

V.3.1. Memoria cache

Problema

- procesorul este mai rapid decât memoria
 - este obligat să aștepte până când primește datele și instrucțiunile din memorie
- performanța procesorului nu este exploatată
- cauze
 - dezvoltarea tehnologică
 - factori economici

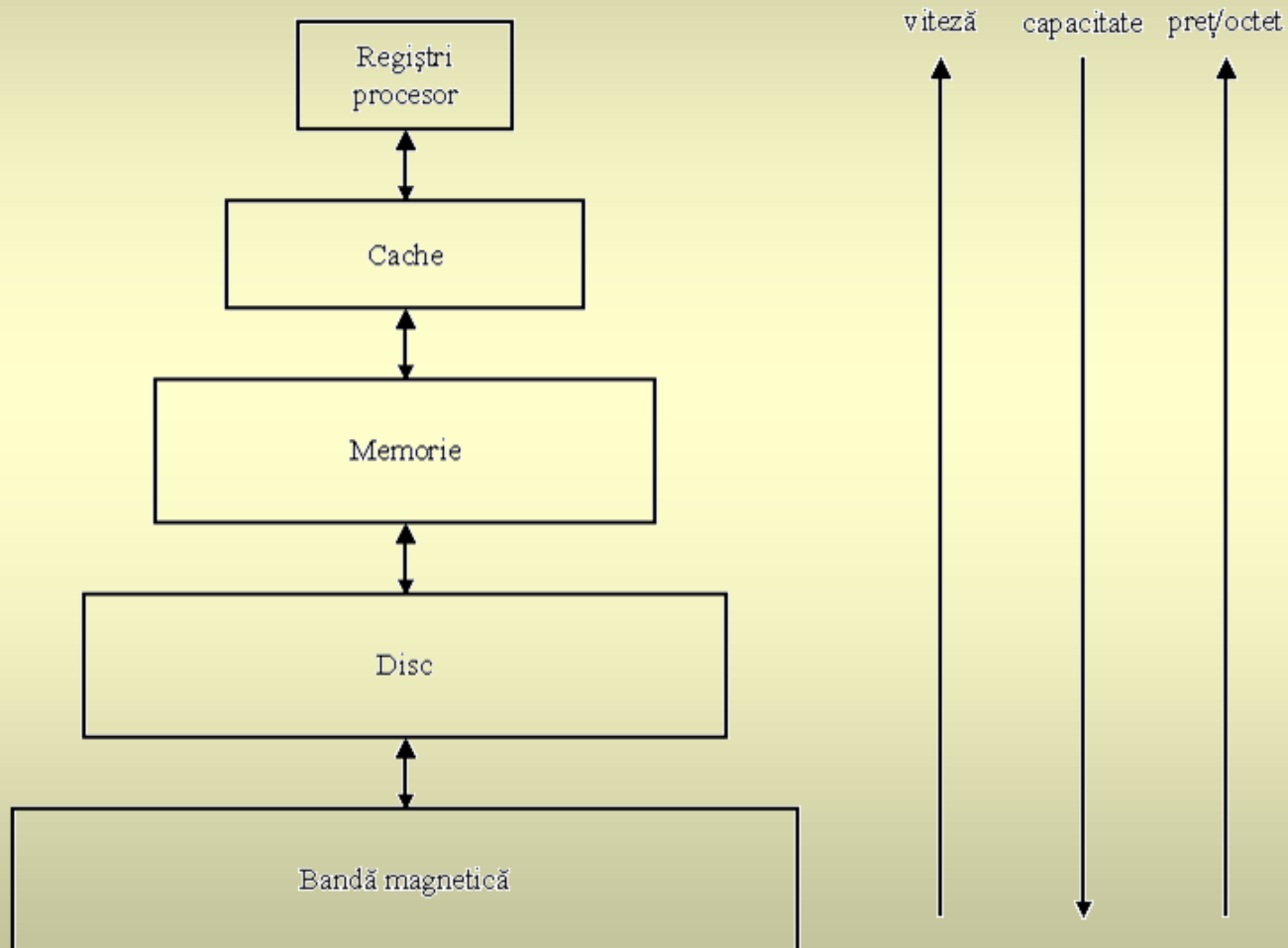
Soluția

- legile localizării - determinate empiric
- valabile pentru marea majoritate a aplicațiilor
- tipuri de localizare
 - spațială
 - temporală
- exploatarea localizării - ierarhia de memorii

Ierarhia de memorii (1)

- diferite nivele de stocare
 - având caracteristici diferite
- cerințe contradictorii
 - capacitate cât mai mare
 - viteză de acces cât mai mare
- aceste cerințe nu pot fi satisfăcute simultan de același tip de stocare

Ierarhia de memorii (2)



Cum funcționează?

- toate informațiile sunt memorate pe nivelul cel mai de jos
- pe nivelele superioare sunt aduse subseturi tot mai mici din aceste informații
- problema - cum maximizăm viteza?
- reformulare: care subseturi trebuie aduse pe nivelele superioare?
 - pentru o viteză cât mai mare

Legile localizării - consecințe

- la un moment dat, un program folosește numai o (mică) parte din locațiile sale de memorie
 - acestea trebuie păstrate pe nivelele superioare
 - mai mici, dar mai rapide
- care sunt aceste locații?
 - cel mai probabil, cele accesate cel mai recent
- caz particular - memoria cache

Memoria cache

- circuit rapid și de capacitate mică
 - interpus între procesor și memoria principală
- reține locațiile din memoria principală accesate cel mai recent de procesor
- procesorul solicită conținutul unei locații
 - se caută mai întâi în cache
 - dacă locația nu este găsită în cache - căutare în memoria principală

Caracteristici

Viteza

- foarte mare - la același nivel cu procesorul
 - tehnologie performantă (SRAM)
 - dimensiune redusă → bloc de decodificare mai simplu, deci mai rapid

Prețul

- rezonabil
 - datorită dimensiunii reduse

Parametri de performanță (1)

- H - rata de succes (*hit ratio*)
 - procentajul cazurilor în care locația căutată a fost găsită în cache
- M - rata de insucces (*miss ratio*)
 - procentajul cazurilor în care locația căutată nu a fost găsită în cache

$$0 \leq H, M \leq 1$$

$$M = 1 - H$$

Parametri de performanță (2)

- T_c - timpul de acces la cache
- T_m - timpul de acces la memorie în cazul unei ratări în cache
- T - timpul mediu de acces la memorie (cu cache)
- T_p - timpul de acces la memoria principală (în absența cache-ului)

Performanța memoriei cache (1)

$$T = T_c \cdot H + T_m \cdot M$$

- dacă $T < T_p \rightarrow$ spor de viteză
- T - mărime statistică
- cazuri extreme
 - $H=100\%$ ($M=0$): $T = T_c \rightarrow$ ideal
 - $H=0$ ($M=100\%$): $T = T_m \rightarrow$ pierdere de viteză
($T_m > T_p$)

Performanța memoriei cache (2)

Situația reală - exemplu

- $T_c = 2 \text{ ns}$
- $T_p = 10 \text{ ns}$
- $T_m = 11 \text{ ns}$
- $H = 95\%$
- $T = 2.45 \text{ ns} = 0.245 T_p \rightarrow$ viteza de acces crește de peste 4 ori

Adresare

- adresa din cache nu corespunde cu adresa din memoria principală
- căutarea se face după adresa din memoria principală
- deci cache-ul trebuie să rețină și adresele locațiilor în memoria principală

Linii de cache

- cache-ul se folosește de localizarea temporală
- cum se poate exploata și localizarea spațială?
- când se aduce o locație în cache, se aduc și locațiile vecine
 - acestea formează o *linie de cache*

Politica de înlocuire

- cache mic - se umple repede
- noi linii aduse în cache - trebuie eliminate altele mai vechi
 - eliminare - scriere în memoria principală
- care linii trebuie eliminate?
 - scopul - creșterea vitezei
- cele care nu vor fi accesate în viitorul apropiat !!!

Îmbunătățirea performanței

- depinde de două mărimi
 - timpul de acces la cache (T_c)
 - rata de succes (H)
- nu pot fi optimizate simultan
- influențate de
 - tehnologie
 - politica de înlocuire

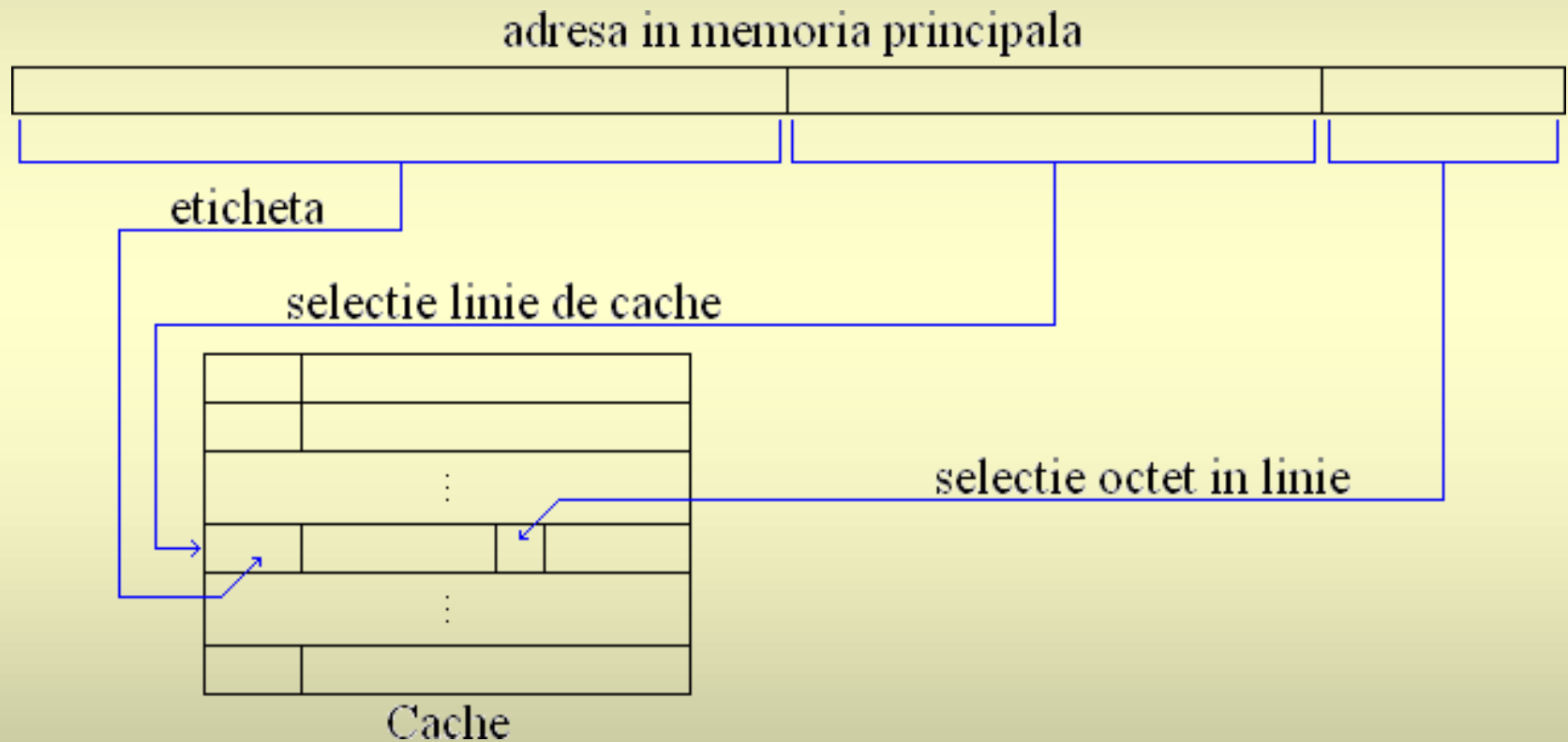
Tipuri constructive de cache

- cu adresare directă (*direct mapped cache*)
- total asociativ (*fully associative cache*)
- parțial asociativ (*set associative cache*)

Cache cu adresare directă (1)

- plasarea unei locații în cache
 - linia de cache este întotdeauna aceeași
 - depinde de adresa din memoria principală
- adresa din memoria principală - 3 părți
 - eticheta - se memorează în cache
 - selectorul liniei de cache
 - selectorul octetului în cadrul liniei

Cache cu adresare directă (2)



Cache cu adresare directă (3)

Exemplu

- adresa în memoria principală - 32 biți
- dimensiune cache: 2^{11} linii \times 2^5 octeți/linie
- adresa în memoria principală se împarte în
 - selectorul liniei de cache - 11 biți
 - selectorul octetului în cadrul liniei - 5 biți
 - eticheta - 16 biți ($= 32 - 11 - 5$)

Cache cu adresare directă (4)

Exemplu (continuare)

- adresa în memoria principală: $45097373_{(10)}$

$00000010101100000010000110011101_{(2)}$

- eticheta: $0000001010110000_{(2)} = 688_{(10)}$

- linia de cache: $00100001100_{(2)} = 268_{(10)}$

- octetul în cadrul liniei: $11101_{(2)} = 29_{(10)}$

Cache cu adresare directă (5)

Exemplu (continuare)

- Ce adrese din memoria principală sunt aduse în linia de cache?

000000101011000000100001100xxxxx₍₂₎

00000010101100000010000110000000 ÷

000001010110000001000011001111₍₂₎

45097344 ÷ 45097375₍₁₀₎

Cache cu adresare directă (6)

Conținutul unei linii de cache

- un bit care indică dacă linia conține date valide
 - inițial, toate liniile sunt goale, deci invalide
- câmpul etichetă
- datele propriu-zise, aduse din memoria principală

Cache cu adresare directă (7)

Avantaje

- implementare simplă
- timp de acces (T_c) redus

Dezavantaje

- lipsă de flexibilitate
- politică de înlocuire neperformantă - rată de succes (H) scăzută

Cache cu adresare directă (8)

Exemplu

```
for (i=0; i<1000; i++) a=a+i;
```

- adrese: $i \rightarrow 3806240$, $a \rightarrow 1756566572$
- ambele sunt memorate în cache în linia 161
- accese alternative \rightarrow înlocuiri dese în cache
 \rightarrow număr mare de ratări

Cache total asociativ (1)

- realizat cu memorii asociative
 - memoria obișnuită - acces la o locație pe baza adresei sale
 - memoria asociativă - permite și regăsirea locației pe baza conținutului său
 - implementare - valoarea căutată este comparată în paralel cu toate locațiile
 - de ce în paralel?

Cache total asociativ (2)

Avantaje

- plasarea datelor din memoria principală - în orice linie de cache
- se pot alege convenabil adresele aduse în linia de cache
- se pot implementa politici de înlocuire eficiente - rată de succes (H) ridicată

Cache total asociativ (3)

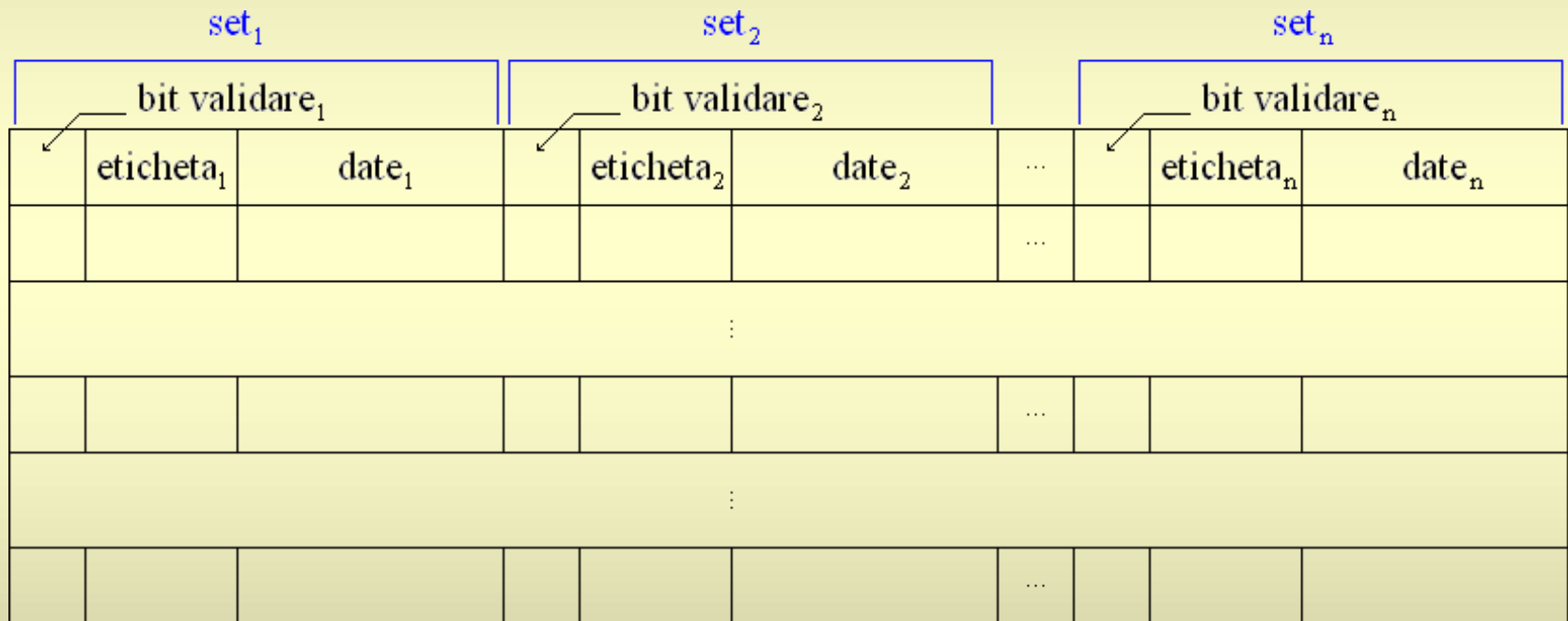
Dezavantaje

- timp de acces (T_c) mare
 - memoriile asociative - lente
 - algoritmi complecși de înlocuire - timp suplimentar consumat
- hardware complicat pentru memoriile asociative și algoritmi de înlocuire

Cache parțial asociativ (1)

- numit și cache asociativ pe seturi
- derivat din cache-ul cu adresare directă
- fiecare linie de cache conține mai multe seturi de date (4, 8, 16, ...)
- structura unui set
 - bit de validare
 - etichetă
 - date din memoria principală

Cache parțial asociativ (2)



Cache parțial asociativ (3)

Timpul de acces (T_c)

- puțin mai mare decât la cache-ul cu adresare directă
 - trebuie verificate toate cele n seturi

Rata de succes (H)

- ridicată
 - elimină problema suprapunerilor

Scrierea în cache (1)

- scriere într-o locație care nu se află în cache
- unde se face scrierea?
- variante
 - doar în memoria principală - nu se poate
 - de ce?
 - doar în cache (*write-back*)
 - atât în cache, cât și în memoria principală (*write-through*)

Scrierea în cache (2)

Cache de tip *write-back*

- scrierea se face doar în cache
- datele ajung în memoria principală doar la evacuarea din cache
- viteză mare
- probleme în sistemele multiprocesor

Scrierea în cache (3)

Cache de tip *write-through*

- scrierea se face atât în cache, cât și în memoria principală
- mai lent
 - datorită accesului la memoria principală
- ambele tipuri de cache sunt larg folosite

Conceptul de cache - extindere

- aplicabil nu doar la procesoare
- tipul de problemă: comunicarea cu o entitate lentă, de mare capacitate
- soluția: interpunerea unei entități cu capacitate mai mică și viteză mai mare
 - reține ultimele date vehiculate

Unde mai putem folosi ideea?

Aplicabilitate

- oriunde funcționează legile localizării
- hardware
- software

Example (1)

Cache-uri de disc

- 2 direcții de aplicare
 - hardware - circuit de memorie integrat în controller
 - software - o zonă din memoria sistem
- entitatea mai mare și lentă - discul
- entitatea mai mică și rapidă - memoria

Example (2)

Browserul web

- ultimele pagini accesate sunt reținute pe disc
 - numai localizare temporală - de ce?
- entitatea mai mare și lentă - rețeaua (Internet)
- entitatea mai mică și rapidă - discul