

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

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



Μ.Στεφανιδάκης

Επανάληψη: Απόδοση (Κ)ΜΕ

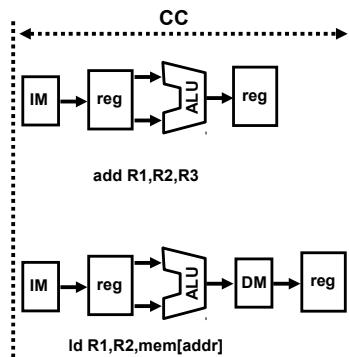
• Απόδοση ΚΜΕ

- 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)

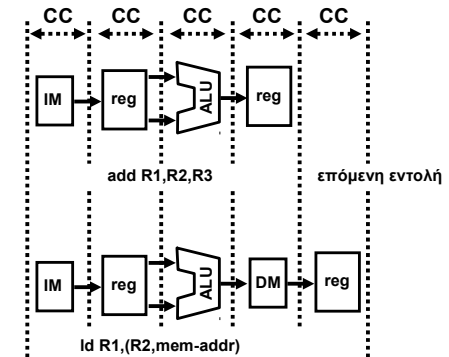
- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου



Κάθε εντολή ολοκληρώνεται σε έναν κύκλο ρολογιού
 $\text{CPI} = 1$
 $\text{CC} =$ διάρκεια αργότερης εντολής

ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων (multi-cycle)

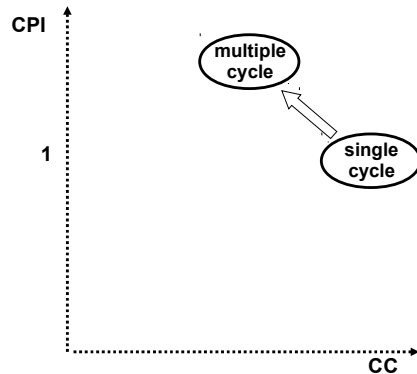
- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων



Κάθε εντολή ολοκληρώνεται σε μεταβλητό αριθμό βημάτων (κύκλων ρολογιού)
 $\text{CPI} > 1$
 $\text{CC} =$ διάρκεια αργότερου βήματος

Απόδοση ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων



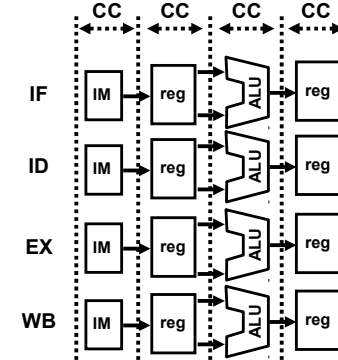
Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Παράλληλισμός σε επίπεδο εντολών”

5

Πιθανότητα περαιτέρω βελτίωσης;

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων

Σε κάθε κύκλο, ένα μέρος της ΚΜΕ δεν χρησιμοποιείται!



Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Παράλληλισμός σε επίπεδο εντολών”

6

Παράλληλισμός 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 παραμένει 1

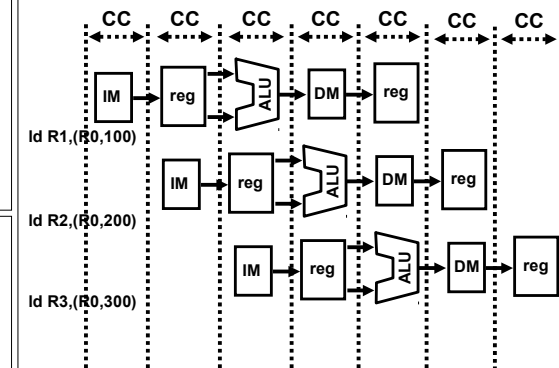
Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Παράλληλισμός σε επίπεδο εντολών”

7

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 – “Παράλληλισμός σε επίπεδο εντολών”

8

Απόδοση τεχνικής pipelining

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

- Χρόνος ολοκλήρωσης μιας εντολής (latency)
 - Όσο χρειάζεται η εντολή να διασχίσει το pipeline (ιδανικά $N*CC$, αν το pipeline έχει N βαθμίδες)
 - Δεν αλλάζει σε σχέση με την ΚΜΕ χωρίς pipeline: η μεμονωμένη εντολή δεν εκτελείται ταχύτερα!

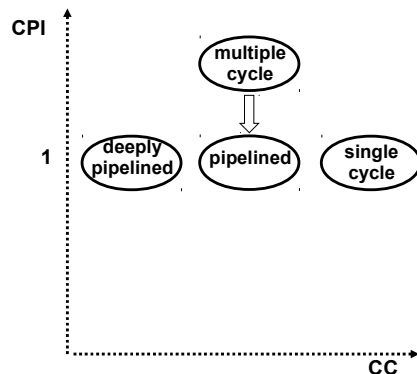
Απόδοση τεχνικής pipelining

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

- Ρυθμός ολοκλήρωσης εντολών
 - Σε κάθε έναν κύκλο ρολογιού ολοκληρώνεται μια εντολή (CPI = 1)
 - Και μια νέα ξεκινά την εκτέλεσή της
 - Η ιδανική περίπτωση...αλλά:
 - Απόδοση συστήματος μνήμης - αποκωδικοποίηση εντολών;
 - Ανάγκη ταυτόχρονης χρήσης ίδιων βαθμίδων pipeline από διαφορετικές εντολές;
 - Αλληλεξαρτήσεις δεδομένων εντολών;
 - Διακλαδώσεις;

Απόδοση ιδανικού pipeline

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



Δυσκολίες στην εφαρμογή του pipelining

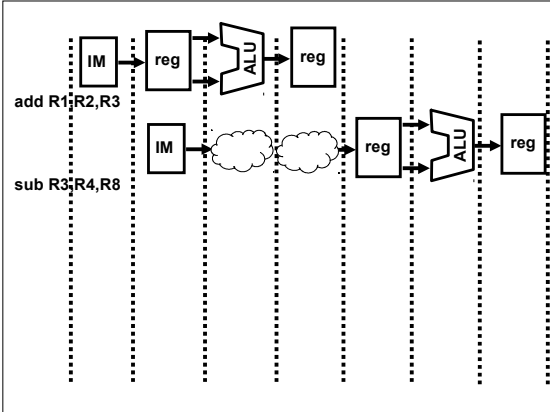
- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining

- Αδυναμία χρήσης μιας βαθμίδας
 - Structural hazards
 - Η βαθμίδα χρησιμοποιείται από άλλη εντολή
 - Αποφεύγεται με σωστή σχεδίαση και πρόσθετες μονάδες
- Αλληλεξαρτήσεις δεδομένων
 - Data hazards
 - 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

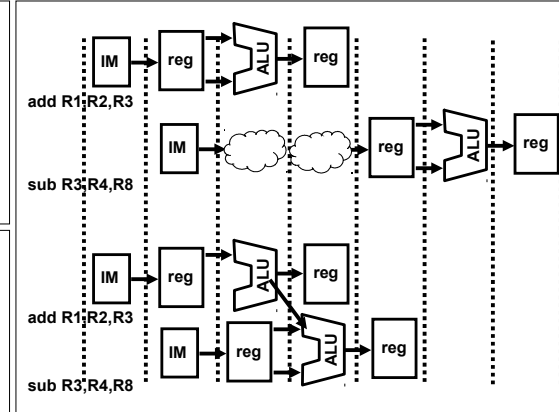
! Pipeline bubbles



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) hazards
 - Όταν η διακλάδωση πραγματοποιείται, η ροή της εκτέλεσης αλλάζει
 - Μεταπήδηση σε άλλη θέση του προγράμματος κι όχι στην επόμενη εντολή
 - Οι επόμενες εντολές που τυχόν έχουν μπει στο pipeline μετά την εντολή διακλάδωσης δεν θα είναι οι σωστές
 - Η διακλάδωση αποφασίζεται συνήθως αφού ολοκληρωθεί το στάδιο της αποκωδικοποίησης (ID)
 - Συνεπώς μία τουλάχιστον επόμενη εντολή θα έχει προλάβει να μπει στο pipeline πριν την απόφαση διακλάδωσης

Αντιμετώπιση control hazards

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

- 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 λανθασμένων 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

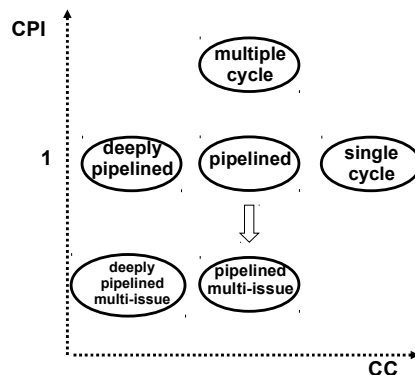
Ακόμα μεγαλύτερος βαθμός ILP

- 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



Είδη multiple-issue επεξεργαστών

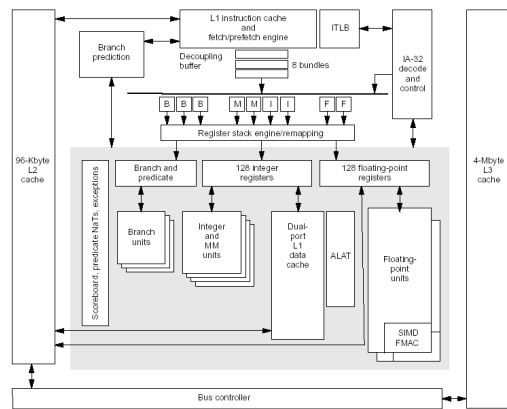
- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining
- Προχωρημένες τεχνικές ILP

- **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

Ιστορία: Intel Itanium processor (~2000)

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

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



Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Παράλληλισμός σε επίπεδο εντολών”

21

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...

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Παράλληλισμός σε επίπεδο εντολών”

22

Εικαζόμενη εκτέλεση

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

Speculative Execution

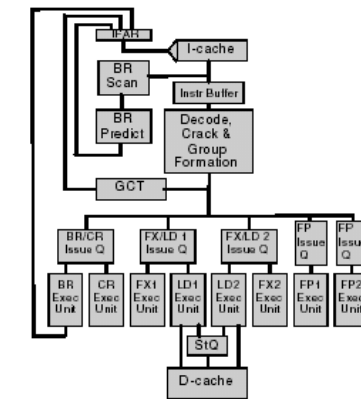
- Κλειδί για την αύξηση του βαθμού παραλληλίας σε επίπεδο εντολών
 - Όταν προβλέπεται πολλαπλή ταυτόχρονη εκτέλεση εντολών
- Εκτέλεση εκτός σειράς
 - Επιτρέπεται η εκτέλεση επόμενων εντολών πριν την ολοκλήρωση της προηγούμενης εντολής
 - Προσωρινή αποθήκευση αποτελεσμάτων έως ότου να μην είναι πλέον εικαζόμενα
 - Διόρθωση λαθών πρόβλεψης διακλάδωσης

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Παράλληλισμός σε επίπεδο εντολών”

23

Ιστορία: IBM Power4 processor (2001)

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



Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Παράλληλισμός σε επίπεδο εντολών”

24