colocviu de laborator
- **Recuperări:** max. 2 lucrări pe parcurs, max. 2 lucrări la sfârșitul semestrului (cu plată)

Informații despre disciplina SSC (6)

● Observații

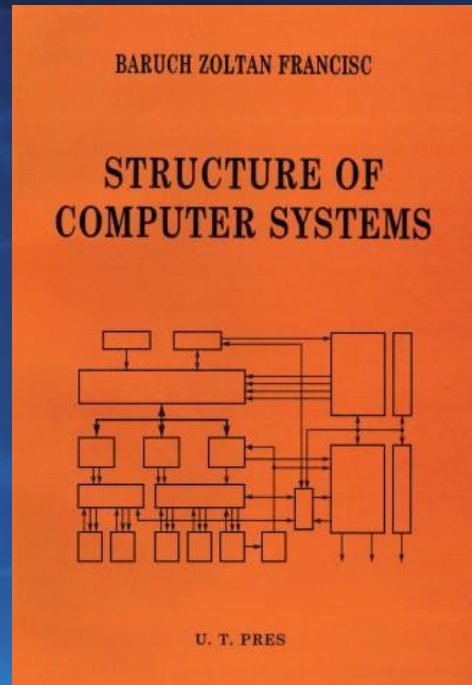
- Înregistrarea cursurilor nu este permisă
- Studenții trebuie să se prezinte strict cu grupa proprie (L, P)
- Se pot efectua schimburi între semigrupe cu acordul cadrelor didactice
- Studenți din anul 4
 - Trebuie să comunice prin mail adresa Didatec și seria din care au făcut parte în anul 3
 - Trebuie să se prezinte cu grupa suplimentară (L, P)

Bibliografie (1)



- Baruch, Z. F., *Structura sistemelor de calcul*, Editura Albastră, Cluj-Napoca, 2005, ISBN 973-650-143-4

Bibliografie (2)



- Baruch, Z. F., *Structure of Computer Systems*, Editura U.T.PRES, Cluj-Napoca, 2002, ISBN 973-8335-44-2

Bibliografie (3)



- Baruch, Z. F., *Aplicații de proiectare digitală cu circuite FPGA*, Editura MEGA, Cluj-Napoca, 2020, ISBN 978-606-020-261-5 (în curs de apariție)

Cuprinsul cursului

- 1. Introducere
- 2. Unitatea aritmetică și logică
- 3. Sisteme de memorie
- 4. Arhitecturi RISC
- 5. Introducere în arhitecturi paralele

1. Introducere

- Indicatori de performanță
 - Timpul de execuție
 - Timpul UCP
 - MIPS
 - MFLOPS
- Programe de evaluare a performanțelor
- Legea lui Amdahl

Timpul de execuție (1)

- Performanța unui calculator se referă la:
 - Viteza
 - Fiabilitatea hardware și software
- Măsura performanței: timpul de execuție (t_E)
- Timpul de răspuns: timpul necesar terminării unui task
 - Include accesele la memorie, operațiile de I/E și operațiile executate de sistemul de operare

Timpul de execuție (2)

- **UCP**: unitatea centrală de prelucrare
- **Timpul UCP**: timpul în care UCP execută efectiv un program
 - Nu cuprinde timpul de așteptare pentru operațiile de I/E
 - Nu include nici timpul în care UCP execută alte programe
 - Poate fi divizat în:
 - **Timpul UCP al utilizatorului**
 - **Timpul UCP al sistemului**

Timpul de execuție (3)

- Compararea performanțelor a două calculatoare, de ex., X și Y
 - Calculatorul X este mai rapid decât Y dacă timpul de execuție al lui X este mai redus decât cel al lui Y pentru taskul dat
 - Calculatorul X este cu $n\%$ mai rapid decât Y înseamnă că:

$$\frac{t_E(Y)}{t_E(X)} = 1 + \frac{n}{100}$$

Timpul de execuție (4)

- Deoarece t_E este inversul performanței P :

$$\frac{t_E(Y)}{t_E(X)} = \frac{P(X)}{P(Y)} = 1 + \frac{n}{100}$$

- Creșterea performanței (n) va fi:

$$n = \frac{P(X) - P(Y)}{P(Y)} \times 100 = \frac{t_E(Y) - t_E(X)}{t_E(X)} \times 100$$

Exemplul 1.1

- Calculatorul **A** execută un program în 12 s, iar calculatorul **B** execută același program în 15 s. Cu cât este mai performant calculatorul **A** față de **B**?

1. Introducere

- Indicatori de performanță
 - Timpul de execuție
 - Timpul UCP
 - MIPS
 - MFLOPS
- Programe de evaluare a performanțelor
- Legea lui Amdahl

Timpul UCP (1)

- Timpul UCP (t_{UCP}) poate fi exprimat prin:

$$t_{UCP} = C_{UCP} \times t_C$$

- C_{UCP} – numărul ciclurilor de ceas ale UCP necesare pentru execuția programului
- t_C – durata ciclului de ceas
- O altă exprimare:

$$t_{UCP} = \frac{C_{UCP}}{f}$$

- f – frecvența semnalului de ceas

Timpul UCP (2)

- Se poate considera numărul de instrucțiuni executate → **contorul de instrucțiuni N**
- Numărul mediu al **ciclurilor de ceas pe instrucțiune (CPI)**:

$$\text{CPI} = \frac{C_{UCP}}{N}$$

- Timpul UCP poate fi definit ca:

$$t_{UCP} = C_{UCP} \times t_C = N \times \text{CPI} \times t_C$$

Timpul UCP (3)

• sau:

$$t_{UCP} = \frac{N \times CPI}{f}$$

• Numărul total al ciclurilor de ceas ale UCP:

$$C_{UCP} = \sum_{i=1}^n (CPI_i \times I_i)$$

• CPI_i – numărul ciclurilor de ceas pentru instrucțiunea i

• I_i – numărul de execuții ale instrucțiunii i

Timpul UCP (4)

- Rezultă pentru timpul UCP:

$$t_{UCP} = C_{UCP} \times t_C = t_C \times \sum_{i=1}^n (CPI_i \times I_i)$$

- Numărul total al ciclurilor pe instrucțiune:

$$CPI = \frac{C_{UCP}}{N} = \frac{\sum_{i=1}^n (CPI_i \times I_i)}{N} = \sum_{i=1}^n \left(CPI_i \times \frac{I_i}{N} \right) = \sum_{i=1}^n (CPI_i \times F_i)$$

- F_i – frecvența de utilizare a instrucțiunii i

Timpul UCP (5)

● Exemplul 1.2

- Considerăm un calculator la care toate operațiile sunt executate cu registrele, pentru transferul cu memoria existând numai instrucțiuni de încărcare (*Load*) și de memorare (*Store*)
- Se indică frecvența de utilizare a instrucțiunilor

Tip instrucțiune	Frecvența de utilizare	CPI
UAL	50%	1
Load	20%	2
Store	10%	2
Salt	20%	2

Timpul UCP (6)

- Presupunem că 20% din instrucțiunile UAL utilizează direct un operand încărcat din memorie, operand care nu este utilizat ulterior
- Propunem adăugarea unor instrucțiuni UAL care au un operand în memorie și un operand într-un registru; acestea necesită 2 cicluri de ceas
- Presupunem că prin extinderea setului de instrucțiuni numărul ciclurilor de ceas necesare pentru executarea salturilor va fi de 3 în loc de 2
- Întrebarea este dacă modificarea efectuată crește performanța UCP

1. Introducere

- Indicatori de performanță
 - Timpul de execuție
 - Timpul UCP
 - MIPS
 - MFLOPS
- Programe de evaluare a performanțelor
- Legea lui Amdahl

MIPS (1)

- Cel mai important indicator de performanță: timpul de execuție al programelor reale
- Totuși, s-au adoptat diferiți indicatori populari de performanță
- Unul din indicatori este numit **MIPS** (*Millions of Instructions Per Second*)
- Indică numărul de “instrucțiuni medii” pe care un calculator le poate executa pe secundă

MIPS (2)

- Pentru un program dat, **MIPS** este:

$$\text{MIPS} = \frac{N}{t_E \times 10^6}$$

- N – contorul de instrucțiuni

- Considerând că $t_E = t_{UCP}$,

$$t_E = \frac{N \times \text{CPI}}{f}$$

- Rezultă:

$$\text{MIPS} = \frac{f}{\text{CPI} \times 10^6}$$

MIPS (3)

- Timpul de execuție exprimat în funcție de indicatorul **MIPS**:

$$t_E = \frac{N}{\text{MIPS} \times 10^6}$$

- Un indicator similar: **BIPS** (*Billions of Instructions Per Second*) sau **GIPS**
- Avantajul indicatorului **MIPS**: este ușor de înțeles, mai ales de către utilizatori
- Există anumite probleme atunci când **MIPS** este utilizat ca o măsură pentru comparație:

MIPS (4)

- MIPS este dependent de setul de instrucțiuni
- MIPS variază pentru programe diferite ale aceluiași calculator
- MIPS *poate varia invers proporțional cu performanța*
- Exemplu pentru ultimul caz: calculator cu un coprocesor pentru calcule în virgulă mobilă
 - Programele care utilizează coprocesorul necesită un timp mai redus pentru execuție, dar au o valoare MIPS mai redusă

MIPS (5)

● Exemplul 1.3

- Presupunem că se realizează un compilator cu optimizarea codului pentru calculatorul din exemplul anterior
- Compilatorul elimină 50% din instrucțiunile UAL, dar nu poate reduce numărul altor instrucțiuni
- Dacă semnalul de ceas are frecvența de 2 GHz, care este valoarea indicatorului MIPS pentru codul neoptimizat și pentru codul optimizat?

1. Introducere

- Indicatori de performanță
 - Timpul de execuție
 - Timpul UCP
 - MIPS
 - MFLOPS
- Programe de evaluare a performanțelor
- Legea lui Amdahl

MFLOPS (1)

- **MIPS** nu reprezintă o metrică adecvată pentru calculatoarele care execută calcule științifice și ingineresti
 - Este important să se măsoare numărul operațiilor de calcul în virgulă mobilă (VM)
- **MFLOPS** (*Millions of Floating-point Operations Per Second*), **GFLOPS**, **TFLOPS**, **PFLOPS**
- Formula de calcul:

$$\text{MFLOPS} = \frac{N_{VM}}{t_E \times 10^6}$$

MFLOPS (2)

- N_{VM} – numărul de operații în virgulă mobilă
- Valoarea **MFLOPS** este dependentă de calculator și de program
- Probleme legate de indicatorul **MFLOPS**:
 - Setul operațiilor de calcul în VM diferă de la un calculator la altul
 - Valoarea **MFLOPS** se modifică în funcție de:
 - Combinația operațiilor întregi și în VM
 - Combinația operațiilor în VM mai rapide și mai lente

MFLOPS (3)

- Soluția la ambele probleme: utilizarea operațiilor normalizate în VM
- Exemplu în care se calculează numărul de operații normalizate în VM pentru un program în funcție de operațiile reale din codul sursă

Operații reale în VM	Operații normalizate în VM
ADD, SUB, MULT	1
DIV, SQRT	4
EXP, SIN	8

MFLOPS (4)

- Operațiile reale în VM conduc la **valoarea nativă** pentru **MFLOPS**
- Operațiile normalizate în VM conduc la **valoarea normalizată** pentru **MFLOPS**
- Indicatorii **MIPS** și **MFLOPS** sunt utili pentru compararea calculatoarelor din aceeași familie
 - Nu sunt potriviți pentru compararea calculatoarelor cu seturi diferite de instrucțiuni

MFLOPS (5)

- Totuși, **MFLOPS** este utilizat de anumite programe de evaluare a performanței supercalculatoarelor
- **Exemplu:** programul **Linpac**
 - Bibliotecă software pentru operații de algebră numerică liniară (vectorială sau matriceală)
 - **HPL** (*High Performance Linpack*) – implementare portabilă a programului **Linpac** utilizată pentru lista **TOP500**

MFLOPS (6)

- **TOP500** – ordonează primele 500 cele mai rapide calculatoare cunoscute public
 - <http://www.top500.org/>
- Lista actuală: publicată în iunie 2020
- Nr. 1 în listă: **Fugaku** (Japonia)
 - Produs de firma Fujitsu Ltd.
 - Instalat la centrul de știință computațională al institutului RIKEN (R-CCS), Kobe
 - Performanța Linpack: **415,53 PFLOPS**
 - Performanța maximă: **513,85 PFLOPS**



MFLOPS (7)

- Este Nr. 1 și în alte liste, de exemplu, **HPL-AI** pentru aplicații de inteligență artificială
 - Performanța: 1.420 PFLOPS (1,42 exa-FLOPS)
- Numărul nodurilor de calcul: 152.064
- Nod de calcul:
 - Procesor **ARM A64FX** cu 48 nuclee (2,2 GHz)
 - Arhitectura **ARM v8.2-A**, extinsă cu setul de instrucțiuni **Scalable Vector Extension**
 - Nu se utilizează procesoare grafice (GPU)
 - Memorie internă stivuită 3D, cu rata de transfer de 1.024 GB/s

MFLOPS (8)

- Număr total de nuclee: 7.299.072
- Memorie internă: 4,8 PB (4.866.048 GB)
- Interconexiune între procesoare: **Tofu D**
 - Rețea toroidală, 6-dimensională
 - Rata de transfer: 6,8 GB/s între noduri
- Sistem de operare: **Red Hat Enterprise Linux** (RHEL), vers. 8.x
- Consum de putere: 28,3 MW
 - Este Nr. 1 în lista **Green500** (Noiembrie 2019)
 - Performanța de 16,9 GFLOPS/W

MFLOPS (9)

- Calculatorul **Fugaku** permite accelerarea proiectelor de cercetare complexe
 - Simularea dezastrelor naturale
 - Dezvoltarea tehnologiilor pentru generarea, conversia și stocarea energiei
 - Dezvoltarea unor noi materiale
 - Dezvoltarea a noi procese de proiectare și producție
 - Medicina preventivă și personalizată
 - Experimental: cercetări legate de COVID-19

MFLOPS (10)



MFLOPS (11)



Rezumat (1)

- **Timpul de execuție** este principalul indicator de performanță
- Pentru estimarea performanței UCP, timpul de execuție se poate aproxima prin **timpul UCP**
- Timpul UCP se poate exprima în funcție de numărul mediu al **ciclurilor de ceas pe instrucțiune (CPI)**
- **MIPS** este un indicator popular de performanță

Rezumat (2)

- Există diferite probleme atunci când **MIPS** se utilizează pentru compararea performanțelor
- Pentru aplicații care necesită operații în VM, ca metrică de performanță se poate utiliza **MFLOPS** sau alți indicatori similari
 - Pentru evitarea unor probleme legate de utilizarea indicatorului **MFLOPS**, se pot considera **operații normalizate în VM**
- Programul **Linpack** se utilizează pentru evaluarea performanței supercalculatoarelor

Noțiuni, cunoștințe

- Timpul de răspuns
- Timpul UCP
- Exprimarea timpului UCP
- Indicatorul MIPS
- Probleme legate de utilizarea indicatorului MIPS
- Indicatorul MFLOPS
- Probleme legate de utilizarea indicatorului MFLOPS

Test de verificare

- Curs SSC Seria B, Test 0
 - Nu se ține cont de rezultatul testului 0
 - Punctaj: 0
 - Selectați toate răspunsurile corecte
 - Testul va fi evaluat automat