Zvyšování výpočetního výkonu mikroprocesoru

ZVYŠOVÁNÍ VÝPOČETNÍHO VÝKONU PROCESORŮ

- Oblast technologie (maximalizace hodinového kmitočtu). Předpokládané odhady (bipolární Si - 800MHz, CMOS – 3,3GHz).
- Oblast architektury procesoru - paralelizace procesů a zpracování jednotlivých instrukcí.
  - Překrývání instrukcí „pipeline“ (segmentace zpracování instrukcí)
  - Zvětšování počtu paralelně pracujících jednotek **super-skalární** architektury – řazení instrukcí zajišťuje obvodově řadič procesoru (např. PC).
  - Paralelizace instrukcí (architektura **VLIW**) – řazení současně zpracovávaných instrukcí zajišťuje programátor nebo překladač (signálové procesory).
  - Paralelně řazené segmentované aritmetické jednotky tzv. superscalar super-pipelining (Alpha, P4).
  - Paralelizace založená na zvětšování počtu jader (multi-core).
- Paralelizace uplatňovaná **na zpracovávaná data nebo instrukce**.

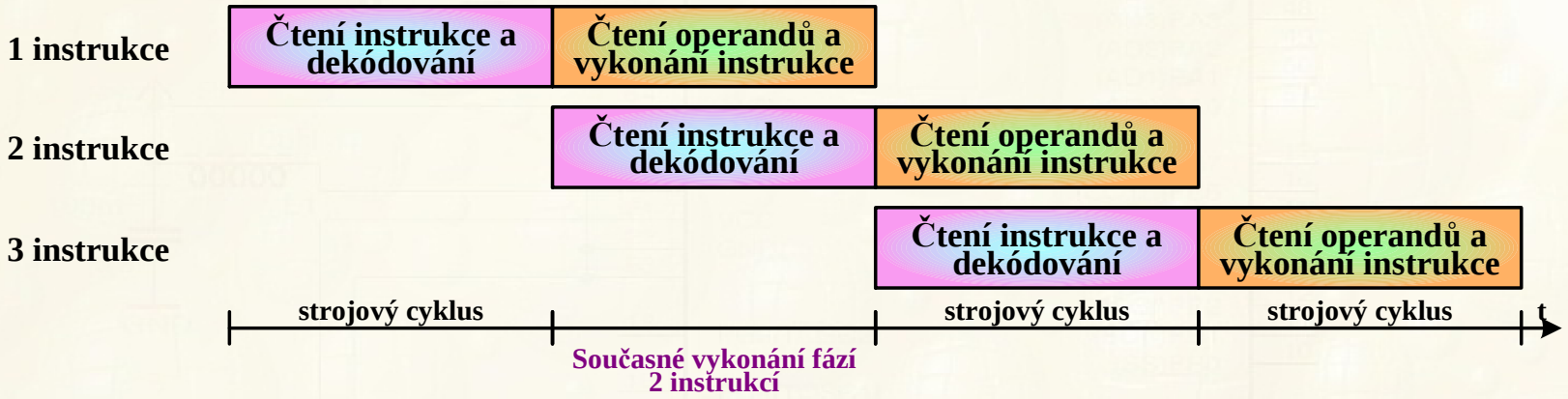
ZVYŠOVÁNÍ VÝPOČETNÍHO VÝKONU PROCESORŮ

Segmentace instrukce do překrývajících se fází byla přirozeným vyústěním snahy o zvyšování výpočetního výkonu. Zahájen u 8051 (1980) částečným překrýváním instrukcím.

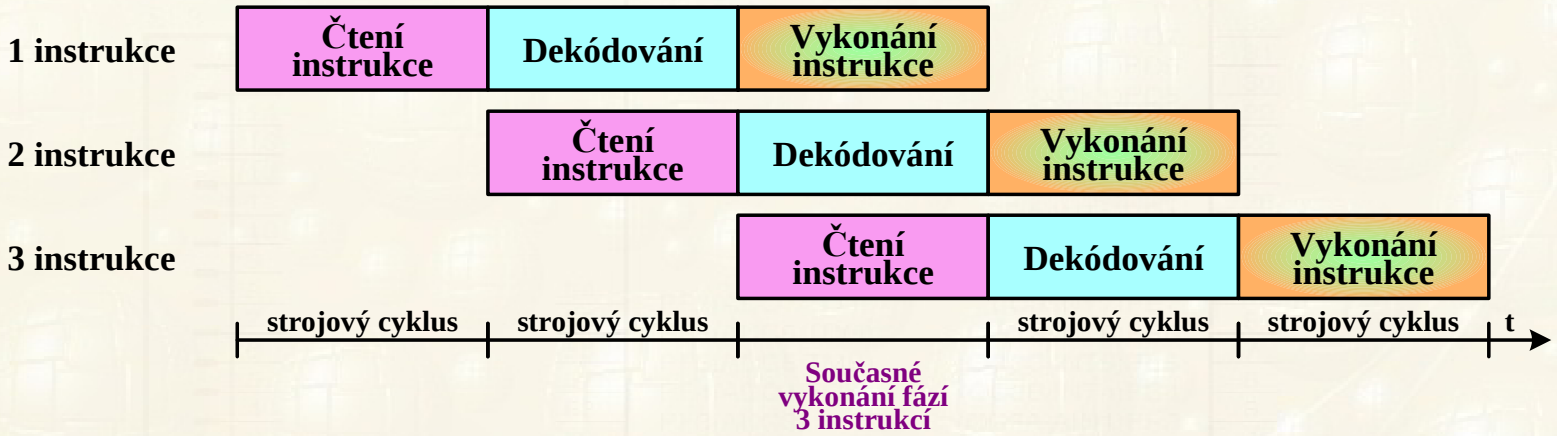
- Segmentovaná aritmetická jednotka nebo celý procesor má instrukce rozděleny na dvě nebo více částí.
- Výsledky fáze se ukládají do vyrovnávací paměti, z které si je v dalším strojovém cyklu přebírá ke zpracování další segment.
- Jsou-li **všechny segmenty naplněny**, pak každý strojový cyklus je **jedna instrukce dokončena**.
- Konfigurace se označuje „**pipeline**“ nebo „Princip sdílení času“.
- „superpipeline” počet fází >4. Pro počet fází > 3 se komplikuje obsluha operační paměti a větvení programu.
- U jednočipových (8-bitových) µP maximálně 2 fáze.
- Je-li v procesoru více stupňový „pipeline“ ⇒ co s načtenými instrukcemi, které nemají být vykonány (podmíněné větvení a návrat, nepodmíněný skok, atd.) ⇒ instrukce **NOP**, **zpožděné instrukce**, **podmíněně vykonávané instrukce**

ZVYŠOVÁNÍ VÝPOČETNÍHO VÝKONU PROCESORŮ

- Procesory AVR využívají 2 fázový pipeline. Čtení instrukce a její dekódování ⇒ Čtení operandů a vykonání instrukce

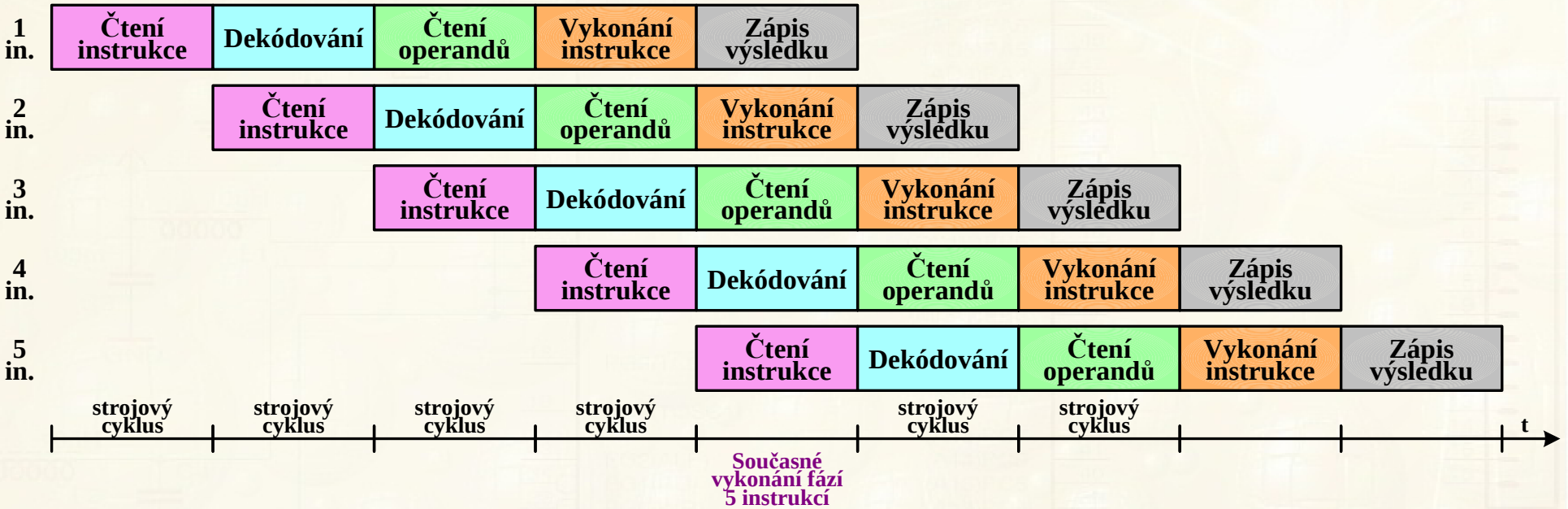


- Procesory Cortex-M3 používají 3-fázový pipeline pro vykonání instrukcí. Čtení instrukce (Fetch) ⇒ Dekódování instrukce ⇒ Čtení operandů a vykonání



ZVYŠOVÁNÍ VÝPOČETNÍHO VÝKONU PROCESORŮ

- Procesory ARM9 využívají 5 fázový pipeline

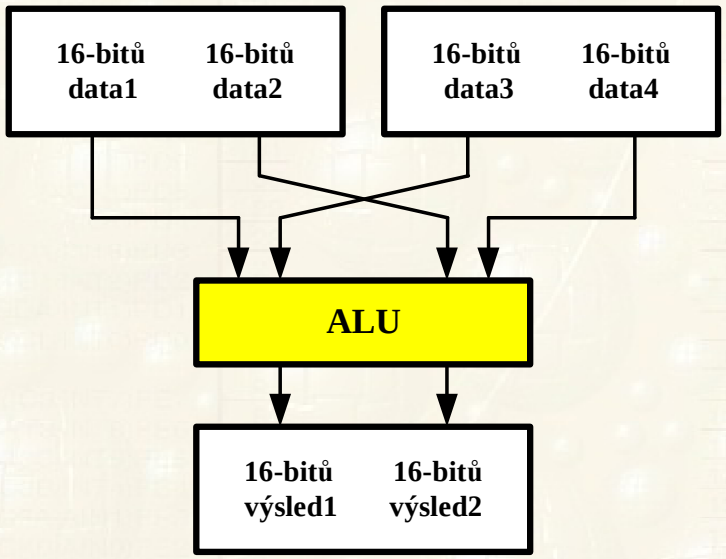


- U běžných signálových procesorů se pipeline pohybuje v rozmezí 3÷6
- U signálových procesorů (VLIW) s instrukčním cyklem (0,87ns až 3ns) jsou časově kritické přístupy i do paměťových prostorů, které se rozkládají do dalších fází.
  Např. TMS320C6416 (příprava adresy ⇒ přenos adresy po sběrnici ⇒ vybavení obsahu paměti ⇒přenos dat po sběrnici). Díky tomu se pipeline prodlužuje na 7 fázový.
  Výsledky některých vykonaných instrukcí nejsou ihned k dispozici ⇒ pipeline je skrytě 11 fázový.

SIMD (Single Instruction stream, Multiple Data stream) je podpůrný prostředek využívaný od 90 let. m.s. ke zvýšení výpočetního výkonu procesorů MMX (PC) a u signálových procesorů. SIMD je systém zpracovávající několik datových toků jedním programem.

- Operandy **jedné instrukce** vzniknou sloučením nezávislých dat do jednoho delšího datového slova
- Výkonná jednotka je rozdělena na dvě nebo více částí.
- Jedna instrukce provede stejnou operaci (např. sčítání, násobení) se dvěma nebo více nezávislými hodnotami.
- Efektivnost skládání slov ?
- Využití např. Viterbiho algoritmus, Zpracování radarových dat

výsled1=data1+data3
výsled2=data2+data4

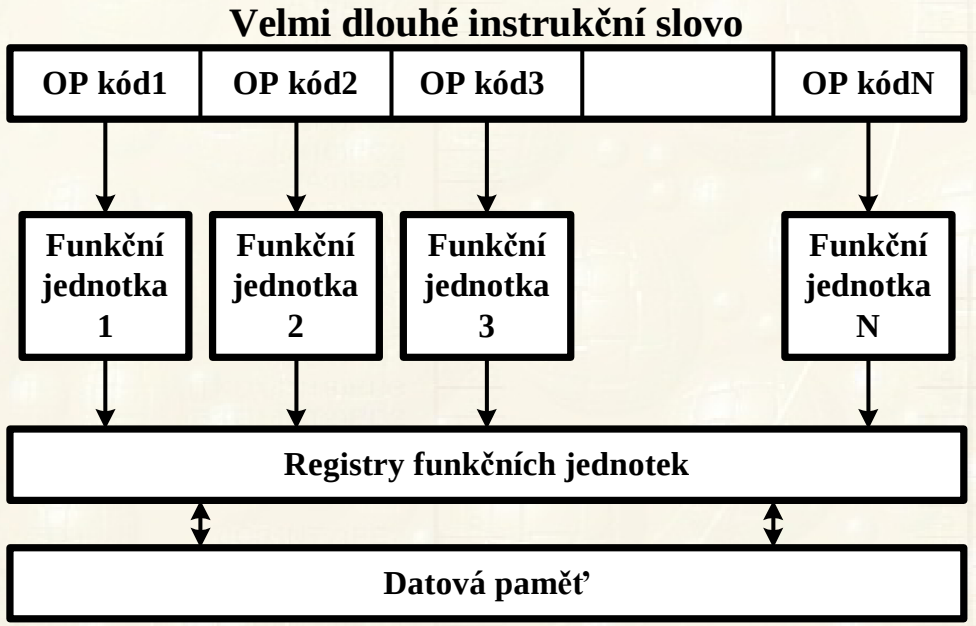


MIMD (Multiple Instruction stream, Multiple Data stream)

Obecný typ paralelního systému zpracovávajícího několik datových toků samostatnými jednotkami, z nichž každá realizuje samostatný program.

- Standardní multiprocesorové systémy
  - Složené z **několika procesorů**
  - Integrované do čipu (pole procesorů TMS320C8x, AD14060, atd.).

- **VLIW** (Very Large Instruction Word) a jeho modifikace. V procesoru je integrováno více **aritmetických jednotek** schopných zpracovat samostatně instrukci.



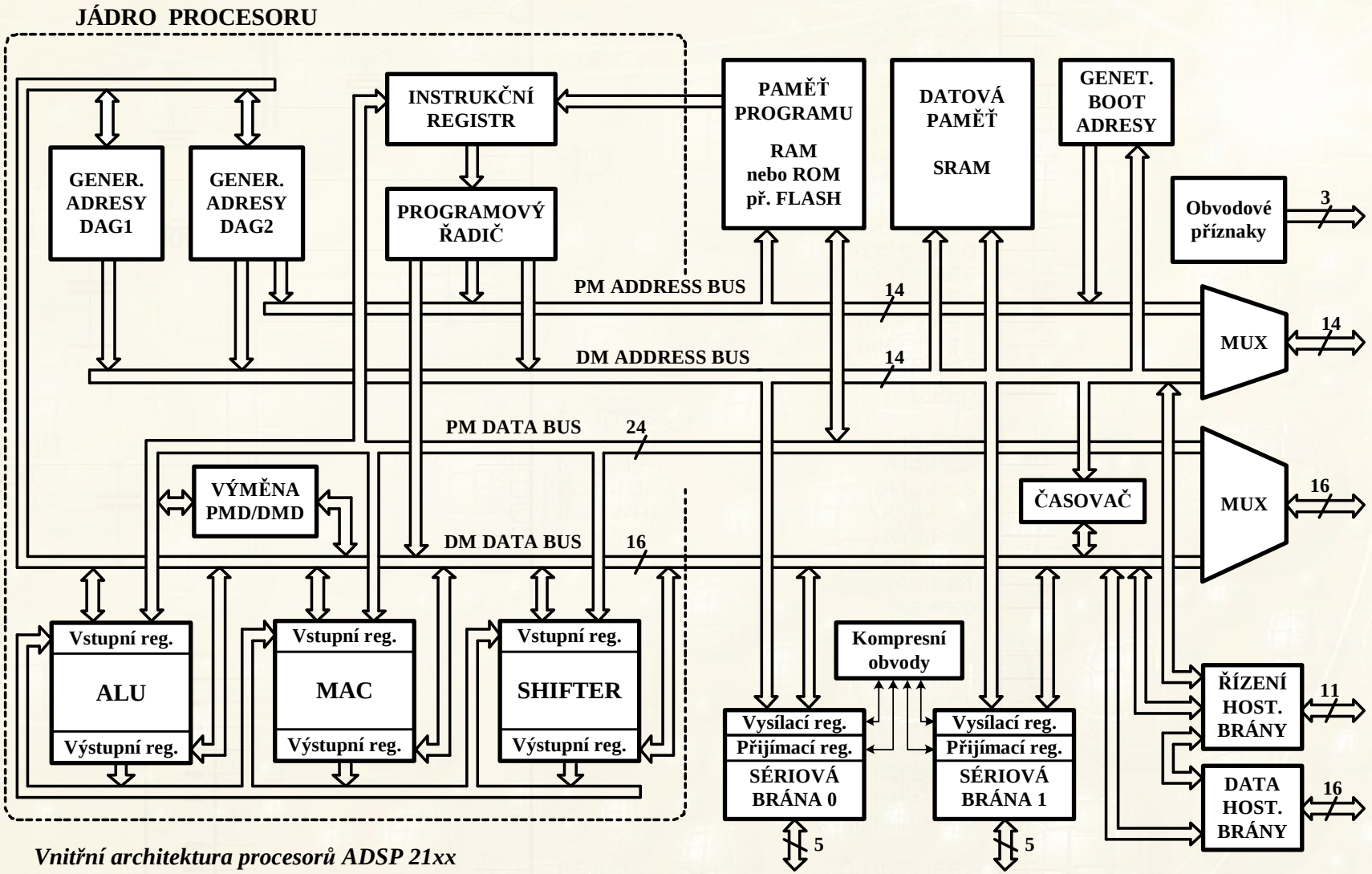
Signálové procesory

- 1979 – první signálový procesor I2920 (Intel) ⇒ malé kapacity pamětí, integrovaný A/D a D/A převodník, bez násobičky a možnosti připojení externích pamětí. Neujal se.
- Nový možný směr vývoje, na který navázaly firmy TI, Analog Device, NEC.
- Nyní používány pro číslicové zpracování signálu a obrazu, tak i pro obecné logické řízení a regulaci.
- **Architektura** a instrukční soubor optimalizován na rychlou realizaci **násobení, sčítání (akumulace) a posunu**

Konvoluce	$y_n = \frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N-1} x_i . x_{n+i}$	Filtrace	$y_n = \sum_{i=0}^{M} a_i . x_{n-i} - \sum_{i=1}^{L} b_i . y_{n-i}$
Diskrétní transformace	$X_k = \sum_{i=0}^{M-1} x_i . W^{ik}$	Korelace	$y_n = \sum_{i=0}^{M-1} h_i . x_{n-i}$

- **Realizace** součinu, součtu, adresování nových operandů a počitadla opakování v jednom strojovém cyklu.
- **Modifikovaná** harvardská struktura s odděleným programovým a datovým prostorem.
- **Současná manipulace** se dvěma nebo více operandy.
- Výpočetní výkon zvyšován technologií a zřetězením instrukcí **„pipeline“** princip „sdílení času“ (dnes 2 až 7 (skrytě 12)).
- V současné době opět nejvýkonnější procesory, ačkoliv pracují na kmitočtu 3x nižším, než procesory PC.

ARCHITEKTURA BĚŽNÉHO SIGNÁLOVÉHO PROCESORU



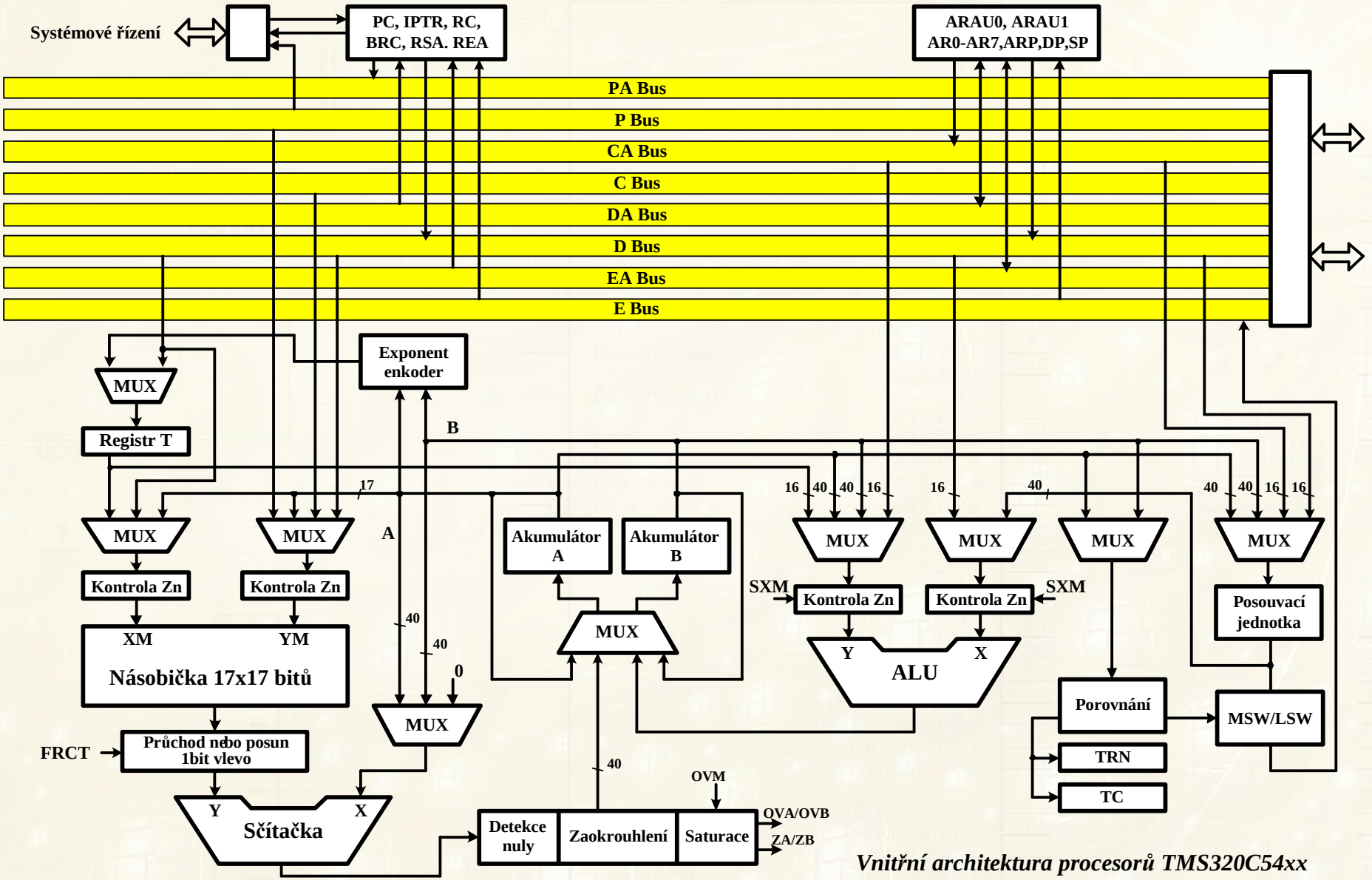
Vnitřní architektura procesorů ADSP 21xx

Adresovací módy generátorů adres signálových procesorů str 445 až 450

FILTR FIR - ALGEBRAICKÝ ASSEMBLER, KRUHOVÉ ADRESOVÁNÍ

```
I0=data;                          { Nastavení ukazatele na data}
L0=LENGTH(data);                  { Nastavení délky zásobníku}
M0=1; M1=0; M2=-1; M4=1;          { Nastavení modifikačních registrů}
I4=coef; L4= LENGTH(coef);        { Nastavení ukazatele a délky zásobníku}
CNTR=taps-1;                      { Nastavení počtu opakování cyklu}
MR=0, MX0=DM(I0,M0), MY0=PM(I4,M4); { Nulování střadače MR,
                                      načtení vzorku dat a konstanty}
DO sop UNTIL CE;                  { Spuštění cyklu po náveští sop}
sop: MR=MR+MX0*MY0(SS), MX0=DM(I0,M0), MY0=PM(I4,M4);
    { Násobení (se znaménky), sčítání a načtení nových dat a konstanty}
MR=MR+MX0*MY0(RND);               { Poslední součin, součet a zaokrouhlení}
IF MV SAT MR;                     { Test owerflow a případná saturace}
dm(ad_out)=MR1;                   { Uložení bitů 31÷16 MAC do D/A}
AX0=dm(ad_in);                    { Uložení nového vzorku vstup. signálu}
dm(I0,M0)=AX0;                    { Uložení nového vzorku do paměti a
                                    přesun ukazatele na nejstarší vzorek
                                    x(n-M+2)}
```

ARCHITEKTURA BĚŽNÉHO SIGNÁLOVÉHO PROCESORU

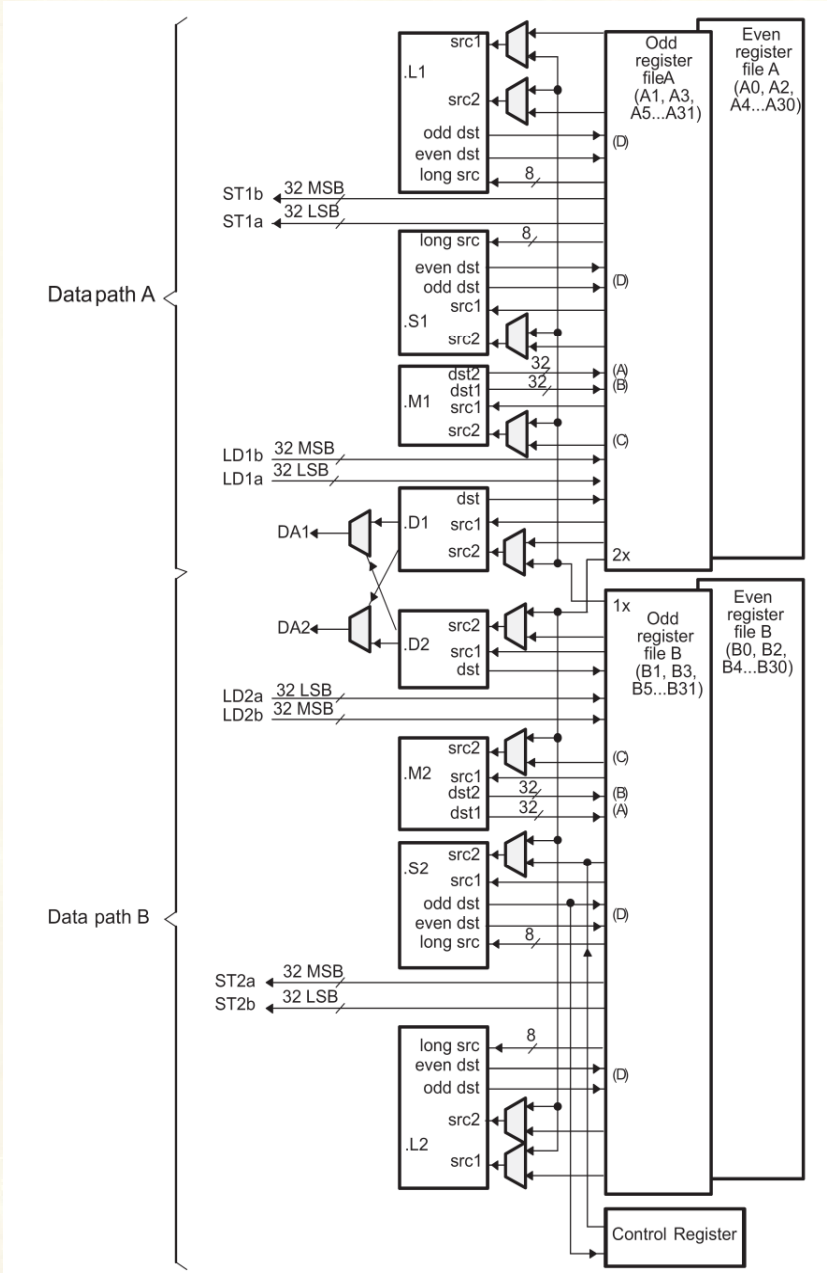


Vnitřní architektura procesorů TMS320C54xx

```
    STM #COEF+4, AR3          ; Nastavení ukazatele AR4 na koeficient B(M-1)
    STM # X+49, AR2           ; Nastavení ukazatele dat na nejstarší vzorek
    STM # -1,AR0              ; Ukazatele se budou zmenšovat o hodnotu 1
    STM # 50, BK              ; Nastavení délky kruhových zásobníků
    SSBX FRCT                 ; Zpracovávané hodnoty jsou ve formátu Fraction
                              ; Součin bude posunut o jednu pozici doleva
FIR:
    RPTZ A, #49               ; Čítač opakovaní nastaven na 50 cyklů
    MAC *AR2+0%,*AR3+0%,A     ; Násobení a sčítání s kruhovým adresováním
    STH A,*AR2                ; Uložení výsledku na pozici nejstaršího vzorku
    PORTW *AR2, PA0           ; Zápis výsledku do D/A převodníku
    BD FIR                    ; Zpožděný skok na začátek programu FIR
    PORTR PA1,*AR2+0%         ; Uložení nového vzorku a nastavení ukazatele
                              ; na nejstarší vzorek
COEF:
    .word B0,B1,B2,B3,B4, atd. ; Definice koeficientů X filtru
```

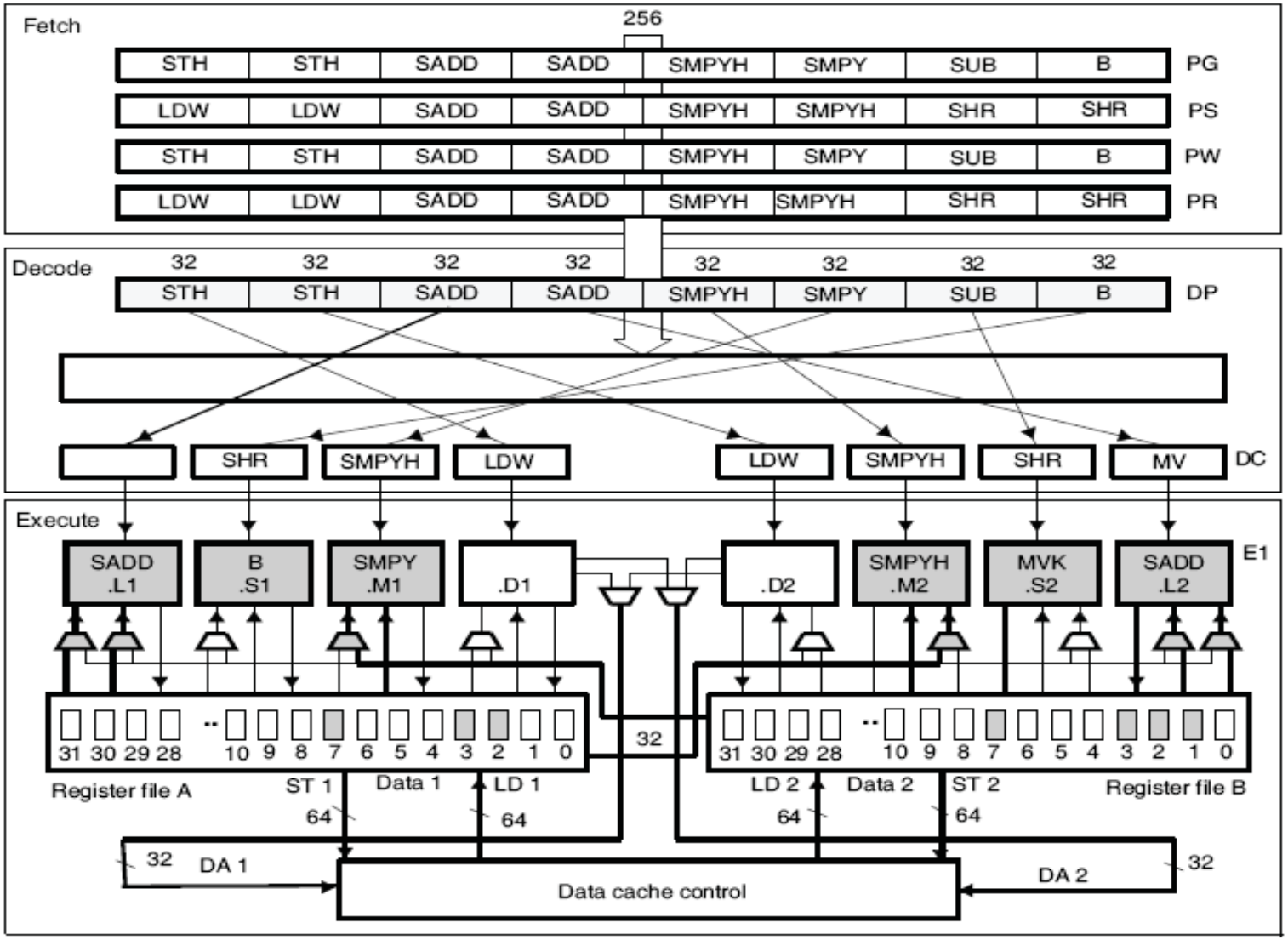
Signálové procesory se strukturou VLIW

- **Sdružená instrukce** u běžného signálového µP vyvolá současnou činnost MAC, ALU, Shifter, generátorů adres a AJ v oblasti čítače instrukcí.
- **VLIW µP** čtou 256 nebo 128 bitové instrukční slovo obsahující několik **instrukcí** určených pro jednotlivé aritmetické jednotky. Zpracování je paralelní nebo sekvenční.
- U TMS320C6xxx (TI, 1997) je to 8 32-bitových instrukcí určených pro dvě násobičky a šest dost podobných ALU, tím započal vývoj v oblasti
  - **Paralelní programování**
  - Programování s instrukcemi, jejichž výsledek je k dispozici až po několika strojových cyklech.



ZVYŠOVÁNÍ VÝPOČETNÍHO VÝKONU PROCESORŮ

- Procesory z řady TMS320C62xx a 64xx využívají 7 fázový pipeline a skrytě 11 fázový



[Zdroj: TMS320C64x/C64x+ DSP, CPU and Instruction Set, Reference Guide

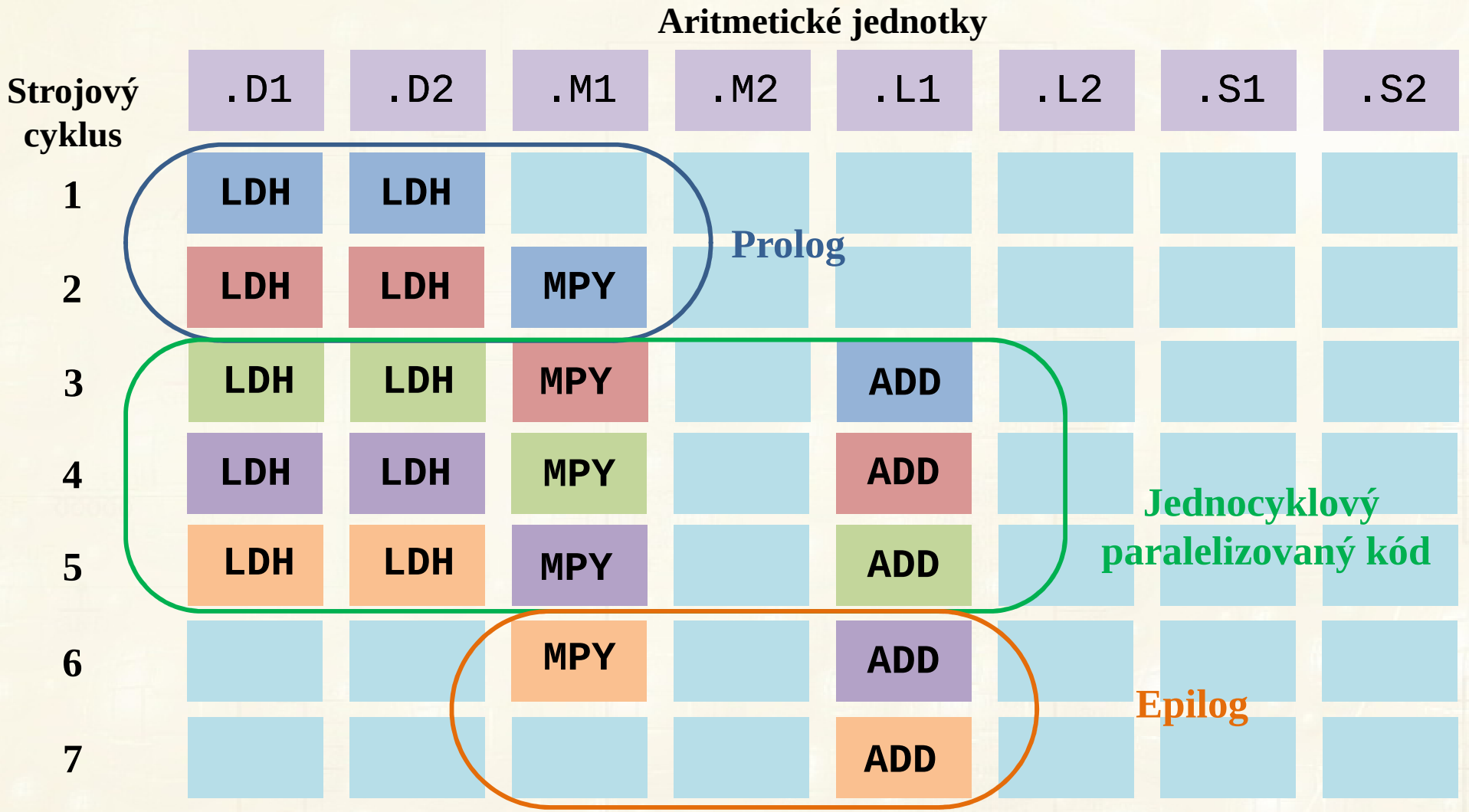
SEKVENČNÍ PROGRAM S ČÁSTEČNOU PARALELIZACÍ

Aritmetické jednotky

Strojový cyklus	.D1	.D2	.M1	.M2	.L1	.L2	.S1	.S2
1	LDH	LDH						
2			MPY					
3					ADD			
4	LDH	LDH						
5			MPY					
6					ADD			
7	LDH	LDH						
8			MPY					
9					ADD			

[Zdroj: TMS320C64x/C64x+ DSP, Teaching materials

POSTUPNÁ PARALELIZACE PROGRAMU – PIPELINING CODE



Paralelizace (pipeline instrukcí) vyžaduje k vykonání 1/2 strojových cyklů!

[Zdroj: TMS320C64x/C64x+ DSP, Teaching materials

Ukázka postupné paralelizace (tzv.Prolog) a výkonné fáze programu (filtru FIR) na procesoru se strukturou VLIW.

```
c0:       ldw .D1   *A4++,A5
 ||       ldw .D2   *B4++,B5

c1:       ldw .D1   *A4++,A5
 ||       ldw .D2   *B4++,B5
 || [B0]  sub .S2   B0,1,B0

c2_3_4:   ldw .D1   *A4++,A5
 ||       ldw .D2   *B4++,B5
 || [B0]  sub .S2   B0,1,B0
 || [B0]  B   .S1   loop
             .
             .
             .
```

```
c5_6:     ldw   .D1   *A4++,A5
 ||       ldw   .D2   *B4++,B5
 || [B0]  sub   .S2   B0,1,B0
 || [B0]  B     .S1   loop
 ||       mpy   .M1x  A5,B5,A6
 ||       mpyh  .M2x  A5,B5,B6
```

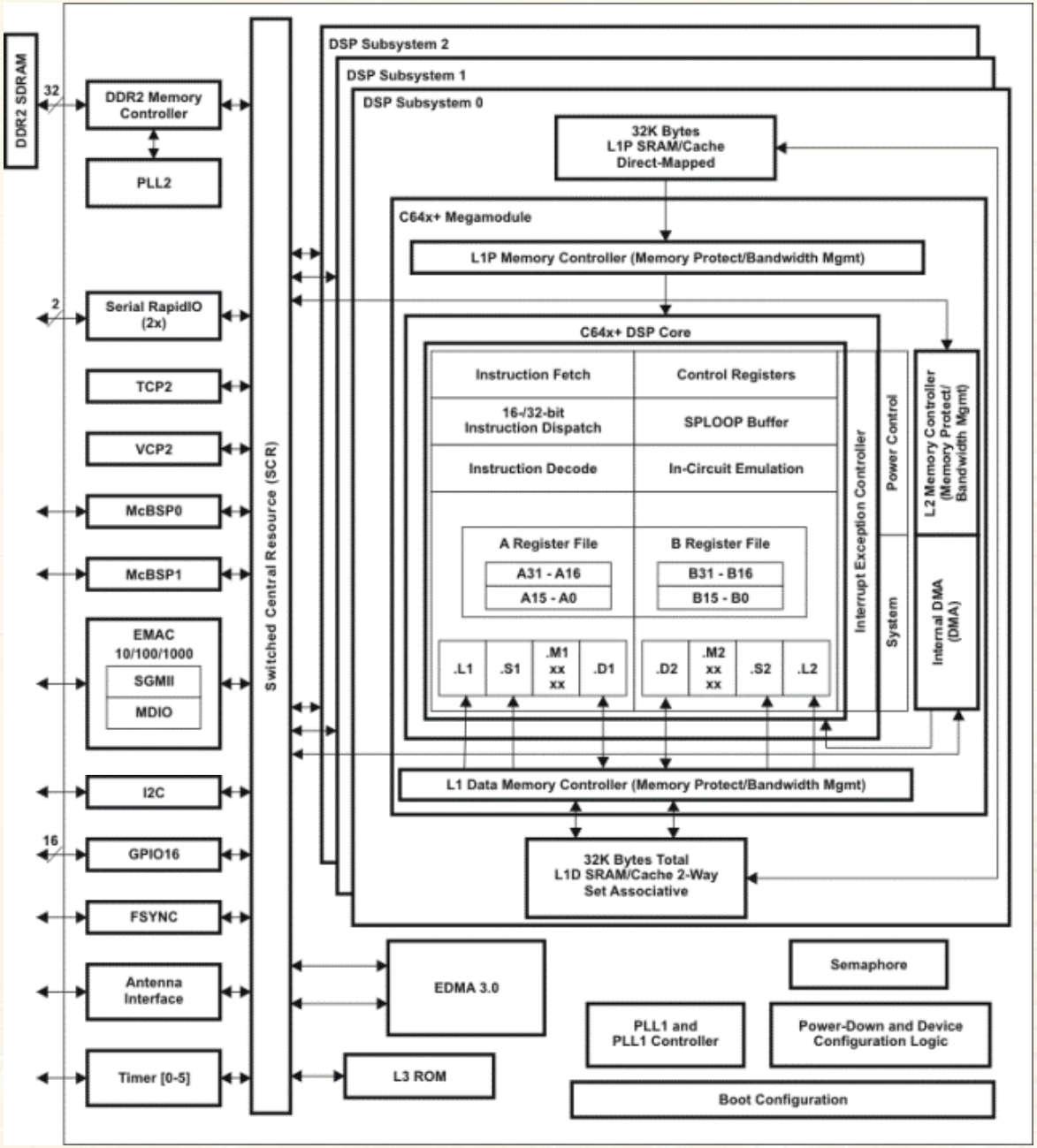
```
*** Single-Cycle Loop
loop:     ldw .D1   *A4++A5
 ||       ldw .D2   *B4++,B5
 || [B0]  sub .S2   B0,1,B0
 || [B0]  B     .S1   loop
 ||       mpy  .M1x  A5,B5,A6
 ||       mpyh.M2x  A5,B5,B6
 ||       add  .L1   A7,A6,A7
 ||       add  .L2   B7,B6,B7
```

[Zdroj: TMS320C64x/C64x+ DSP, Teaching Guide

VLIW SIGNÁLOVÉ MIKROPROCESORY S NĚKOLIKA JÁDRY

Donedávna nejvýkonnějším signálovým procesorem je procesor TMS 320C6474.

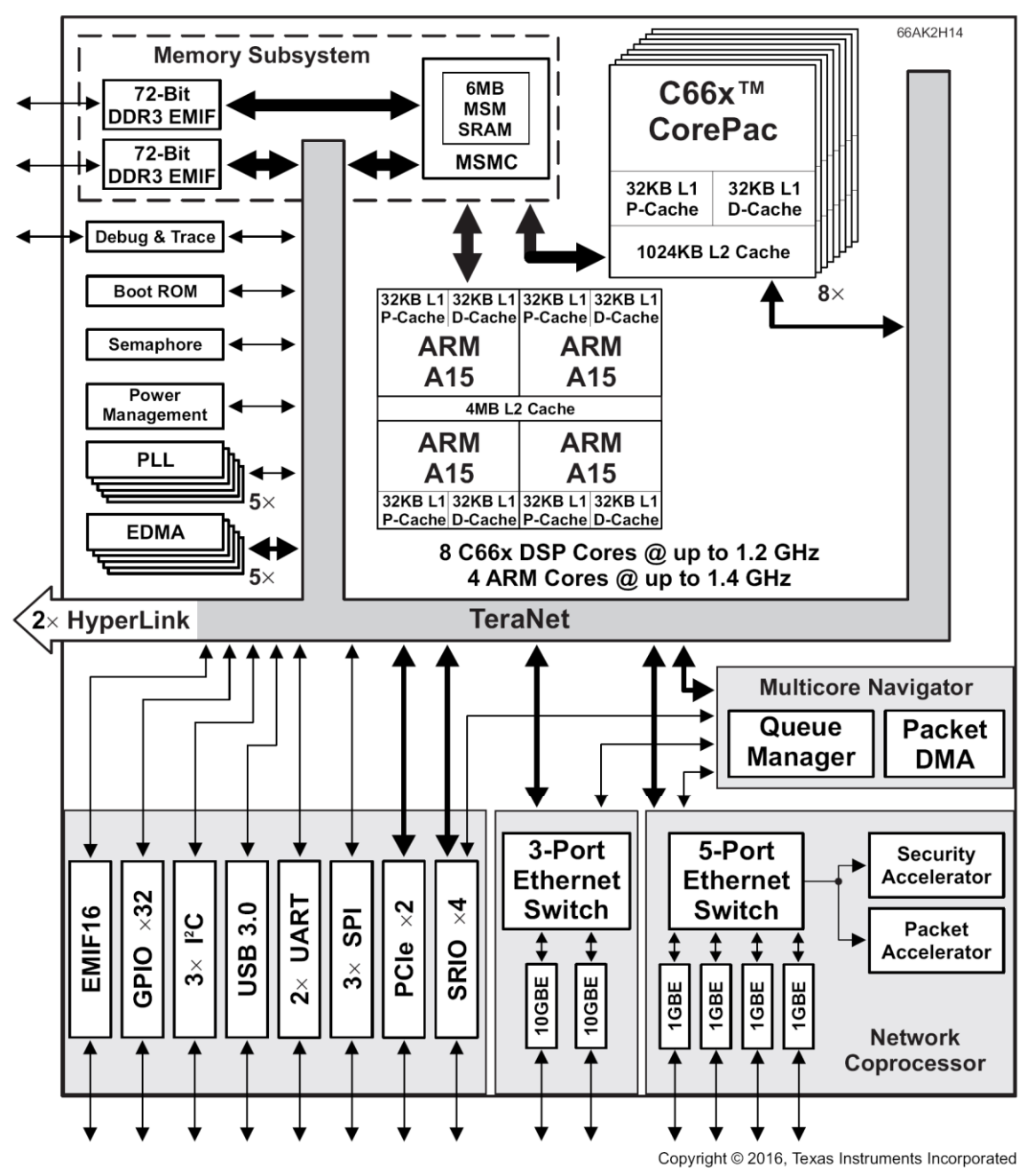
- Tři jádra VLIW řady 64xx
- Výkon 28400 MIPS/Core při 1,2 GHz
- Modifikované násobičky M1 a M2, které v jednom strojovém cyklu vypočtou jeden součin 32x32bitů, dva součiny 16x32, čtyři součiny 16x16 nebo 8x8 se sčítáním/odčítáním včetně jednoho komplexního násobení.
- Řada rozhraní jako I^2C, 100Mb/s McBSP0, kontrolér Ethernet a rozhraním pro DDR2, atd.



VLIW SIGNÁLOVÉ MIKROPROCESORY S NĚKOLIKA JÁDRY + ARM

Nyní nejvýkonnějším signálovým procesorem je procesor TMS 320C66x plus 4xARM

- 8 jader VLIW řady 66x
- Výkon 38400 MIPS/Core při 1,2 GHz
- Modifikované násobičky M1 a M2, které v jednom strojovém cyklu vypočtou jeden součin 32x32bitů, dva součiny 16x32, čtyři součiny 16x16 nebo 8x8 se sčítáním/odčítáním včetně jednoho komplexního násobení.
- Doba instrukce 0,87ns



Vývoj programů

VÝVOJ PROGRAMŮ – MOŽNOSTI ZÁPISU PROGRAMU

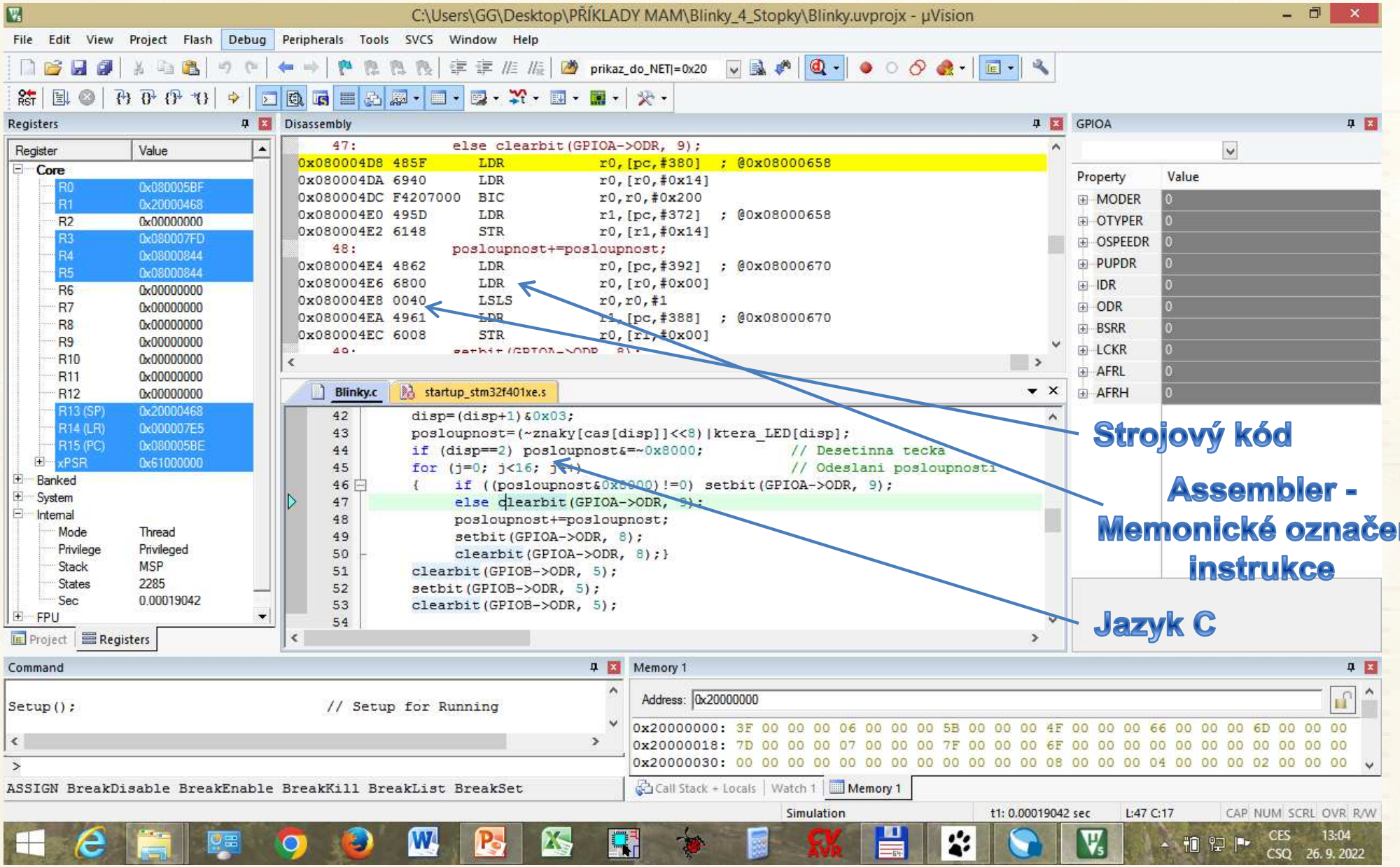
Použití daného programovacího jazyka závisí na

- Složitosti vyvíjené aplikace
- Architektuře a podpoře interních periferií vývojovým prostředím
- Na výkonu procesoru

Program pro mikropočítač můžeme vytvářet ve:

- **Strojovém kódu** – tj. v kódech instrukcí daného procesoru
- **Jazyce symbolických adres** – tj. v mnemonickém zápisu instrukcí daného procesoru
- **Jazyce symbolických adres s aritmetickou knihovnou**
- **Jazyce C**
- **Vyšších jazycích**
  - **Kompilované**
  - **Interpretované**

VÝVOJ PROGRAMŮ – MOŽNOSTI ZÁPISU PROGRAMU



VÝVOJ PROGRAMŮ – MOŽNOSTI ZÁPISU PROGRAMU

- **Strojový kód** – dnes se nepoužívá. **Vložení instrukce** vede k **přeadresování návěští a podprogramů**.
  - **Umožňuje plně využít možností instrukčního souboru.**
  - Realizace je **nesmírně zdlouhavá,** možnost **řady chyb**.
  - Se strojovým kódem se setkáme hlavně při **podezření na chybu překladače** nebo jinak těžko vysvětlitelnou chybu.
- **Jazyk symbolických adres (JSA)** – zápis programu v **mnemonických označeních jednotlivých** instrukcí s **odkazy** na **symbolické adresy** (návěští), **konstanty**, **proměnné**, atd.
  - Používá se - **knihovní funkce jazyka C** a **ovladače**.
  - K části programu - **neefektivně realizovatelného** ve vyšším jazyce, **k obsluze nové periferie nepodporované vývojovým prostředím.**
  - V případech nezbytné **kontroly časového zpoždění.**
  - **Umožňuje nejefektivnější řešení dané úlohy v závislosti svých instrukcí, nápaditosti a znalostí programátora.**

VÝVOJ PROGRAMŮ – MOŽNOSTI ZÁPISU PROGRAMU

- **Jazyk symbolických adres s aritmetickou knihovnou**
  - Využíval se pro složitější operace v době, kdy nebyly k dispozici překladače vyššího jazyka pro mikropočítače.
  - Knihovna obsahovala **podprogramy** s definovaným **vstupem a výstupem** operandů v jednotlivých registrech.
  - **Stejně jsou řešeny funkce a operace ve vyšších jazycích. Operandy jsou uloženy do registrů a následně je zavolán příslušný podprogram.**
- **Jazyk C** – je využíván k realizaci **složitých programů** pro jednočipové, signálové a částečně i PC procesory.
  - Zdrojový kód je **přenositelný** i na jiné typy procesorů. Pro každý procesor **musí být přeložen do strojového kódu**.
  - Vývoj je **podstatně rychlejší a bezpečnější,** než v JSA. Nelze v něm dosáhnout **efektivní realizace** některých operací podporovaných **instrukčním souborem procesoru. Neumožňuje** realizaci **riskantních operací** jako v JSA.

- Je-li napsán dobře, je délka strojového kódu větší, ale **srovnatelná** s velikostí kódu JSA.
- Obtížně realizovatelné operace v jazyce C nebo neefektivně kompilované mohou být do jazyka C vloženy ve formě assembleru (JSA). Pozor na případný **přenos programu na jiný procesor** (instrukční soubor, Big a Little endian).

Přenositelnost jazyka C

- Program bez odkazů na konkrétní registry nebo podprogramy v assembleru ⇒ bezproblémová kompilace na jiný procesor.
- Odkazy na registry nebo assembler musí být předělány pro nový typ procesoru. Po překladu zdrojového kódu bude strojový kód pro nový procesor funkční.
- Odlišná architektura nového procesoru může vést na **strojový kód nevyužívající jeho efektivnější instrukce.**
- Příklad: y=x+x nebo y=2*x nebo y=x<<1. Překladač nemusí přeložit přesně Váš zápis.

Překladač jazyka C nekontroluje, zda byla nadefinovaná špatná velikost pole, odkaz na nedefinovaný prvek pole nebo na nevyužívané paměťové místo, atd. Příklad dvou zápisů

unsigned char pole[15];

pole[20]=25; - identifikován jako chybný

alfa=26; pole[alfa-7]=36; - není a nemůže být označen jako chybný

- Proto někdy bývá označován jako jazyk **nebezpečný**.

VÝVOJ PROGRAMŮ – MOŽNOSTI ZÁPISU PROGRAMU

- **Vyšší a interpretované jazyky** – univerzálně nebo aplikačně orientované jazyky umožňující realizaci úlohy nebo problému.

- **Kompilované** – C, C++, Pascal, Basic, atd., ⇒ výsledkem je **strojový kód** naprogramovaný **do paměti s paralelním přístupem.** Zpracování je rychlejší, než jazyk interpretovaný.

- **Interpretované** – BASIC (zdrojový zápis), Java, PLC, (přeložené do **mezikódu** (**nikoliv strojového**)). Kompilovaný **aplikační program (interpret)** interpretuje **uživatelský program** na platformě daného procesoru. ⇒ Interpretovaný program je pomalejší a může být uložen v paměti RAM, EEPROM, sériové Flash nebo zálohované RAM. **Program nemusí** být uložen v paměti s paralelním přístupem ⇒ postupně čten a realizován interpretem.
  - Využití těchto jazyků má kořeny v multiplatformní přenositelnosti (Java)

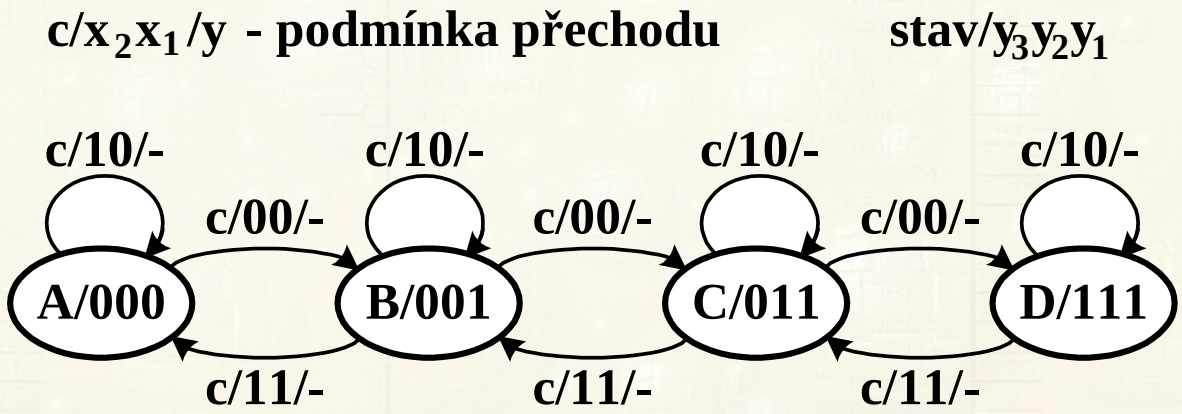
VÝVOJ PROGRAMŮ – PROGRAMOVACÍ METODY

- **Dělení programů podle použití a způsobu zpracování**
  - **Jednoprůchodové**
  - **Víceprůchodové**
  - **Rekurzivní** – nevhodný pro procesory s omezenou nebo malou kapacitou zásobníku.
- **Programy pro PC**
  - **Jednovláknové**
  - **Vícevláknové**
- **Dělení podle reakce a rychlosti zpracování události**
  - **Programování v reálném čase** – ČZS. Jednočipové procesory – jednotky kHz. Signálové procesory - desítky kHz. VLIV - až jednotky MHz. Vyšší pásmo – běžné a DSP programovatelné obvody – desítky a stovky MHz.
  - **Událostní programování**

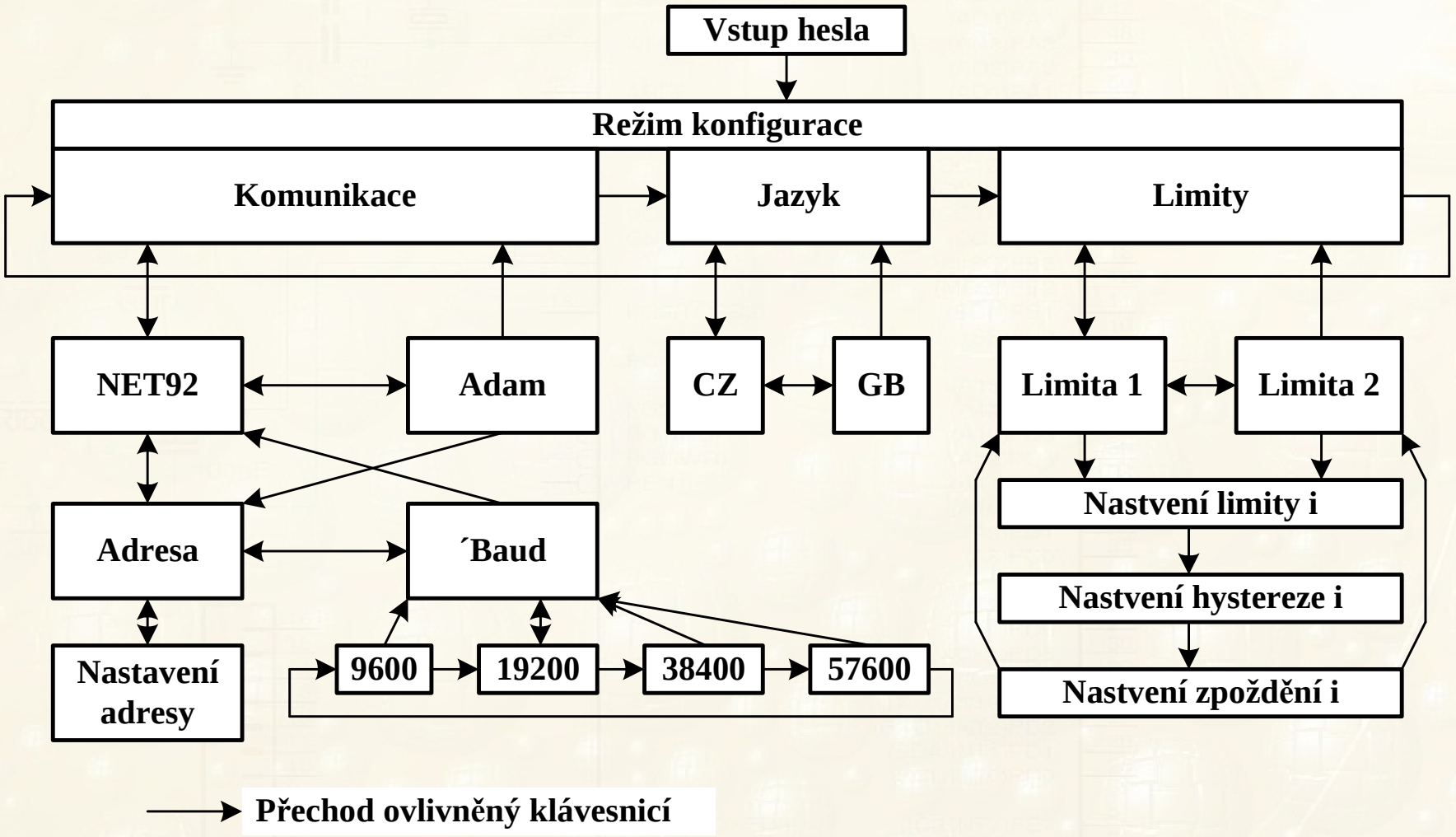
Rozdíl mezi událostním a programování v reálném čase?

❖ Dělení programů podle podobnosti

- **Stavové programování** – chování podobné **stavovému automatu.** Možné využít místo **RTOS** k realizaci dvou a více procesů, které běží současně (měření a řízení technologického procesu, měření a obsluha stromového konfiguračního menu, atd., příjem a zpracování komunikačních protokolů s proměnnou délkou).



STAVOVÉ PROGRAMOVÁNÍ – PŘÍKLAD KONFIGURAČNÍHO MENU



STAVOVÉ PROGRAMOVÁNÍ - PŘÍKLAD

```
//Převod hodnoty Tx_data na posloupnost bitů sériového přenosu UART
If (Data_platna == true)
{     vysli(0);          // vyslání start bitu
      for (i=0; i<8; i++)
      {     if(Tx_data&0x01)!=0) vysli(1); else vysli(0);
            Tx_data=Tx_data>>1;}
      vysli(1); }      // vyslání stop bitu

//Realizace pomocí stavového řešení (řešení nejsou identická)
switch(Tx_State_var)
{
      CASE 0:          // čekání na nová data
      if (Data_platna == true) Tx_State_var = 1; break;
      CASE 1:          // vyslání start bitu, nulování počitadla
      vysli(0); Tx_State_var = 2; pocitadlo = 0; break;
      CASE 2:          // vysílání bitů 0-7
      if ((Tx_data & (1<<pocitadlo))) == 0) vysli(0);
      else vysli(1); pocitadlo++;
      if (pocitadlo == 8) Tx_State_var = 3; break;
      CASE 3:          // vyslání stopbitu
      vysli(1); Tx_State_var = 0
}
```

VÝVOJ PROGRAMŮ – MODULÁRNÍ PROGRAMOVÁNÍ

- Jednodušší a přehlednější vytváření rozsáhlých programů
- Nezbytné v případě **týmového vytváření programu**.
- Snazší ladění a úpravy podprogramů, možnost jejich násobného použití a snadného začlenění do programových knihoven.
- Důležité je správné definování vstupů a výstupů daného modulu (podprogramu), předávání parametrů mezi moduly.
- Odladěné a ověřené moduly lze spojit do výsledného i velmi rozsáhlého programu nebo začlenit do knihoven.
- Na stejném principu se vytváří programy v jazyce C, kde proměnné jsou z datové paměti přeneseny do registrů a následně jsou volány standardní knihovní moduly (podprogramy).
- Část parametrů se může předávat v registrech a zbývající parametry se přenáší přes zásobník nebo paměťové umístění.
- Při modulární tvorbě programu jsou větší nároky na **velikost zásobníku** ⇒ postupně je voláno **velké množství podprogramů**. Je-li zásobník součástí vnitřní paměti procesoru (omezená kapacita), může nás tento postup dostat do **potíží.**