

Paralelni računarski sistemi

SIMD

SIMD

✱ Vektorska izračunavanja mogu biti obavljena i pomoću SIMD računara:

- SIMD računari koriste prostorni paralelizam kod obavljanja vektorskih instrukcija
- postoji više identičnih procesnih elemenata (PE) koji jednovremeno izvršavaju istu instrukciju nad različitim elementima nekog polja.

✱ SIMD računar je sinhrono polje PE-ova čijim radom upravlja upravljačka jedinica (CU – control unit)

- u jednom trenutku svi PE-ovi obavljaju jednu instrukciju nad različitim skupom ulaznih podataka
 - SIMD računarom se postiže paralelizam u obradi podataka, a ne u izvršenju instrukcija
 - SIMD se specijalno projektuje za obavljanje vektorskih izračunavanja – mašine specijalne namene koje se dodaju host računaru kao akceleratori za vektorska izračunavanja

SIMD

* Javljaju se u dve osnovne arhitekturne konfiguracije:

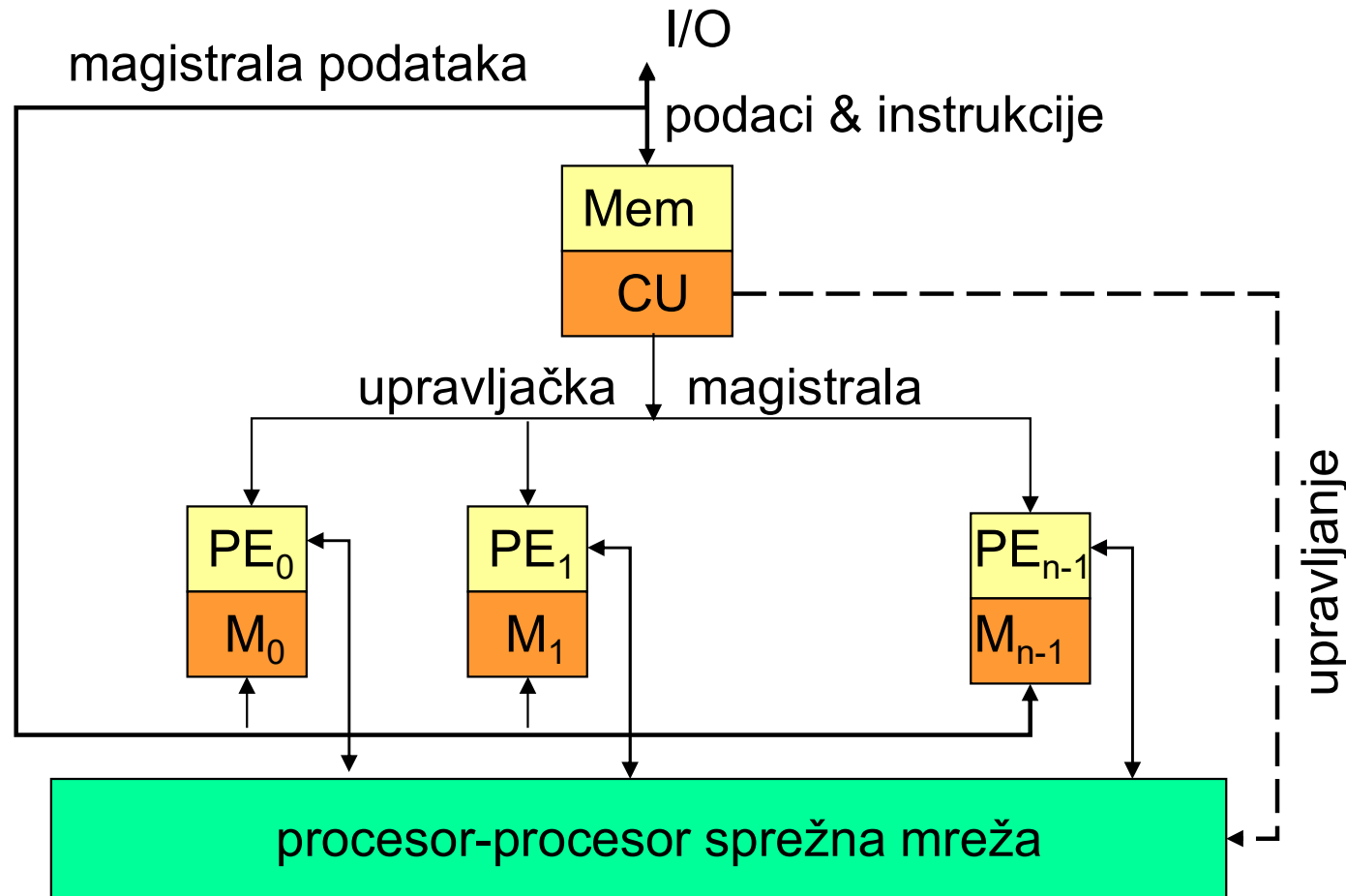
1. Procesorska polja – koriste RAM memorije
2. Asocijativni procesori – koriste sadržajno adresibilne (asocijativne) memorije.

Procesorska polja

* Dve varijante:

- sa distribuiranom memorijom
- sa zajedničkom (deljivom) memorijom

Procesorska polja sa distribuiranom memorijom



Procesorska polja sa distribuiranom memorijom

* $n=2^m$ sinhronih PE-ova čijim radom upravlja CU

- PE je aritmetičko-logička jedinica sa pridruženim radnim registrima i lokalnom memorijom za smeštanje distribuiranih podataka
- memorija CU služi za pamćenje programa i skalarnih podataka
 - sistemski i korisnički programi se izvršavaju pod kontrolom CU
 - korisnički programi se pune u CU iz hosta
 - CU dekodira instrukcije i određuje gde se izvršavaju:
 - skalarne instrukcije i instrukcije upravljačkog tipa izvršavaju se u CU
 - vektorske instrukcije se distribuiraju svim PE-ovima preko upravljačke magistrale
 - vektorski operandi se distribuiraju u lokalne memorije PE-ova preko magistrale za podatke

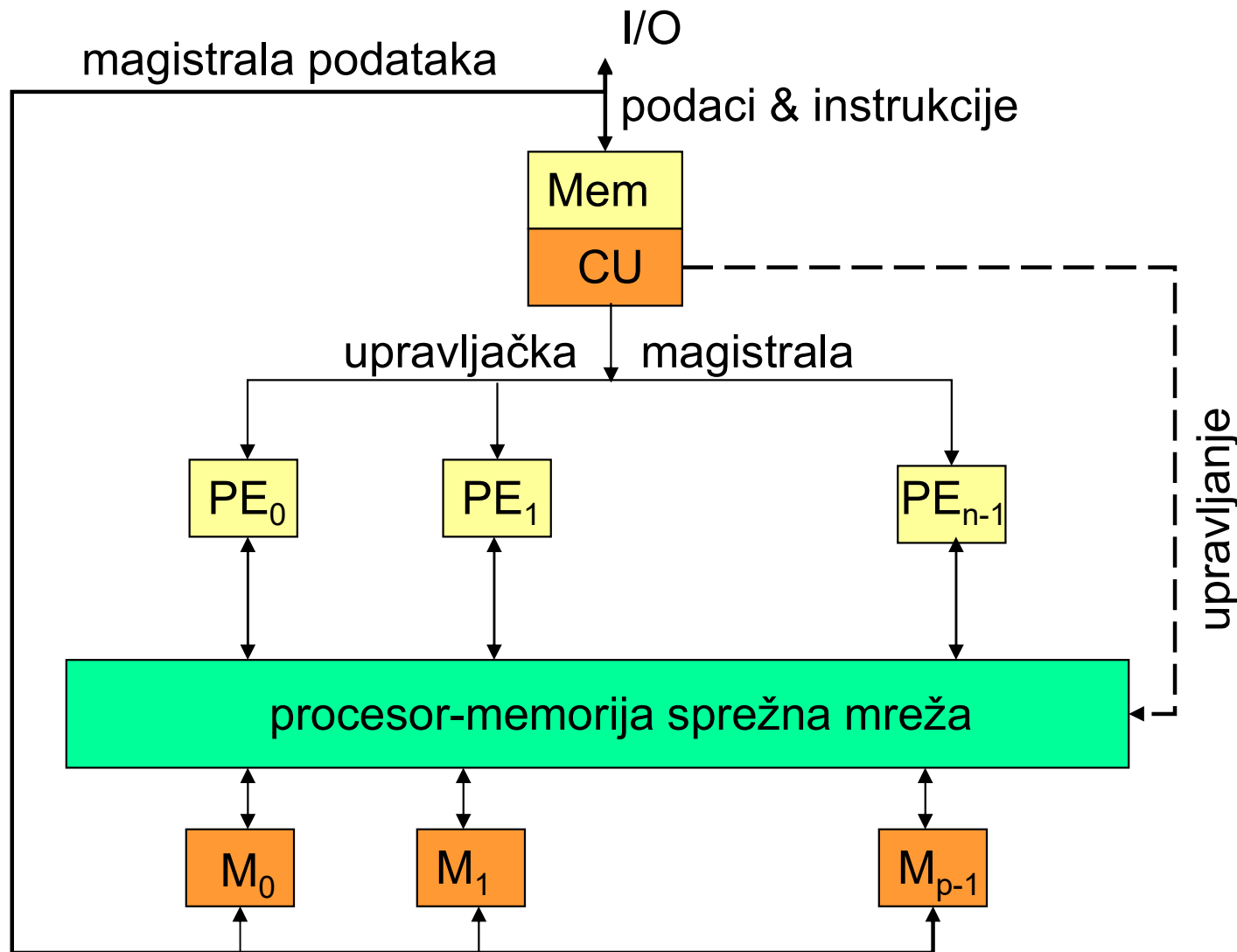
Procesorska polja sa distribuiranom memorijom

- Za upravljanje statusom PE koristi se maskiranje (pasiva/aktivan)
- Razmena podataka izmedju PE-ova ostvaruje se preko sprežne mreže
 - radom sprežne mreže upravlja CU preko instrukcija za rutiranje

*** Procesorsko polje je spregnuto sa host računarom preko CU.**

- Host upravlja radom celog sistema
- F-ja hosta:
 - U/I aktivnosti
 - kompajliranje programa
 - loadovanje programa u CU
 - upravljanje resursima

Procesorska polja sa deljivom memorijom



Procesorska polja sa deljivom memorijom

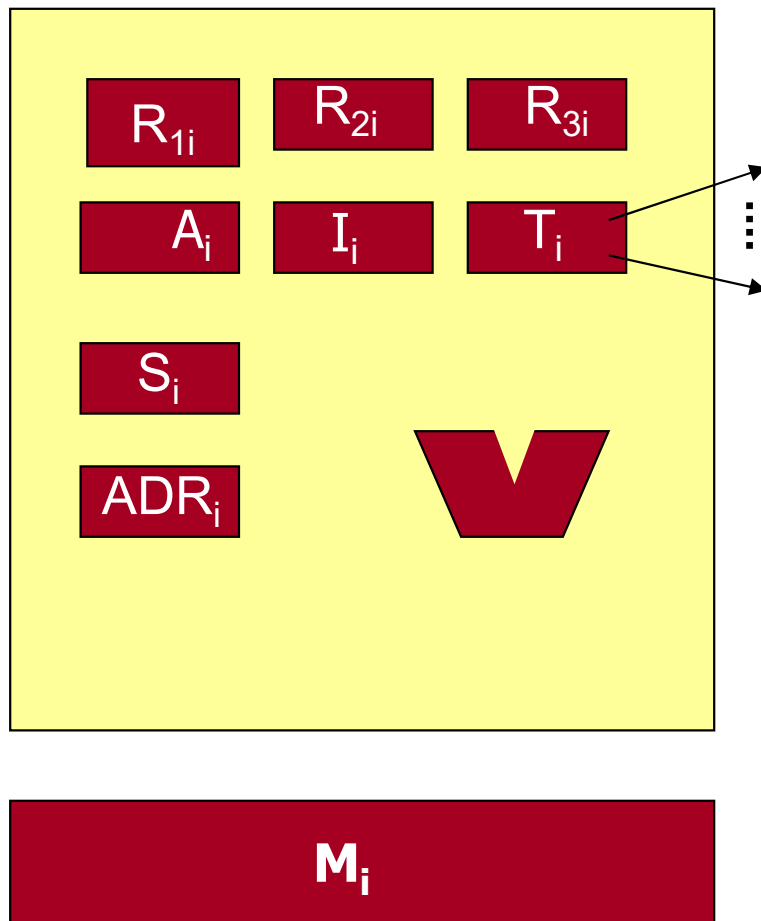
- * Postoji $n=2^m$ PE-ova i p memorijskih modula (obično su n i p uzajamno prosti)
- * Lokalne memorije su zamenjene paralelnim memorijskim modulima kojima mogu pristupati svi PE-ovi preko sprežne mreže
 - f-ja sprežne mreže je ostvarivanje veze izmedju PE i memorijskog modula za što veći broj parova procesor-memorija bez konflikata.

Procesorska polja

* Većina procesorskih polja je sa distribuiranom memorijom

- ILLIAC IV – 64 PE
- MasPar MP-1 od 1024 do 16384 PE-ova (32 PE na čipu)
- Connection Machine CM-2 64K 1-bitnih PE-ova (16 PE na čipu)
- DAP610 4K PE (64 PE na čipu)
- BSP – 16 PE i 17 memorijskih modula (deljiva memorija)

Izgled PE sa distribuiranom memorijom



- * R_{1i}, R_{2i}, R_{3i} – radni registri
- * A_i – adresni registar
- * I_i – indeksni registar
 - (za adresiranje lokalne memorije zajedno sa A_i)
- * T_i – registar za komunikaciju spregnut sa drugim T registrima preko sprežne mreže
- * S_i – statusni registar (0 Pe pasivan/ 1 PE aktivan)
- * ADR_i – m-bitna adresa PE-a

Maskiranje PE

* Svaka maska deli skup PE-ova na

- podskup aktivnih
- podskup pasivnih

* Nekim načinima maskiranja moguće je maskirati proizvoljne podskupove PE.

- Direktno maskiranje (ILLIAC IV)

- omogućava maskiranje proizvoljnog podskupa
- sadržaj registra maske određuje kompilator nakon prevodjenja svake instrukcije
- CU emituje sadržaj vektora maske zajedno sa svakom instrukcijom

Maskiranje PE

* maskiranje pomoću adrese PE

- $n=2^m$ PE, m-bitna maska
- svaka pozicija u maski može imati vrednost 0,1,X
- aktivni su oni PE čija se adresa poklapa sa maskom
- PRIMER: $n=8$ PE, maska 1X0 \Rightarrow 110 i 100, aktivni
- nije moguće maskirati proizvoljni podskup PE

* Maskiranje podacima – dinamičko maskiranje

- maske predstavljaju implicitni rezultat naredbe uslovnog grananja u zavisnosti od podatka koji je lokalni za PE
- Kada se naredba uslovnog grananja emituje od strane CU, svaki PE je obavlja nad različitim podacima, pa rezultat može biti različit u svakom PE.
 - maske se dobijaju naredbom WHERE oblika
 - where (uslov) do niz_nar_A elsewhere niz_naredbi_B
 - svaki PE postavlja svoj interni flag na 0 ili 1
 - emituje se niz_naredbi_A
 - komplementira se flag
 - emituje se niz_naredbi_B

* maskiranje po podacima se može koristiti u kombinaciji sa drugim načinima maskiranja

Primer

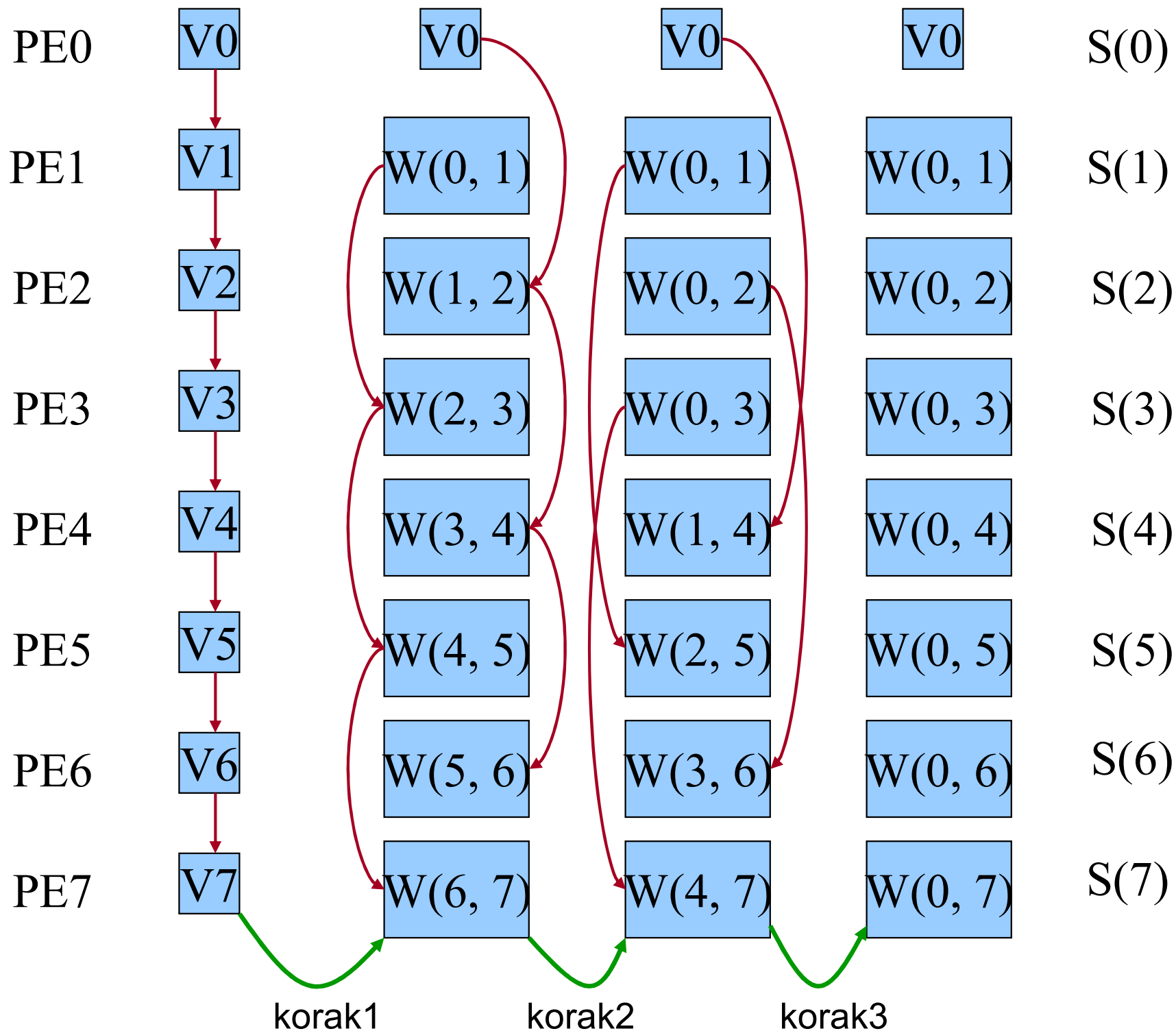
- * Naći sve parcijalne sume $S(k)$ prvih k komponenti vektora $V=[V_i]_{n \times 1}$, za svako $k=0,1,\dots,n-1$.

$$S(k) = \sum_{i=0}^k V_i, \quad k = 0,1,\dots,n-1$$

- * Izračunavanje je moguće obaviti u $\log_2 n$ koraka ako postoji n PE-ova
 - Jedan korak podrazumeva razmenu podataka i izračunavanje (sabiranje)

Primer – nast.

- * $n=8$, naći $S(0), \dots, S(7)$
 - * Inicijalno u lok. memoriji svakog PE se nalazi po jedan element vektora
1. **Korak:** $PE_i \rightarrow PE_{i+1}$, za $i=0,1,\dots,6$ (PE7 maskiran)
 $W_i := V_i + V_{i+1}$ (PE0 maskiran)
 2. **Korak:** $PE_i \rightarrow PE_{i+2}$ za $i=0, 1, \dots, 5$ (PE6, PE7 maskirani)
 $W_i := W_i + W_{i-2}$ za $i=2, \dots, 7$ (PE0, PE1 maskirani)
 3. **Korak:** $PE_i \rightarrow PE_{i+4}$, za $i=0,1,2,3$ (PE4 – PE7 maskirani) V_i
 $W_i := W_i + W_{i-4}$ za $i=4, \dots, 7$ (PE0- PE3 maskirani)



SIMD

Sprežne mreže

Sprežne mreže

* Služe za povezivanje

- PE i PE
- PE i memorijskih modula

* Statičke SM – veze izmednju PE su fiksne i ne mogu se menjati u toku izvršenja programa

* Dinamičke SM – veze izmedju PE-ova nisu striktno dodeljene, već se mogu menjati u toku rada postavljenjem aktivnih mrežnih komponenti (komutacioni elementi)

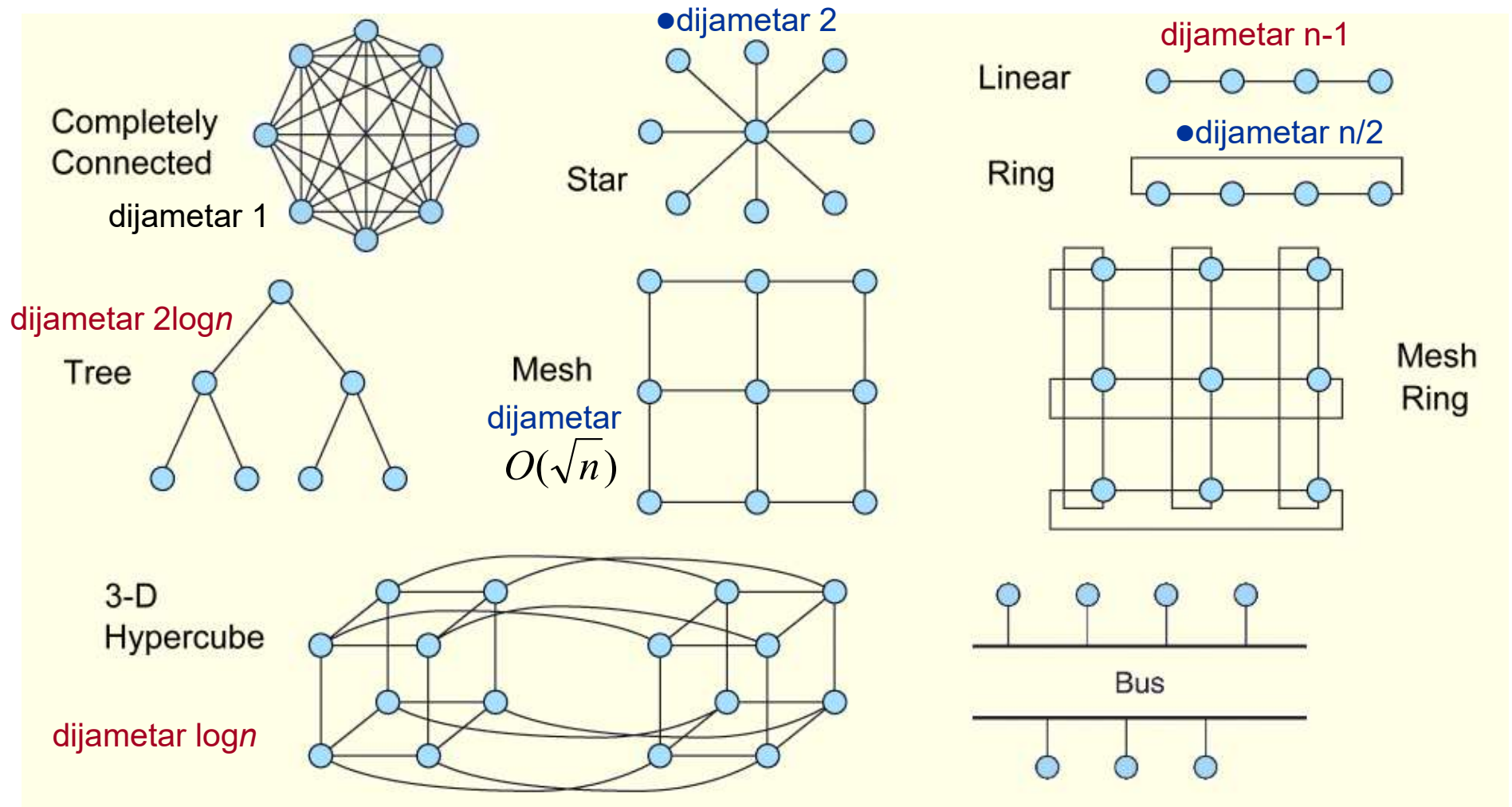
- jednostepene
- višestepene

Parametri SM

- * Dijametar SM – maksimalno minimalno rastojanje izmedju dva čvora u mreži
- * proširljivost – dali se čvorovi mogu dodavati?
- * Redundantnost – koliko puteva postoji izmedju svakog para čvorova
- * rutiranje – koliko je komplikovano
- * propusnost – koliko podataka u jedinici vremena
- * latentnost – koliko je vremena potrebno da se podatak prenese od čvora do čvora

Statičke SM

- * Jednodimenzionalne (linearne)
- * dvodimenzionalne
- * trodimenzionalne



Statičke SM

* Linearne

- dijametar $n-1$

* Ring

- dijametar $n/2$

* Zvezda (star)

- dijametar 2

* Rešetka (mesh)

- dijametar $O(\sqrt{n})$

* Stablo

- dijametar $2\log n$

* potpuno povezana

- dijametar 1

* Hiperkub

- dijametar $\log n$

Statičke mreže

Linearno polje (1D polje)

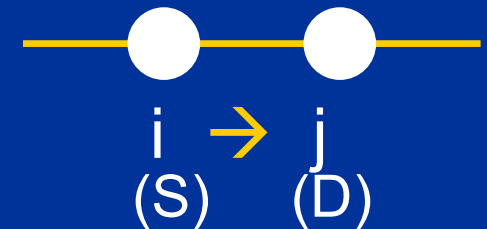


Br. čvorova = N

Dijametar = $N-1$

Rutiranje - samorutirajuće

U procesu komunikacije svaki čvor zna kome da pošalje primljenu poruku



čvor i poredi svoj ID sa odredišnim ID

if dest.ID $>$, pošalji \rightarrow

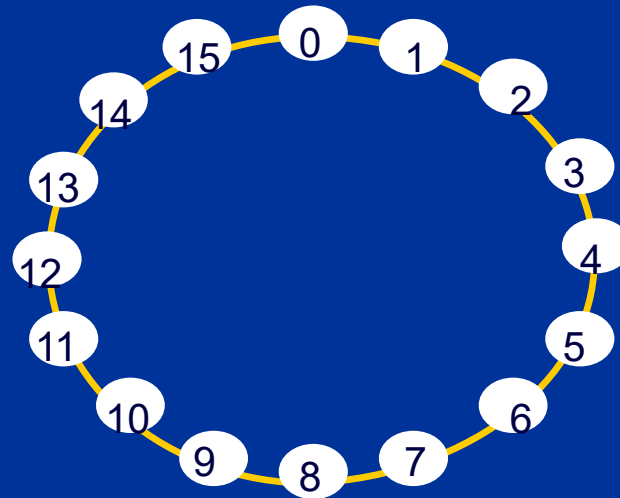
if dest ID $<$, pošalji \leftarrow

Statičke mreže

Ring

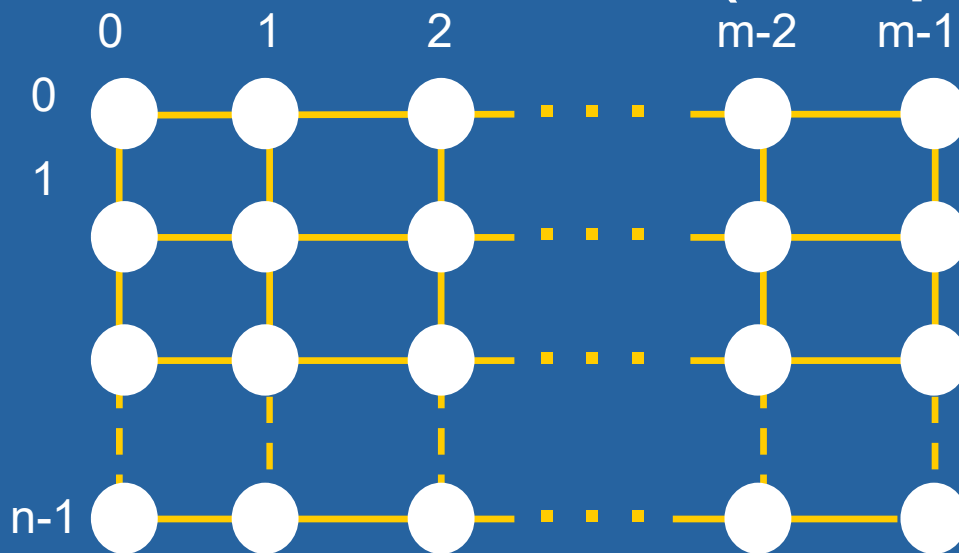
dobija se povezivanjem krajnjih
čvorova u 1D polju

Br čvorova = N , dijametar = $n/2$



Statičke mreže

Mesh - rešetka (2D polja)



Br.čvorova $N = m \times n$

Dijameter = $m-1+n-1$

Stepeni čvorova = 2 (na uglovima)
nodes) 3 (bočni)
4 (središnji)

Rutiranje

Izvor poredi prvo broj vrste svog i odredišnog čvora

if Dest vrsta $<$, pošalji \uparrow

if Dest vrsta $>$, pošalji \downarrow

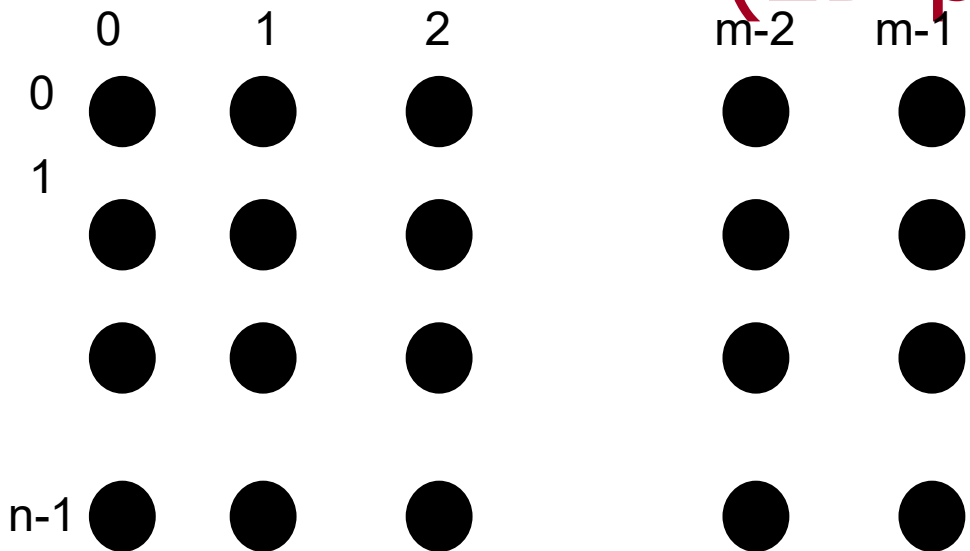
Zatim poredi redne brojeve kolona

if Dest kol $>$, pošalji \rightarrow

if Dest kol $<$, pošalji \leftarrow

Statičke mreže

(2D polja)



Br.čvorova $N = m \times n$

Dijameter = $m-1+n-1$

Stepeni čvorova = 2 (na uglovima)
nodes)
3 (bočni)
4 (središnji)

Izvor poredi prvo broj vrste svog i odredišnog čvora

if Dest vrsta $<$, pošalji

if Dest vrsta $>$, pošalji

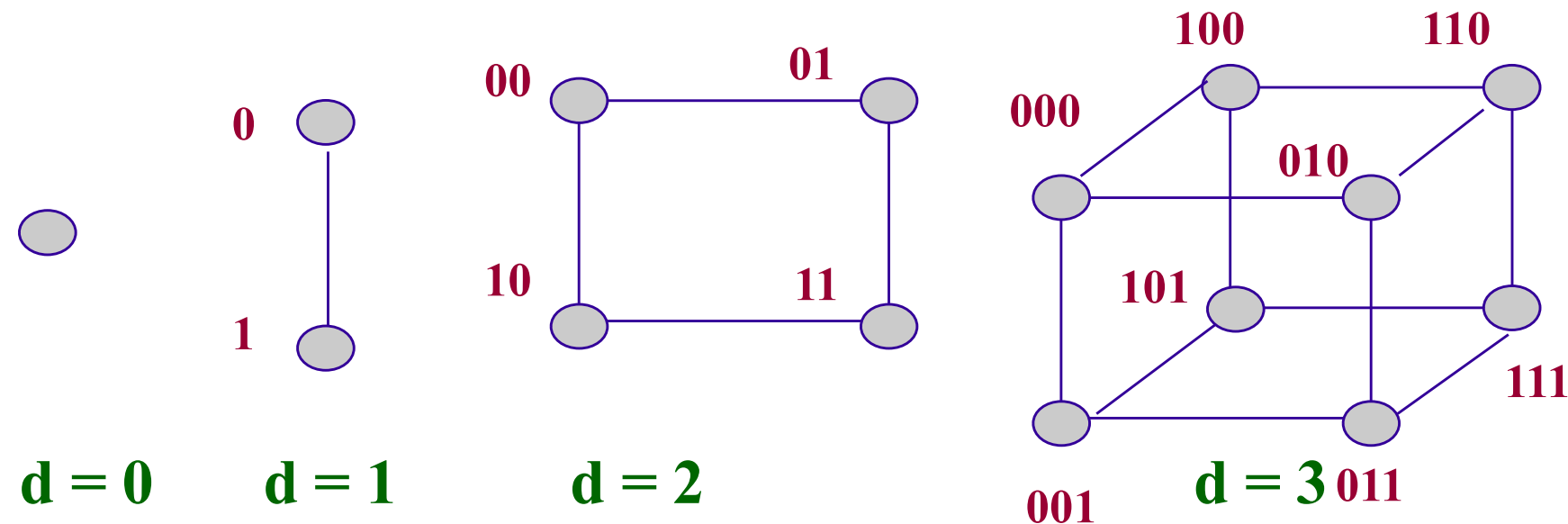
Zatim poredi redne brojeve kolona

if Dest kol $>$, pošalji

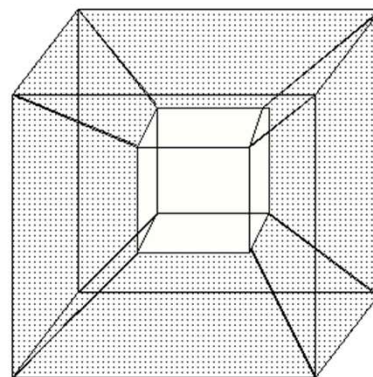
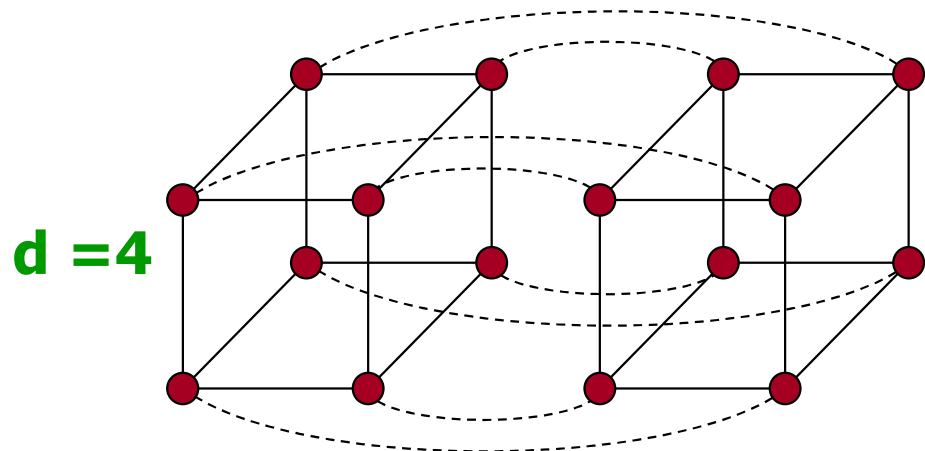
if Dest kol $<$, pošalji

Hiperkub

- * broj čvorova stepen 2
- * Adrese čvorova $0, 1, \dots, 2^k-1$
- * Čvor i povezan direktno sa k čvorova čije se adrese razlikuju samo na jednoj bitskoj poziciji.



4D Hypercube or Binary 4-Cube



Rutiranje u hiperkubu

Algoritam:

- Ne ka je $s(i)$ adresa izvora, $d(i)$ adresa odredišta i $\sigma(i)$ adresa čvora koji je na putu od $s(i)$ do $d(i)$
- Uporediti bitove adresa $d(i)$ sa $\sigma(i)$ s leva u desno
- Identifikovati prvu bit poziciju na kojoj se ove dve adrese razlikuju
- Proslediti paket susedu $n(i)$ tako da se adrese $n(i)$ i $\sigma(i)$ razlikuju samo na uočenoj bitskoj poziciji.

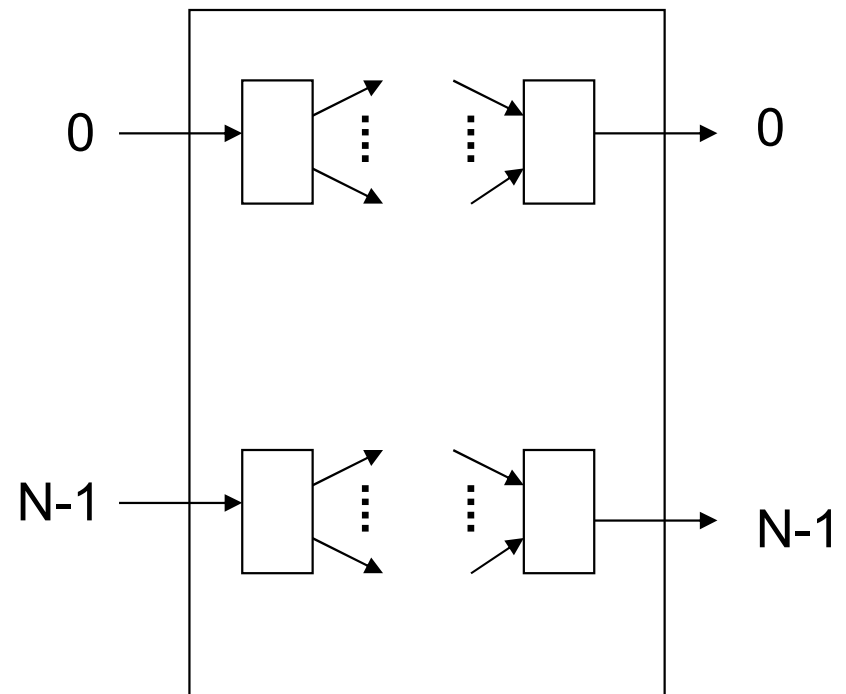
➤ Npr. $s(i)=(1,0,1,0)$, $d(i)=(0,1,0,1)$ ide preko čvorova

➤ $(1,0,1,0) \rightarrow (0,0,1,0) \rightarrow (0,1,1,0) \rightarrow (0,1,0,0) \rightarrow (0,1,0,1)$

Dinamičke SM - jednostepene

✱ Sastoji se od N ulaznih i N izlaznih jedinica (N je broj PE)

- ulazne jedinice DMUX $1 \times D$
- izlazne jedinice MUX $M \times 1$
 - $1 \leq D, M \leq N$, za $D=M=N$ crossbar SM
- recirkularne –podaci mogu da kruže više puta kroz mrežu da stignu od izvora do odredišta
 - broj kruženja zavisi od povezanosti (što je veće D i M veća je povezanost)



Sprežne funkcije

* Dinamičke SM se definišu skupom sprežnih funkcija

- Sprežna f-ja S_f preslikava adresu X jednog PE u adresu $S_f(X)$ drugog PE sa kojim se ostvaruje povezivanje
 - kada se sprežna f-ja primeni na adresu jedne komponente sistema, dobija se adresa druge komponente koja može direktno primiti podatak
 - Da bi se preneo podatak od jednog PE do drugog PE mora se izvršiti programirana sekvenca jedne ili više sprežnih f-ja
 - Kod SIMD sistema svi aktivni PE-ovi moraju izvršavati istu sprežnu f-ju u datom trenutku
 - Sprežne f-je su deo SIMD programa

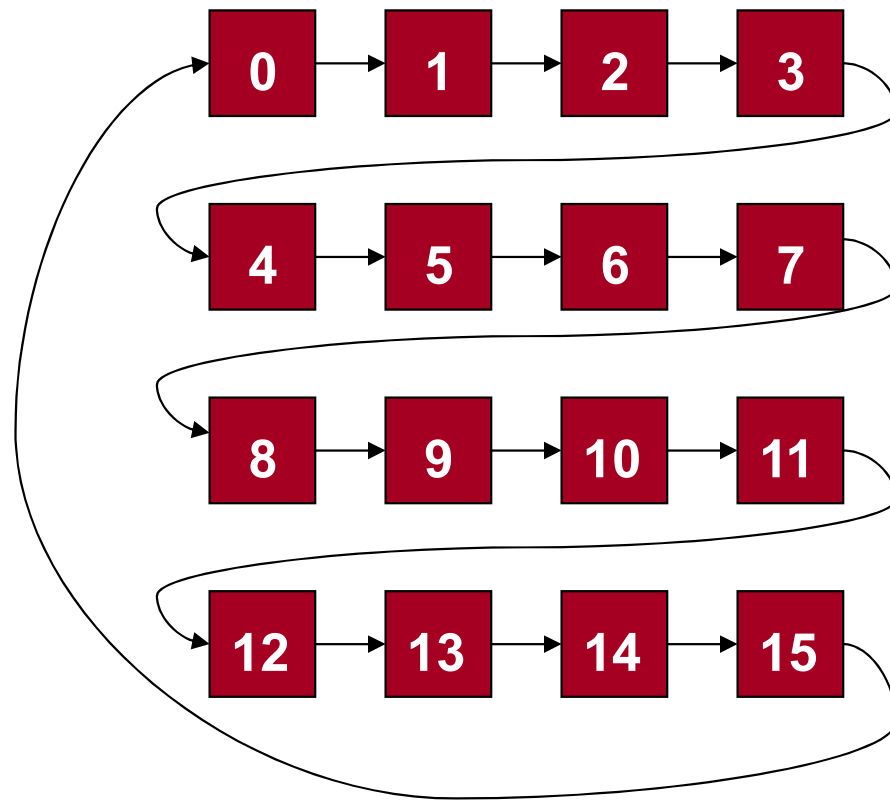
Primeri SM: rešetka (ILLIAC IV)

* Definisana sa 4 sprežne f-je:

- $M_{+1}(x) = (x+1) \bmod N$
 - $M_{-1}(x) = (x-1) \bmod N$
 - $M_{+r}(x) = (x+r) \bmod N$
 - $M_{-r}(x) = (x-r) \bmod N,$ $r = \sqrt{N}$
-
- za $N=64$ dobija se ILLIAC IV SM

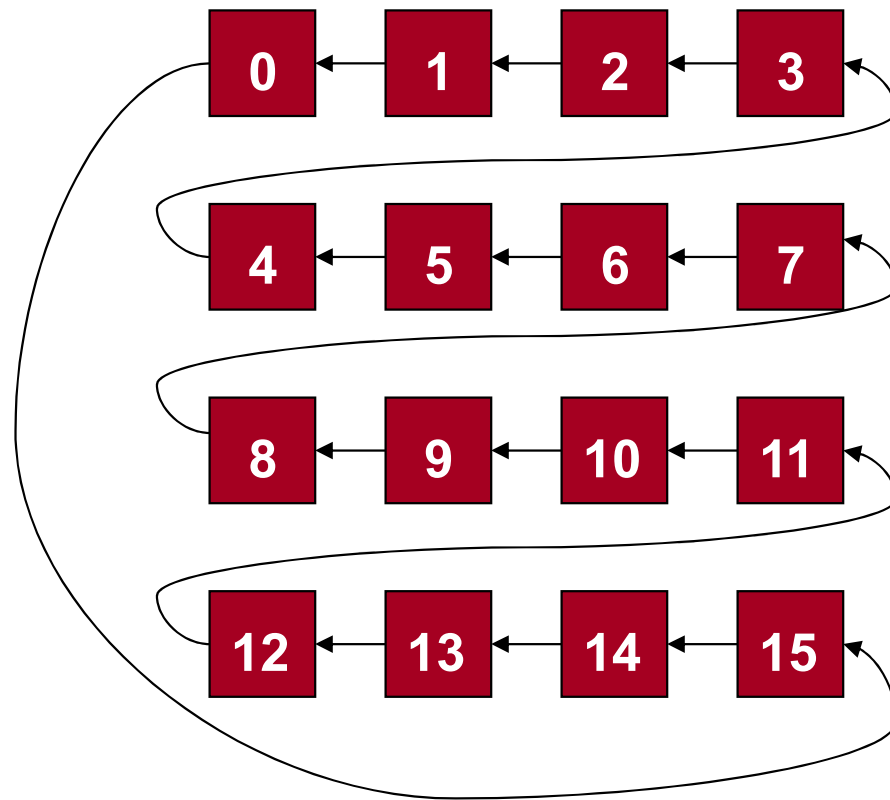
Primer: rešetka za N=16

* $M_{+1}(x) = (x+1) \bmod 16$



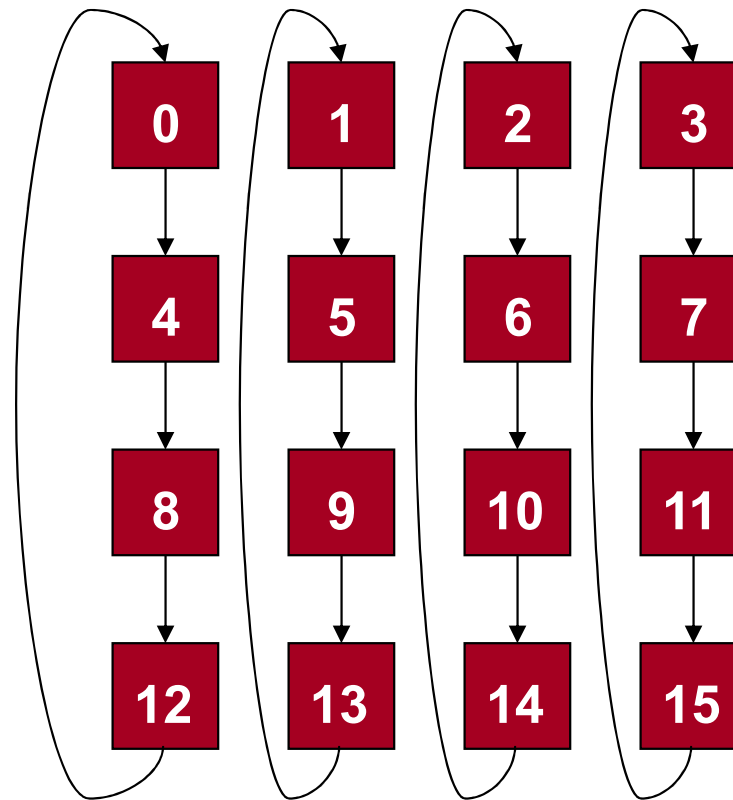
Primer: rešetka za N=16 (nast.)

* $M_{-1}(x) = (x-1) \bmod 16$



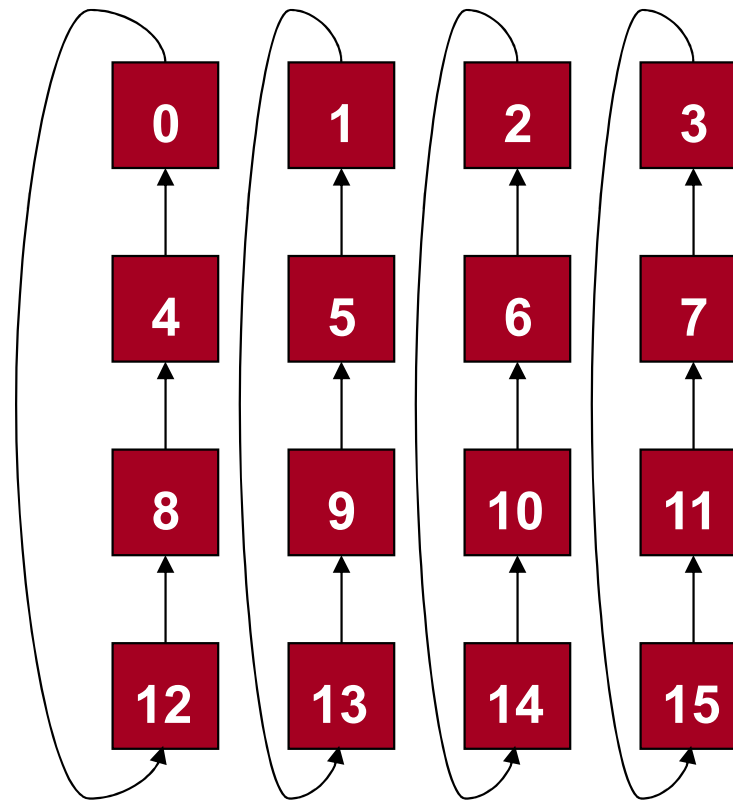
Primer: rešetka za N=16 (nast.)

* $M_{+4}(x) = (x+4) \bmod 16$,



Primer: rešetka za N=16 (nast.)

* $M_{-4}(x) = (x-4) \bmod 16,$



SM mešanje zamena (shuffle-exchange)

* F-ja mešanja odgovara savršenom mešanju špila karata

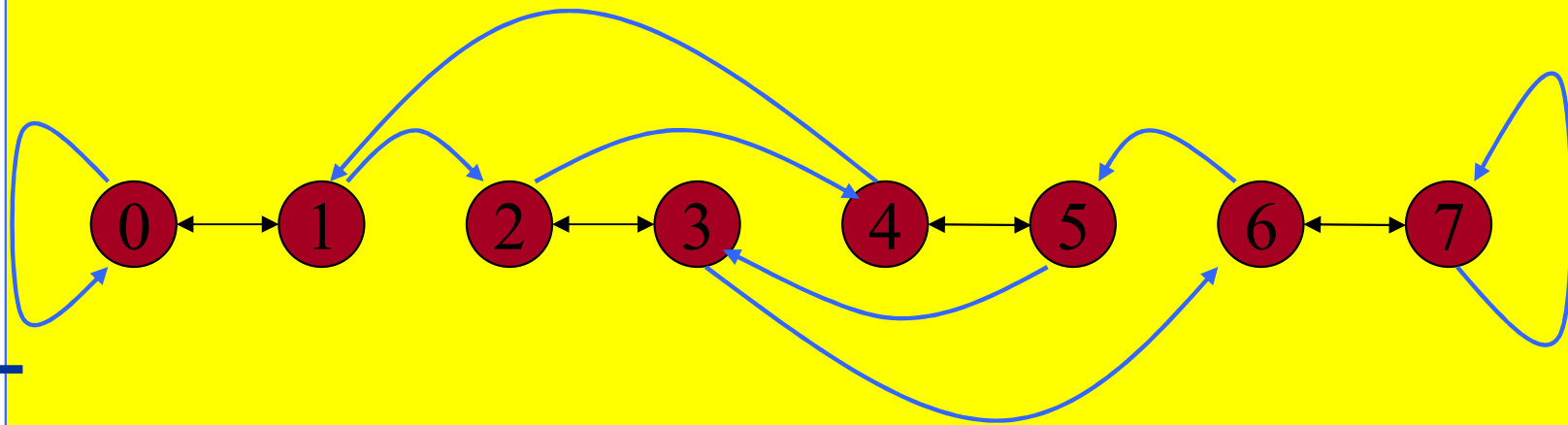
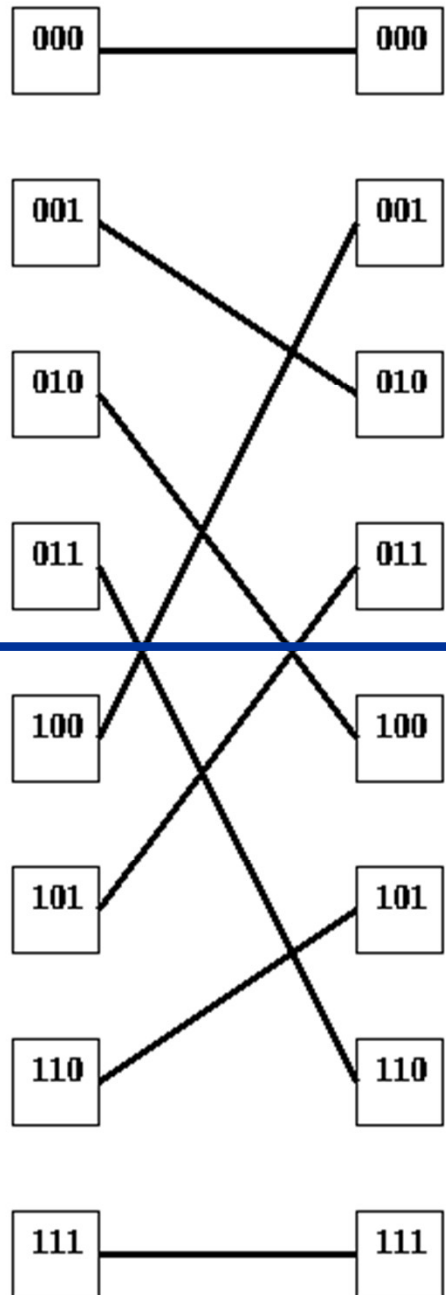
$$S(b_{m-1}, b_{m-2}, \dots, b_1, b_0) = b_{m-2}, \dots, b_1, b_0, b_{m-1}$$

* F-ja zamene

$$E(b_{m-1}, b_{m-2}, \dots, b_1, b_0) = b_{m-1}, b_{m-2}, \dots, b_1, \bar{b}_0$$

Mešanje-zamena primer

Perfect Shuffle on 8 processors



Primer – izračunavanje vrednosti polinima

$$P(n) = \sum_{i=0}^n a_i x^i$$

* Izračunavanje je moguće obaviti procesorskim poljem sa $N=n+1$ PE spregnutim SM mešanje-zamena u $2\log N$ koraka:

- dve faze:

1. svaki PE računa $a_i x^i$

2. svi PE vrše sumiranje dobijenih rezultata i dobijaju $P(x)$

- posmatraju se sadržaji 3 registra: registar koeficijenata, A_i , registar promenljive x , registar maske, M_i

* I faza (množenje)

```
for j:=1 to logN
  for i:=0 to N-1 do inparallel
    if  $M_i=1$  then
       $A_i := A_i * x$ 
    endif;
  x :=  $x * x$ ;
  shuffle( $M_i$ );
endfor;
endfor;
```

M_i je registar maske ($M_i=1$ znači da je PE aktivan)

* II faza (sabiranje)

```
for j:=1 to logN
  for i:=0 to N-1 do inparallel
     $T_i := A_i$ ;
    shuffle( $T_i$ );
     $A_i := T_i$ ;
    exchange( $T_i$ );
     $A_i := A_i + T_i$ ;
  enfor;
endfor;
```

T_i je transportni registar čiji se sadržaj razmenjuje u komunikaciji

I faza - množenje

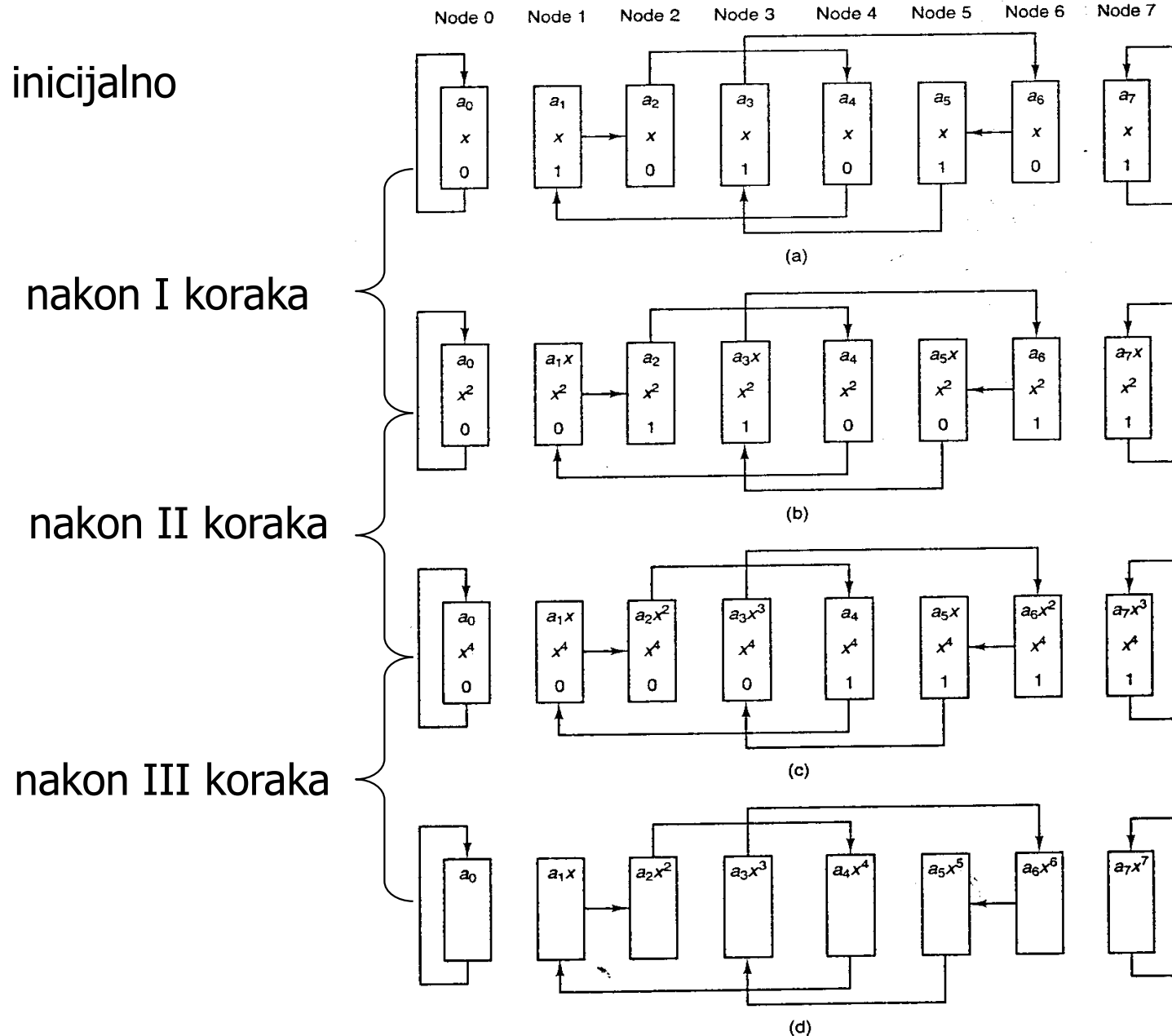


Figure 5.9 Steps for the computation of the $a_i x^i$. (a) Initial values. (b) Values after step 1. (c) Values after step 2. (d) Values after step 3.

II faza - sabiranje

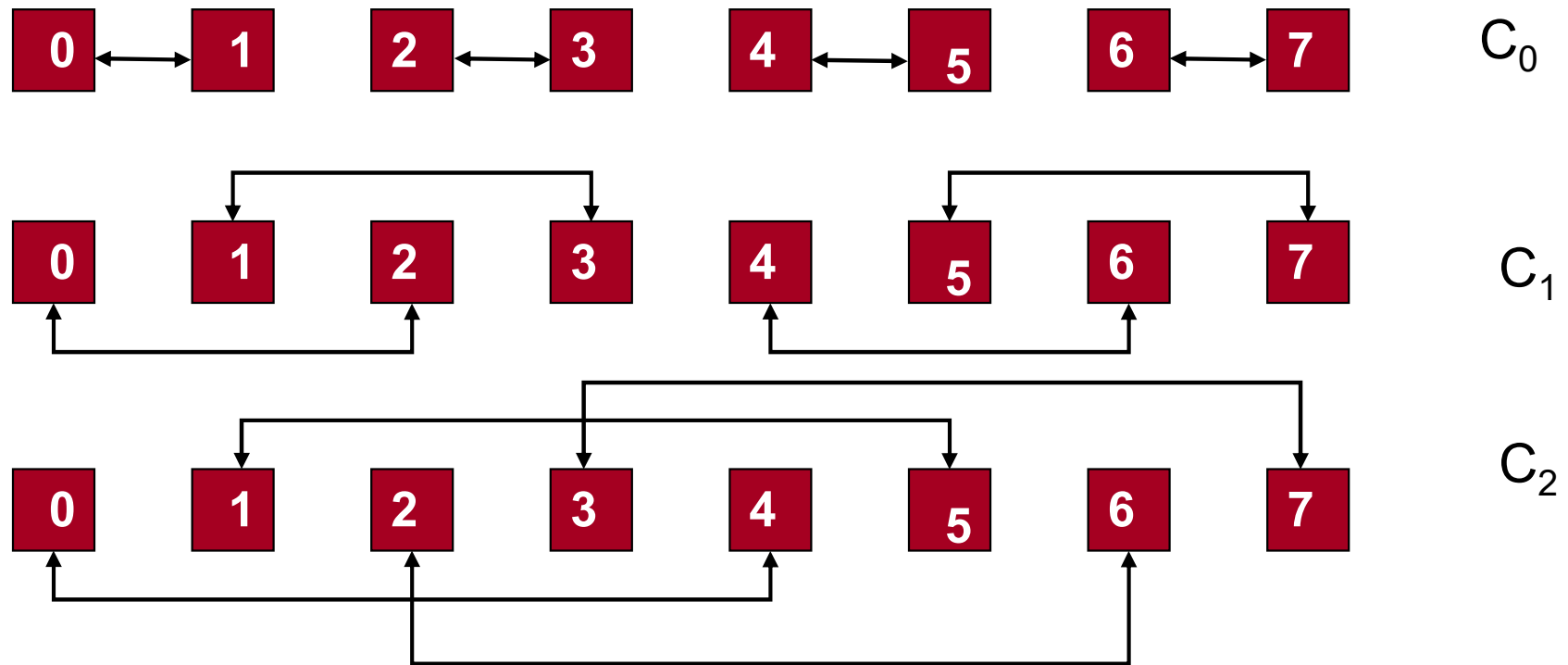
	Node 0	Node 1	Node 2	Node 3	Node 4	Node 5	Node 6	Node 7
Initial values	a_0	a_1x	a_2x^2	a_3x^3	a_4x^4	a_5x^5	a_6x^6	a_7x^7
Step 1 Shuffle	a_0	a_4x^4	a_1x	a_5x^5	a_2x^2	a_6x^6	a_3x^3	a_7x^7
Exchange	$a_0 + a_4x^4$	$a_0 + a_4x^4$	$a_1x + a_5x^5$	$a_1x + a_5x^5$	$a_2x^2 + a_6x^6$	$a_2x^2 + a_6x^6$	$a_3x^3 + a_7x^7$	$a_3x^3 + a_7x^7$
Step 2. Shuffle	$a_0 + a_4x^4$	$a_2x^2 + a_6x^6$	$a_0 + a_4x^4$	$a_2x^2 + a_6x^6$	$a_1x + a_5x^5$	$a_3x^3 + a_7x^7$	$a_1x + a_5x^5$	$a_3x^3 + a_7x^7$
	Node 0		Node 1		Node 2		Node 3	
Exchange	$a_0 + a_4x^4 + a_2x^2 + a_6x^6$		$a_0 + a_4x^4 + a_2x^2 + a_6x^6$		$a_0 + a_4x^4 + a_2x^2 + a_6x^6$		$a_0 + a_4x^4 + a_2x^2 + a_6x^6$	
	Node 4		Node 5		Node 6		Node 7	
Step 3.	$a_1x + a_5x^5 + a_3x^3 + a_7x^7$		$a_1x + a_5x^5 + a_3x^3 + a_7x^7$		$a_1x + a_5x^5 + a_3x^3 + a_7x^7$		$a_1x + a_5x^5 + a_3x^3 + a_7x^7$	
	Node 0		Node 1		Node 2		Node 3	
Shuffle.	$a_0 + a_4x^4 + a_2x^2 + a_6x^6$		$a_1x + a_5x^5 + a_3x^3 + a_7x^7$		$a_0 + a_4x^4 + a_2x^2 + a_6x^6$		$a_1x + a_5x^5 + a_3x^3 + a_7x^7$	
	Node 4		Node 5		Node 6		Node 7	
	$a_0 + a_4x^4 + a_2x^2 + a_6x^6$		$a_1x + a_5x^5 + a_3x^3 + a_7x^7$		$a_0 + a_4x^4 + a_2x^2 + a_6x^6$		$a_1x + a_5x^5 + a_3x^3 + a_7x^7$	
	Node 0				Node 1			
Exchange	$a_0 + a_4x^4 + a_2x^2 + a_6x^6 + a_1x + a_5x^5 + a_3x^3 + a_7x^7$				$a_0 + a_4x^4 + a_2x^2 + a_6x^6 + a_1x + a_5x^5 + a_3x^3 + a_7x^7$			
	Node 2				Node 3			
	$a_0 + a_4x^4 + a_2x^2 + a_6x^6 + a_1x + a_5x^5 + a_3x^3 + a_7x^7$				$a_0 + a_4x^4 + a_2x^2 + a_6x^6 + a_1x + a_5x^5 + a_3x^3 + a_7x^7$			
	Node 4				Node 5			
	$a_0 + a_4x^4 + a_2x^2 + a_6x^6 + a_1x + a_5x^5 + a_3x^3 + a_7x^7$				$a_0 + a_4x^4 + a_2x^2 + a_6x^6 + a_1x + a_5x^5 + a_3x^3 + a_7x^7$			
	Node 6				Node 7			
	$a_0 + a_4x^4 + a_2x^2 + a_6x^6 + a_1x + a_5x^5 + a_3x^3 + a_7x^7$				$a_0 + a_4x^4 + a_2x^2 + a_6x^6 + a_1x + a_5x^5 + a_3x^3 + a_7x^7$			

values for k_1 and k_0 ; rather, the total number of nodes is defined. A two-dimensional mesh with $k_1 = k_0 = n$ is usually referred to as a *mesh* with N nodes, where $N = n^2$. For example, Figure 5.12 shows a mesh with 16 nodes. From this point forward, the term

Kub mreža

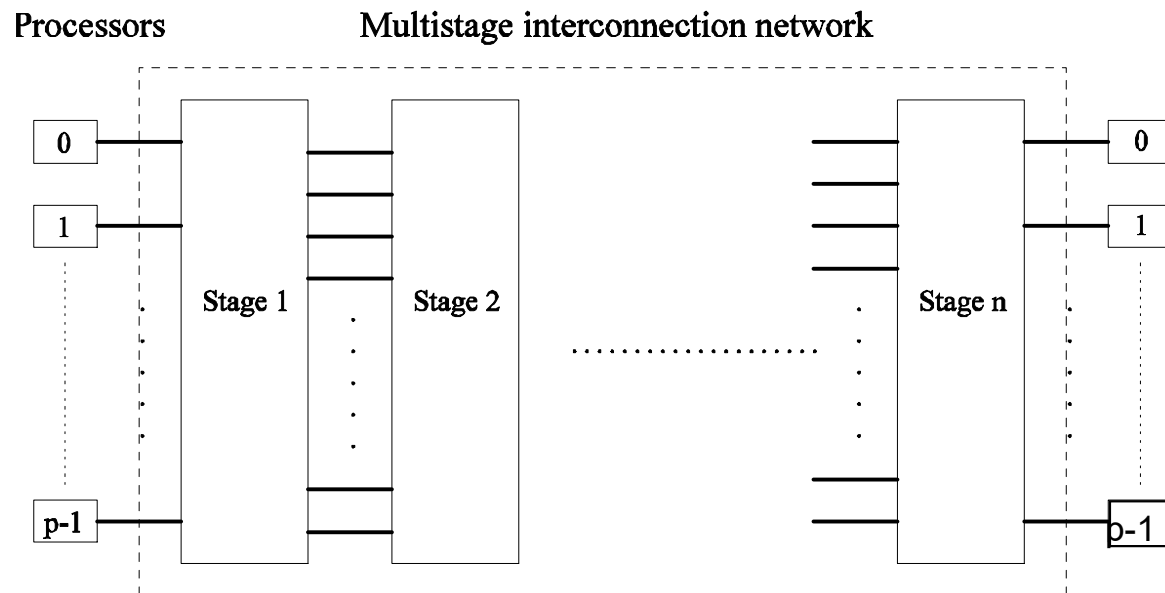
* Definisana sa $m = \log_2 N$ sprežnih f-ja

$$C_i(b_{m-1}, \dots, b_i, \dots, b_1, b_0) = b_{m-1}, \dots, \bar{b}_i, \dots, b_1, b_0,$$
$$i = 0, 1, \dots, m-1$$



Višestepene SM

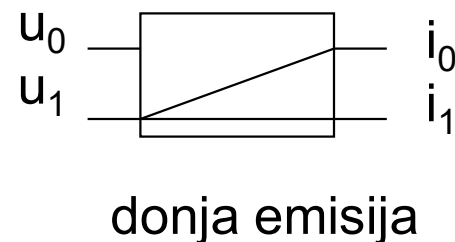
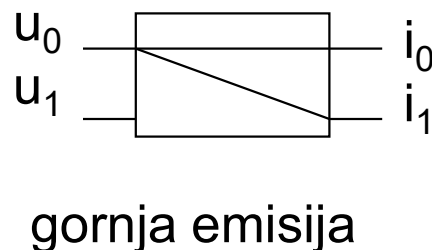
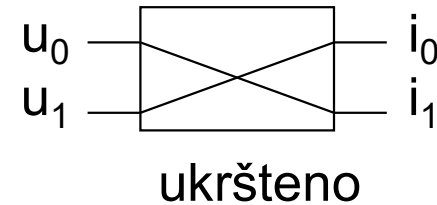
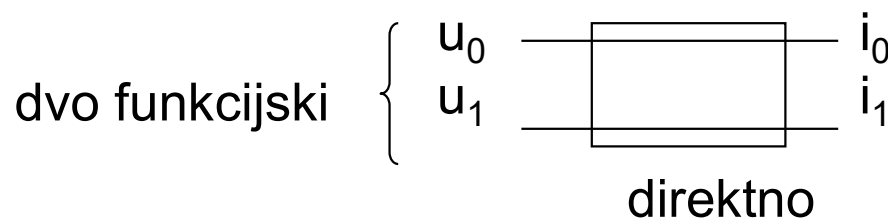
- * Sastoje se od komutacionih elemenata (KE) i komunikacionih kanala
- * KE čine stepene mreže
- * Veze izmedju stepena su fiksne
- * KE se mogu dinamički postavljati da bi se ostvarila veza izmedju željenog ulaza i izlaza
- * Višestepenu SM karakteriše
 - izgled KE
 - način povezivanja susednih stepena
 - način upravljanja



Komutacioni element

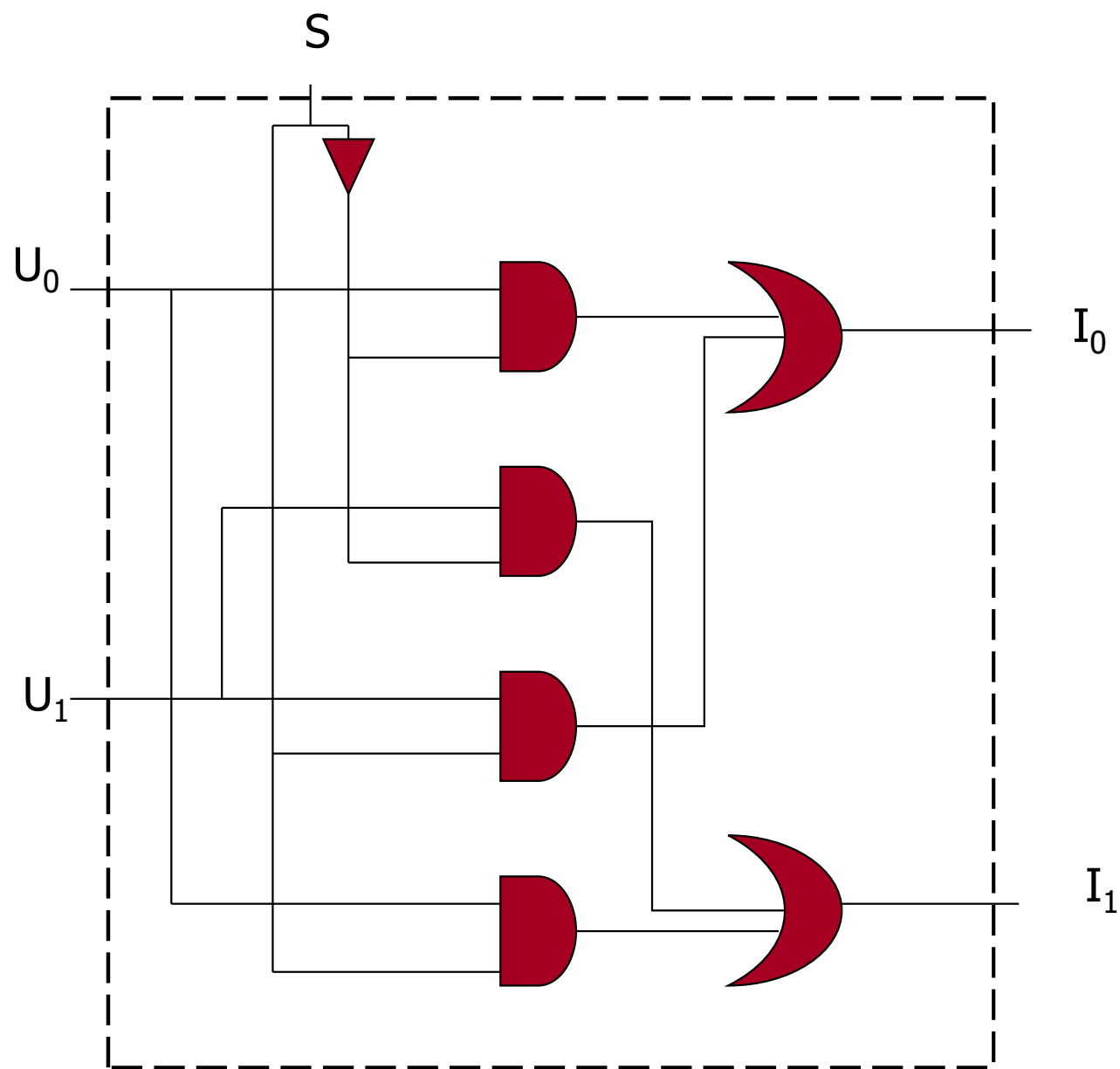
* U opštem slučaju može imati a ulaza i b izlaza

- a, b teorijski ne moraju biti jednaki
- najčešće je $a=b=2^k, k \geq 1$
- sa brojem ulaza i izlaza raste složenost KE, pa je najčešće $a=b=2$ (tipa 2×2)
- KE tipa 2×2
 - dvofunkcijski
 - četvorofunkcijski



4-funk.

Izgled dvo-funkcijskog KE



$S=0$, direktno
 $S=1$, ukršteno

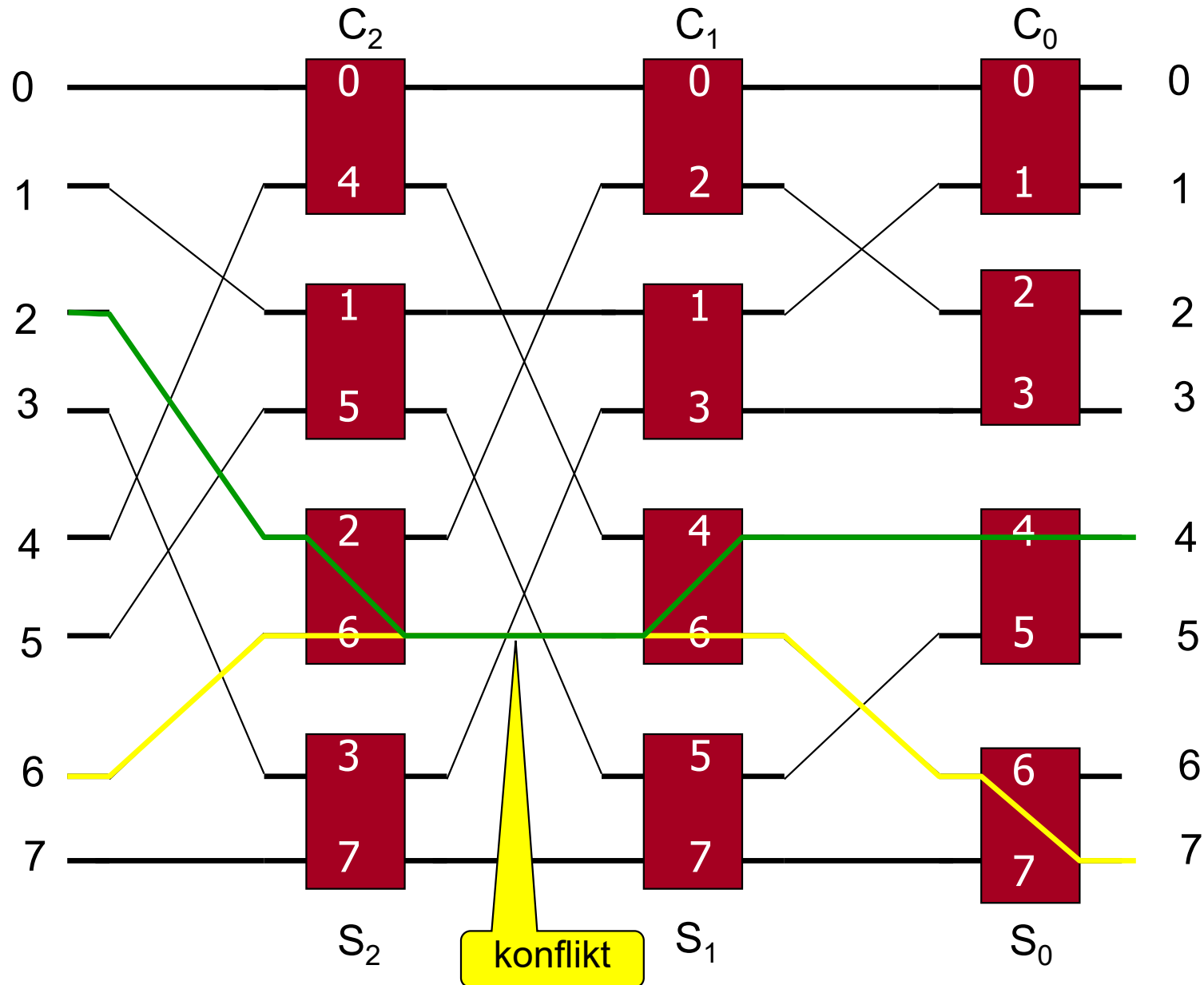
Višestepene SM

- * Višestepena SM koja treba da poveže $N=2^m$ PE-ova sastoji se od $\log_2 N=m$ stepena i $N/2$ KE u svakom stepenu.
- * U odnosu na strategiju upravljanja mogu se razlikovati mreže sa:
 - individualnim upravljanjem stepena (potrebno je m linija za upravljanje)
 - individualno upravljanje KE (potrebno je $N/2*m$ linija za upravljanje)
 - nezavisno upravljanje na nivou grupe u jednom stepenu

Višestepena kub mreža (generalizovani kub)

- * Sastoji se od $\log_2 N = m$ stepena i $N/2$ KE
- * Svaki stepen realizuje jednu sprežnu f-ju kub mreže
 - Step S_0 –sprežnu f-ju C_0
 - Step S_1 –sprežnu f-ju C_1
 - \vdots
 - Step S_{m-1} –sprežnu f-ju C_{m-1}
- Stepni su označeni od izlaza ka ulazu sa S_0, \dots, S_{m-1}

Generalizovani kub –primer N=8



Generalizovani kub - osobine

- * Može povezati proizvoljni par PE
- * Jedininstveni put izmedju svakog para izvor-odredište
- * Blokirajuća mreža – mogu nastupiti konflikti

Generalizovani kub – određivanje puta poruka

* Jedan-na-jedan

- pomoću EX-OR zaglavlja
- pomoću odredišne adrese

* Jedan izvor u 2^k odredišta (emisija)

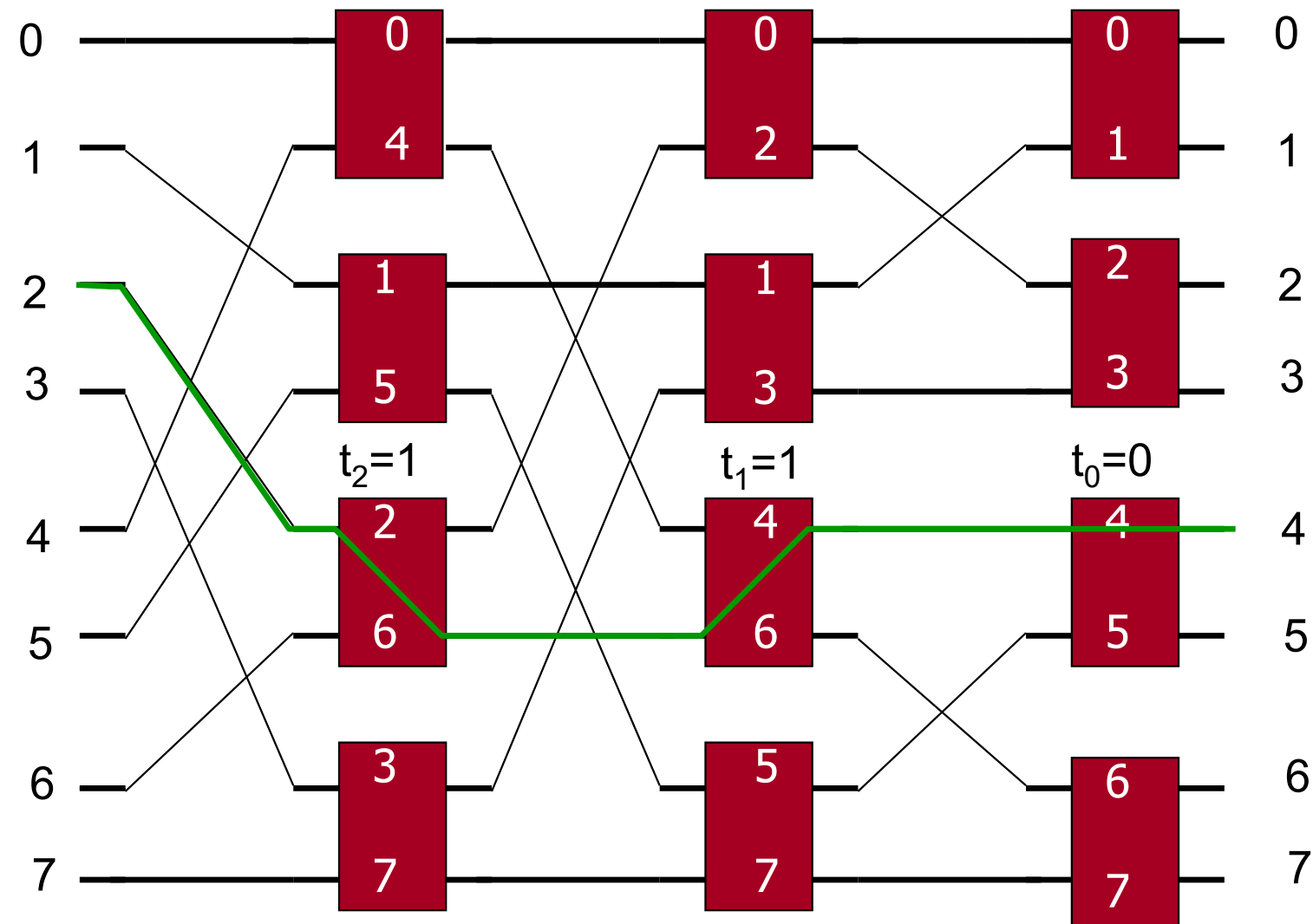
- varijanta EX-OR

* Određjivanje puta pomoću EX-OR zaglavlja

- poruci se dodaje zaglavlje dužine m bitova (2^m PE-ova)
 - zaglavlje se dobija primenom EX-OR operacija na binarnim adresama izvora i odredišta
 - adresa izvora $S = s_{m-1}s_{m-2}\dots s_1s_0$
 - adresa odredišta $D = d_{m-1}d_{m-2}\dots d_1d_0$
 - zaglavlje $T = S \oplus D = t_{m-1}t_{m-2}\dots t_1t_0$
 - da bi se odredio položaj KE (direktno ili ukršteno) u stepenu i , potrebno je ispitati t_i

$$t_i = \begin{cases} 0, & \text{direktno} \\ 1, & \text{ukrsteno} \end{cases}$$

Odredjivanje puta - primer



$S=2=010$, $D=4=100$, $T=010 \oplus 100 = 110 = t_2 t_1 t_0$ (ukršteno, ukršteno, direktno)

Zašto ovo funkcioniše?

* Odgovor se krije u strukturi SM i definiciji sprežnih funkcija:

- Ako se S i D razlikuju na i-toj bit poziciji, $s_i \oplus d_i = t_i = 1$, neophodno je primeniti sprežnu f-ju C_i da bi se ostvarilo povezivanje (preslikavanje) izvora S i odredišta D
 - Postavljanje KE u stepenu i u položaj ukršteno implementira sprežnu f-ju C_i
- Ako se adrese S i D ne razlikuju u i-toj bit poziciji, $s_i \oplus d_i = t_i = 0$, f-ja C_i ne treba da se primeni
 - postavljanjem prekidača u položaj direktno f-ja C_i se ne implementira

* Dobra osobina ovog načina odredjivanja puta

- na osnovu poruke sa zaglavljem moguće je odrediti odakle je poruka pristigla jer važi $S = T \oplus D$
 - korisno ako je potrebno potvrđivanje prispelih poruka

Odredjivanje puta na osnovu adrese odredišta

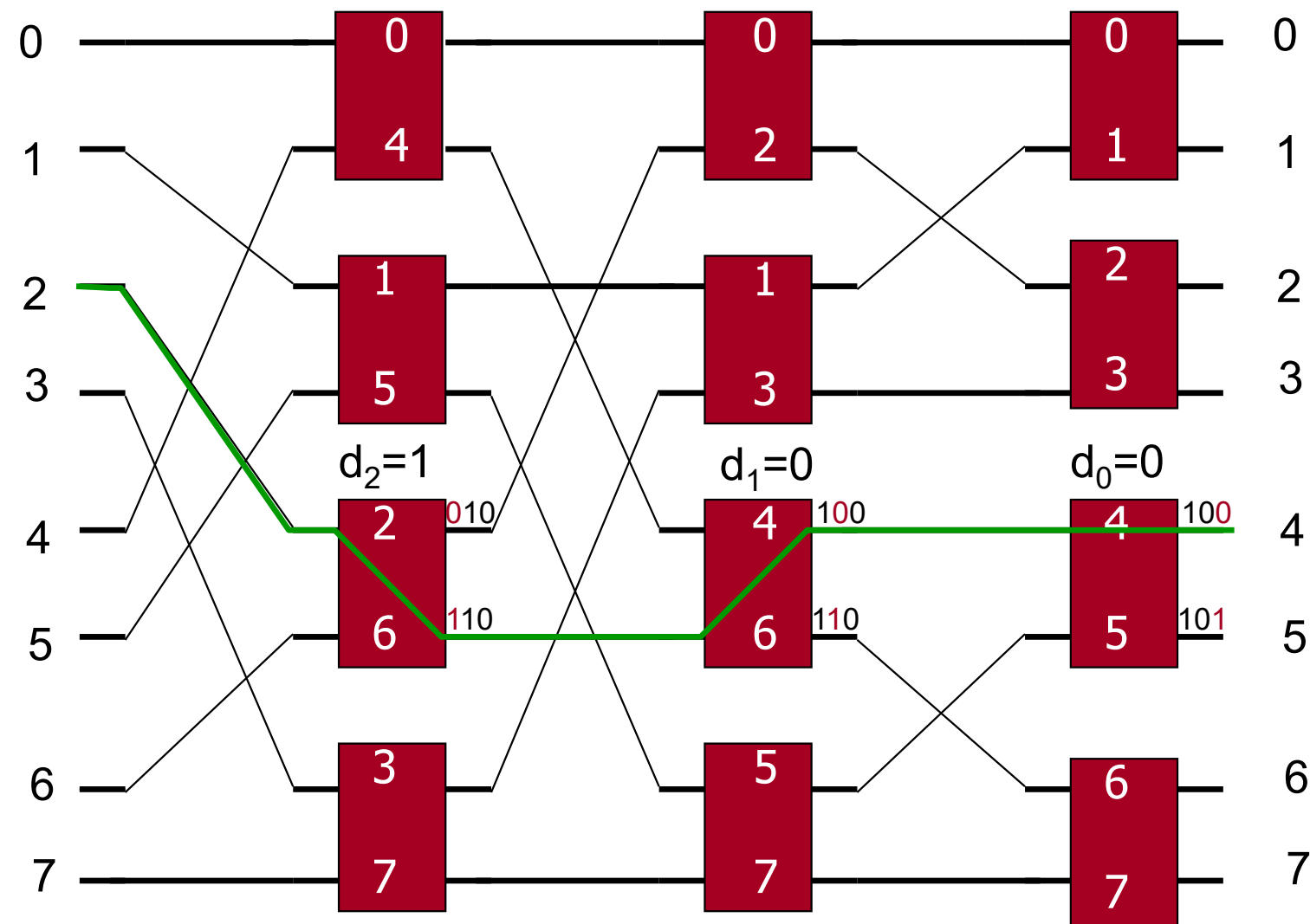
* Kao zaglavlje može se koristiti adresa odredišta

$$d_i = \begin{cases} 0, & \text{gornji izlaz KE} \\ 1, & \text{donji izlaz KE} \end{cases}$$

* Primer:

- S=2= 010, D=4= 100 \Rightarrow donji izlaz, gornji izlaz, gornji izlaz
- Osobine
 - moguće je na osnovu zaglavlja utvrditi da li poruka stiže po korektnom mrežnom izlazu (poredjenjem adrese odredišta i zaglavlja poruke)
 - nije moguće odediti adresu izvora (problem ako je potrebno potvrđjivanje)

Primer – određivanje puta na osnovu odredišne adrese



Zašto ovo funkcioniše: gornji izlaz u stepenu i na i -toj bit poziciji uvek ima vrednost 0, a donji izlaz vrednost 1

Odredjivanje puta za slučaj emisije

* Koristi se proširena šema sa EX-Or zaglavljem

- da bi emisija bila moguća broj odredišta mora biti stepen dvojke, 2^j
- odredišne adrese se moraju razlikovati na j pozicija, a poklapati na $m-j$ pozicija

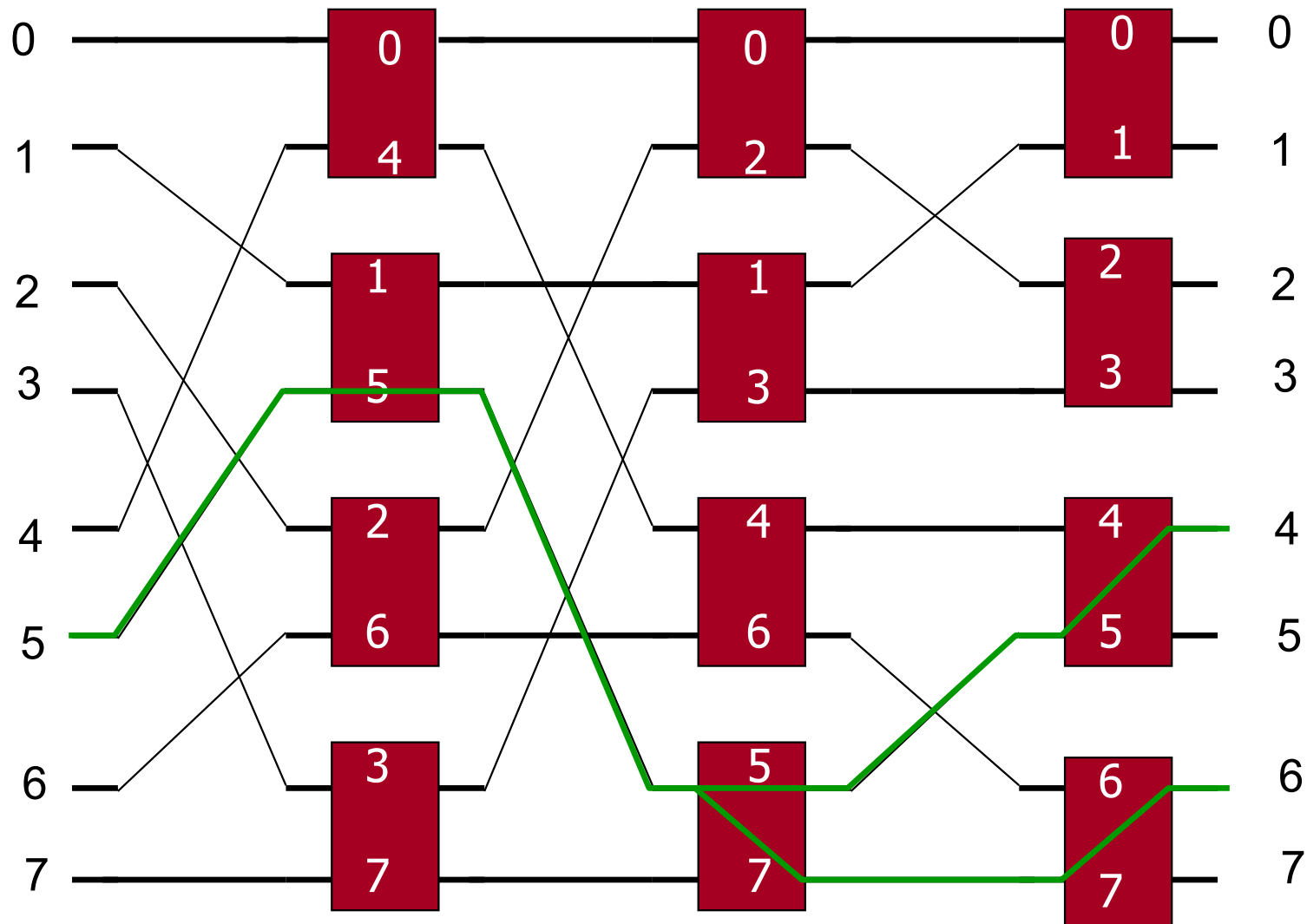
● PRIMER

- S adresa izvora, E i F adrese odredišta
- Individualna zaglavlja za destinacije E i F, $T_E = S \oplus E$, $T_F = S \oplus F$
- $S=101$ (5), $E=100$ (4), $F=110$ (6), $T_E=00\textcolor{red}{1}$, $T_F=0\textcolor{red}{1}1$
- Zaglavlja se slažu u svim bit pozicijama izuzev na mestu gde se razlikuju odredišne adrese
 - putevi kroz mrežu su identični u stepenu 2, granaju se (dolazi do emisije) u stepenu 1, i paralelni su na dalje (koriste isto postavljanje KE u stepenu 0)
 - Da bi se odredilo zaglavlje za slučaj emisije potrebno je poznavati informaciju o putu pre i posle grananja i tačke grananja
 - Zaglavlje za slučaj emisije određeno je skupom $\{R, B\}$
 - » $R=r_{m-1} \dots r_1 r_0$ sadrži informaciju o putu, $B=b_{m-1} \dots b_1 b_0$ informacije o tačkama grananja

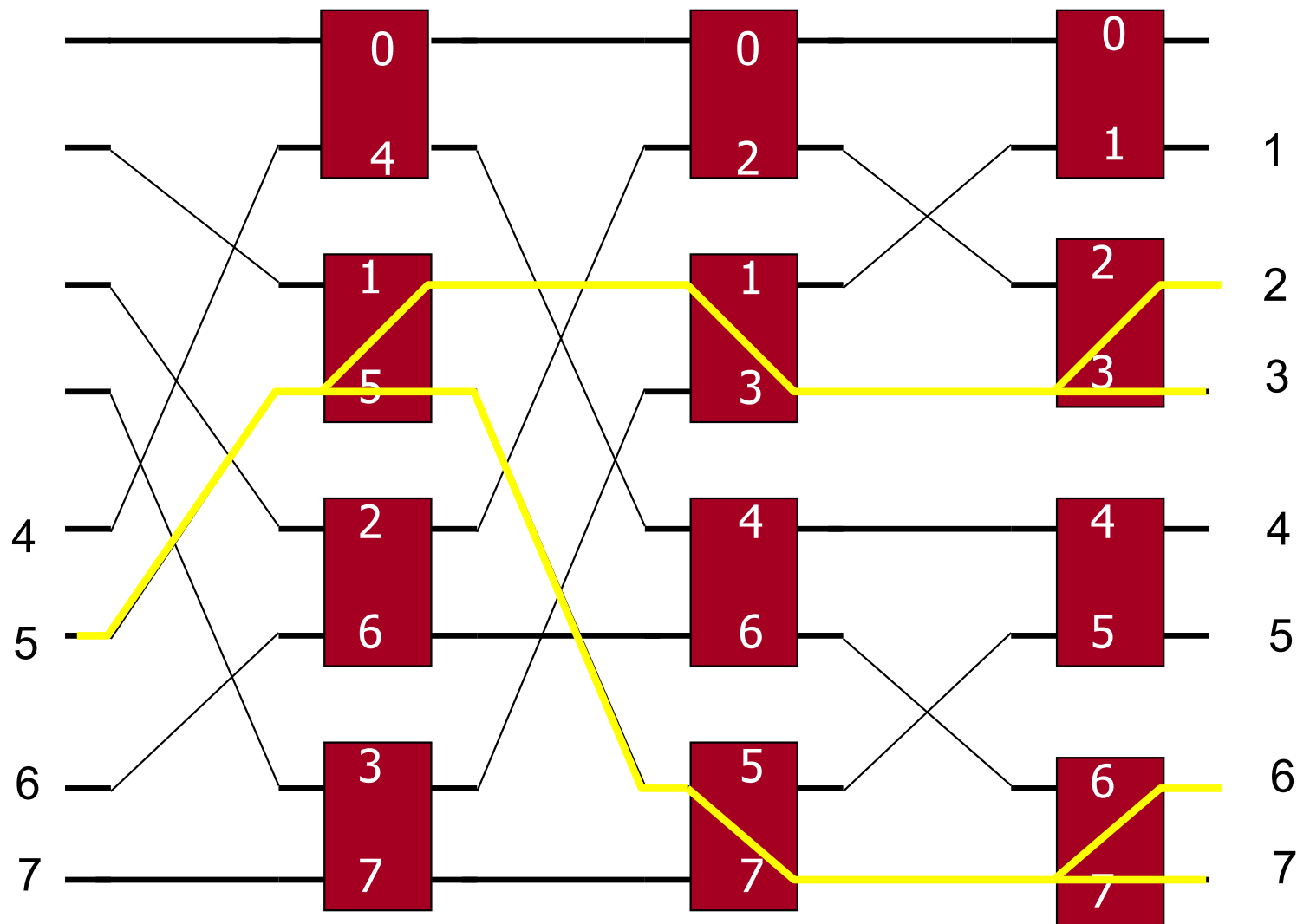
Odredjivanje puta za slučaj emisije –nast.

- * I T_E i T_F sadrže informaciju o putu, pa se za R može odabrati bilo koji, npr. $R = T_E$.
- * Da bi se odredilo $B = b_{m-1} \dots b_1 b_0$ potrebno je naći $B = T_E \oplus T_F = E \oplus F$
 - Za $S = 101$ (5), $E = 100$ (4), $F = 110$ (6), $\{R = 001, B = E \oplus F = 010\}$
 - Da bi se odredilo u koji položaj se postavlja KE u stepenu i potrebno je ispitati r_i i b_i .
 - ako je $b_i = 1$, r_i se ignoriše i obavlja se emisija (grnja ili donja)
 - $b_i = 0$, r_i se koristi da se odredi položaj KE

Emisija iz PE₅ u PE₄ i PE₆



Emisija iz PE₅ u PE₂, PE₃, PE₆ PE₇



$$R = S \oplus D2 = 101 \oplus 010 = 111, B = D2 \oplus D7 = 010 \oplus 111 = 101$$

kada se određuje B potrebno je potražiti \oplus odredišnih adresa koje se razlikuju na svim dozvoljenim pozicijama

Omega mreža

- * Sastoji se od $\log_2 N = m$ stepena i $N/2$ KE
- * Veze izmedju stepena su ostvarene po principu savršenog mešanja, a KE obavljaju f-ju zamene kada su postavljeni u položaj ukršteno

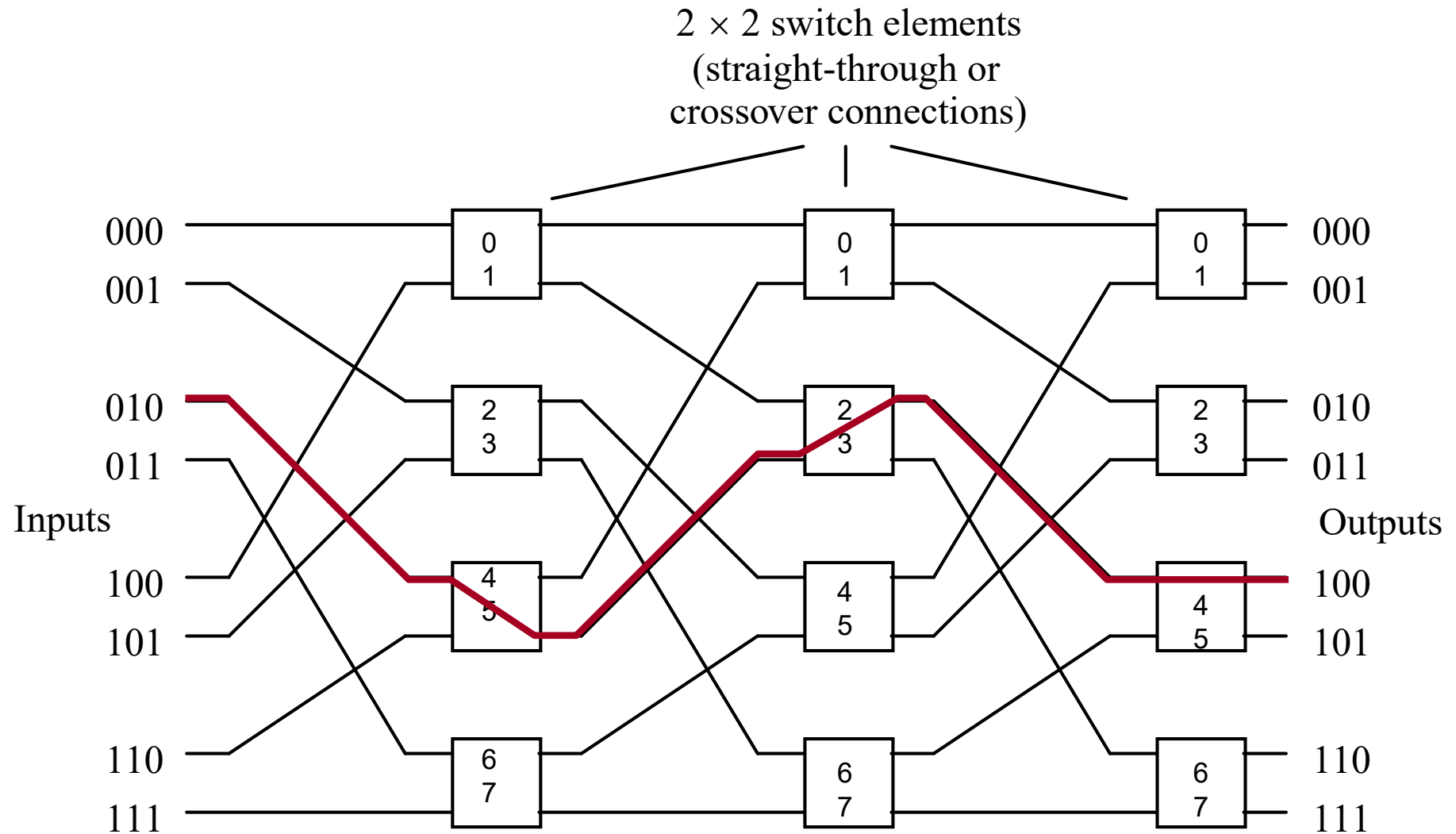
$$S(b_{m-1}, b_{m-2}, \dots, b_1, b_0) = b_{m-2}, \dots, b_1, b_0, b_{m-1}$$

$$E(b_{m-1}, b_{m-2}, \dots, b_1, b_0) = b_{m-1}, b_{m-2}, \dots, b_1, \bar{b}_0$$

- * Put poruke se odredjuje na osnovu EX-OR adrese izvora i odredišta po istom principu kao kod generalizovanog kuba

Omega mreža – primer za N=8

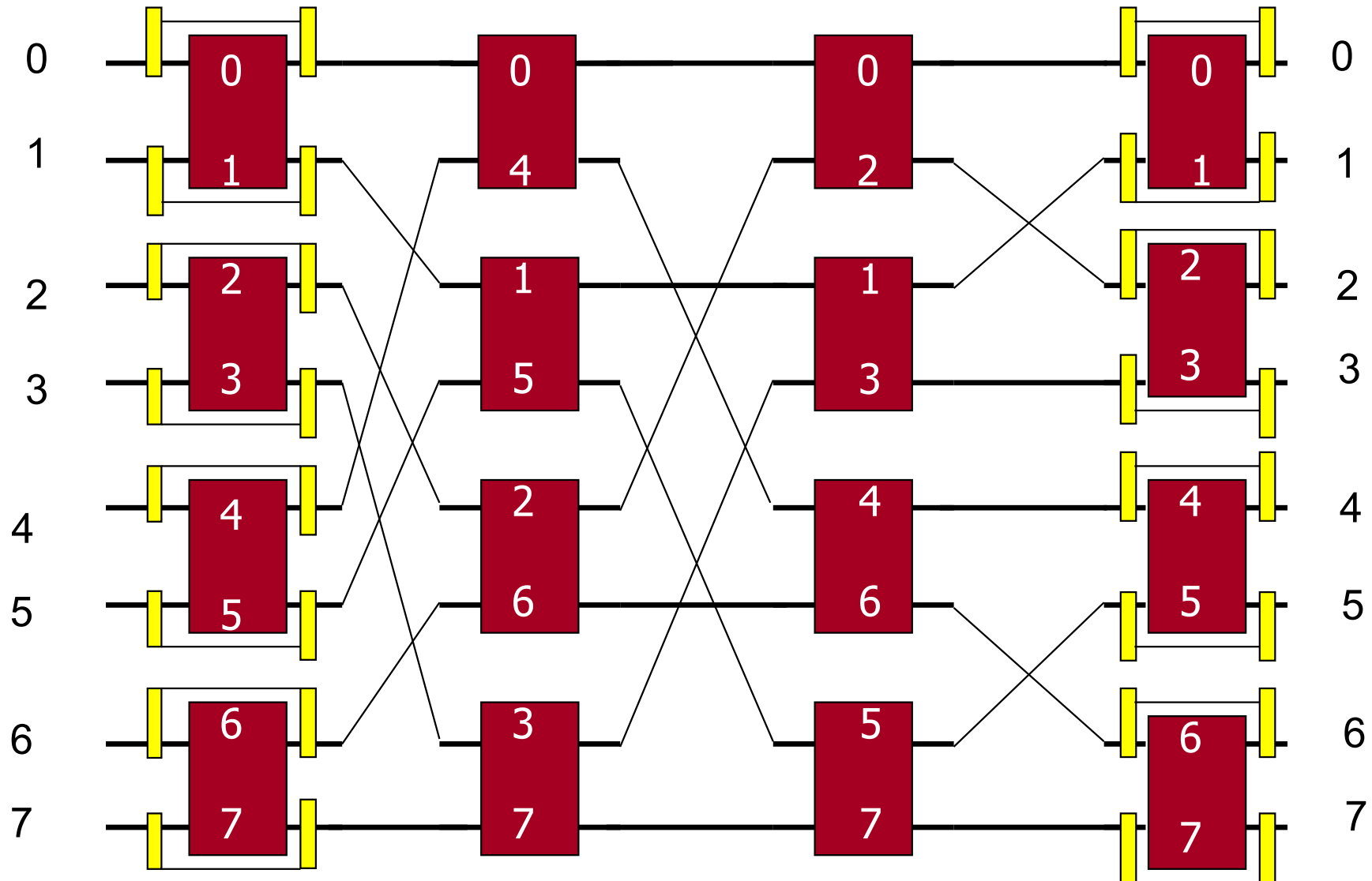
$T=S \oplus D=010 \oplus 100=110$ (ukršteno, ukršteno, direktno)



Generalizovani kub sa ekstra stepenom(ESC)

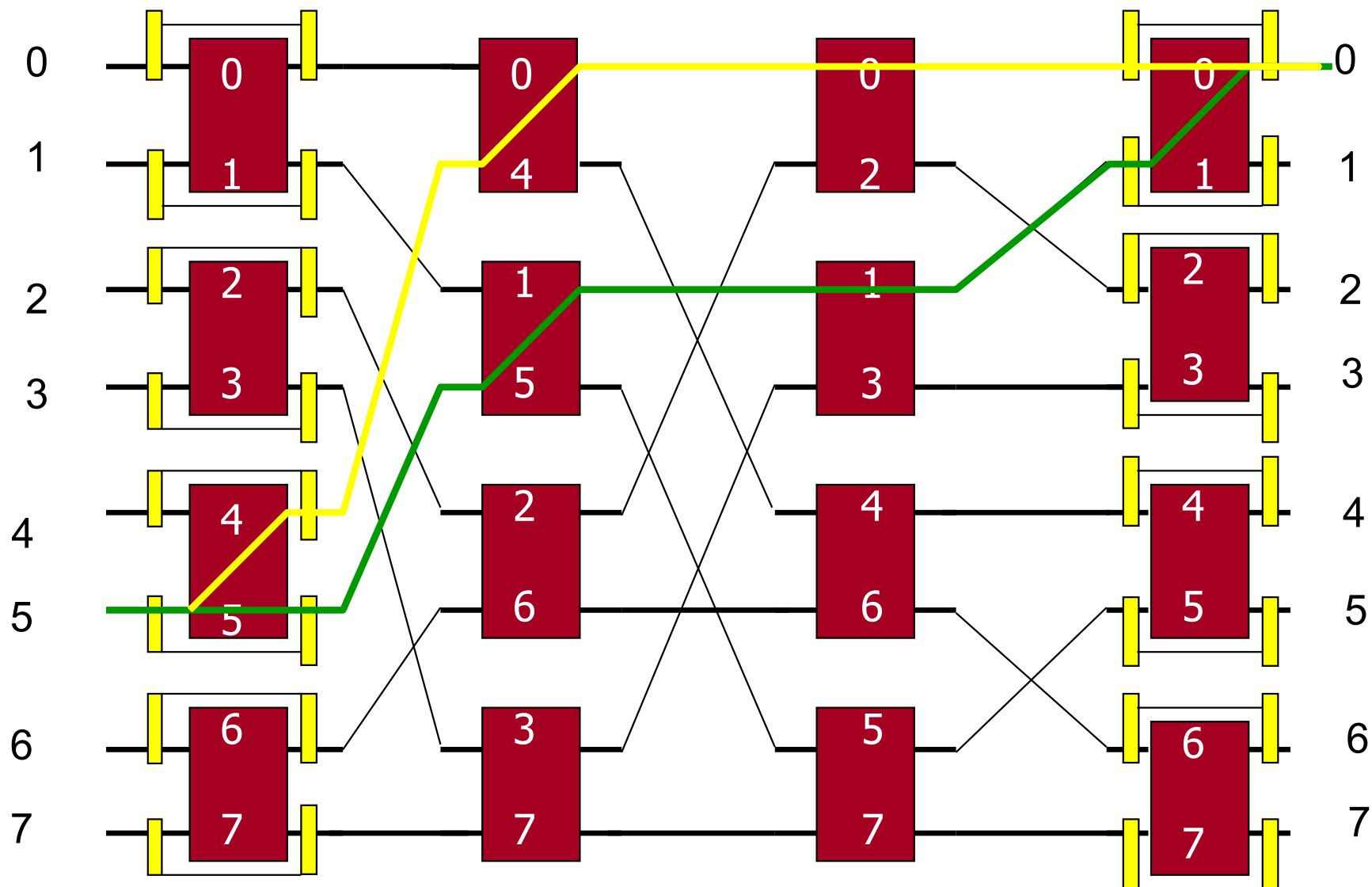
- * Ako nastupi greška na nekom kom. kanalu ili u KE, vezu izmedju odredjenog para izvor-odredište nije moguće uspostaviti (jer postoji jedinstveni put)
- * Problem je moguće rešti dodavanjem ekstra stepena na ulaz mreže (stepen S_m)
 - ekstra stepen obavlja sprežnu f-ju C_0
 - potrebno je dodati i MUX i DMUX na ulaze ekstra stepena (stepena m) i poslednjeg stepena (stepena 0)
 - sada postoje dva stepena koji obavljaju spr. f-ju C_0
 - dodavanjem ekstra stepena dobijaju se dva puta izmedju svakog para izvor-odredište koji ne koriste iste KE i kom. kanale u stepenima $1, 2, \dots, m-1$
 - mreža postaje otporna na jednostruke greške

ESC



- * Mreža je normalno konfigurisana da je stepen m premošćen, a stepen 0 aktivan
- * analiza greške
 - mreža se testira za poznate test oblike
 - ako se detektuje jednostruka greška preduzimaju se sledeće akcije
 - ako je greška u stepenu m , stepen 0 je aktivan
 - ako je greška u stepenu 0, stepen 0 je premošćen a m aktivan
 - ako je greška u stepenu i , $0 < i < m$, stepeni 0 i m su aktivni
 - kada su stepeni 0 i m aktivni u mreži postoje dva disjunktna puta izmedju svakog izvora i odredišta (primarni i sekundarni)
 - Zaglavlje za primarni put $T_p = 0t_{m-1}...t_1t_0$
 - Zaglavlje za sekundarni put $T_s = 1t_{m-1}...t_1\bar{t}_0$

ESC



zeleno – primarni put, žuto – sekundarni put