

## Παραλληλισμός σε επίπεδο εντολών (Pipelining και άλλες τεχνικές αύξησης απόδοσης)

<http://mixstef.github.io/courses/comparch/>



Μ.Στεφανιδάκης

### • Απόδοση KME

#### • Υπολογιστικό σύστημα

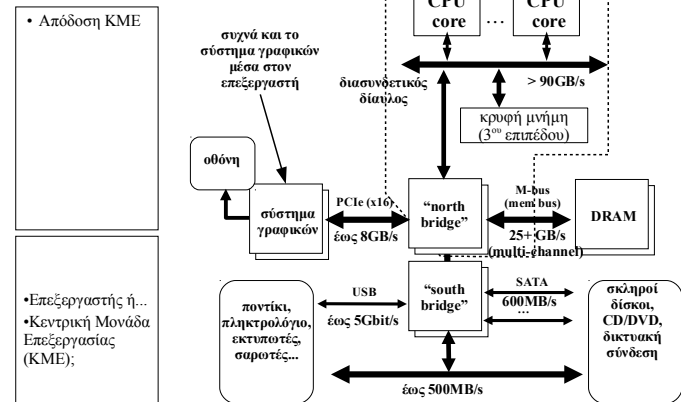
- Η απόδοση εξαρτάται από όλα τα επιμέρους τμήματά του
  - Υλικό και λογισμικό

#### • Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας

- Πόσο γρήγορα εκτελείται ένα πρόγραμμα;

$$\text{ExecTime} = \text{IC} \times \text{CPI} \times \text{CC}$$

## Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας



οι ρυθμοί μεταφοράς που δίνονται είναι οι θεωρητικά μέγιστοι!

## Επανάληψη: Απόδοση KME

### • Απόδοση KME

#### • Υπολογιστικό σύστημα

- Η απόδοση εξαρτάται από όλα τα επιμέρους τμήματά του
  - Υλικό και λογισμικό

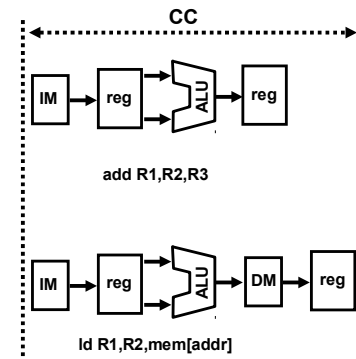
#### • Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας

- Πόσο γρήγορα εκτελείται ένα πρόγραμμα;

$$\text{ExecTime} = \text{IC} \times \text{CPI} \times \text{CC}$$

## KME ενός κύκλου (single-cycle)

- Απόδοση KME
- KME ενός κύκλου

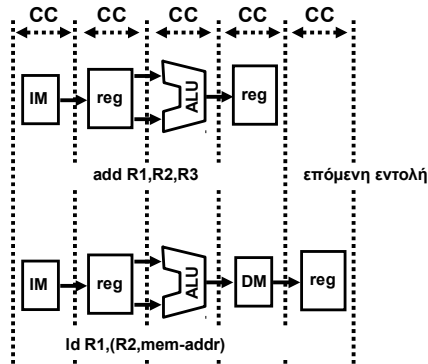


Κάθε εντολή ολοκληρώνεται σε έναν κύκλο ρολογιού  
CPI = 1  
CC = διάρκεια αργότερης εντολής

## ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων (multi-cycle)

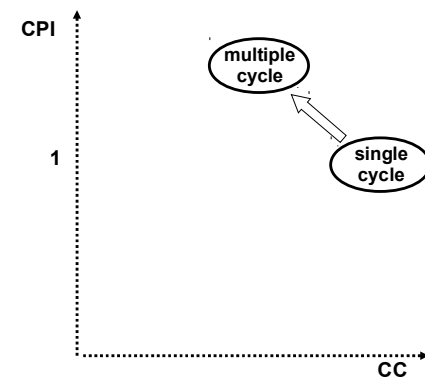
- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων

Κάθε εντολή ολοκληρώνεται σε μεταβλητό αριθμό κύκλων ρολογιού  
 $CPI > 1$   
 CC = διάρκεια αργότερου σταδίου



## Απόδοση ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων

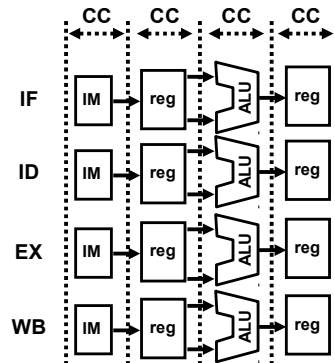
- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων



## Πιθανότητα περαιτέρω βελτίωσης;

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων

Σε κάθε κύκλο, ένα μέρος της ΚΜΕ δεν χρησιμοποιείται!



## Παραλληλισμός σε επίπεδο εντολών

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP

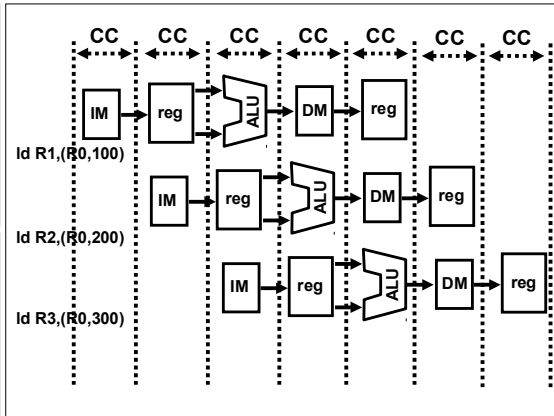
- **Instruction Level Parallelism (ILP)**
  - Παράλληλη (ταυτόχρονη) εκτέλεση μεταξύ εντολών
- **Pipelining**
  - Επικάλυψη εκτέλεσης πολλαπλών εντολών
    - Την ίδια στιγμή
    - Βαθμίδες pipeline (μία ανά CC)
  - Βασικό στοιχείο αύξησης απόδοσης των επεξεργαστών
  - Στόχος
    - Να μειωθεί το CC, αλλά ταυτόχρονα
    - το CPI να παραμείνει 1

## Αρχές τεχνικής pipelining

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining

;

Ποιος ο χρόνος εκτέλεσης μιας εντολής;  
Κάθε πότε ολοκληρώνεται μια εντολή;



Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Παραλληλισμός σε επίπεδο εντολών”

9

## Απόδοση τεχνικής pipelining

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining

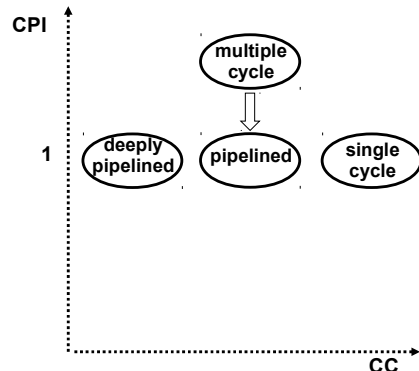
- Χρόνος ολοκλήρωσης μιας εντολής
  - “latency”
  - Δεν αλλάζει! (διάσχιση pipeline)
- Ρυθμός ολοκλήρωσης εντολών
  - Σε κάθε έναν κύκλο ρολογιού
    - Ολοκληρώνεται μια εντολή
    - Μια νέα ξεκινά την εκτέλεσή της
  - Η ιδανική περίπτωση...αλλά
    - Απόδοση συστήματος μνήμης - αποκωδικοποίηση εντολών;
    - Ανάγκη ταυτόχρονης χρήσης ίδιων βαθμίδων pipeline;
    - Αλληλεξαρτήσεις δεδομένων εντολών;
    - Διακλαδώσεις;

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Παραλληλισμός σε επίπεδο εντολών”

10

## Απόδοση ιδανικού pipeline

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining



Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Παραλληλισμός σε επίπεδο εντολών”

11

## Δυσκολίες στην εφαρμογή του pipelining

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining

- Αδυναμία χρήσης μιας βαθμίδας
  - Structural hazard
  - Η βαθμίδα χρησιμοποιείται από άλλη εντολή
  - Αποφεύγεται με σωστή σχεδίαση και πρόσθετες μονάδες
- Αλληλεξαρτήσεις δεδομένων
  - Data hazard
  - Τα αναγκαία δεδομένα για την εκτέλεση μιας εντολής δεν είναι διαθέσιμα
    - Υπολογίζονται από προηγούμενη εντολή
  - Αντιμετωπίζεται (εν μέρει) με πρόσθετο υλικό
    - Μηχανισμός forwarding - bypassing

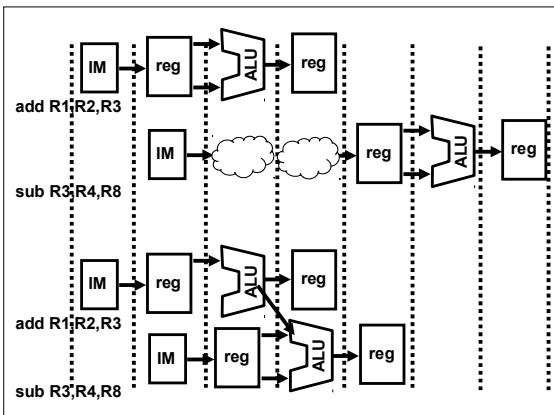
Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Παραλληλισμός σε επίπεδο εντολών”

12

## Forwarding - bypassing

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining

! Pipeline bubbles  
Δεν αποφεύγονται πάντοτε!



Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Παραλληλισμός σε επίπεδο εντολών”

13

## Δυσκολίες στην εφαρμογή του pipelining

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining

### • Διακλαδώσεις

- Control (branch) hazard
- Η ροή της εκτέλεσης αλλάζει
  - Οι εντολές που έχουν μπει στο pipeline δεν είναι οι σωστές!
- Πρόβλεψη διακλαδώσεων
  - Δυναμικές μέθοδοι στο υλικό του επεξεργαστή (διατήρηση ιστορίας προηγούμενων διακλαδώσεων)
  - Συσχέτιση με αποφάσεις για άλλες διακλαδώσεις
  - σήμερα: >90% σωστές προβλέψεις
- Σε περίπτωση λάθους πρόβλεψης
  - Απόρριψη όλων των εντολών στο pipeline
  - Χωρίς να λαμβάνονται υπ' όψη τα αποτελέσματά τους

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Παραλληλισμός σε επίπεδο εντολών”

14

## Pipelining και διακοπές-σφάλματα

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining

### • Interrupts - Exceptions

- Ποια εντολή στο pipeline προκάλεσε τη διακοπή;

### • Διαδικασία

- Διακοπή εκτέλεσης εντολής
- Ολοκλήρωση προηγούμενων εντολών στο pipeline
- Άδειασμα pipeline (flush) από τυχόν επόμενες εντολές
- Μετάβαση σε προκαθορισμένη διεύθυνση
  - Καθορίζεται από το Λειτουργικό Σύστημα

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Παραλληλισμός σε επίπεδο εντολών”

15

## Ακόμα μεγαλύτερος βαθμός ILP

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining
- Προχωρημένες τεχνικές ILP

### • Ο στόχος: CPI < 1

- Η αλλιώς: ολοκλήρωση πολλών εντολών ανά κύκλο ρολογιού
  - Πολλαπλές βαθμίδες εκτέλεσης
  - Σε κάθε κύκλο ξεκινά η εκτέλεση πολλαπλών νέων εντολών

### • Πολλαπλή εκτέλεση (multiple-issue)

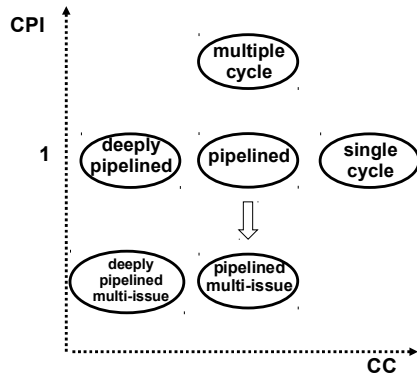
- Στατική πολλαπλή εκτέλεση
  - Ο μεταγλωττιστής αποφασίζει κατά κύριο λόγο ποιες εντολές θα εκτελεστούν ταυτόχρονα
- Δυναμική πολλαπλή εκτέλεση
  - Οι αποφάσεις εκτέλεσης λαμβάνονται από την ΚΜΕ

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Παραλληλισμός σε επίπεδο εντολών”

16

## Απόδοση multiple-issue επεξεργαστών

- Απόδοση KME
- KME ενός κύκλου
- KME πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining
- Προχωρημένες τεχνικές ILP



Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Παράλληλισμός σε επίπεδο εντολών”

17

## Εικαζόμενη εκτέλεση

- Απόδοση KME
- KME ενός κύκλου
- KME πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining
- Προχωρημένες τεχνικές ILP

### • Speculative Execution

- Κλειδί για την αύξηση του βαθμού παραλληλίας σε επίπεδο εντολών
  - Όταν προβλέπεται πολλαπλή εκτέλεση εντολών
- Πρόβλεψη ροής εκτέλεσης
  - Για την επίτρεψη εκτέλεσης επόμενων εντολών που (ίσως) εξαρτώνται από την τρέχουσα εντολή
  - Προσωρινή αποθήκευση έως ότου τα δεδομένα να μην είναι πλέον εικαζόμενα
  - Διόρθωση λάθους πρόβλεψης

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Παράλληλισμός σε επίπεδο εντολών”

18

## Είδη multiple-issue επεξεργαστών

- Απόδοση KME
- KME ενός κύκλου
- KME πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining
- Προχωρημένες τεχνικές ILP

### • Επεξεργαστές VLIW

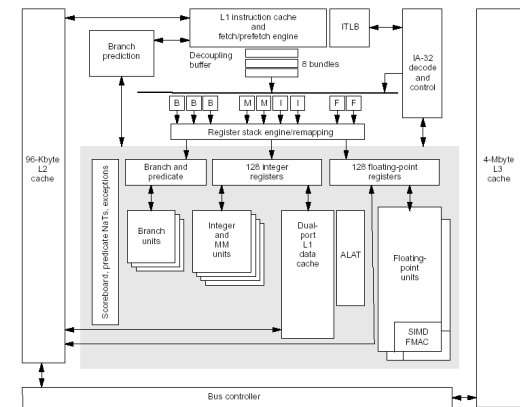
- Very Long Instruction Word
- Πακέτα πολλαπλών εντολών
  - Παράλληλη εκτέλεση
  - Δεν είναι δυνατοί όλοι οι συνδυασμοί εντολών στο ίδιο πακέτο
- Ο μεταγλωττιστής συγκροτεί τα πακέτα εντολών
- Ελέγχει σε (μεγάλο βαθμό)
  - Αλληλεξαρτήσεις – αλληλουχίες εντολών
  - Πρόβλεψη διακλαδώσεων

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Παράλληλισμός σε επίπεδο εντολών”

19

## Intel Itanium processor

- Απόδοση KME
- KME ενός κύκλου
- KME πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining
- Προχωρημένες τεχνικές ILP



**i**  
H Intel είχε ονομάσει την αρχιτεκτονική αυτή **EPIC** (explicitly parallel instruction computer)

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Παράλληλισμός σε επίπεδο εντολών”

20

## Είδη multiple-issue επεξεργαστών

- Απόδοση KME
- KME ενός κύκλου
- KME πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining
- Προχωρημένες τεχνικές ILP

### • Επεξεργαστές superscalar

- Ο επεξεργαστής ελέγχει σε κάθε κύκλο αν μπορεί να ξεκινήσει την εκτέλεση μιας ή περισσότερων εντολών
  - Πολλαπλές μονάδες εκτέλεσης
  - Δυναμική απόφαση ανάθεσης εντολών σε μονάδες
  - Εκτέλεση εκτός σειράς (out-of-order execution)
- Ο κώδικας εκτελείται πάντα σωστά
  - Ανεξάρτητα από μεταγλώττιση
- Intel IA-32/64 (Pentium και μετά), PowerPC...

## IBM Power4 processor

- Απόδοση KME
- KME ενός κύκλου
- KME πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining
- Προχωρημένες τεχνικές ILP

