



2. Процесорни архитектури

Васил Георгиев

 i.s.fmi.uni-sofia.bg/t3/
 v.georgiev@fmi.uni-sofia.bg

Съдържание

- Процесорни архитектури – технологично пространство
- Линейни и нелинейни конвейри
- Архитектура на набора инструкции
- Субинструкционен паралелизъм
- Суперскаларни и мултипроцесорни масови процесори

2. Процесорни
архитектури

ФМИ/СУ * ИС/СИ/КН *
РИТАрх/РСА/СПО

2

Процесорни архитектури

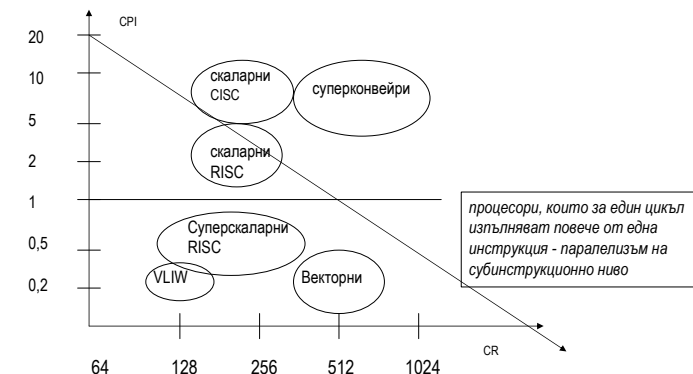
- **Main frame** – широк архитектурен клас от компютри, прилагат се някои от следните процесорни архитектури:
 - Скаларни процесори **CISC** (Complex Instruction Set Computer); **RISC** (Reduced Instruction Set Computer);
 - Суперскаларни **CISC**; **RISC**, само че **RISC** се използва по-често по технологични причини;
 - Процесори **VLIW** – Very Long Instruction Word;
 - Векторни;
 - Суперконвейрни [super pipeline];
- Основни характеристики на всички архитектурни класове процесори:
 - Процесорни цикли **CPI**;
 - Тактова честота **CR**.
- Тези два параметъра на пръв поглед са независими, но между тях съществува корелация, която може да се представи в диаграма на технологичното пространство:

2. Процесорни
архитектури

ФМИ/СУ * ИС/СИ/КН *
РИТАрх/РСА/СПО

3

Диаграма на технологичното пространство [MHz]



2. Процесорни
архитектури

ФМИ/СУ * ИС/СИ/КН *
РИТАрх/РСА/СПО

4

Фази на инструкционен конвейер

- Процесорната обработка на типична инструкция реализира **MISD** паралелизъм на инструкционно ниво и минава през фазите извличане (от **cache** - обикновено 1 инстр. за цикъл), декодиране (установява функцията за изпълнение и необходимите ресурси - регистри, магистрали, устройства), издаване (резервира ресурсите чрез блокиране и извлича операндите от регистрите към устройствата), изпълнение (1 или повече фази), записване (**writeback** - на резултатите в регистрите).



2. Процесорни
архитектури

ФМИ/СУ * ИС/СИ/КН *
РИТАрх/РСА/СПО

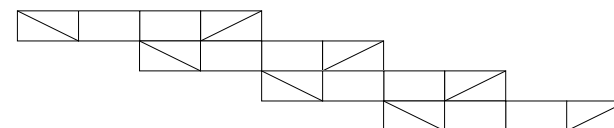
5

Времедиаграма на инструкционен конвейер

- Закъснението между две последователни инструкции е една фаза при скаларните процесори



- Поради ресурсен конфликт между фазите на извличане и запис по-често се прилага закъснение на две фази (два субтакта) между инструкциите:



2. Процесорни
архитектури

ФМИ/СУ * ИС/СИ/КН *
РИТАрх/РСА/СПО

6

Синхронни линейни конвейерни процесори ЛКП

- ЛКП е каскада от k процесорни фази (**stages** - S_i), която изпълнява фиксирана функция върху данните, преминаващи през устройството от входа (S_i) през последователните фази ($S_i \rightarrow S_{i+1}$) към изхода му S_k . Те не са динамично (**run-time**) настройваеми т.е. са статични. Изпълняват операционни, аритметични и обменни инструкции.
- Синхронните ЛКП са с интерфейс между фазите, който представлява синхронизиращи буферни ключове (**latches**) с общ такт. Фиг. 2.7. Ключовете са регистри които изолират входовете от изходите и предават данните синхронно във всички фази. Фазата с най-голямо закъснение определя общия такт и общата производителност: $\tau = \tau_{\max} + d_{\text{latch}}$; $P_{\text{peak}} = f / \tau$. Проявява се и фазово отместване (**skew[ing]**) на такта при предаване на тактовия сигнал между фазите. Затова се избира $\tau = \tau_{\max} + d_{\text{latch}} + s$.

2. Процесорни
архитектури

ФМИ/СУ * ИС/СИ/КН *
РИТАрх/РСА/СПО

7

Асинхронни линейни конвейерни процесори ЛКП

- Асинхронните ЛКП контролират потока данни с "Hand Shaking" протокол - **Ready/Ack** между $S_i \rightarrow S_{i+1}$. Фиг. 2.8. Подходящи за комуникационни канали при системи с обмен на съобщения. Производителността на отделните фази може да варира.

2. Процесорни
архитектури

ФМИ/СУ * ИС/СИ/КН *
РИТАрх/РСА/СПО

8

Нелинейни конвейрни процесори НЛКП

- Динамични, настройваеми, допуска се разклонение, обратна връзка (**feedback**) и пре-предаване (**feedforward**) на данните за обработка. Фиг. 2.9.1. Изходът може да не е от последната фаза.
- **Карта на резервацията.** Тук не е тривиална като при ЛКП. За различните функции може да **варира по устройства и време** (тактове). Фиг. 2.9.2. Тя се дава и съвместимостта на последователните функции по устройства т.е. зависимостта им по ресурси

Анализ на закъснението при НЛКП

- Закъснението (**latency**) се представя от броя процесорни тактове k между две последователни инициирания на функции.
- Опит за повече от едно инициране едновременно на едно устройство е колизия, която се избягва чрез *планиране* (*диспечеризация*, *scheduling*) на последователността от инициирания.
- Когато закъснението е такова, че предизвиква колизия, то е *забранено закъснение*; трябва да се избере последователност от закъснения, така че да не предизвиква колизия. Пример за две забранени закъснения с карта на резервацията - фиг. 2.10.
- *Цикъл на закъснението* е последователност от закъснения, която се повтаря неопределено дълго. Интервалите между две последователни инициирания на функции в цикъла на закъснението може да са еднакви, (*константен цикъл*), но може и да са различни, при което се изчислява *средно закъснение*. Чрез коефициента на запълване на цикъла се получава ефективността на конвейера.

Инструкционен конвейер

- ИК е специализиран за обработка на последователните инструкции в машинния код чрез припокриване (**overlapping**)
- типичната инструкция минава през фазите извличане (от **cache** - обикновено 1 за цикъл), декодиране (установява функцията за изпълнение и необходимите ресурси - регистри, магистрали, устройства), издаване (резервира ресурсите чрез блокиране и извлича операндите от регистрите към устройствата), изпълнение (1 или повече фази), записване (**writeback** - на резултатите в регистрите).
- архитектурата на процесорния конвейер Фиг. 2.11
- преподдреждане на инструкциите за по-голям коефициент на запълване на цикъла фиг. 2.11.1

Обработка на преходите

- Конвейеризацията се лимитира от зависимостта по данни и от инструкциите за преход
- Производителността при програма с 20%/10% вероятност за условен преход между последователните инструкции, 50% вероятност за изпълнение на условието (т.е. на прехода; статистически обаче повечето условни преходи - 60% -се изпълняват) и 8-фазен конвейер е 41%/25% по-малка отколкото производителността при програма, в която поне едната вероятност е 0. Затова при конвейрни процесори е желателно алгоритъмът да се кодира с минимум условни преходи.
- Предвиждането на преходите се използва за да се отложи прехода докато се изпълнят опр. брой инструкции, независими от условието на прехода. То може да бъде базирано на кода на програмата - статично или на историята на изпълнението - динамично

Архитектура на набора инструкции

Разграничават се класовете RISC и CISC по следните параметри:

- формат на инструкцията и на данните
- режими на адресация
- регистърно адресиране (регистри с общо назначение)
- управление на изпълнението на програмата (flow control instructions)

2. Процесорни
архитектури

ФМИ/СУ * ИС/СИ/КН *
РИТАрх/РСА/СПО

13

CISC

- ➔ класическа архитектура (първите процесори са ограничен набор инструкции)
- ➔ уверения набор инструкции настъпва с микропрограмирането с промяната на SWcost/HWcost (първосигнална реакция на семантичната ножица между HLL и процесорните архитектури/машинните езици)
- ➔ параметри:
 - ➔ 120 – 350 инструкции с няколко формата на инструкциите и данните
 - ➔ 32 – 64 регистъра с общо предназначение
 - ➔ 4 – 16 режима на адресиране
 - ➔ голяма част от изразите на HLL са микрокодирани (т.е. имат съответствие в набора инструкции)
- ➔ скаларни CISC процесори – за операции върху скаларни данни; частична конвейризация поради:
 - ➔ зависимост по данни между последователните инструкции
 - ➔ ресурсен конфликт
- ➔ фиг. 2.14.

2. Процесорни
архитектури

ФМИ/СУ * ИС/СИ/КН *
РИТАрх/РСА/СПО

14

RISC

- ➔ 25% от машинните инструкции кодират 90% от HLL програмата и се изпълняват 95% от процесорното време
- ➔ подходи за оптимизация:
 - ➔ трансформиране на микропрограмна памет в регистърен cache
 - ➔ FPU и други специализирани устройства на процесорния чип
 - ➔ суперскаларни процесори
 - ➔ броя на инструкциите е < 100 – с фиксиран формат (предимно регистър-регистър)
 - ➔ до 5 режима на адресиране, инструкциите са предимно от тип load/store
 - ➔ “регистърни фалове” – по 32+ вътрешни регистри за бързо превключване между процесите
 - ➔ едночипови, затова висока тактова честота CR и нисък CPI т.е. висок MIPS коефициент
 - ➔ скаларните RISC процесори са подобни на скаларните CISC но при еднаква тактова честота производителността може да е по-ниска поради по-малката плътност на кода
 - ➔ необходимост от ефективен компилатор за постигане на високо ниво конвейризация на ниво инструкция
 - ➔ суперскаларна RISC архитектура – фиг. 2.15.

2. Процесорни
архитектури

ФМИ/СУ * ИС/СИ/КН *
РИТАрх/РСА/СПО

15

| Показатели | CISC | RISC скаларен |
|-------------------------------|---|---|
| Брой инструкции | 128-256-300 | 24-32 |
| Формат на инструкции | 16-64 бита, т.е. инструкцията е с плаваща дължина | 32 бита, т.е. дължината е фиксирана |
| Формат на адреси | 8-12 бита, различни начини на адресиране на операционната памет, къси/дълги | Регистър-регистър (много по-голям брой вътрешни регистри), регистърни (файлове), 3-4 броя на регистърните формати |
| CPI брой просецорни тактове | 8-20 процесорни такта, т.нар. инструкции с различна степен на сложност | 3-6 процесорни такта, инструкциите са с фиксирана дължина – опростени |
| СМ управляващ контролен модул | Базира се на микропрограмиране | С помоща на апаратна логика (АЛ) hardware control |

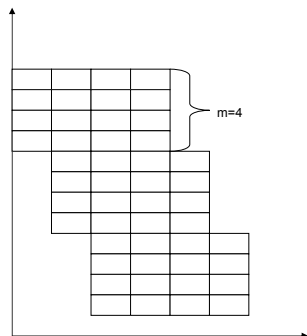
2. Процесорни
архитектури

ФМИ/СУ * ИС/СИ/КН *
РИТАрх/РСА/СПО

16

Суперскаларни процесори (RISC и CISC)

- Повече от 1 инструкция на такт поради наличието на няколко (напр. 3) инструкционни конвейера – съответно няколко резултата от всеки инструкционен цикъл
- модел MIMD инструкционно ниво
- разлика от векторните процесори, които реализират SIMD на инструкционно ниво
- паралелизма се реализира на инструкционно ниво – само между логически независими инструкции
- кратност на инструкцията $m = 2$ до 5 (при скаларните процесори $m = 1$)
- суперскаларен RISC процесор – фиг. 2.17.



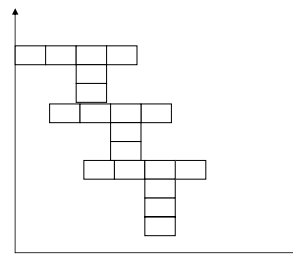
2. Процесорни
архитектури

ФМИ/СУ * ИС/СИ/КН *
РИТАрх/РСА/СПО

17

VLIW процесори

- Комбинират концепцията за хоризонтално микрокодирани и суперскаларна архитектура:
- дълги инструкции (стотици битове), които задават по няколко операции над операндите
 - различават се от суперскаларните процесори по
 - бързо и просто декодиране на инструкциите понеже една VLIW инструкция замества няколко суперскаларни
 - по-ниска плътност на кода но по-висок паралелизъм на инструкционно ниво (понеже инструкциите са с фиксиран формат който може да включва и неизпълними операции, а суперскаларните операции са само изпълними)
 - непреносим обектен код понеже нивото на паралелизма при различните процесори е различно а е заложено в самата дълга инструкция (суперскаларните архитектури са портателни със скаларните) – само за специализирани компютри
 - инструкционния паралелизъм се задава на етапа компилация – т.е. статичен няма динамична диспечеризация и синхронизация
 - VLIW процесор – фиг. 2.18.



2. Процесорни
архитектури

ФМИ/СУ * ИС/СИ/КН *
РИТАрх/РСА/СПО

18

Векторни процесори

Специализирани копроцесори за векторни операции – операндите в отделната инструкция са масив[и]

- дългите вектори (надвишаващи дължината на регистърните файлове) се сегментират
- инструкциите са тип
 - регистър-регистър – кратки; адресират се регистърни файлове
 - памет-памет – дълги (защото съдържат адреси от основната памет); те могат да обработват по-големи масиви с различна дължина
- типични векторни операции
 - зареждане на вектор от паметта на компютъра: $V_1 \leftarrow M_n$;
 - запис: $V_1 \rightarrow M_n$;
 - ескалиране: $S_1 \bullet V_1 \rightarrow V_2$;
 - векторна операция, при която и двете операнди са вектори и резултат е вектор: $V_1 \bullet V_2 \rightarrow V_3$;
 - редукция от векторни операнди и резултат скалар: $V_1 \bullet V_2 \rightarrow S_1$;
 - зареждане вектор-вектор: $\bullet V_1 \rightarrow V_2$;
 - редукция на единичен вектор: $\bullet V_1 \rightarrow S_1$;
 - аналогични инструкции от тип памет-памет – операндите са от вида $M(1 : n)$

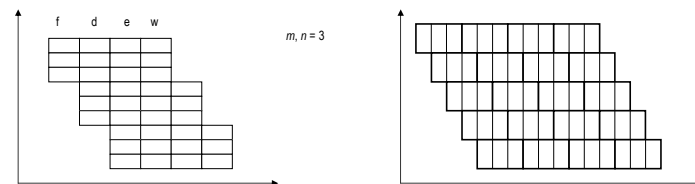
2. Процесорни
архитектури

ФМИ/СУ * ИС/СИ/КН *
РИТАрх/РСА/СПО

19

Суперконвейерна архитектура

- При степен n цикъла на суперконвейера е $1/n$ от базовия цикъл на фазите. Фиг. 2.20.
- Закъснението за една операция е равно на базовия цикъл, но ILP е $n \cdot f$
- $T(1, n) = k + (N-1)/n$
- $S(1, n) = \dots \rightarrow n$ за $N \rightarrow \infty$.
- Cray1: $n=3$.



2. Процесорни
архитектури

ФМИ/СУ * ИС/СИ/КН *
РИТАрх/РСА/СПО

20

Суперконвейрна суперскаларна архитектура

➤ Степента е (m, n) като m е кратността на едновременно издаваните инструкции (т.е. на супрескаларност) а n е кратността на суперконвейера ($1/n$ от кратността на базовия цикъл между групите последователни инструкции). Фиг. 2.21. Закъснението за една операция е равно на базовия цикъл, но ILP е n .

➤ $T(m, n) = k + (N-m)/mn$

➤ $S(m, n) = \dots \rightarrow nm$ за $N \rightarrow \infty$.

➤ DEC Alpha: $n=6, m=2$.

Технологии на процесорите

- Суперскаларните архитектури са по-подходящи за паралелизъм по данни - многократни операции се изпълняват конкурентно на няколко еднотипни устройства (блокове за изпълнение, портове към регистрови файлове ...). Затова необходимост от по голяма интеграция в чипа – CMOS технология. Комбинират се с RISC архитектура на процесорната дума.
- Суперконвейрите се базират на паралелизъм по управление, поради което съществено при тях е прилагането на устройства с висока тактова честота – т.е. TTL технология.

Intel Pentium

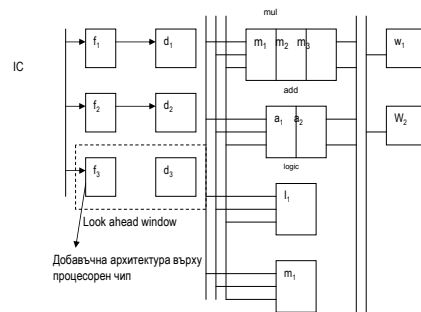
С въвеждането на Пентиум архитектурата (1995) Интел прилага предимствата на неklasическа паралелна архитектура в производството на процесор, предназначен типично за масови компютри:

- суперскаларен процесор с ниво на инструкционния паралелизъм $m=2$ (3 за P4) – едновременна обработка на 2 целочислени операнда по модела MIMD (когато последователните инструкции нямат зависимост по данни или управление!);
- всеки инструкционен конвейер се състои от 5 фази: извличане, декодиране, адресна генерация (типичен CISC процесор с много режими на адресация на ОП), изпълнение и запис
- изпълнението на последователни инструкции от всеки конвейер е със закъснение 1 фаза (извличане): два самостоятелни I cache + D cache по 8 кБ

...Intel Pentium

- за ефективно съчетаване на работата на конвейрите (т.е. за избягване на някои от случаите на конфликт) работата на двата инструкционни конвейера е «дефазирани» със стъпка от 1 фаза (първата фаза «извличане»)
- със същата цел Dcache е с двупортова организация – по един самостоятелен порт за всеки от инструкционните конвейери
- cache буферите са с асоциативна организация на достъпа: асоциативната памет има 32-байтов TLB с последните адреси така че търсенето на зарежданата страница става в 32 адреса (вместо 8K)
- планирането на активните страници в cache е по дисциплината LRU
- изискването за свързаност (кохерентност) между данните в cache и в ОП се постига чрез специален протокол – MESI – което позволява изграждането на мултипроцесорни архитектури (т. нар. симетричен мултипроцесинг – хомогенна мултипроцесорна архитектура с обща памет между процесорите)
- интегрирано FPU устройство с 8-фазов конвейер (извличане, декодиране, адресна генерация, изпълнение, обработка мантиса, обработка експонента, обработка приближение и запис, който може да изпълнява и две FP инструкции едновременно (когато едната от тях е присвояване).

...Intel Pentium



Look ahead window – прозорец за предварителен преглед на инструкциите.
Mul – модул за изпълнение на умножението;
Add – модул за събиране;
Log – логически модул;

2. Процесорни
архитектури

ФМИ/СУ * ИС/СИ/КН *
РИТАрх/РСА/СПО

25

Intel Multicore

- Intel Core Microarchitecture технология прилага интегриране на машинната архитектура на симетричния мултипроцесинг в микропорцесор
- суперконвейрни суперскаларни ядра: 14 фази (коеф. на супреконвейрност 2); по 4 инструкции
- Две/четири независими ядра - NUMA мултипроцесинг с локализиран L1-cache за всяко ядро и общ L2-cache
- елементи на VLIW и RISC (едновременно!):
 - поддържа x86 CISC набор инструкции, като декодира част от тях до 2 и повече конвейрни микроинструкции - RISC
 - т.нар. микрооперации обединяват няколко често срещани последователности от машинни инструкции за изпълнение като една инструкция - напр. проверка на стойност и преход по флаг са обединени в "микрооперацията" условен преход
- интегриран арбитраж на достъпа до L2-магистралата
- разширени възможности на управление на енергийното потребление и версии

2. Процесорни
архитектури

ФМИ/СУ * ИС/СИ/КН *
РИТАрх/РСА/СПО

26