

Παραλληλισμός σε επίπεδο εντολών

(Pipelining και άλλες τεχνικές αύξησης απόδοσης)

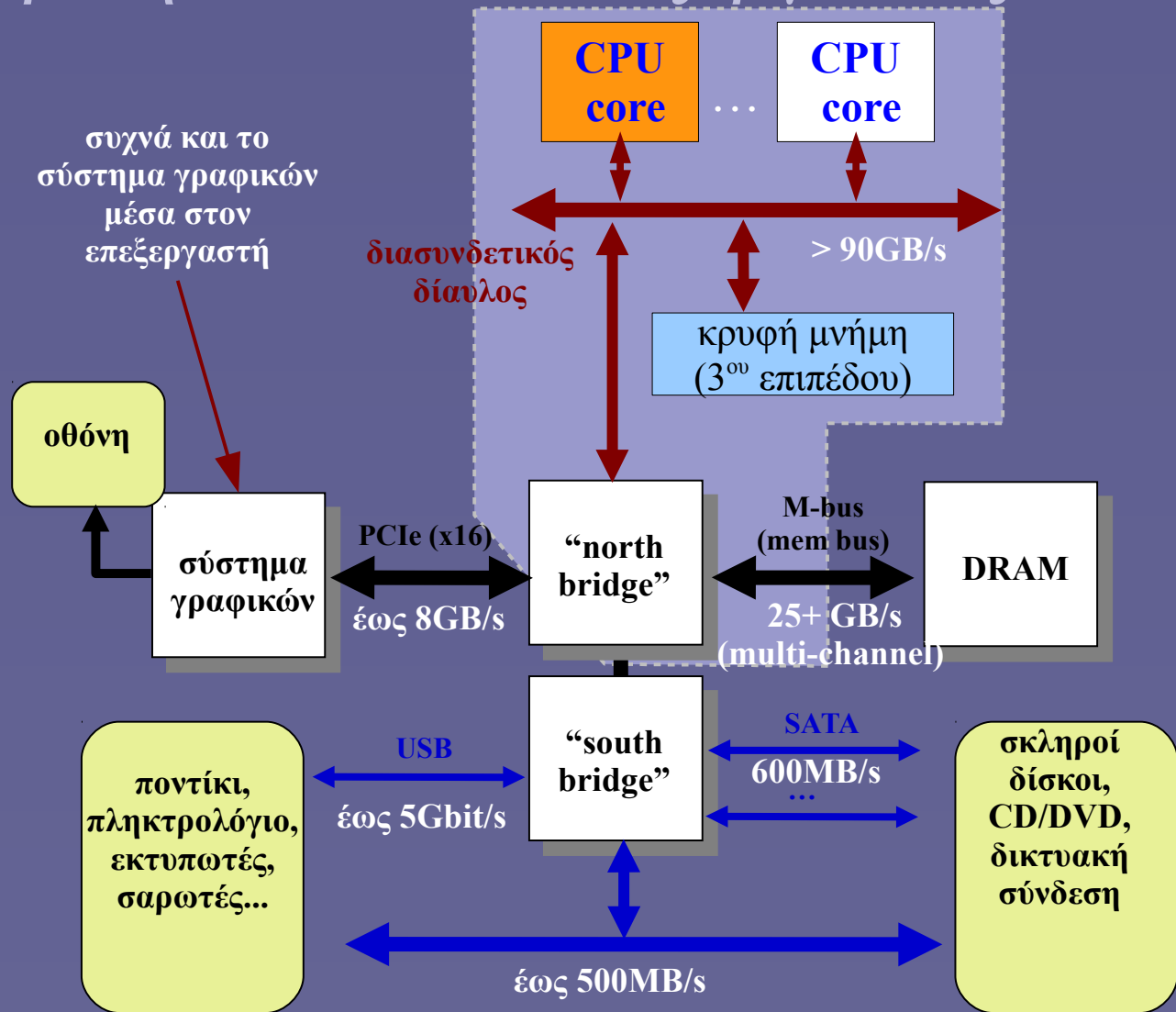
<http://mixstef.github.io/courses/comparch/>

Μ.Στεφανιδάκης



Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας

- Απόδοση ΚΜΕ



οι ρυθμοί μεταφοράς που δίνονται είναι οι θεωρητικά μέγιστοι!

Επανάληψη: Απόδοση ΚΜΕ

- Απόδοση ΚΜΕ

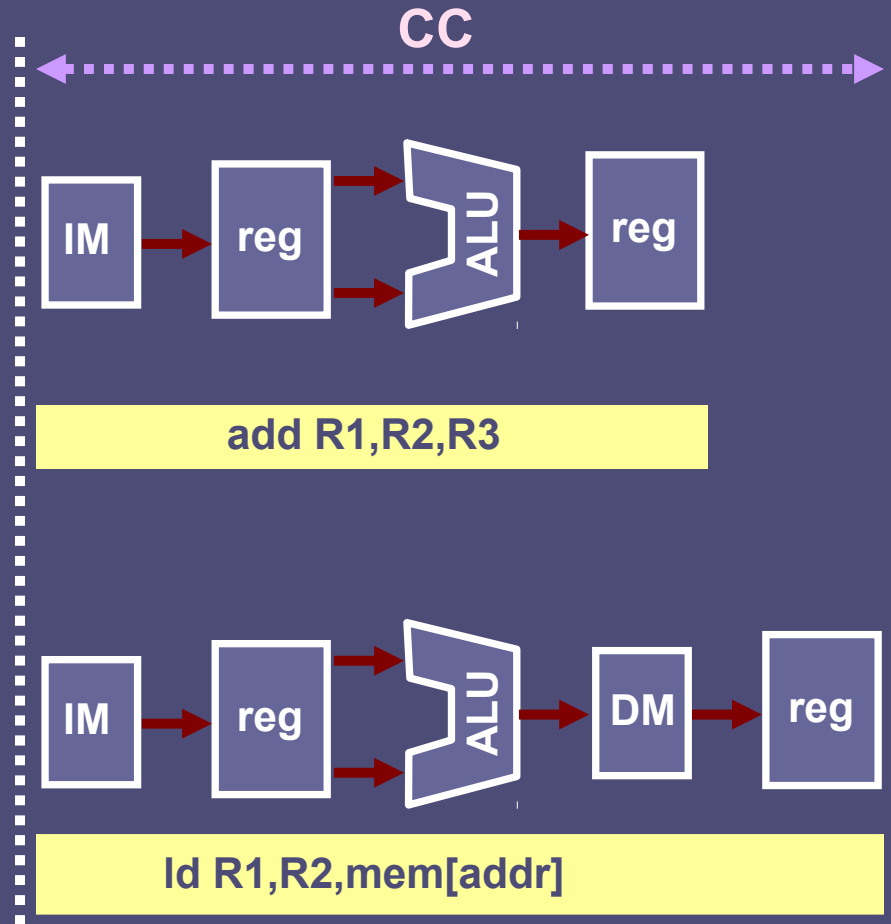
- Υπολογιστικό σύστημα
 - Η απόδοση εξαρτάται από **όλα** τα επιμέρους τμήματά του
 - Υλικό και λογισμικό
- Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας
 - Πόσο γρήγορα εκτελείται ένα πρόγραμμα;

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

ΚΜΕ ενός κύκλου (single-cycle)

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου

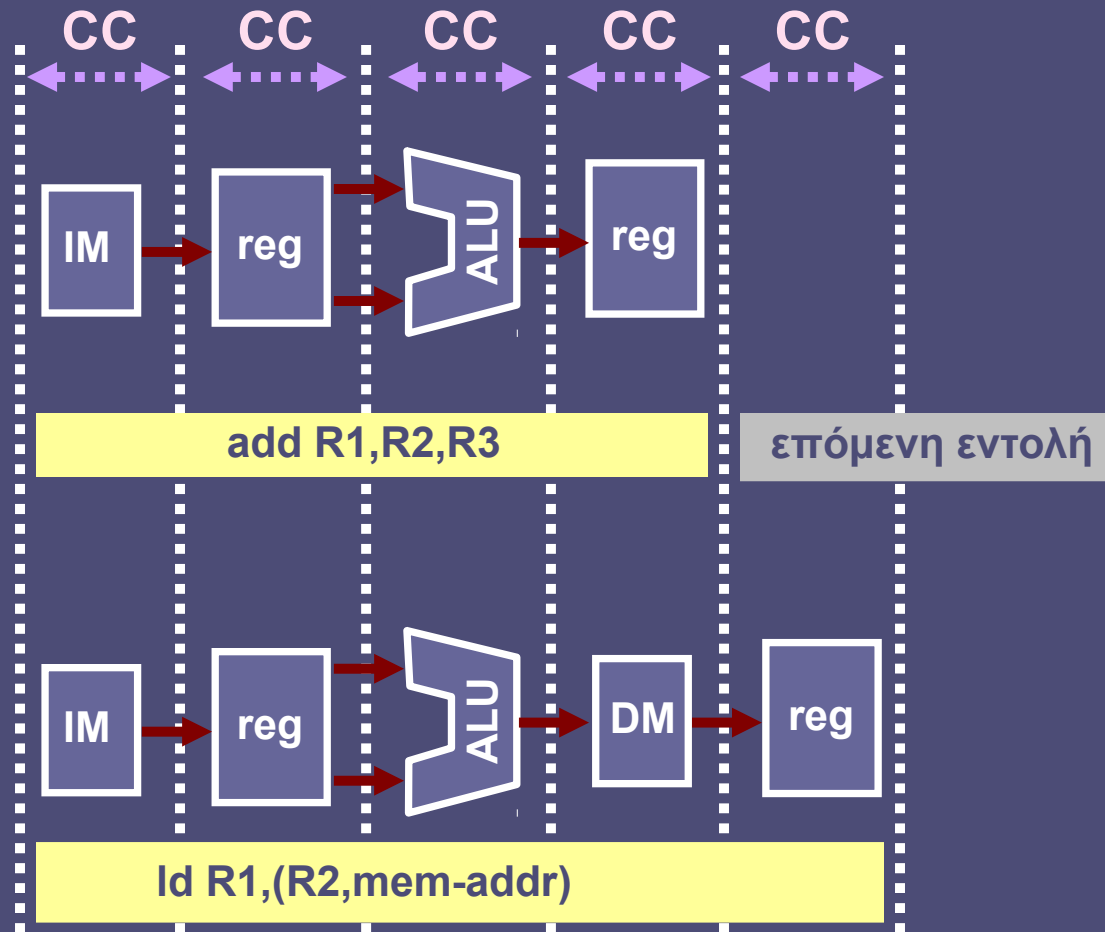
Κάθε εντολή ολοκληρώνεται σε έναν κύκλο ρολογιού
 $CPI = 1$
 $CC =$ διάρκεια αργότερης εντολής



ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων (multi-cycle)

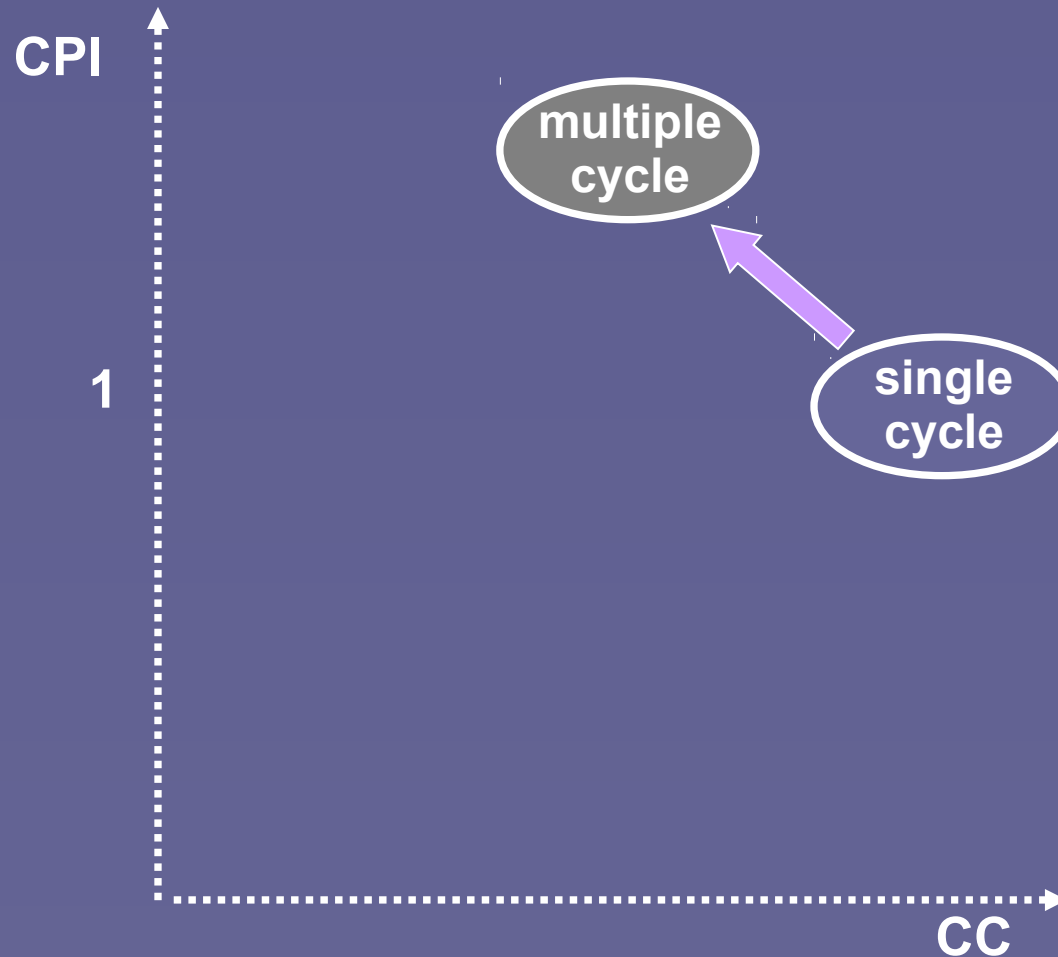
- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων

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



Απόδοση ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων

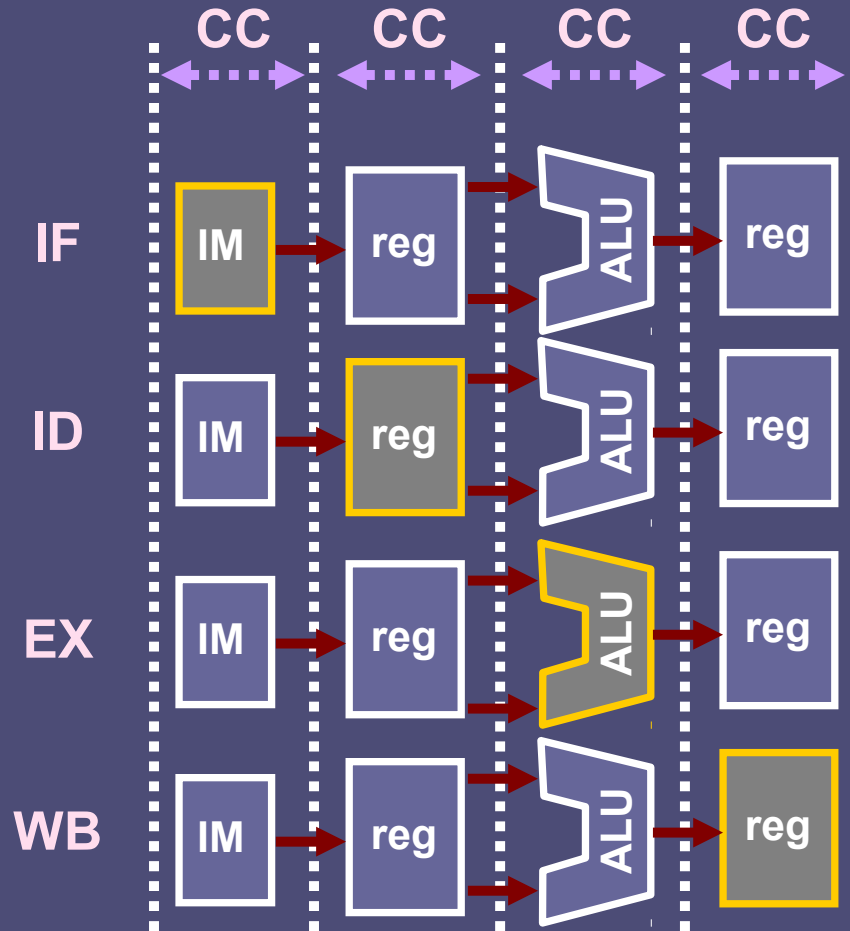
- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων



Πιθανότητα περαιτέρω βελτίωσης;

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων

Σε κάθε κύκλο, ένα μέρος της ΚΜΕ δεν χρησιμοποιείται!



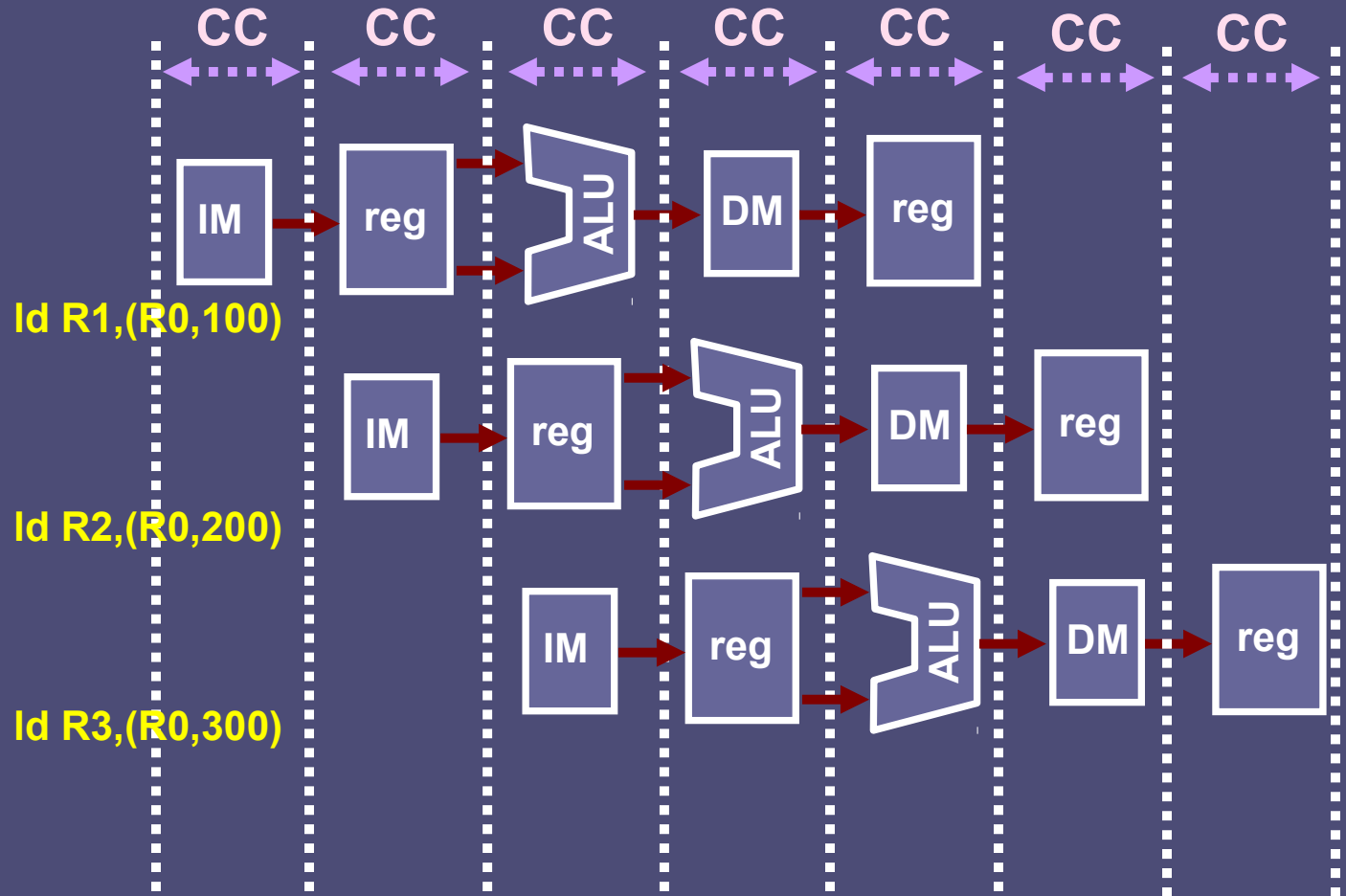
Παραλληλισμός σε επίπεδο εντολών

- 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 σύγχρονων 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;

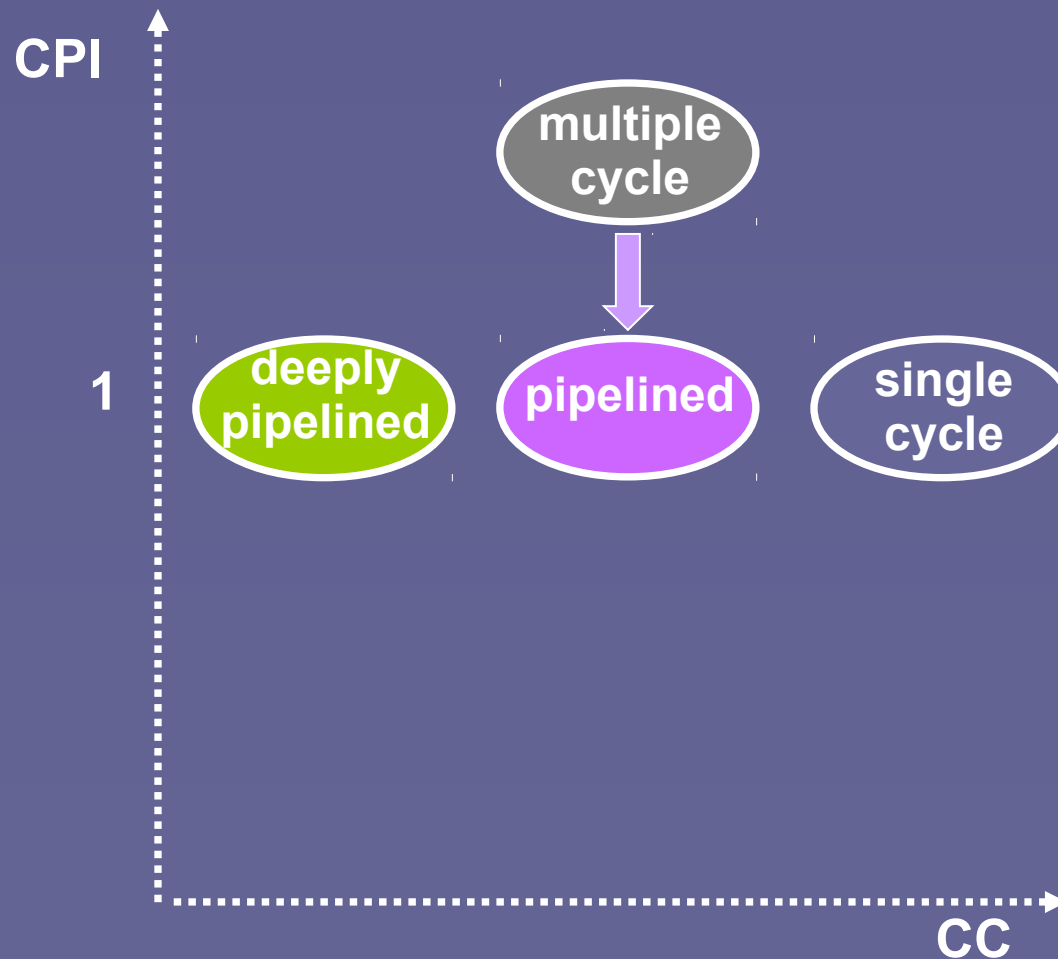
Απόδοση τεχνικής pipelining

- 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;

Απόδοση ιδανικού pipeline

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



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
- **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

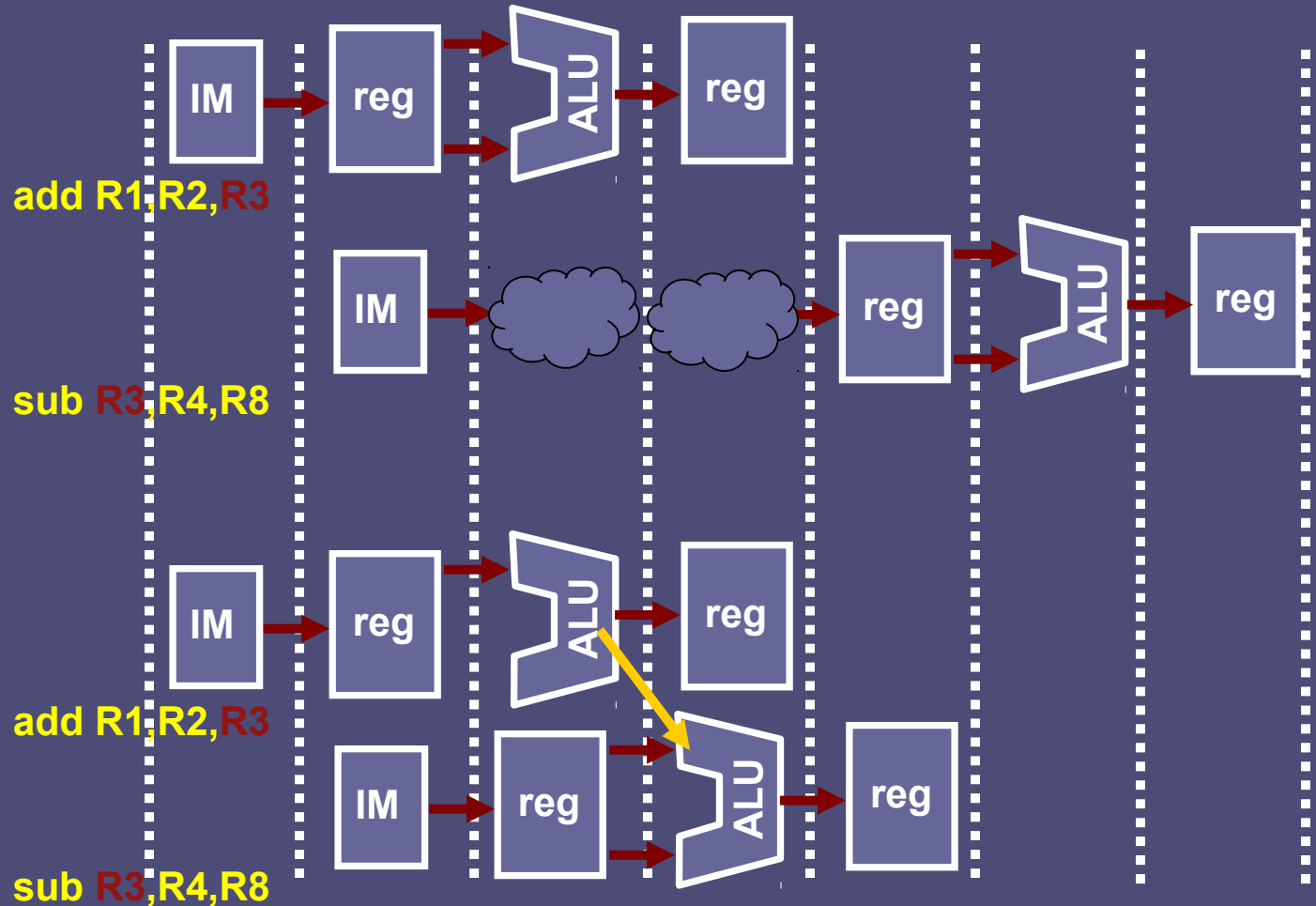
Forwarding - bypassing

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



Pipeline bubbles

Δεν αποφεύγονται
πάντοτε!



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

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

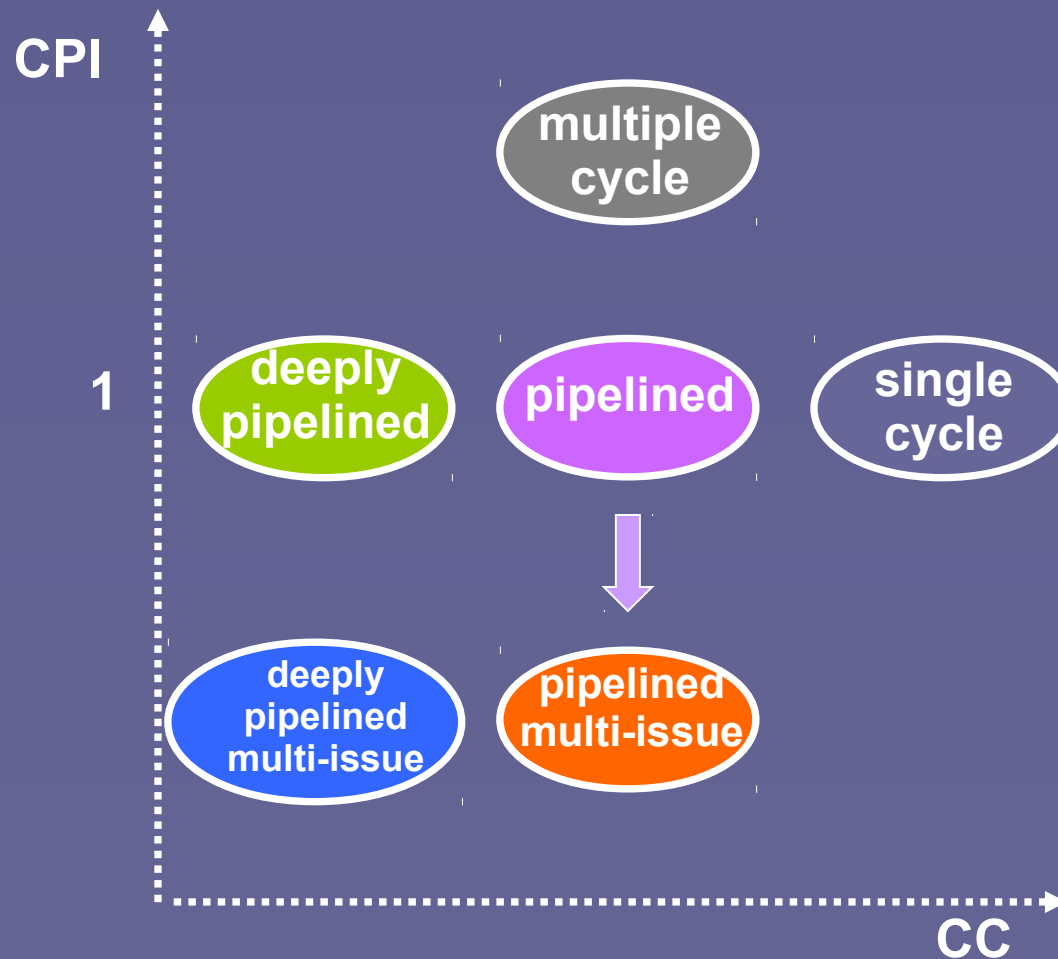
Ακόμα μεγαλύτερος βαθμός ILP

- 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

Απόδοση multiple-issue επεξεργαστών

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



Εικαζόμενη εκτέλεση

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ 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 και αποτελεσμάτων
 - 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

Είδη multiple-issue επεξεργαστών

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

• Επεξεργαστές VLIW

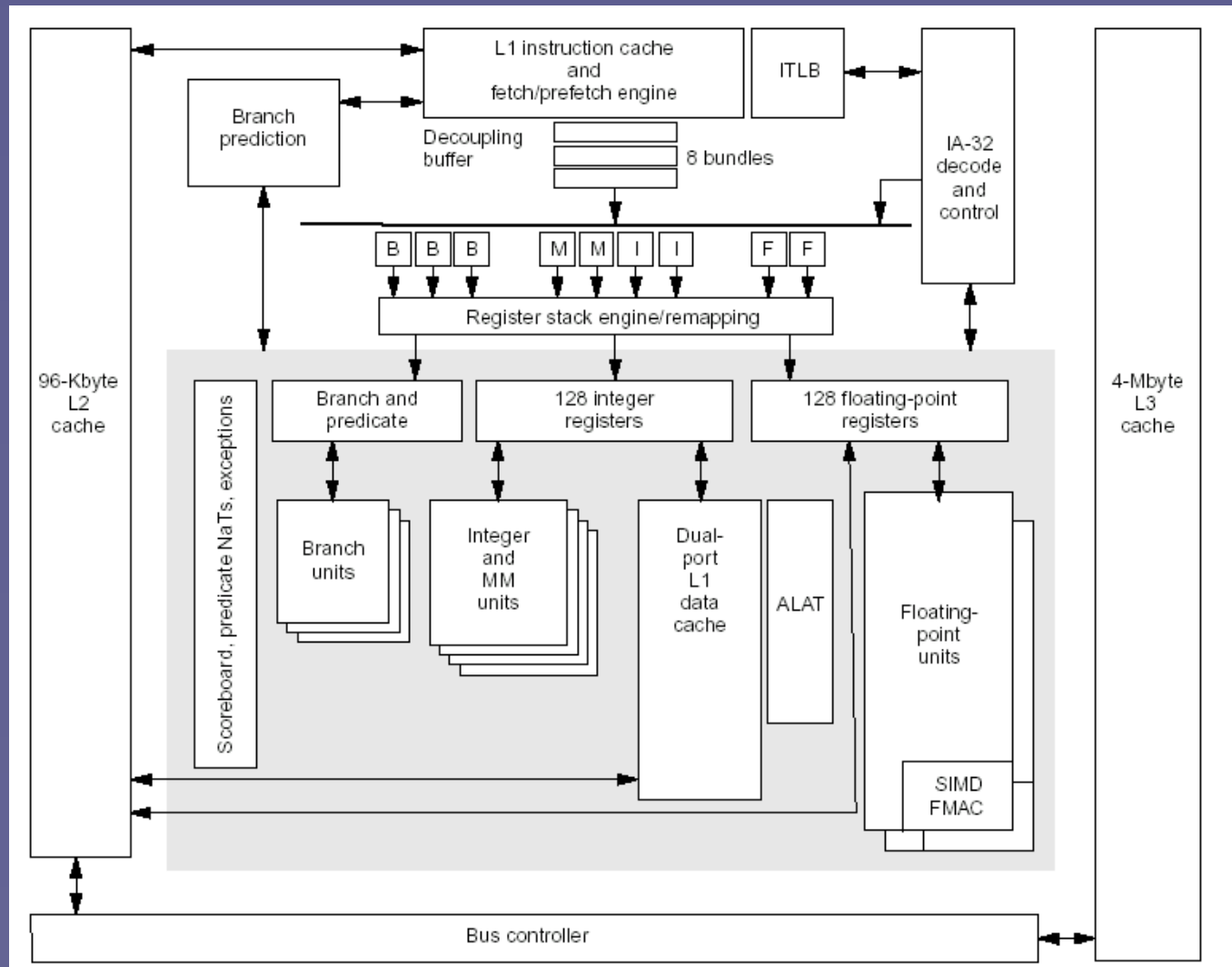
- Very Long Instruction Word
- Πακέτα πολλαπλών εντολών
 - Παράλληλη εκτέλεση
 - Δεν είναι δυνατοί όλοι οι συνδυασμοί εντολών στο ίδιο πακέτο
- Ο μεταγλωττιστής συγκροτεί τα πακέτα εντολών
- Ελέγχει σε (μεγάλο βαθμό)
 - Αλληλεξαρτήσεις – αλληλουχίες εντολών
 - Πρόβλεψη διακλαδώσεων
- Intel Itanium, Trimedia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

Intel Itanium processor

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

i

Η Intel ονομάζει την αρχιτεκτονική αυτή **EPIC** (explicitly parallel instruction computer)



Είδη multiple-issue επεξεργαστών

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ 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 (Pentium και μετά), PowerPC...

IBM Power4 processor

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

