

Komutatori paketa

Komutatori paketa

Motivacija

- ❑ Komutacija kola omogućava garantovanje kvaliteta servisa korisniku
- ❑ Komutatori kola su neefikasni za računarske komunikacije
- ❑ Niska iskorišćenost resursa rezultira većim ulaganjima operatora i usporavanju razvoja/uvođenja novih servisa
- ❑ Statističko multipleksiranje paketa postiže visoku efikasnost i iskorišćenje resursa mreže
- ❑ Tehnološki razvoj je omogućio efikasnu obradu paketa koji se prenose linkovima kapaciteta 100Gb/s

Komutatori paketa

Uloga komutatora paketa

- ❑ Osnovna funkcija je prosleđivanje/rutiranje korisničkih paketa
- ❑ Razmjena kontrolnih paketa radi izvršavanje velikog broja kontrolnih funkcija neophodnih za obavljanje funkcija prosleđivanja/rutiranja
- ❑ Implementirani su na različitim nivoima OSI referentnog modela
- ❑ Struktura ekvivalentna strukturi komutatora kola

Komutacija paketa

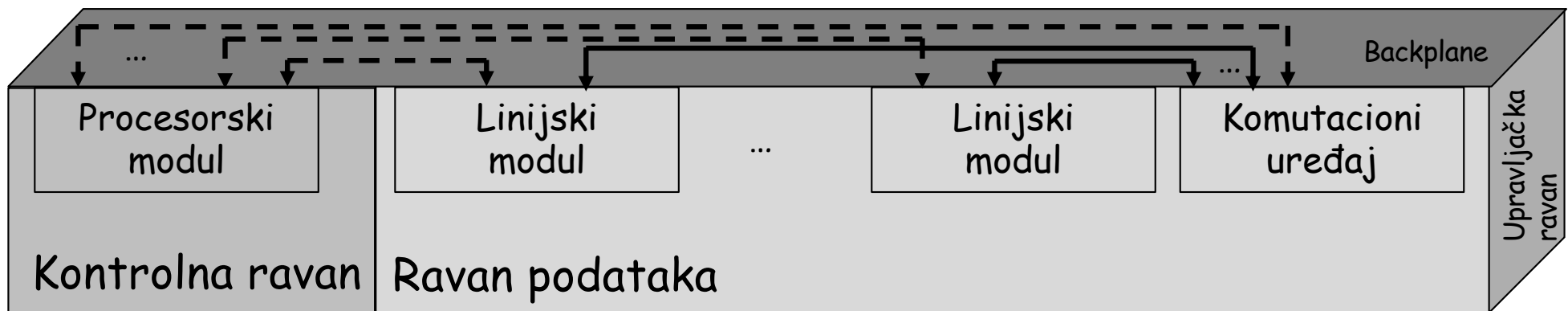
Principiska arhitektura komutatora paketa

Fizička struktura

- ❑ Backplane
- ❑ Linijski modul
- ❑ Komutacionog uređaj
- ❑ Procesorski modul

Logička struktura

- ❑ Ravan podataka
- ❑ Kontrolna ravan
- ❑ Upravljačka ravan



↔ Prenos korisničkih paketa

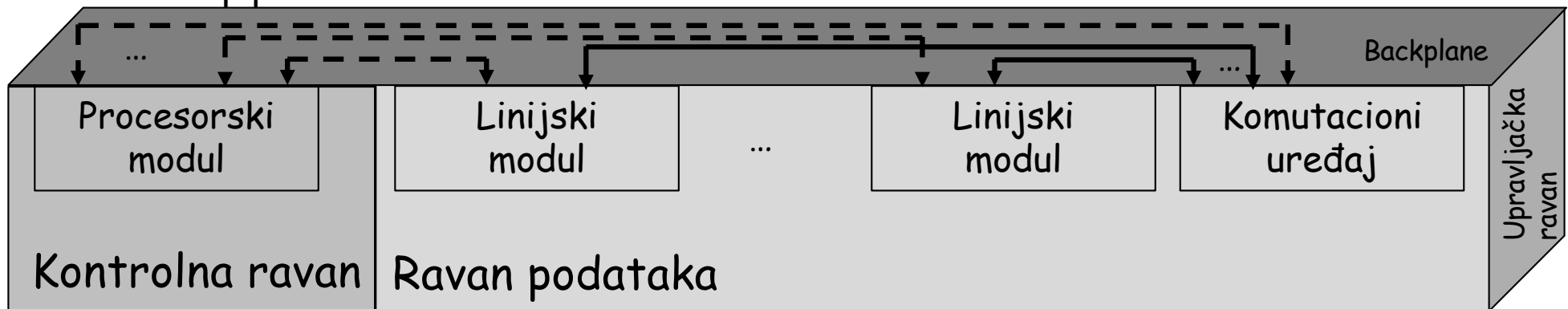
↔ Prenos kontrolnih i upravljačkih paketa

Komutacija paketa

Principiska arhitektura komutatora paketa

Ravan podataka

- ❑ Obrada korisničkih paketa
- ❑ Implementirana u hardveru radi bržeg procesiranja korisničkih paketa
- ❑ Tipične funkcije
 - Ispitivanje ispravnosti primljenog paketa
 - Prosleđivanje paketa
 - Odbacivanje paketa u slučaju zagušenja komutatora
 - Baferovanje paketa
 - Lookup paketa



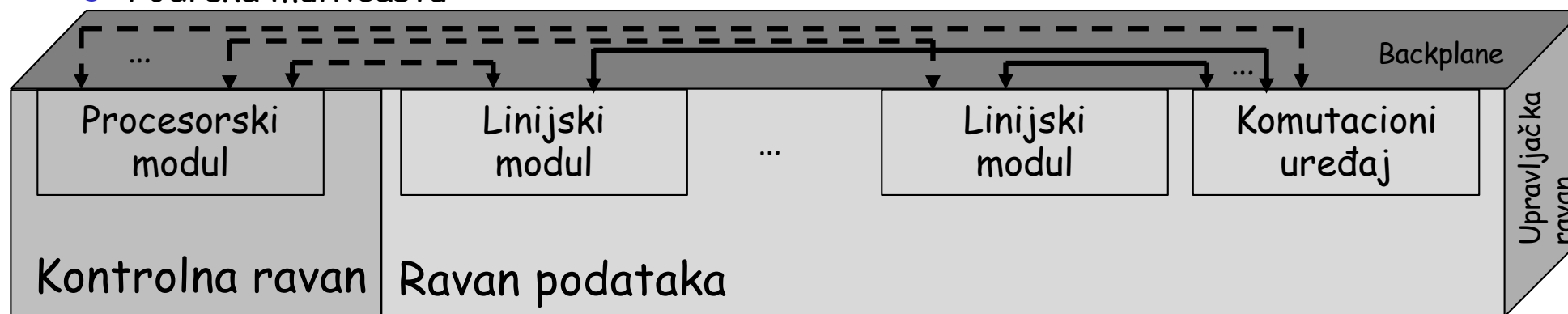
- ↔ Prenos korisničkih paketa
← - → Prenos kontrolnih i upravljačkih paketa

Komutacija paketa

Principiska arhitektura komutatora paketa

Kontrolna ravan

- ❑ Obrada kontrolnih paketa
- ❑ Implementirana zajedno sa upravljačkom ravni u softveru na procesorima opšte namjene radi lakšeg održavanja, dodavanja i modifikovanja kontrolnih funkcija
- ❑ Tipične funkcije
 - Protokoli rutiranja
 - Ažuriranje tabela rutiranja
 - Protokoli za rezervaciju resursa
 - Podrška multicastu



↔ Prenos korisničkih paketa

↔ Prenos kontrolnih I upravljačkih paketa

Komutatori paketa

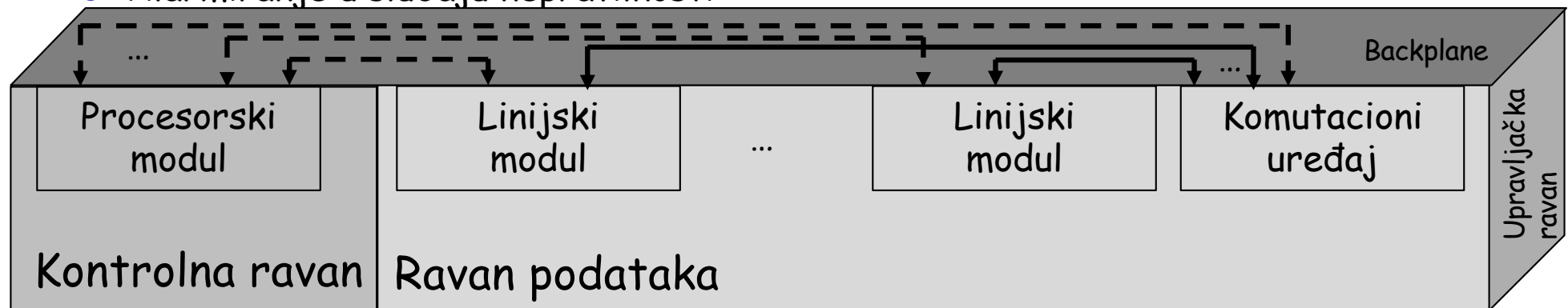
4-6

Komutacija paketa

Principiska arhitektura komutatora paketa

Upravljačka ravan

- ❑ Obrada upravljačkih paketa
- ❑ Implementirana zajedno sa kontrolnom ravni u softveru na procesorima opšte namjene radi lakšeg održavanja, dodavanja i modifikovanja upravljačkih funkcija
- ❑ Tipične funkcije
 - Udaljeni pristup administratora
 - Komandni interfejs za konfiguriranje komutatora paketa
 - Protokoli za nadgledanje komutatora paketa
 - Alarmiranje u slučaju nepravilnosti



↔ Prenos korisničkih paketa

↔ Prenos kontrolnih i upravljačkih paketa

Komutatori paketa

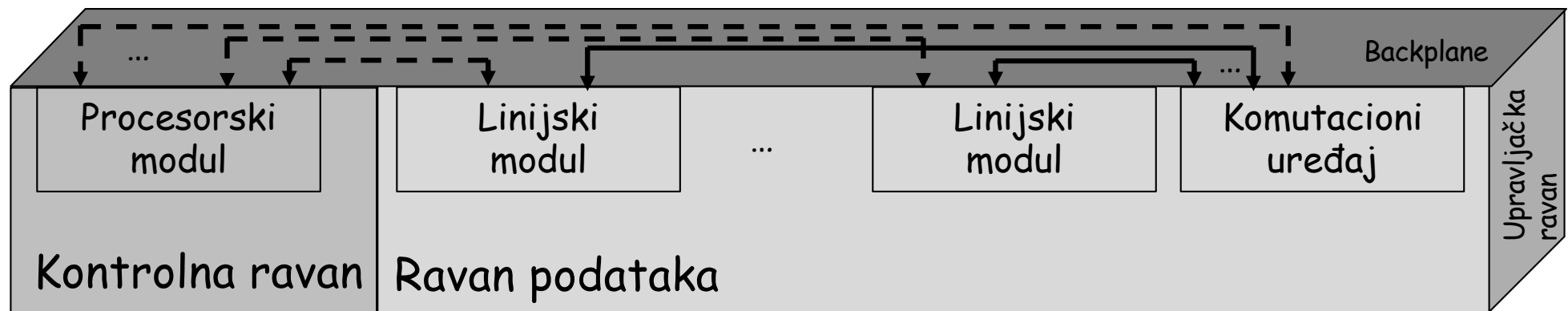
4-7

Komutacija paketa

Principiska arhitektura komutatora paketa

Linijski modul

- ❑ Pripada ravni podataka
- ❑ Sadrži ulazne/izlazne portove
- ❑ Obraduje pakete
 - Provjera ispravnosti paketa
 - Lookup
 - Segmentacija paketa...
- ❑ Baferuje pakete
- ❑ Može ih biti više na komutatoru paketa



↔ Prenos korisničkih paketa

↔ Prenos kontrolnih i upravljačkih paketa

Komutatori paketa

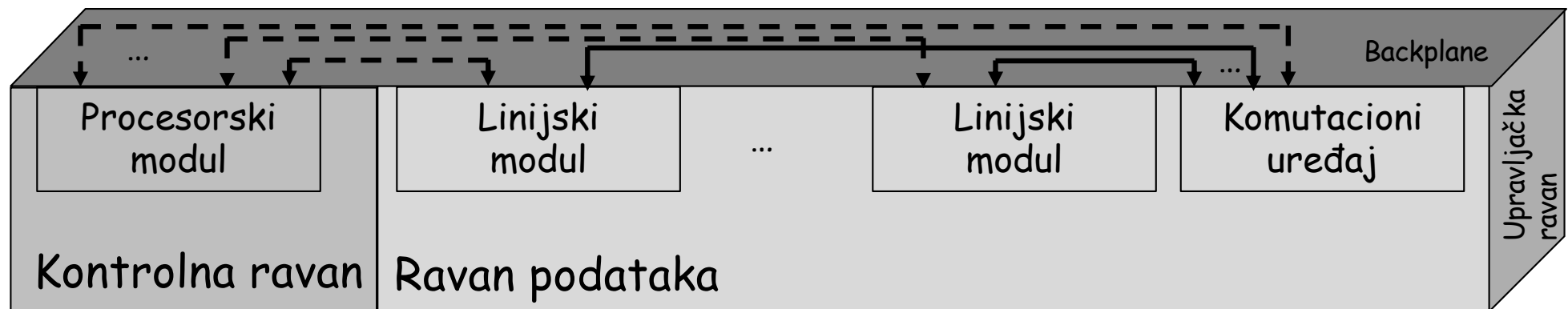
4-8

Komutacija paketa

Principska arhitektura komutatora paketa

Komutacioni uređaj

- Pripada ravni podataka
- Prosleđuje korisničke pakete sa ulaznih na izlazne portove



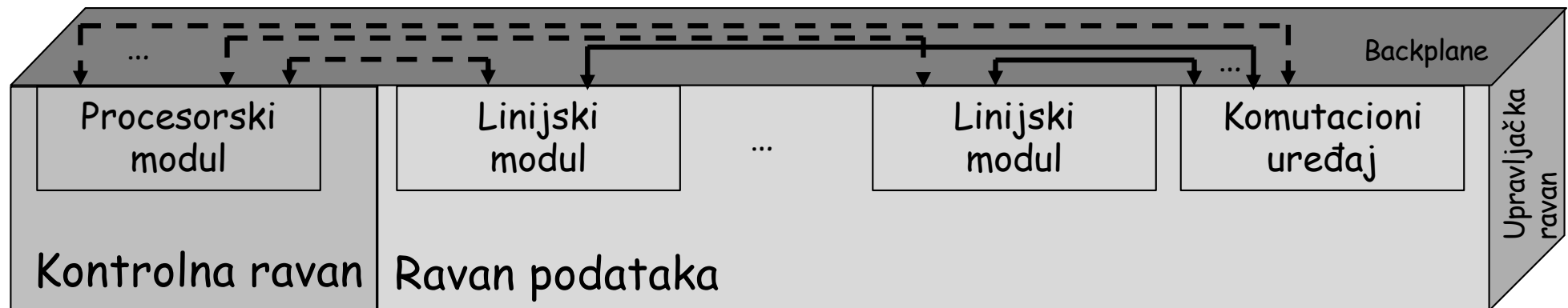
- ↔ Prenos korisničkih paketa
- - - Prenos kontrolnih i upravljačkih paketa

Komutacija paketa

Principiska arhitektura komutatora paketa

Procesorski modul

- ❑ Pripada kontrolnoj ravni
- ❑ Na njemu se instalira operativni sistem komutatora u okviru koga se izvršavaju funkcije kontrolne i upravljačke ravni
- ❑ Jedan ili više radi boljih performansi i veće pouzdanosti
- ❑ Upravlja radom linijskih modula i komutacionog uređaja



↔ Prenos korisničkih paketa
- - - Prenos kontrolnih i upravljačkih paketa

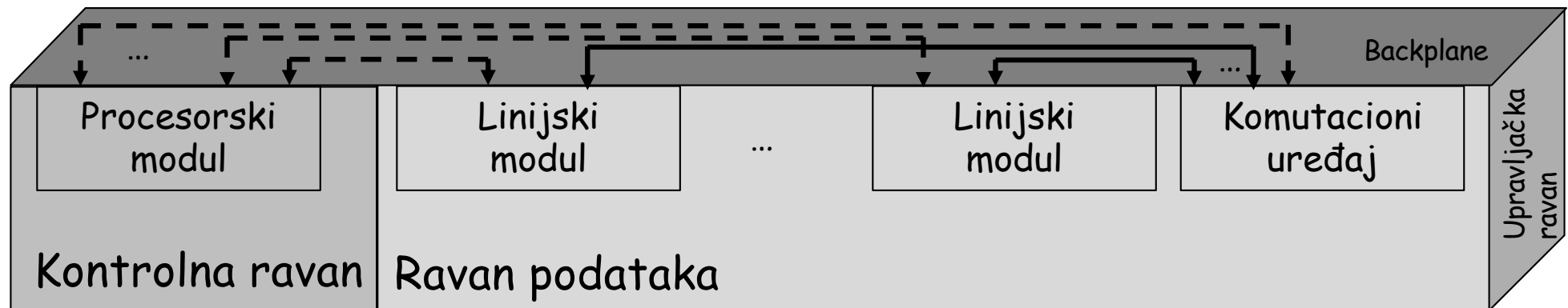
Komutacija paketa

Principiska arhitektura komutatora paketa

Backplane

- ❑ Povezuje sve module realizovane u formi harverskih kartica
- ❑ Omogućava razmjenu korisničkih, kontrolnih i upravljačkih paketa između modula
- ❑ Štampana ploča koja povezuje ostale elemente strukture
- ❑ Omogućava modularan i skalabilan dizajn komutatora paketa sa velikim brojem portova

Napomena: Komutator paketa uvijek ima blok za napajanje



- ↔ Prenos korisničkih paketa
- ↔ Prenos kontrolnih i upravljačkih paketa

Komutacija paketa

Komutacioni uređaj

- ❑ Komutacioni uređaj se sastoji od komutacionih elemenata povezanih u određenu topologiju na osnovu definisanog pravila povezivanja. Komutacioni element je osnovna komutaciona jedinica u strukturi komutacionog uređaja.
- ❑ prosleđivanje (rutiranje) i baferovanje (uskladištenje) ćelija,
- ❑ koncentracija, ekspanzija i multipleksiranje saobraćaja,
- ❑ redundantnost radi otpornosti na otkaze,

Komutacija paketa

Komutacioni uređaj (nastavak)

- ❑ višedifuzija (*multicast*) i širokodifuzija (*broadcast*) paketa,
- ❑ prioritarno prosleđivanje paketa,
- ❑ očuvanje redosleda paketa,
- ❑ nadgledanje zagušenja i aktiviranje indikacije u slučaju postojanja zagušenja.

Komutacija paketa

Komutacioni uređaj (nastavak)

Funkcija prosleđivanja obezbeđuje prenos informacija (vremenskom ili prostornom komutacijom) sa jednog ulaza na jedan izlaz, koji je izabran između većeg broja izlaza. Fizički ulaz/izlaz je definisan brojem porta.

Funkcije uskladištenja: Kada se u komutatorima paketa ostvaruje prostorna komutacija, pojavljuje se problem kolizije ako se dvije ili više paketa nadmeću za isti resurs u istom vremenskom trenutku. Taj problem se može razriješiti primjenom uskladištenja u baferima (redovima čekanja), što je drugi važan aspekt komutatora paketa.

Komutacija paketa

Komutacioni uređaj (nastavak)

Realizacije pojedinih komutatora se razlikuju upravo po načinu na koji su prethodne dvije funkcije primijenjene i mjestu gde su u komutatoru te funkcije locirane.

Komutacija paketa

Bitne karakteristike komutacionog uređaja

- ❑ Podrška multicast saobraćaju
- ❑ Blokiranje
- ❑ Skalabilnost (mogućnost nadogradnje)
- ❑ Ubrzanje komutatora paketa
- ❑ Propusnost komutatora paketa
- ❑ Cijena (ekonomičnost izrade)
- ❑ Kompleksnost (složenost realizacije i upravljanja)
- ❑ Tip paketa (promjenljive ili fiksne dužine)
- ❑ Efikasnost i složenost algoritama za odlučivanje
- ❑ Baferovanje

Komutacija paketa

Klasifikacija komutacionih uređaja

- ❑ Zbog različite realizacije funkcija komutacioni uređaji se mogu razlikovati po mnoštvu karakteristika tako da se jedna njihova cjelovita klasifikacija teško može napraviti.
- ❑ Na primjer, prema načinu organizovanja komutacionih elemenata razlikuju se jednokaskadni i višekaskadne realizacije.
- ❑ Prema načinu rješavanja problema kolizije razlikuju se blokirajući i neblokirajući dizajni.
- ❑ Najveći broj osmišljenih komutacionih uređaja predstavlja "simbiozu" više različitih komutacionih uređaja što takođe otežava njihovu podjelu.

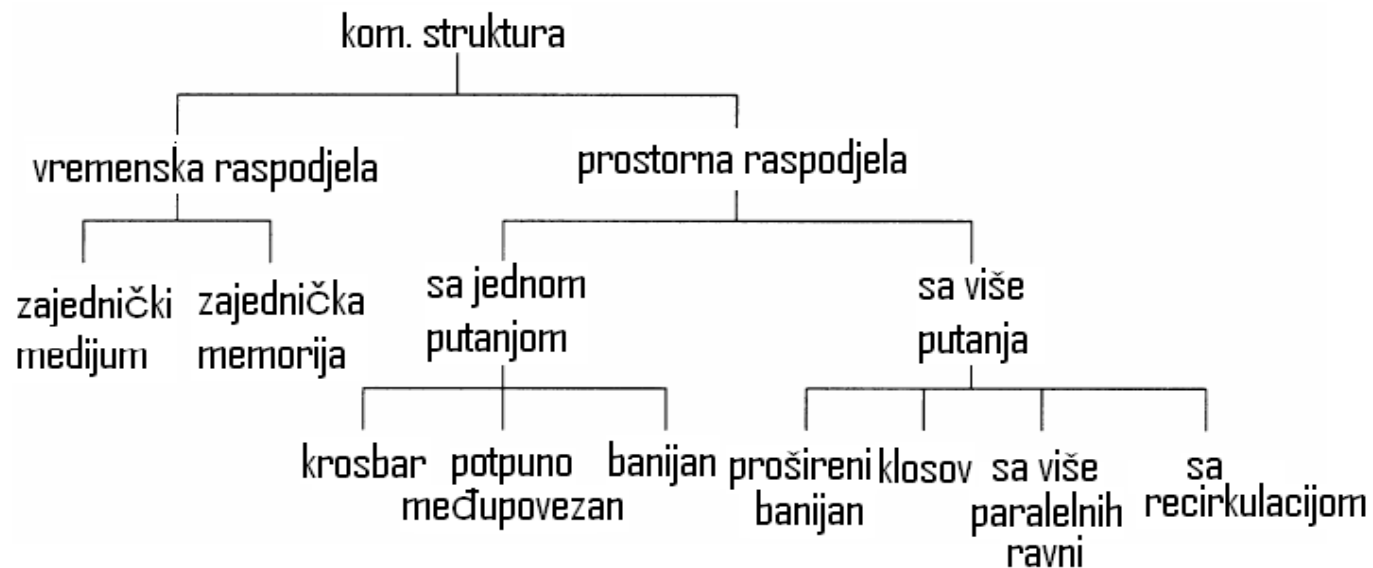
Komutacija paketa

Klasifikacija komutacionih uređaja (nastavak)

- Najopštija podjela se dobija ako se istovremeno razmatra više karakteristika komutatora.
- Izbor navedenih karakteristika je proizvoljan, uz zahtjev da sistematizacija obuhvati što veći broj komutacionih uređaja i ostavi mogućnost budućeg uključivanja novih komutacionih uređaja.

Komutacija paketa

Jedna klasifikacija komutacionih uređaja



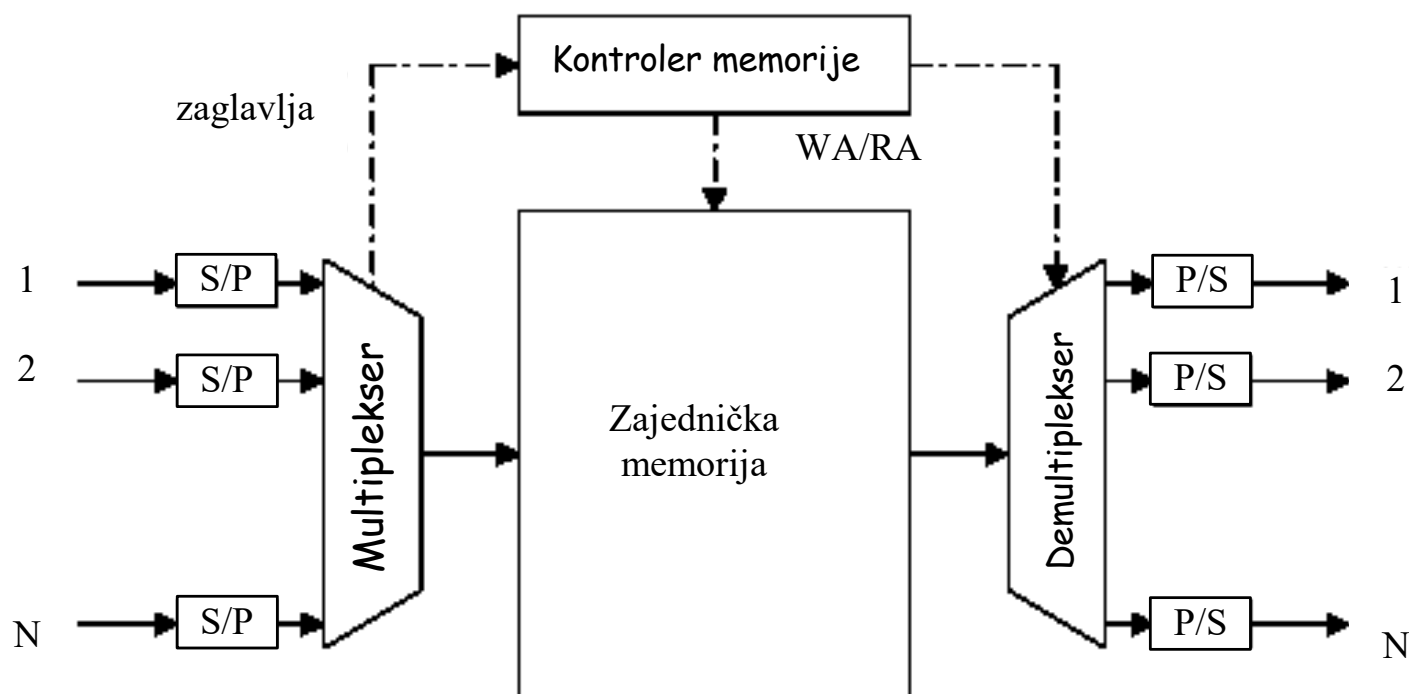
Komutacija paketa

Vremenski komutacioni uređaji

- ❑ Vremenska komutacija, kao princip komutiranja, je primijenjena kod komutacionih uređaja baziranih na zajedničkoj memoriji i zajedničkom medijumu za prenos (prsten, magistrala,...).
- ❑ Ograničavajući parametar je kapacitet memorije, odnosno magistrale.
- ❑ Bitna pogodnost je jednostavnost realizacije *multicast* i *broadcast* saobraćaja.

Komutacija paketa

Vremenski komutacioni uređaji sa zajedničkom memorijom



RA – čitanje adrese
WA – upisivanje adrese
S/P – serija u paralelu
P/S – paralela u seriju

Komutacija paketa

Vremenski komutacioni uređaji sa zajedničkom memorijom

- U slučaju ovog komutacionog uređaja, paketi se konvertuju iz serijske forme, u kojoj se prenose preko linka, u paralelnu formu i sekvencionalno se upisuju u memoriju sa slučajnim pristupom, koja ima dva porta (ulazni i izlazni).
- Zato se koriste TDM multiplekser na ulazu i TDM demultiplekser na izlazu
- Memorija može biti zajednička ili distribuirana.
- Kontroler memorije odlučuje o redosledu izčitavanja paketa iz memorije, zasnovanom na zaglavlju paketa.
- Odlazeći paketi se nakon demultipleksiranja konvertuju iz paralelne u serijsku formu.

Komutacija paketa

Vremenski komutacioni uređaji sa zajedničkom memorijom

- ❑ Ova arhitektura je privlačna jer obezbjeđuje 100% propusnost čak i pod uslovima visokog nivoa dolaznog saobraćaja.
- ❑ Korišćenjem zajedničke memorije postiže se minimizacija memorijskog prostora potrebnog za postizanje odgovarajućeg nivoa vjerovatnoće gubitka paketa.
- ❑ Osnovni nedostatak ove arhitekture je vrijeme pristupa memoriji, koje treba da podrži i dolazni i odlazni saobraćaj.
- ❑ Postoje dva različita pristupa u pogledu načina dijeljenja memorije: kompletna particija (*complete partitioning*) i potpuno dijeljenje (*full sharing*).

Komutacija paketa

Vremenski komutacioni uređaji sa zajedničkom memorijom

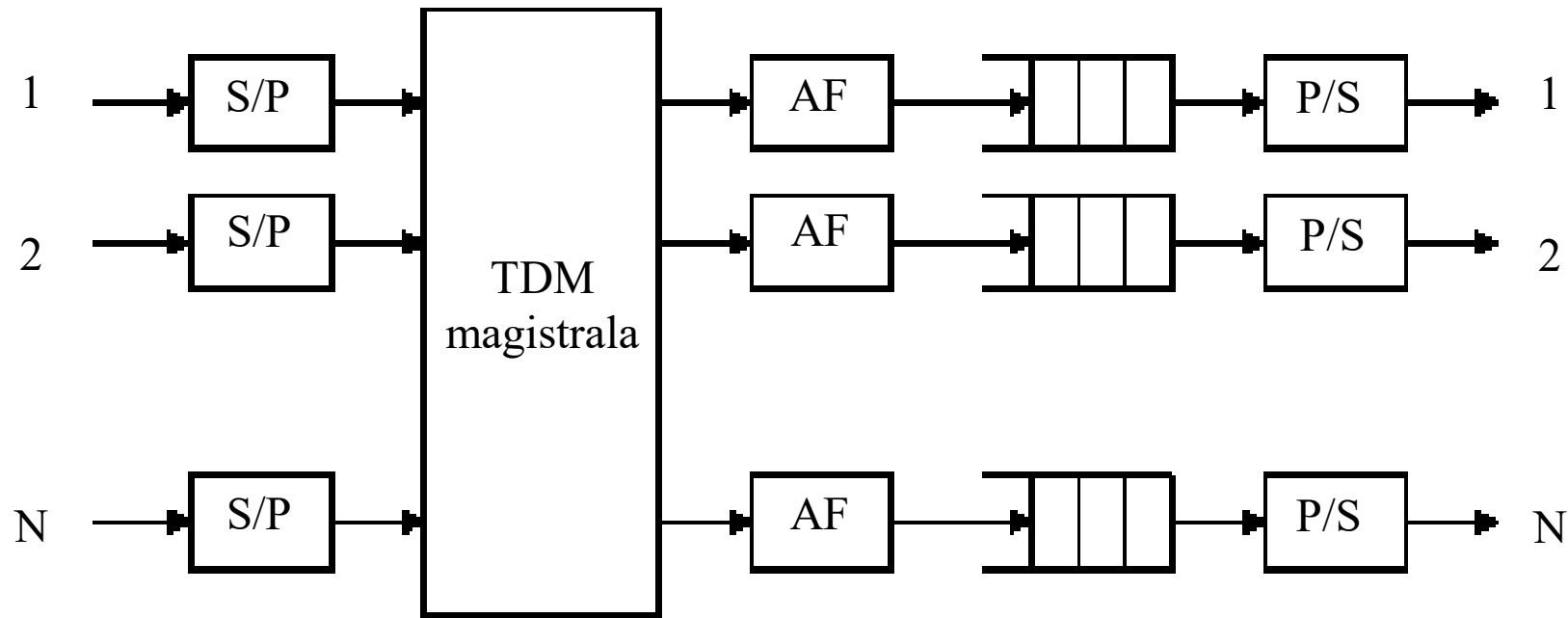
- U slučaju zajedničke memorije zahtijevani memorijski kapacitet je znatno manji, memorija je znatno brža ali i mnogo osjetljivija u odnosu na zagušenje u slučaju neuniformnog saobraćaja.
- Brzina ove realizacije je ograničena brzinom memorije (brzine upisa/čitanja). Ukoliko je brzina prenosa linija R , to je potrebna brzina memorije $2NR$ b/s (strožije nego za komutator sa zajedničkim medijumom). Na primjer, ukoliko je trajanje slota $2.83 \mu\text{s}$ (53 B na liniji brzine 149.76 Mb/s) i vrijeme pristupa memoriji 10 ns, veličina komutatora je limitirana na 141. Broj ulaza je definisan relacijom:

$$2N \leq \frac{T_{\text{paket}}}{T_{\text{memorija}}}$$

- Prvi komutator baziran na ovom principu bio je *Prelude* (CNET). Više proizvođača je do sada proizvelo komutacioni element sa zajedničkom memorijom (ALCATEL, HITACHI, TOSHIBA).

Komutacija paketa

Vremenski komutacioni uređaji sa zajedničkim medijumom



Komutacija paketa

Vremenski komutacioni uređaji sa zajedničkim medijumom

- ❑ Komutacioni uređaji, bazirani na vremenskoj komutaciji, sa zajedničkim medijumom nemaju vrijeme pristupa memoriji kao "usko grlo".
- ❑ Kod ovih arhitektura dolazeći paketi se multipleksiraju na zajedničku sredinu za prenos (magistrala, prsten, dvostruka magistrala,...).
- ❑ Svakom ulazu se dodjeljuje jedan TDM kanal pri čemu jedan TDM frejm ima N kanala
- ❑ Svi izlazi su povezani preko adresnih filtera na zajednički medijum i primaju TDM multipleks
- ❑ Adresni filter propušta samo pakete namijenjene odgovarajućem izlazu
- ❑ Osnovna prednost ove arhitekture je odsustvo kolizije vezane za istovremeno nadmetanje više paketa za isti izlaz.
- ❑ Mogućnosti prenosa *multicast* i *broadcast* saobraćaja su same po sebi jednostavne i prirodne.

Komutacija paketa

Vremenski komutacioni uređaji sa zajedničkim medijumom

- ❑ Medijum za prenos mora N puta brži od ulaznih portova
- ❑ Tokom jednog TDM frejma potrebno je u bafer obaviti N upisa i jedno izčitivanje
- ❑ Problemi nastaju kada se broj ulaznih portova povećava i kada rastu nivoi dolaznog saobraćaja što dovodi zajedničku sredinu u situaciju da predstavlja usko grlo.
- ❑ Zajednički medijum za prenos teško može proširivati (nije skalabilan) i može da podrži relativno mali broj portova.

Komutacija paketa

Vremenski komutacioni uređaji sa zajedničkim medijumom

- ❑ Paketi koji dolaze na ulaze ove arhitekture sa slike se iz serijske forme pretvaraju u paralelnu i sekvencionalno prenose po magistrali po principu “prozivke”.
- ❑ Na svakom izlazu postoji adresni filter koji propušta pakete adresirane na posmatrani izlaz do izlaznih bafera.

Komutacija paketa

Vremenski komutacioni uređaji sa zajedničkim medijumom (nastavak)

- Ukoliko je brzina prenosa linija R , to je potrebna brzina memorije $(N+1)R$ b/s. Na primjer, ukoliko je trajanje slota $2.83\mu s$ (53B na liniji brzine 149.76Mb/s) i vrijeme pristupa memoriji 10ns, veličina komutatora je limitirana na 282.

$$\square N \square 1 \square \leq \frac{T_{paket}}{T_{memorija}}$$

- Prije odlaska paketi se iz paralelne forme transformišu u serijsku formu.
- Praktično su realizovani ALCATEL-ov komutacioni elemenat, *Atmospheric ring (RACE)*, *Atom (NEC)* i Fore System-ov ForeRunner ASX-100 .

Komutacija paketa

Prostorni komutacioni uređaji

Postoje dva osnovna nedostaka komutacionih uređaja sa vremenskom komutacijom:

- ❑ multipleksiranje se zahtijeva na ulaznoj strani a demultipleksiranje na izlaznoj strani komutacionog uređaja, što ograničava mogućnost proširivanja i mogućnost podržavanja većeg broja portova,
- ❑ funkcije upravljanja i kontrole memorijama, odnosno baferima, su centralizovane što povećava kompleksnost, a smanjuje pouzdanost komutatora.

Komutacija paketa

Prostorni komutacioni uređaji (nastavak)

- Kod komutacionih uređaja sa prostornom komutacijom je primijenjen princip višestrukog međupovezivanja skupa ulaza i skupa izlaza.
- Više puteva između skupa ulaza i skupa izlaza omogućava paralelizam u prenosu paketa čak i kada su brzine na ulaznim/izlaznim portovima jednake ili čak veće od brzine komutiranja.
- Na taj način se propusna moć značajno povećava u odnosu na komutatore paketa bazirane na vremenskoj komutaciji.

Komutacija paketa

Prostorni komutacioni uređaji (nastavak)

- ❑ Istovremeno uspostavljanje više zahtijevanih "veza" između ulaza i izlaza dovodi do neophodnosti unutrašnjeg usmjeravanja paketa.
- ❑ Kontrola procesa unutrašnjeg usmjeravanja može biti distribuirana što smanjuje složenost rješenja.

Komutacija paketa

Prostorni komutacioni uređaji (nastavak)

Prosleđivanje paketa po jednoj od mogućih trasa koje se biraju u procesu usmjeravanja može biti:

- ❑ *samorutirajuće* /paket "sam" na osnovu algoritma rutiranja u komutacionom elementu i interne odredišne adrese pronalazi put/;
- ❑ *tabelarno* /paket se rutira na osnovu trase definisane unutar rutirajućih tabela komutatora/;
- ❑ *kombinaciono* (kombinacija prethodna dva načina);

Komutacija paketa

Prostorni komutacioni uređaji (nastavak)

Paket može biti proslijeđen:

- "tačka-tačka",
- višedifuzno ("tačka-više tačaka" ili *multicast*),
- širokodifuzno ("tačka-sve tačke" ili *broadcast*).

Komutacija paketa

Prostorni komutacioni uređaji (nastavak)

Ako više paketa u prenosu zahtijeva isti resurs dolazi do kolizije, koja značajno degradira performanse komutacionog uređaja. Kolizija se može pojaviti kao:

- interna (resurs je unutar komutacionog uređaja),
- spoljašnja (postoji više istovremenih zahtijeva za isti izlaz).

Komutacioni uređaji kod kojih se javlja samo konflikt na izlazu se nazivaju interno neblokirajući komutacioni uređaji.

Komutacija paketa

Prostorni komutacioni uređaji (nastavak)

Postoji više načina za otklanjanje kolizije:

- ❑ odbacivanje svih paketa koji su se našli u koliziji osim jednog,
- ❑ **baferovanje paketa na mjestu kolizije ili na nekom drugom mjestu u komutatoru koji obezbjeđuje eliminisanje kolizije,**
- ❑ uvođenjem prioriteta koji favorizuju prioritetnije grupe paketa,
- ❑ realizacija komutacionih uređaja u vidu paralelnih komutacionih ravni,
- ❑ ubrzavanje komutacije u komutacionom uređaju u odnosu na brzinu portova,
- ❑ realizacija komutacionih uređaja sa brojem izlaza koji je veći od broja ulaza,
- ❑ kombinacija prethodnih postupaka.

Komutacija paketa

Klasifikacija prostornih komutatora

Komutacioni elementi kod prostornih komutatora mogu biti krosbar ili banijan tipa, pa se stoga i komutacioni uređaji sa prostornom komutacijom dijele na

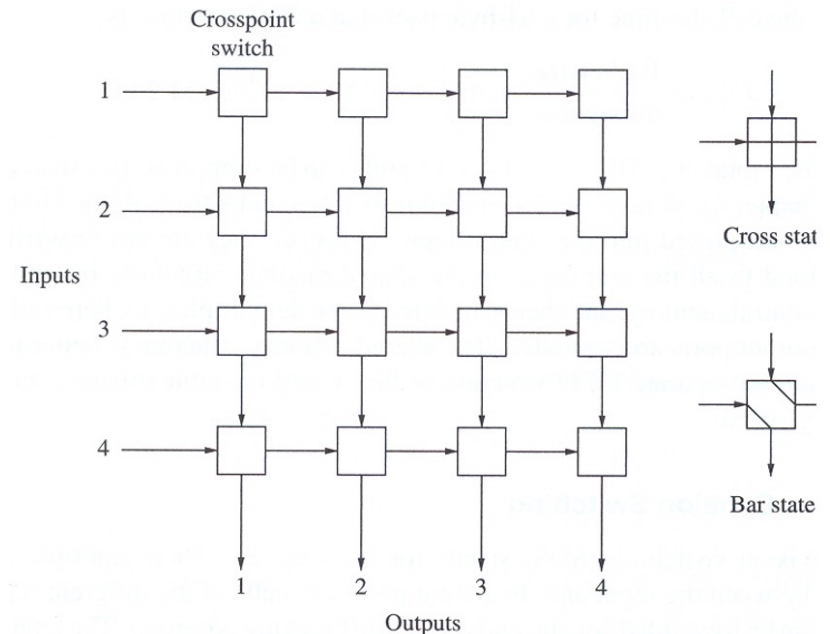
- *Single path* komutatore
 - krosbar (*crossbar*)
 - potpuno povezani (*fully interconnected*)
 - banijan (*banyan*)
- *Multi path* komutatore
 - prošireni banijan (*augmented banyan*)
 - trokaskadni Closov
 - višeravanski (*multiplane*)
 - recirkulacioni

Komutacija paketa

Krosbar prostorni komutatori

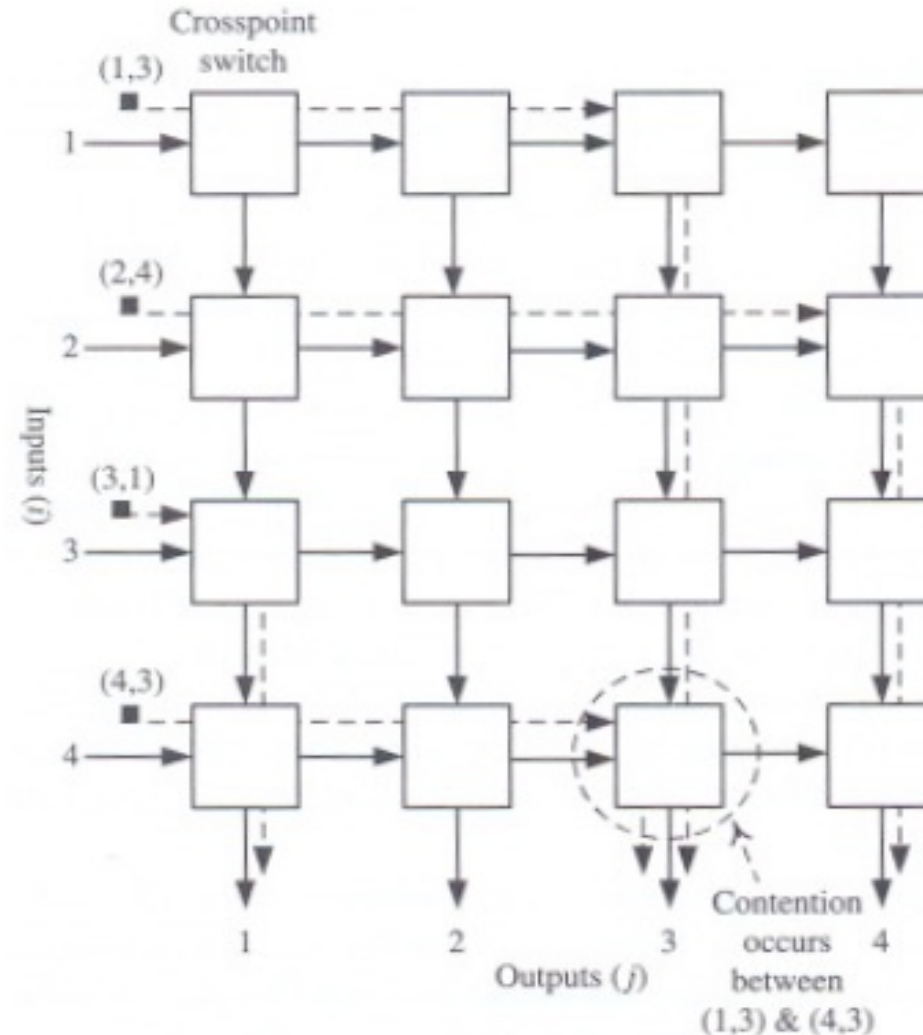
Pod krosbar komutacionim uređajem podrazumijeva se komutacioni uređaj matrične topologije, gdje se horizontalne magistrale pridružuju ulazima, a vertikalne izlazima

- ❑ Baziran na prostornoj komutaciji.
- ❑ Interno neblokirajući
- ❑ Jednostavna struktura
- ❑ Kompleksnost (broj komutacionih elemenata) raste proporcionalno kvadratu veličine komutatora N^2 .



Komutacija paketa

Krosbar prostorni komutatori



Komutacija paketa

Krosbar prostorni komutatori (nastavak)

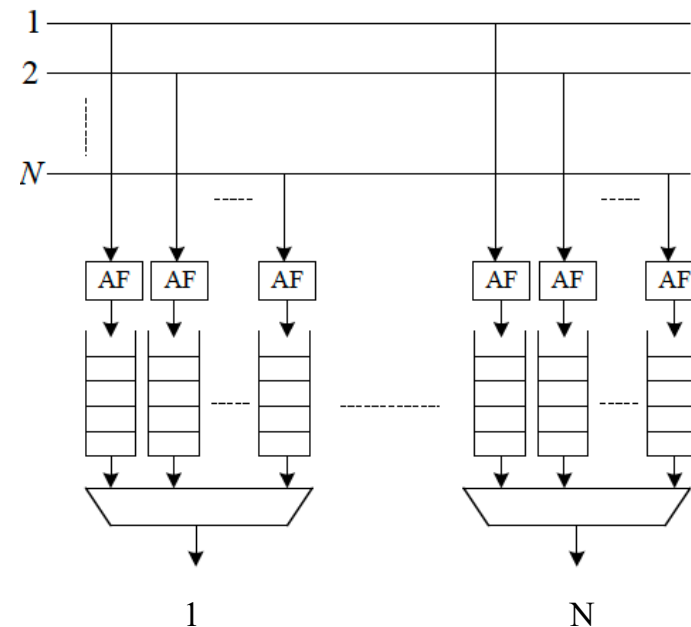
- Matrična krosbar topologija je prisutna u najvećem broju visokoperformantnih rutera današnjice.
- Važnost jednoskaskadne matrične topologije je u tome što ona predstavlja strukturu koju je lako simulirati i analizirati, a dobijeni rezultati se mogu jednostavno primijeniti za bilo koji interno neblokirajući komutator, posebno kada je riječ o metodama rješavanja spoljašnje kolizije.

Komutacija paketa

Potpuno povezani komutator

Potpuna povezanost se postiže povezivanjem preko N odvojenih magistrala od svakog ulaza do svakog izlaza

- Bafer i filter na svakom izlazu
- Kompleksnost (broj komutacionih elemenata) raste proporcionalno kvadratu veličine komutatora N^2 .
- Jednostavna i neblokirajuća struktura.
- Topologije sa N^2 razdvojenih puteva su prisutne u CHRISTMAS TREE, KNOCKOUT i "cilindričnom" komutatoru.



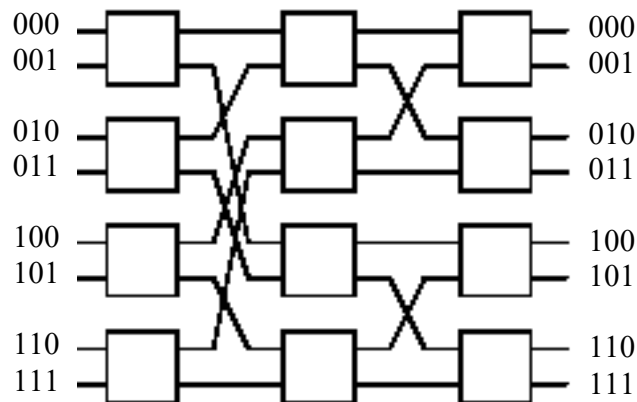
Komutacija paketa

Banijan prostorni komutatori

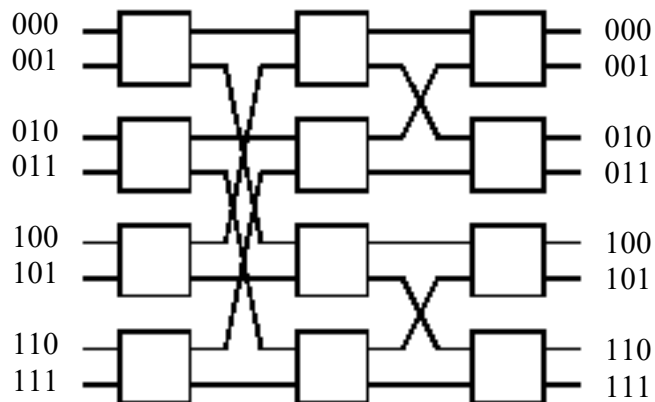
- ❑ Banijan predstavlja jednostavnu "samorutirajuću" topologiju koja garantuje da će ćelija stići "sama" do odredišta, izuzev u slučaju gubitka u arbitraži pri eventualnom nailasku na koliziju.
- ❑ Banijan topologija je bazirana na topologiji "drveta" koja se sastoji od $n \times n$ komutacionih elemenata povezanih u $\log_n N$ kaskada.
- ❑ Najčešće se razmatraju topologije sa $n=2$, koje su najjednostavnije za realizaciju, kako u fizičkom smislu tako i u smislu algoritma usmjeravanja, a posebno sa stanovišta analize performansi.
- ❑ Kod ovih topologija svakoj kaskadi odgovara po tačno jedna cifra u adresi po kojoj se ćelija rutira. Ako je ta cifra 0 ćelija se rutira na "gornji" izlaz, a ako je 1 ćelija se rutira na "donji" izlaz. U slučaju kolizije rutiranje se obavlja u skladu sa odgovarajućim algoritmom odlučivanja koji zavisi od samog komutacionog uređaja.

Komutacija paketa

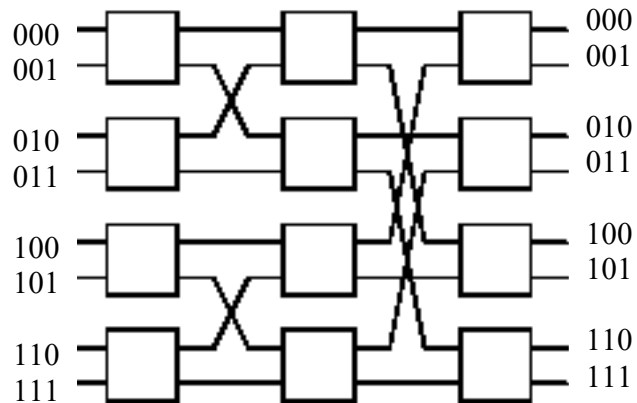
Banijan prostorni komutatori (nastavak)



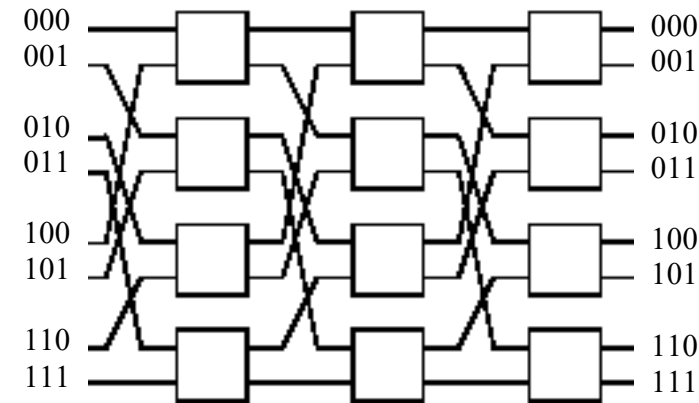
a) *baseline*



b) modifikovani manipulator podacima



c) delta



d) omega

Komutacija paketa

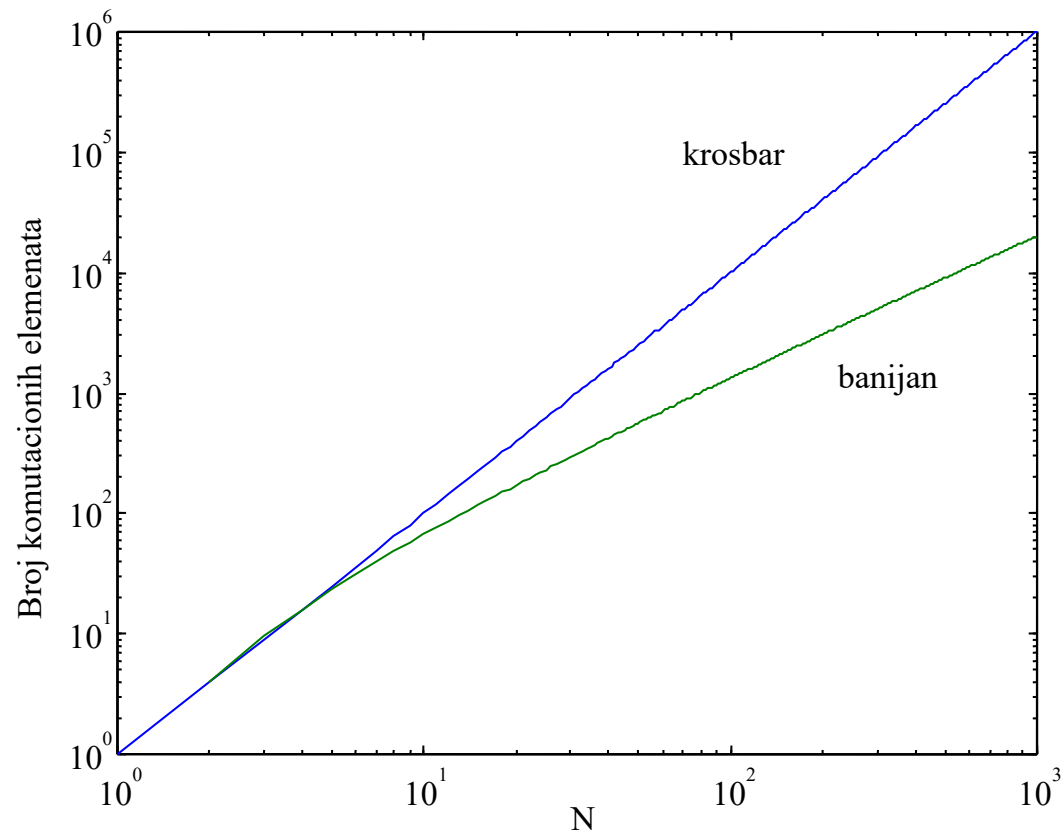
Banijan prostorni komutatori (nastavak)

- Ukupan broj $n \times n$ komutacionih elemenata je jednak $\frac{N \log_n N}{n}$, odnosno u smislu krosbar komutacionih elemenata, što je znatno manje od N^2 kod jednokaskadnih krosbar komutacionih uređaja.

Komutacija paketa

Banijan prostorni komutatori (nastavak)

- Za slučaj $n=2$, ukupan broj komutacionih elemenata u krosbar i banijan komutacionim uređajima u funkciji broja ulaza/izlaza (N) je prikazan na slici.



Komutacija paketa

Banijan prostorni komutatori (nastavak)

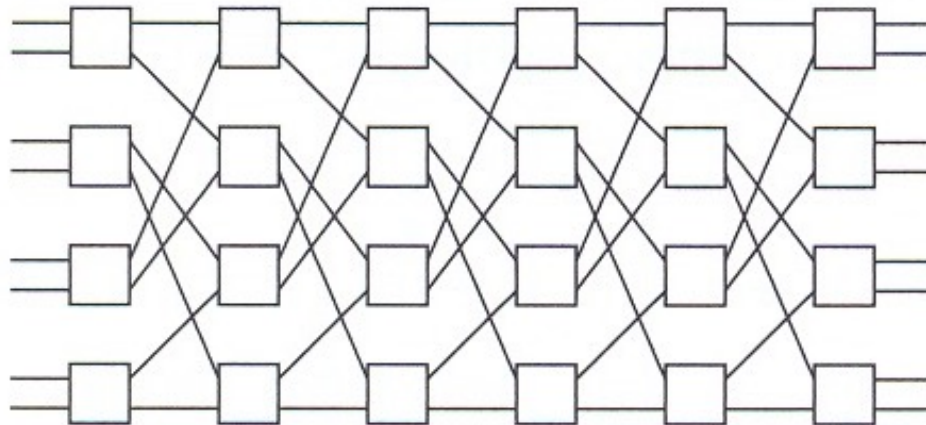
Osnovni nedostatak ove arhitekture je interno blokiranje koje značajno degradira performanse komutacionog uređaja. Postoji više načina za otklanjanje negativnog uticaja internog blokiranja od kojih su najznačajnija:

- ❑ korišćenje bafera unutar komutacionih elemenata /bafer banijan/,
- ❑ dodavanje u kaskadu novih banijan mreža ili više paralelnih ravni /prošireni banijan/,
- ❑ postavljanje *batcher* sortirajuće mreža na ulaz banijan mreže /batcher banijan/.

Komutacija paketa

Prošireni banyan

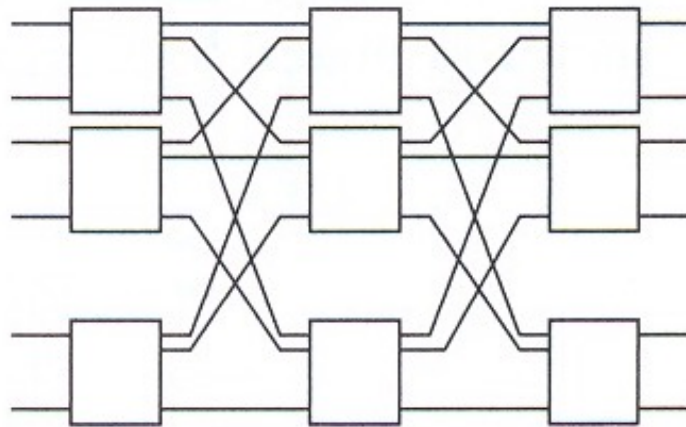
- ❑ Ima više od $\log_n N$ kaskada.
- ❑ Povećava se šansa paketa da dođe do željenog izlaza
- ❑ Na svakoj proširenoj kaskadi se provjerava da li je paket stigao na željeni izlaz
- ❑ *Tandem banyan i dual shuffle*



Komutacija paketa

Trokaskadni Closov komutator

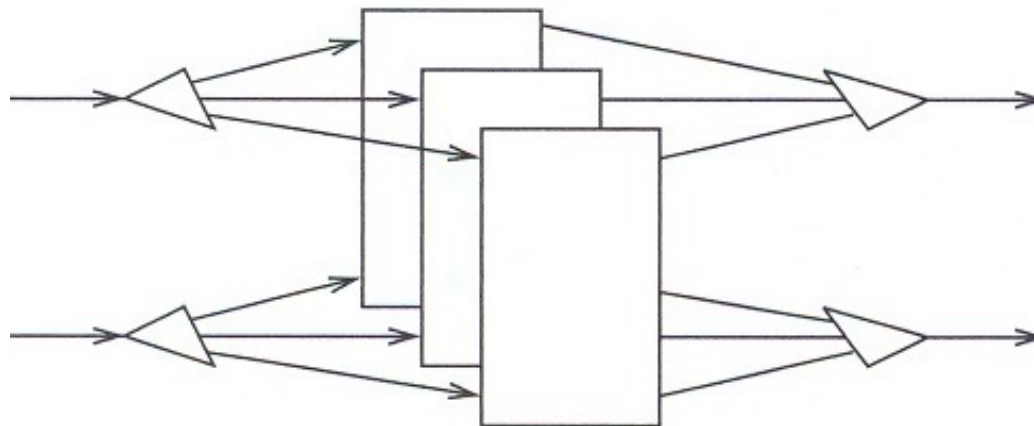
- ❑ Tri kaskade
- ❑ Prva kaskada se koristi za distribuciju saobraćaja
- ❑ Druga kaskada omogućava više paralelnih puteva kroz komutator
- ❑ Treća kaskada više paralelnih puteva vodi na željeni izlaz
- ❑ Closov uslov mora biti zadovoljen ako se želi realizovati neblokirajući dizajn



Komutacija paketa

Višeravanski komutator

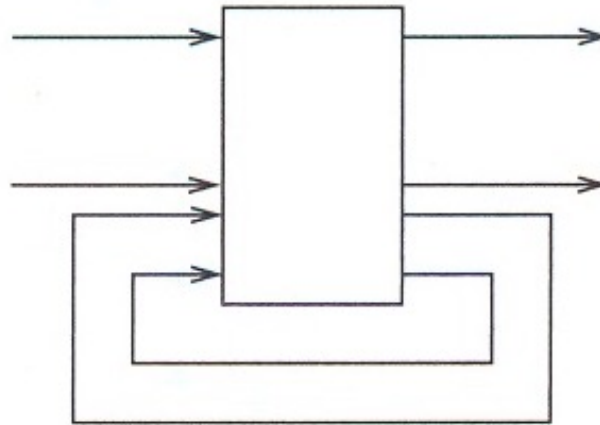
- ❑ Više identičnih komutacionih uređaja postavljenih u paraleli
- ❑ Bolja propusnost sistema
- ❑ Smanjenje unutrašnje kolizije
- ❑ Veća pouzdanost jer otkaz jednog komutacionog uređaja vodi samo smanjenju kapaciteta, ne i dostupnosti
- ❑ Sunshine



Komutacija paketa

Recirkulacioni komutator

- ❑ Vrši recirkulaciju paketa koje su "izgubile" uslijed izlazne kolizije
- ❑ Smanjenje vjerovatnoće gubitka
- ❑ Veći broj portova zbog dodavanja recirkulacionih portova
- ❑ *Out-of sequence* problem
- ❑ Starlite i Sunshine



Komutacija paketa

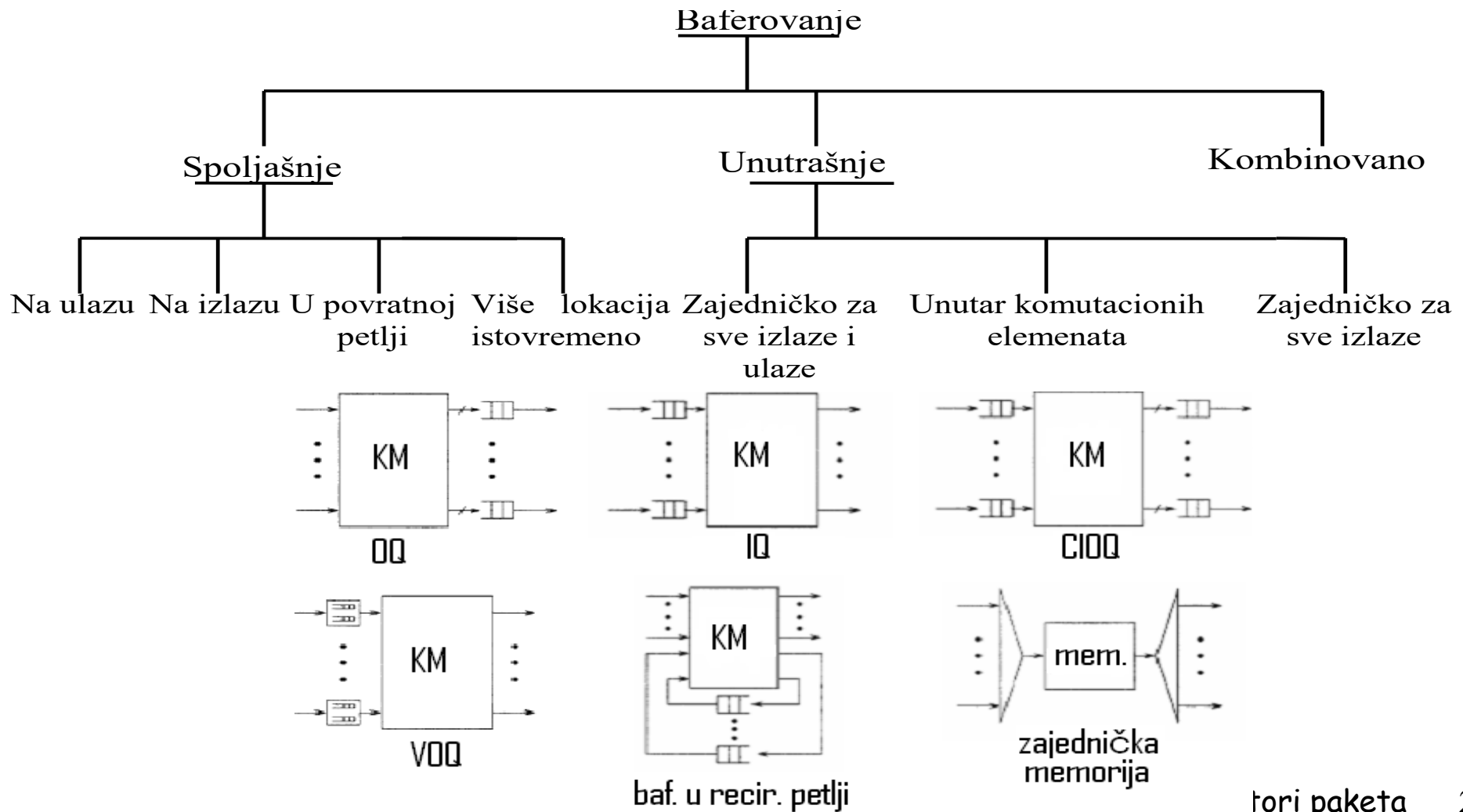
Baferovanje u komutatorima paketa

Da bi se redukovala degradacija performansi komutacionog uređaja prouzrokovana internim i spoljašnjim blokiranjem, mogu se obezbijediti baferi na:

- ❑ ulaznim portovima /ulazno baferovanje/,
- ❑ izlaznim portovima /izlazno baferovanje/,
- ❑ unutar komutatora /centralno baferovanje/,
- ❑ interno unutar komutacionih elemenata /interno baferovanje/
- ❑ kombinacija prethodnih postupaka baferovanja

Komutacija paketa

Baferovanje u komutatorima paketa



Komutacija paketa

Baferovanje u komutatorima paketa

Spoljašnje baferovanje se realizuje sa baferima van komutacionog uređaja lociranim na:

- ❑ ulazima,
- ❑ izlazima,
- ❑ povratnoj petlji,
- ❑ više navedenih lokacija istovremeno (ulaz/izlaz, ulaz/povratna petlja...).

Unutrašnje baferovanje se obavlja unutar komutacionog uređaja i može biti realizovano u obliku:

- ❑ zajedničkog bafera za sve ulaze i izlaze,
- ❑ baferovanja unutar komutacionog elementa (ulaz, izlaz, ulaz/izlaz...),
- ❑ zajedničkog bafera za sve izlaze.

Komutacija paketa

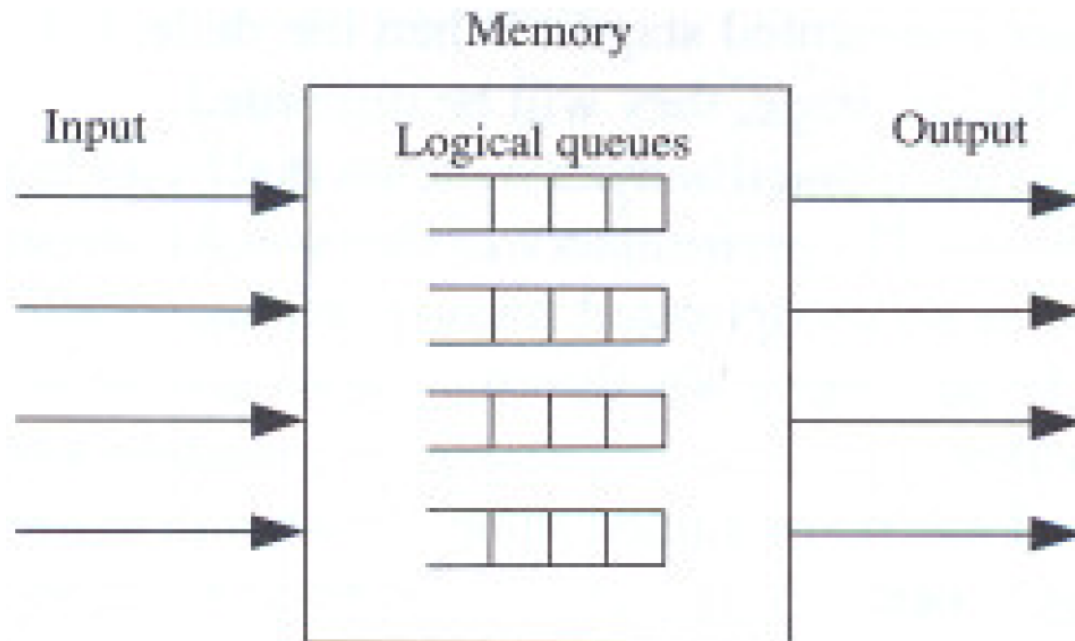
Baferovanje u komutatorima paketa

Kombinovano baferovanje se ostvaruje istovremenim postavljanjem bafera unutar komutacionih elemenata i van komutacionog uređaja.

Komutacija paketa

Komutator sa zajedničkom memorijom

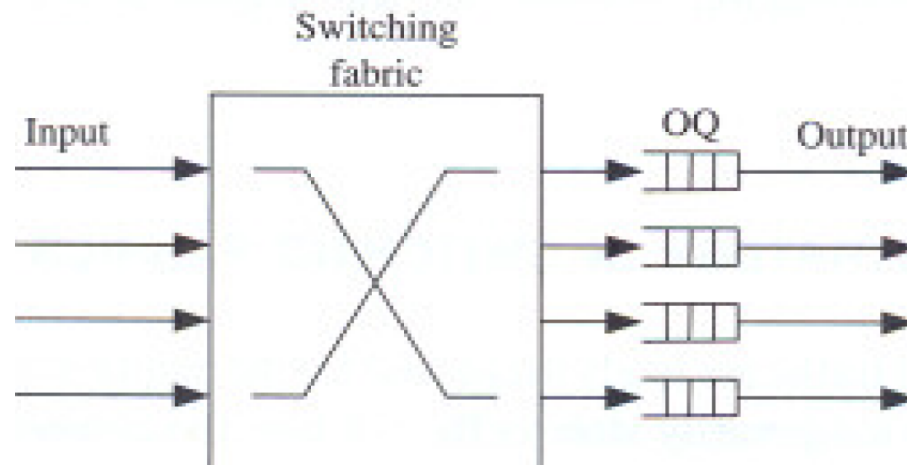
- ❑ Memorija sadrži N logičkih redova čekanja, pri čemu svaki odgovara jednom izlazu
- ❑ Iskorišćenje memorije je maksimalno
- ❑ Memorija mora jednovremeno (tokom trajanja vremenskog slota) odraditi N upisa i N izčitavanja
- ❑ Koristi se za komutatore sa malim brojem ulaza i izlaza



Komutacija paketa

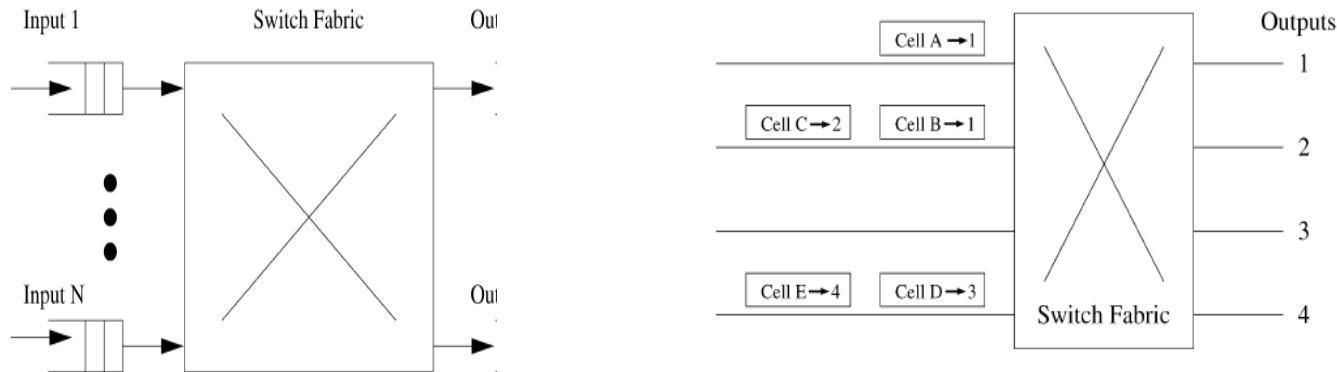
Izlazno baferovanje

- ❑ paketi se sa ulaza odmah prosleđuju na željeni izlaz
- ❑ baferi se postavljaju na izlazima
- ❑ najbolja kontrola saglasno QoS zahtjevima
 - 100% propusnost pri uniformnom dolaznom saobraćaju
 - najmanje srednje kašnjenje
 - mogućnosti alokacije propusnog opsega pojedinim tokovima



Komutacija paketa

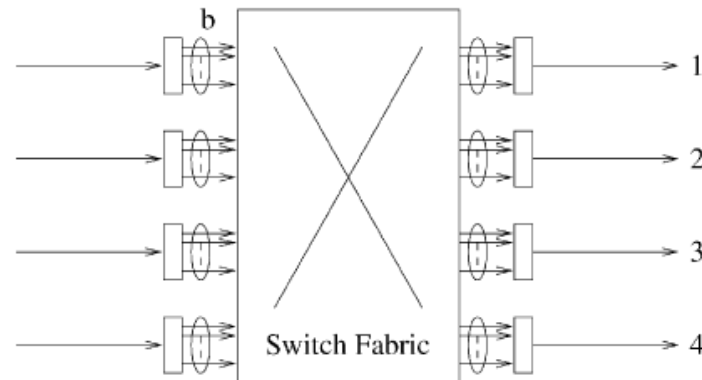
Ulazno baferovanje



- ❑ Na svakom ulazu po jedan FIFO bafer
- ❑ Aktuelna poslednjih godina jer izlazno baferovanje onemogućava realizaciju komutatora sa velikim brojem ulaza/izlaza
- ❑ HOL blokiranje
- ❑ Za beskonačno N propusnost je svega 0.586

Komutacija paketa

Multiline komutator paketa sa baferima na ulazu



- ❑ gubitak redosleda paketa koji pripadaju istom toku.
- ❑ za veliki broj ulaznih/izlaznih portova, potrebna je struktura sa b puta većim brojem ulaza/izlaza.
- ❑ iako je naučno gledano interesantan, ovaj pristup nema neki praktičan značaj.

Komutacija paketa

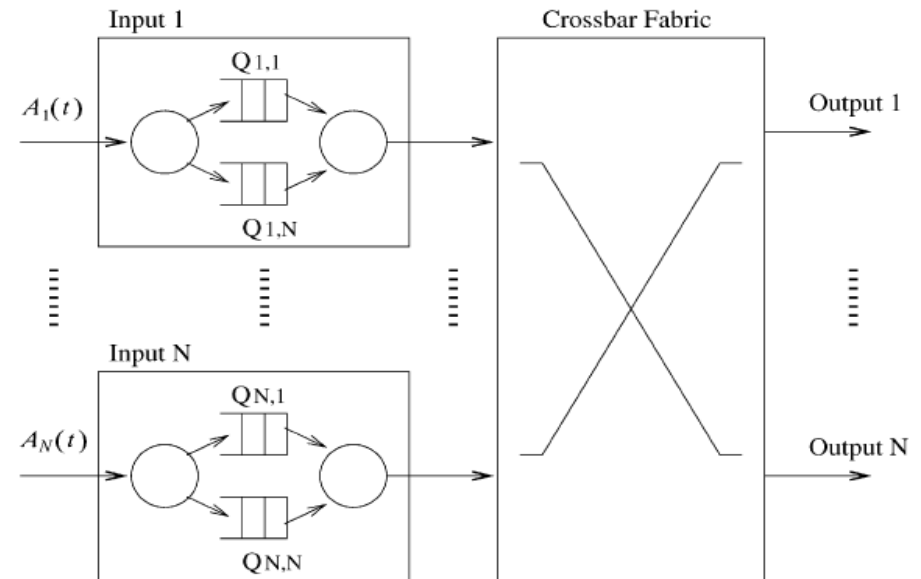
Window based komutator paketa sa baferima na ulazu prostornog komutatora

- ❑ Ostali paketi iz reda čekanja, kada njihova HOL ćelija izgubi nadmetanje, se nadmeću za izlazni resurs.
- ❑ w paketa, koliko iznosi veličina prozora, se nadmeće za izlazni resurs
- ❑ visoka osjetljivost na dolazni saobraćaj, tako da se za *bursty* saobraćaj ne postižu značajno bolje performanse nego kog FIFO discipline

N	Window Size w							
	1	2	3	4	5	6	7	8
2	0.75	0.84	0.89	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96
4	0.66	0.76	0.81	0.85	0.87	0.89	0.91	0.92
8	0.62	0.72	0.78	0.82	0.85	0.87	0.88	0.89
16	0.60	0.71	0.77	0.81	0.84	0.86	0.87	0.88
32	0.59	0.70	0.76	0.80	0.83	0.85	0.87	0.88
64	0.59	0.70	0.76	0.80	0.83	0.85	0.86	0.88
128	0.59	0.70	0.76	0.80	0.83	0.85	0.86	0.88

Komutacija paketa

VOQ komutator paketa



- ❑ paket koji dolazi na ulaz i , a namijenjen je za izlaz j , se postavlja u bafer VOQ_{ij}
- ❑ 100% propusnosti, ukoliko je algoritam za odlučivanje o prosljeđivanju ćelija stabilan
- ❑ Razmatraju se kašnjenje/propusnost i kompleksnost algoritma
- ❑ Algoritam za odlučivanje o prosljeđivanju ćelija je pravilo po kojem se određuje matrica uparivanja, na osnovu koje pojedine ćelije dobijaju odobrenje (*grant*) da budu prosljeđene sa ulaza na željeni izlaz.
- ❑ Algoritam za odlučivanje je sofisticiran (bipartitni grafovi)

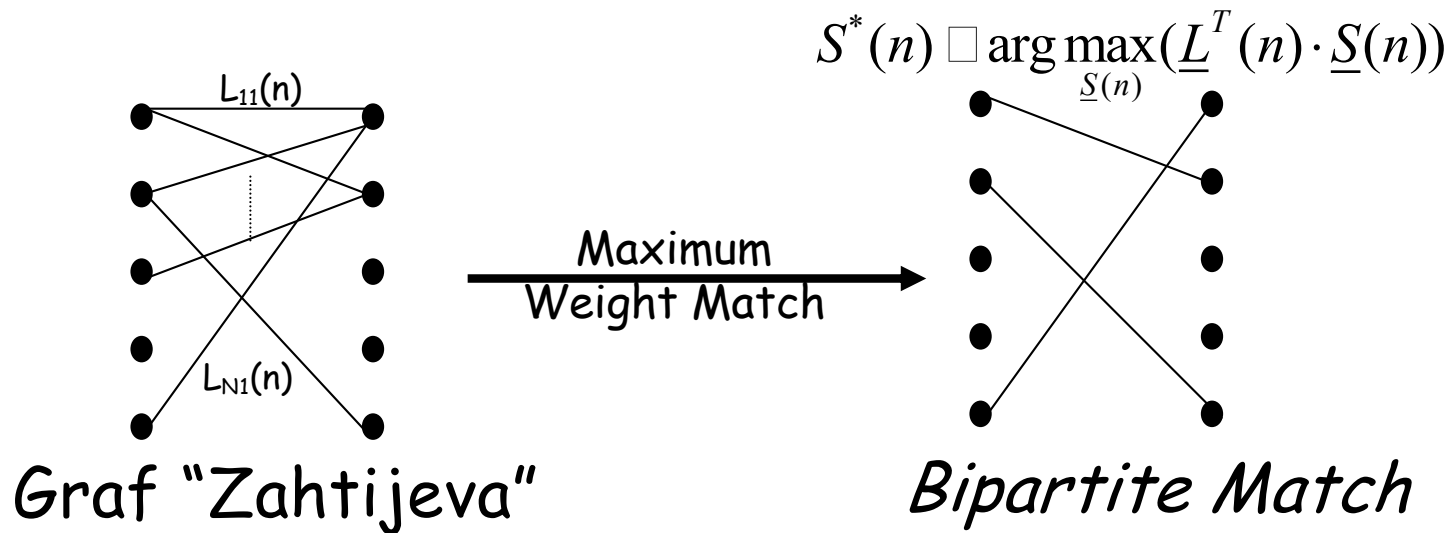
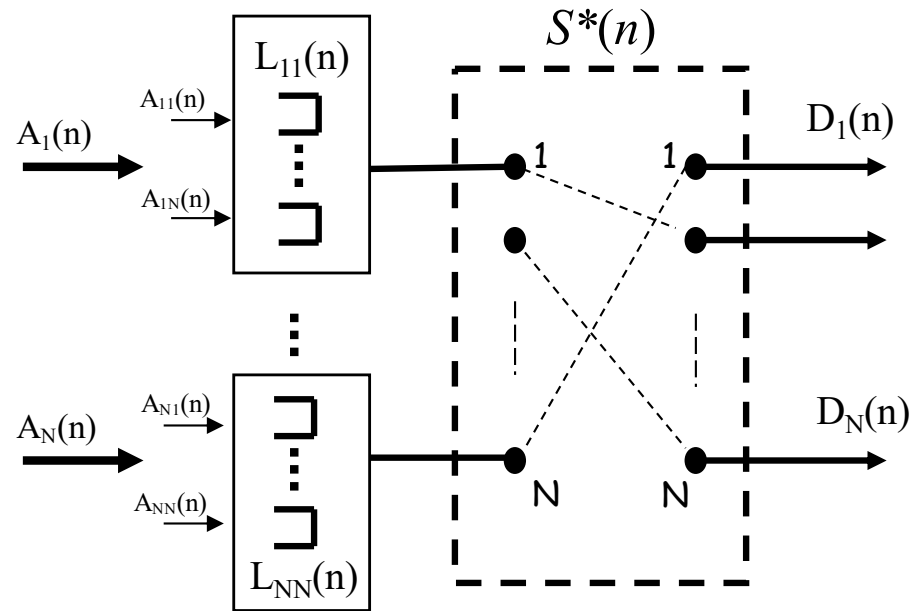
Komutacija paketa

VOQ Krosbar

Maximum weight matching (MWM) algoritmi

- ❑ imaju veoma dobre performanse za širok spektar saobraćajnih uslova ali i veliku kompleksnost implementacije $O(N^3 \log N)$ što ih čini najkomplikovanijim za primjenu u praksi
- ❑ Ako se tome dodaju zahtjevi za multikastom i QoS uslugama onda je ta kompleksnost još veća. MWM metoda se sastoji u uparivanju ulaza i izlaza tako da ukupni težinski faktor svih konekcija bude maksimalan.
- ❑ Taj težinski faktor može biti zauzetost reda ili vrijeme čekanja neke ćelije. Algoritmi koji spadaju u ovu grupu su LQF (*Longest Queue First*), OCF (*Oldest Cell First*) i LPF (*Longest Port First*).
- ❑ Mnogo jednostavniji za implementaciju su iterativni oblici ovih algoritama iLQF, iOCF i iLPF zbog manje kompleksnosti.

Maximum Weight Matching (MWM)



Komutacija paketa

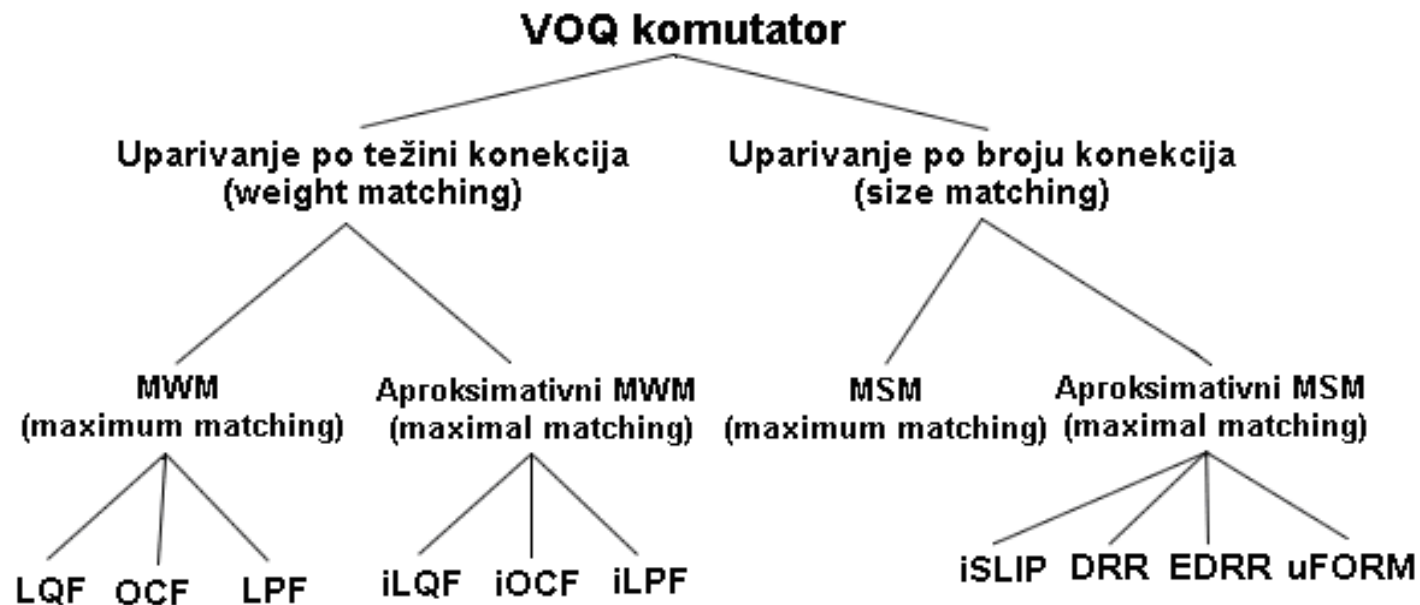
VOQ Krosbar

Maximum size matching (MSM) algoritmi

- ❑ nalaze maksimalni broj konekcija ulaz-izlaz tako da propusnost bude maksimalna
- ❑ specijalni slučaj MWM algoritma za slučaj kada svaka konekcija ulaz-izlaz ima jedinični težinski faktor
- ❑ Daju dobre performanse kada je u pitanju propusnost ali vrlo sporo konvergiraju i nisu imuni na pojavu zapostavljenja ulaz-izlaz konekcija čak i za proste saobraćajne uslove
- ❑ Kada je u pitanju kompleksnost implementacije ovih algoritama ona je manja u odnosu na MWM algoritme ali je i dalje velika. Najmanja postignuta kompleksnost MSM algoritma iznosi $O(N^{2.5})$. Upravo zbog toga u praksi primjenu nalaze aproksimativni MSM algoritmi.
- ❑ U ovu grupu algoritama koji nalaze praktičnu primjenu spadaju: iSLIP, DRR, EDRR i u-FORM.

Komutacija paketa

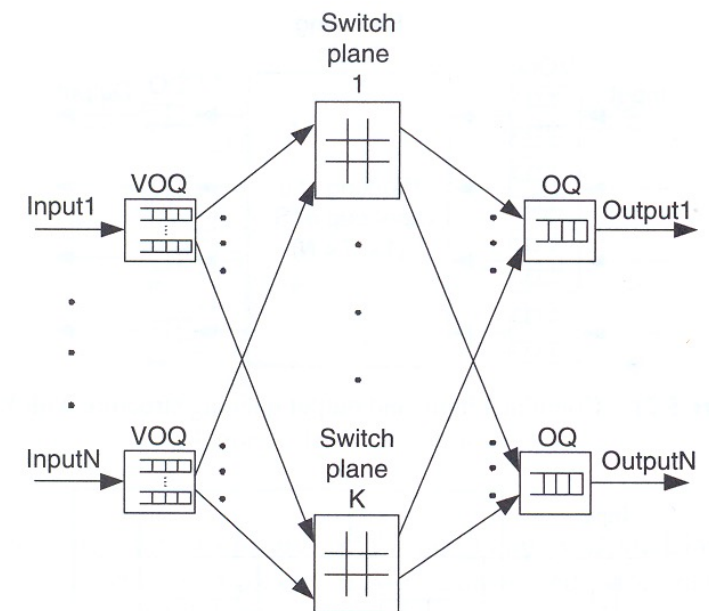
Klasifikacija VOQ Krosbar



Komutacija paketa

Paralelni komutator paketa sa VOQ baferima na ulazu i baferima na izlazu

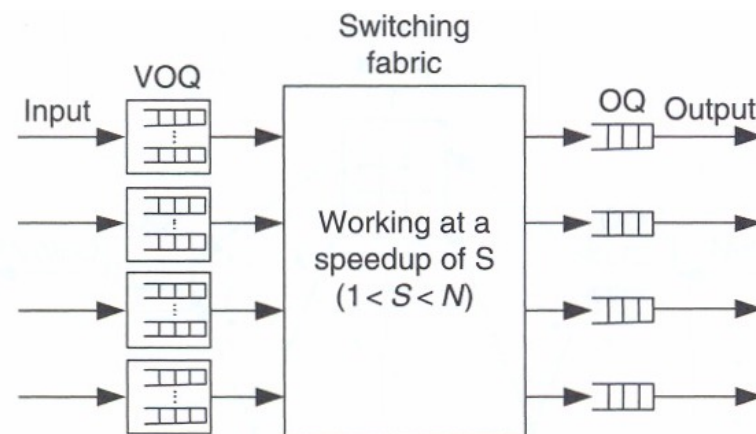
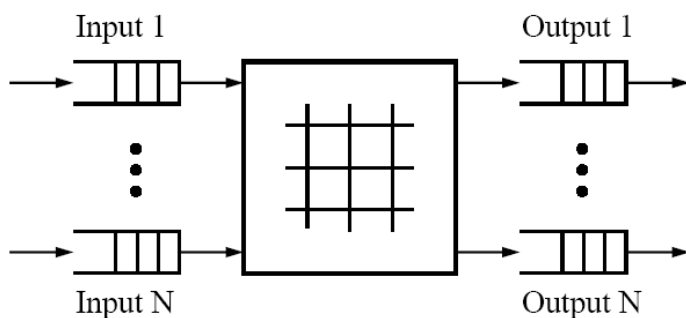
- Paralelni komutator se sastoji od K paralelnih komutacionih struktura, pri čemu svaka struktura ima svoje ulazne bafere, dok izlazne bafere dijeli sa ostalim strukturama.
- Treba pronaći K ćelija koje sa svakog ulaza odlaze tokom slota tako da propusnost bude najveća
- Za N jednako beskonačno paralelni komutator sa $K=2$ paralelnih struktura postiže 100% propusnost, i ponaša se kao komutator sa izlaznim baferovanjem.
- Sa $K=3$ može oponašati bilo koju QoS disciplinu.



Komutacija paketa

Speedup komutator sa ulaznim baferovanjme

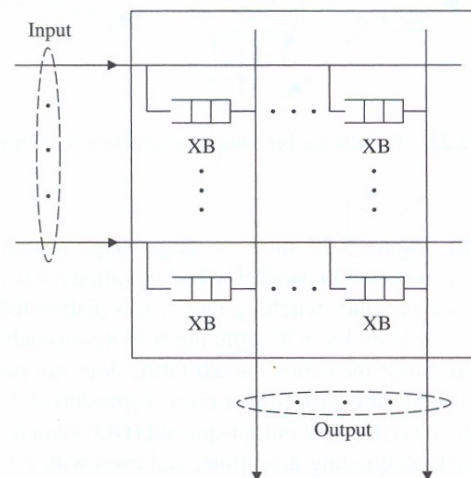
- Unutrašnji kapacitet komutacione matrice se može povećati njenim ubrzavanjem tako da se tokom jednog vremenskog slota S paketa može komutirati sa nekog ulaza na određeni izlaz.
- Komutaciona struktura se opisuje *speedup* faktorom S ($1 < S < N$).
- Za $S=4$, pokazuje se da propusnost dostiže 99% za uniformni saobraćaj.
- Klasa komutatora sa kombinovanim ulaznim i izlaznim baferovanjem, tzv. CIOQ (*Combined Input Output Queueing*) komutatora
- Klasa komutatora sa kombinovanim virtuelnim izlaznim i izlaznim baferovanjem se ponaša kao komutator sa izlaznim baferovanjem brzine N , čak i za $S=2$.



Komutacija paketa

Baferovanje u ukrsnim tačkama

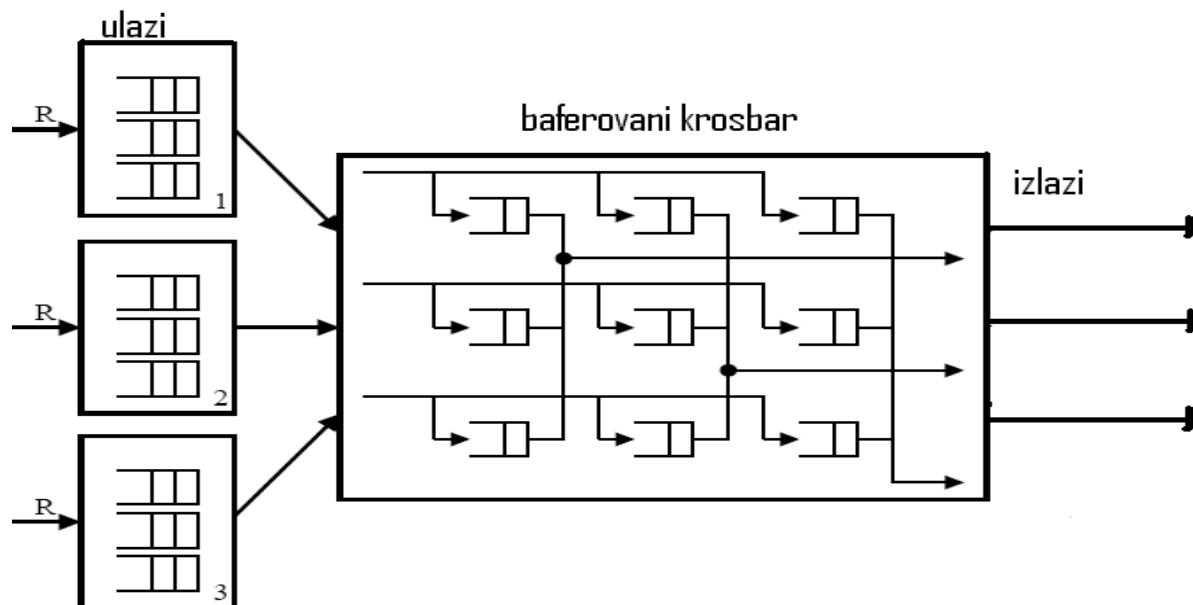
- ❑ baferi se postavljaju u ukrsne tačke, čija je praktična realizacija u CMOS tehnologiji moguća ukoliko su unutrašnji baferi malog kapaciteta, reda nekoliko paketa
- ❑ Algoritmi odlučivanja su jednostavniji nego u VoQ slučaju ali se moraju izvršavati i na ulazima i na izlazima
- ❑ Nema HOL blokiranja
- ❑ N^2 bafera!!!



Komutacija paketa

CICQ (Combined Input Crosspoint Queueing)

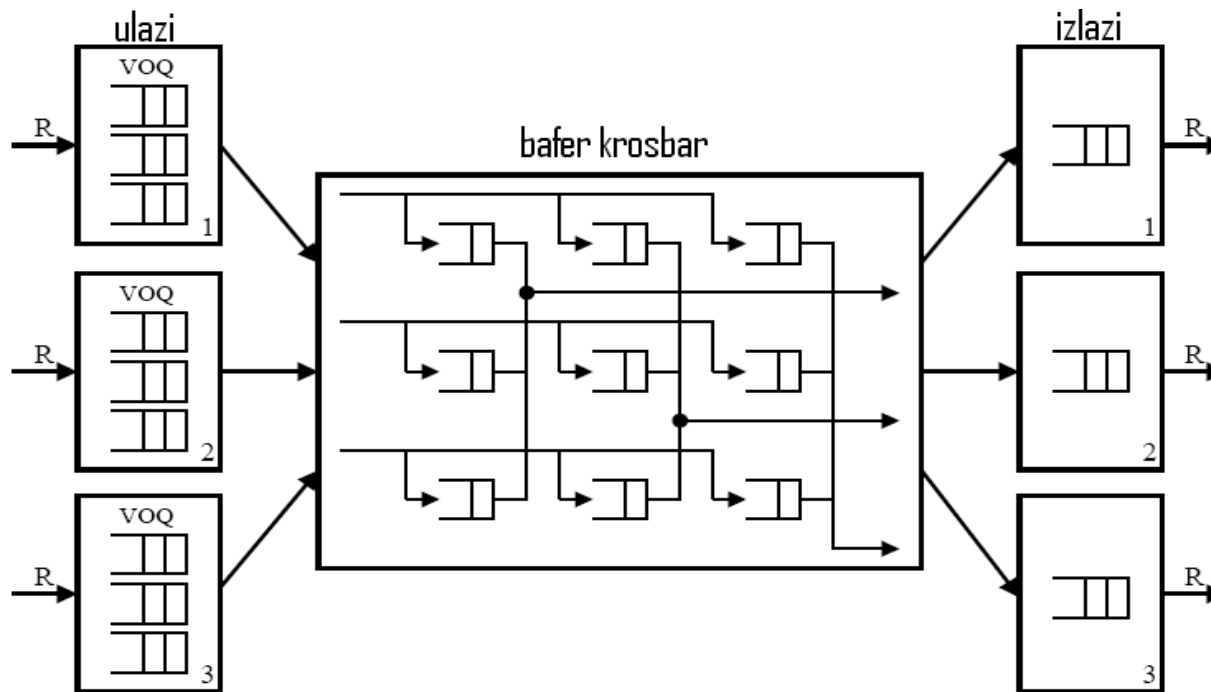
- ❑ baferi se postavljaju u ukrsne tačke, čija je praktična realizacija u CMOS tehnologiji moguća ukoliko su unutrašnji baferi malog kapaciteta, reda nekoliko paketa
- ❑ VOQ baferi na ulazu
- ❑ *Round robin, oldest cell first, longest queue first,....*



Komutacija paketa

CICOQ

- ❑ U odnosu na prethodni slučaj baferi se postavljaju i na izlazima
- ❑ 100% propusnost sa *speedupom* 2
- ❑ Garantovanje protoka sa *speedupom* 2
- ❑ Sa *speedupom* 3, ili sa *speedupom* 2, uz određenu modifikaciju komutacione strukture, može garantovati i kašnjenje



Komutacija paketa

Performanse osnovnih komutatora

- ❑ Modeli saobraćaja
- ❑ Krosbar komutator sa odbacivanjem
- ❑ Krosbar komutator sa baferima na izlazu
- ❑ Krosbar komutator sa baferima na ulazu
- ❑ Krosbar komutator sa višestrukim baferima na ulazu

Komutacija paketa

Modeli saobraćaja

- ❑ Bernoulli uniformni dolazni saobraćaj
- ❑ ON-OFF *bursty* saobraćaj
- ❑ Neuniformni saobraćaj

Komutacija paketa

Modeli saobraćaja

- Bernoulli dolazni proces i slučajni saobraćaj
 - Paketi su fiksne dužine
 - Paketi dolaze u jednakim vremenskim slotovima
 - Vjerovatnoća dolaska paketa je jednaka u svakom slotu (p) i ne zavisi od drugih slotova
 - Ova vjerovatnoća se zove ponuđeno opterećenje ulaza (*offer load*)
 - Ako je paket jednako vjerovatno adresiran prema svakom izlazu onda se radi o uniformnom saobraćaju

Komutacija paketa

Modeli saobraćaja

□ ON-OFF model i *bursty* saobraćaj

- Svaki ulaz prelazi iz "aktivnog" ON u "pasivno" OFF stanje saglasno geometrijskoj raspodjeli.
- Kada se nalazi u ON stanju paket tokom svakog slota dobija paket. Trajanje aktivnog perioda se zove BURST.
- Ako je X trajanje aktivnog, a Y pasivnog perioda onda važe relacije
- b_s je srednje trajanje bursta

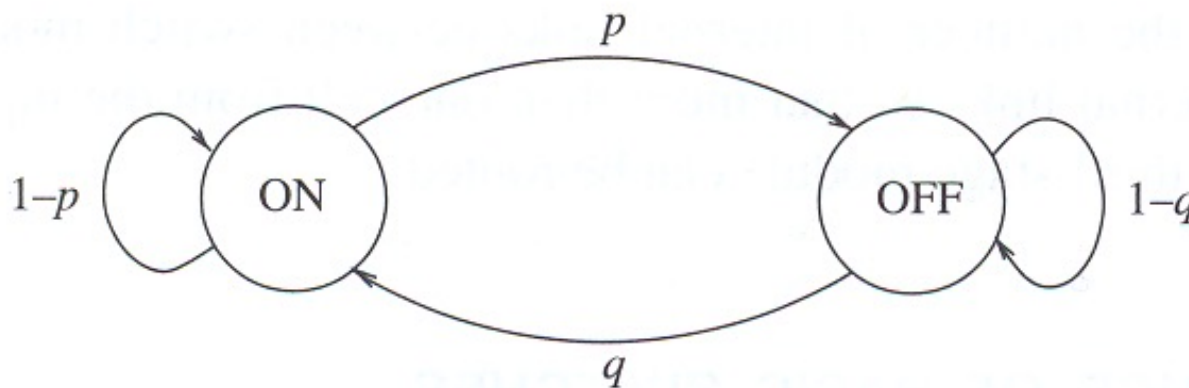
$$P\{X = i\} = p(1-p)^{i-1}, i \geq 1$$

$$P\{Y = j\} = q(1-q)^j, j \geq 0$$

$$E\{X\} = \sum_{i=1}^{\infty} ip(1-p)^{i-1} = \frac{1}{p} = b_s$$

$$E\{Y\} = \sum_{j=0}^{\infty} jq(1-q)^j = \frac{1-q}{q}$$

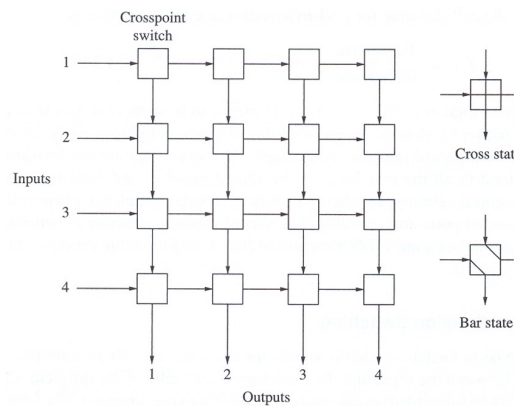
$$\text{Dolazno opterećenje} = \rho = \frac{\frac{1}{p}}{\frac{1}{p} + \frac{1-q}{q}} = \frac{q}{q + p - pq}$$



Komutacija paketa

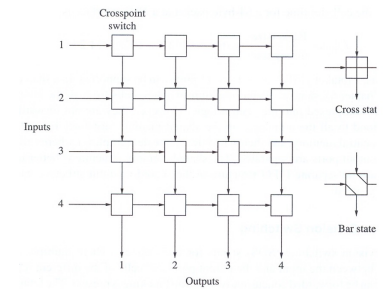
Performanse crossbar komutatora sa odbacivanjem

- ❑ Izlazna kolizija, kod ove vrste komutatora se rješava izborom jedne od ćelija u koliziji od strane linijskog (magistralnog) kontrolera dok se ostale ćelije odbacuju .
- ❑ Izbor ćelije može biti različit (slučajan, *round-robin*, zavisno od prioriteta komutacionih elemenata,...)
- ❑ Neka se pri uniformnom dolaznom saobraćaju uoče proizvoljan ulaz i i proizvoljan izlaz j . Vjerovatnoća da u jednom slotu dolazi n ćelija adresiranih za izlaz j je



$$P_n = \binom{N}{n} \left(\frac{p}{N} \right)^n \left(1 - \frac{p}{N} \right)^{N-n}$$

Komutacija paketa



Performanse crossbar komutatora sa odbacivanjem

- Propusnost komutatora je jednaka propusnosti izlazne magistrale. Polazeći od zakona održanja protoka i uniformnosti ulaznog saobraćaja slijedi:

$$\rho_{ul} \square \rho_{iz} \square \rho_{ul} P_L$$

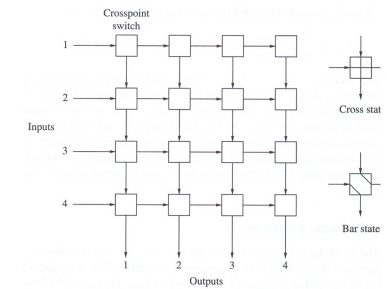
- ρ_{ul} - opterećenje na ulazu posmatrane izlazne magistrale
- ρ_{iz} - propusnost posmatranog izlaza

$$\rho_{ul} \square \sum_{n=1}^N n \binom{N}{n} \left(\frac{p}{N}\right)^n \left(1 - \frac{p}{N}\right)^{N-n} \square \sum_{n=1}^N \frac{N!}{(N-n)!(n-1)!} \left(\frac{p}{N}\right)^n \left(1 - \frac{p}{N}\right)^{N-n} \square$$

$$\square \sum_{n=0}^{N-1} N \binom{N-1}{n} \frac{p}{N} \left(\frac{p}{N}\right)^n \left(1 - \frac{p}{N}\right)^{N-1-n} \square p \left(1 - \frac{p}{N} - \frac{p}{N}\right)^{N-1} \square p$$

$$\rho \square \rho_{iz} \square \sum_{n=1}^N \binom{N}{n} \left(\frac{p}{N}\right)^n \left(1 - \frac{p}{N}\right)^{N-n} \square 1 - \left(1 - \frac{p}{N}\right)^N$$

Komutacija paketa

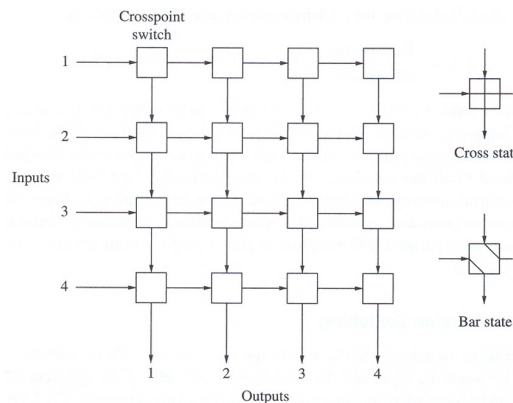


Performanse crossbar komutatora sa odbacivanjem

- Vjerovatnoća gubitka je:

$$P_L \approx \frac{\rho_{ul} - \rho_{iz}}{\rho_{ul}} \approx \frac{p - 1 \approx \left(1 - \frac{p}{N}\right)^N}{p}$$

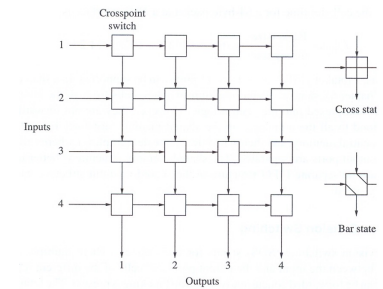
- Kod ove topologije kašnjenje i varijansa kašnjenja u prenosu zbog komutiranja su zanemarljive.
- Za komutator sa beskonačnim brojem ulaza, dobija se



$$\rho \approx 1 - e^{-p}$$

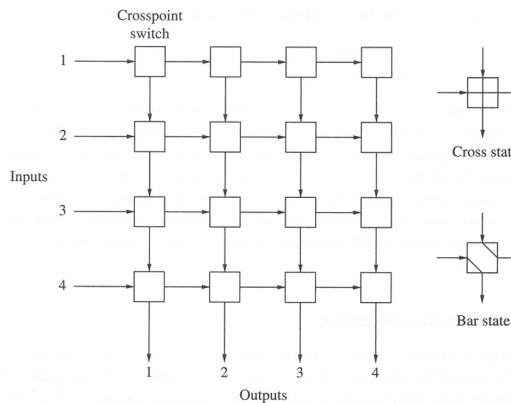
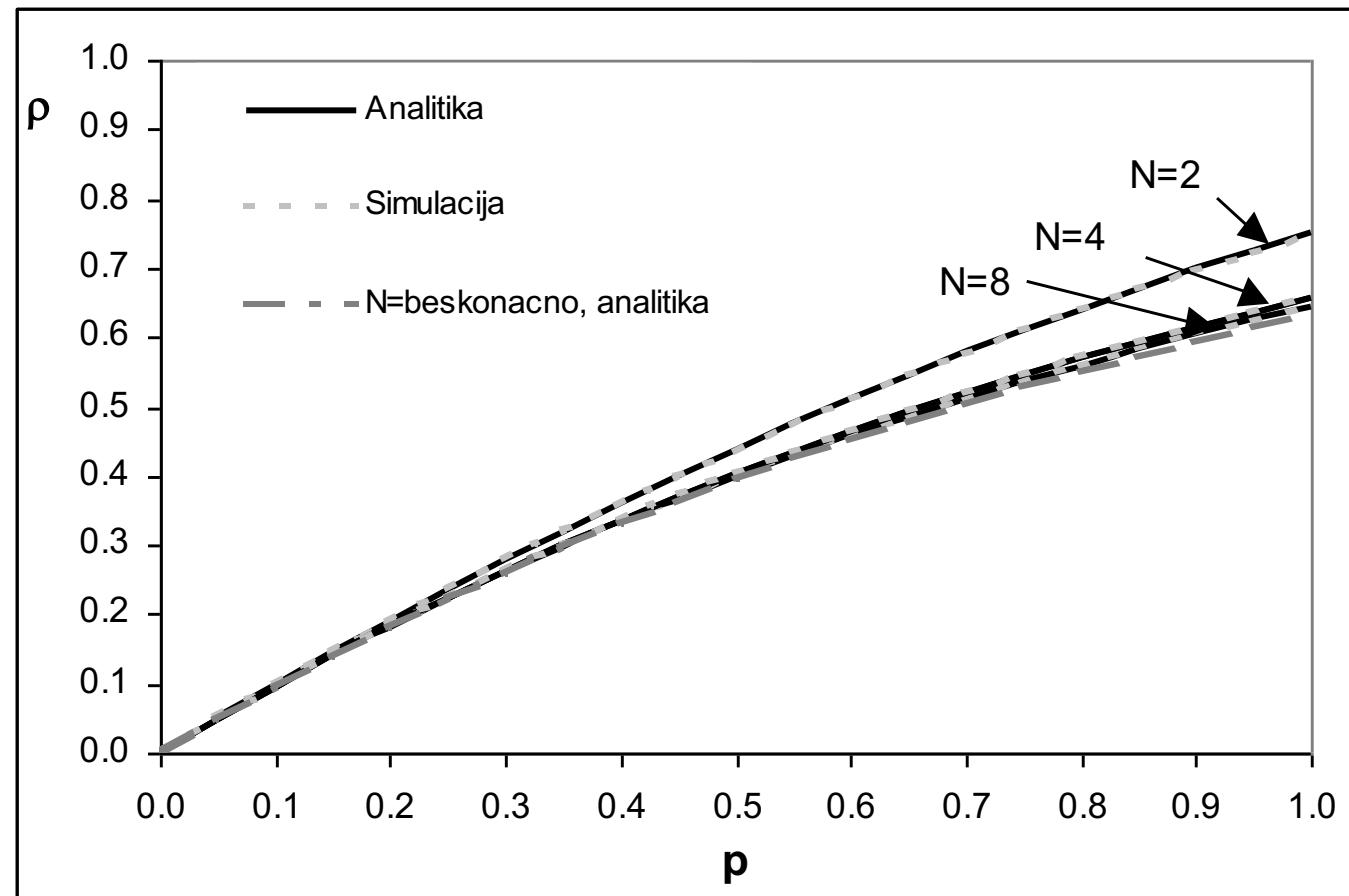
$$P_L \approx \frac{p - 1 \approx e^{-p}}{p}$$

Komutacija paketa

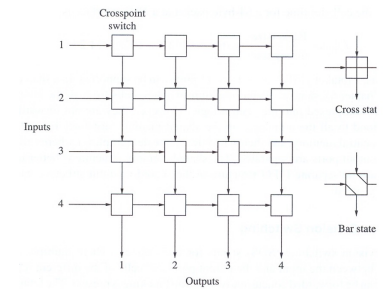


Performanse crossbar komutatora sa odbacivanjem

- Propusnost komutatora ρ u funkciji ulaznog opterećenja p za različito N , za uniformni dolazni saobraćaj

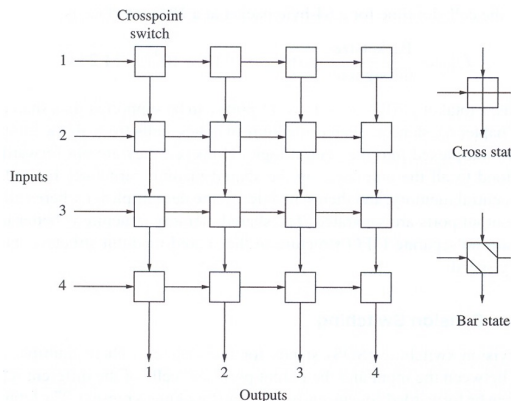
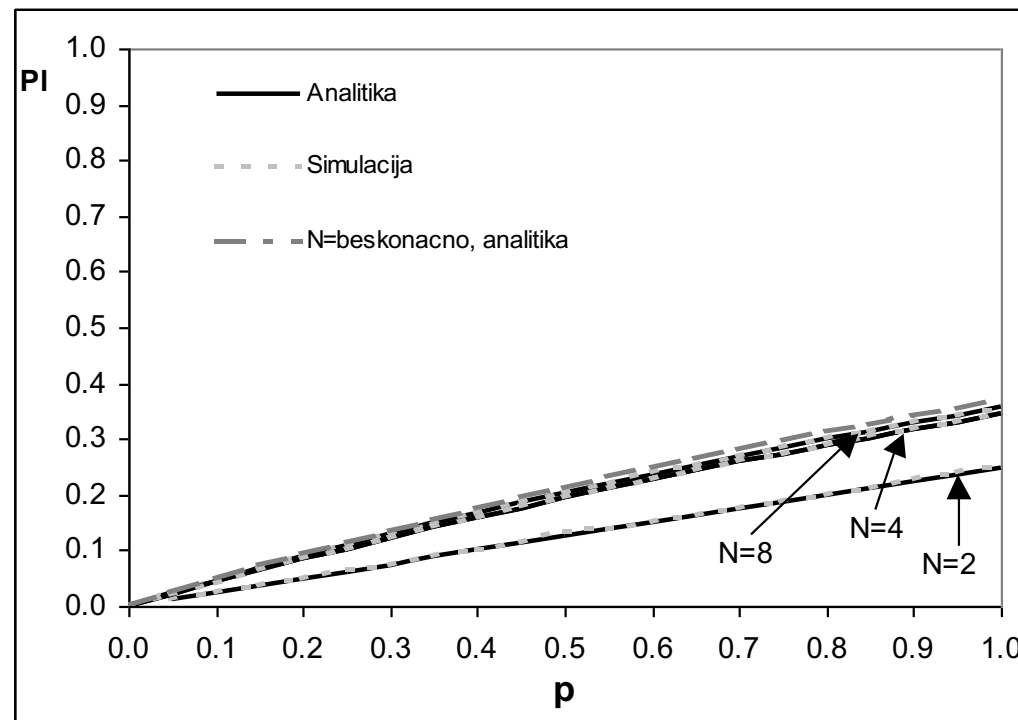


Komutacija paketa

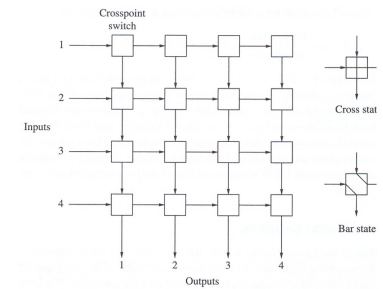


Performanse crossbar komutatora sa odbacivanjem

- *Vjerovatnoća gubitka ćelija u zavisnosti od ulaznog opterećenja p za različite vrijednosti veličine komutatora N , za slučaj uniformnog dolaznog saobraćaja*

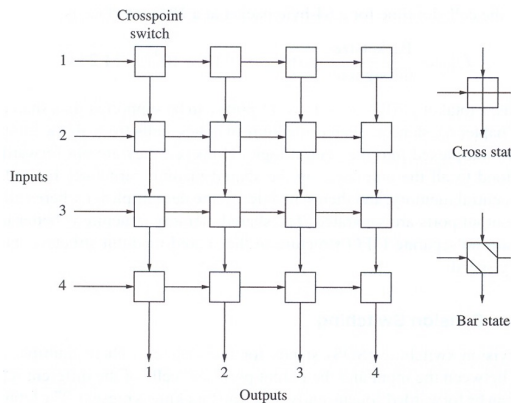
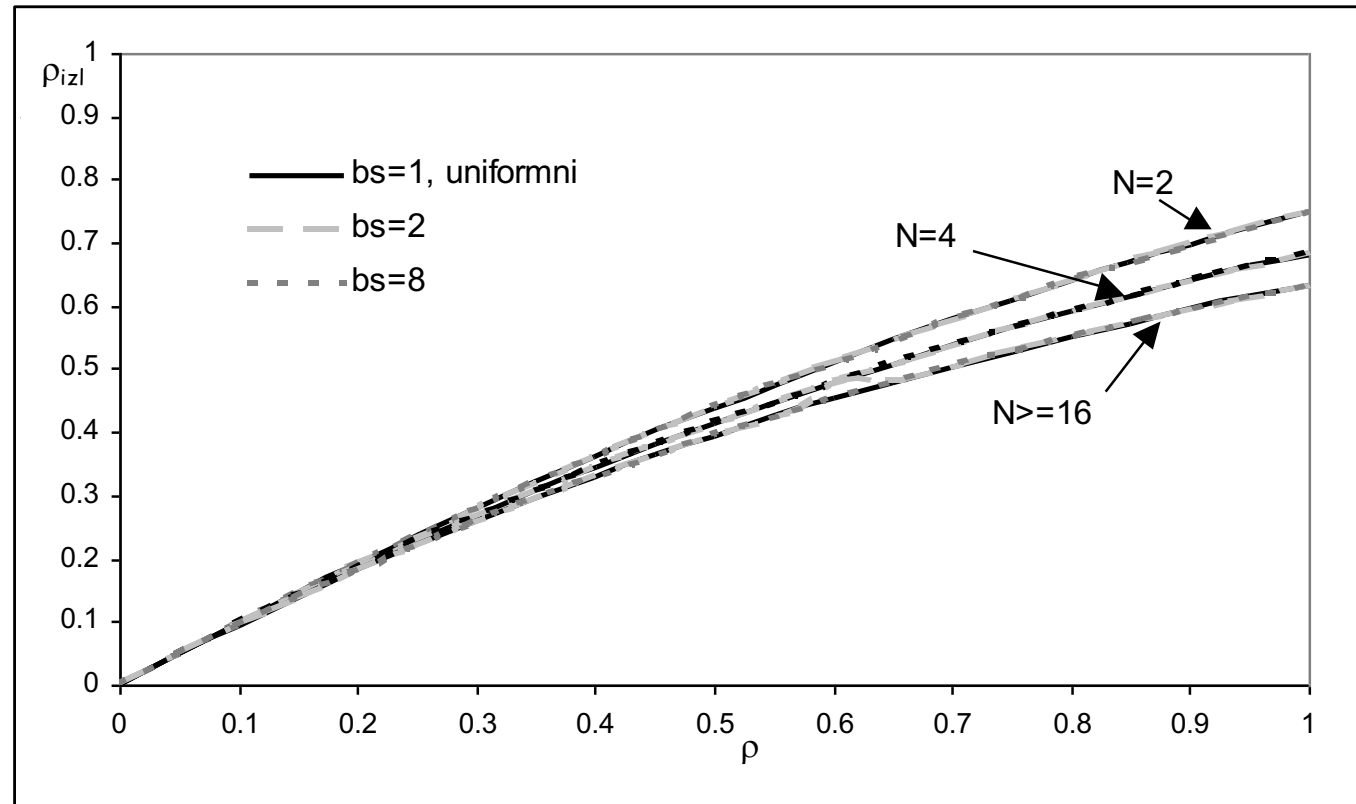


Komutacija paketa

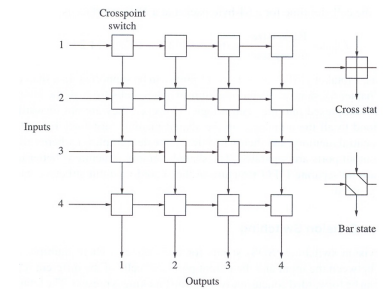


Performanse crossbar komutatora sa odbacivanjem

- Propusnost komutatora ρ u funkciji ulaznog opterećenja p za različito N i bs , u slučaju ON-OFF dolaznog saobraćaj

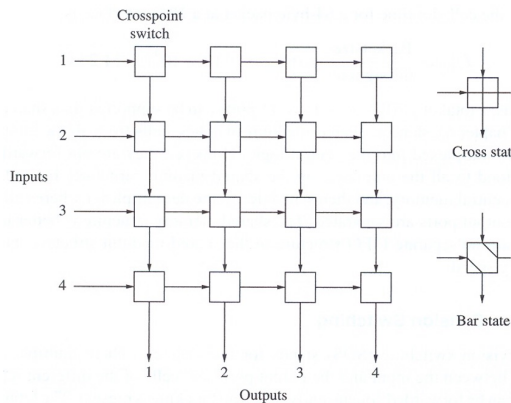
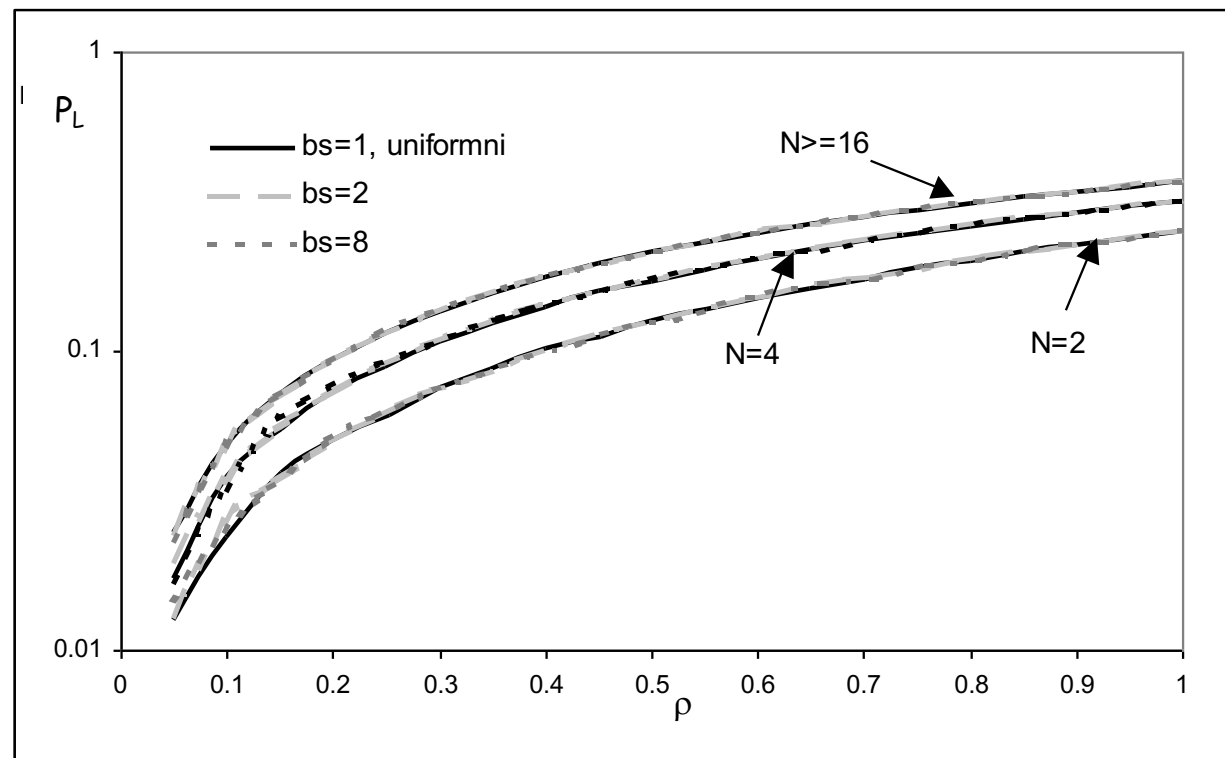


Komutacija paketa

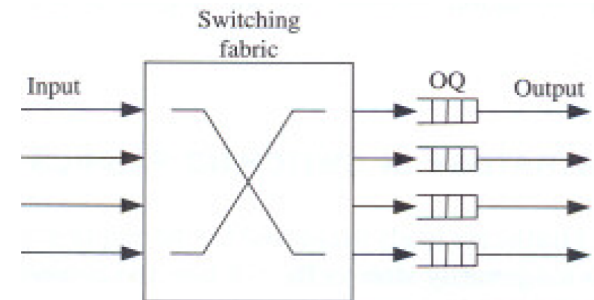


Performanse crossbar komutatora sa odbacivanjem

- *Vjerovatnoća gubitka ćelija P_L u zavisnosti od ulaznog opterećenja za različito N i b_s , u slučaju ON-OFF dolaznog saobraćaja*



Komutacija paketa

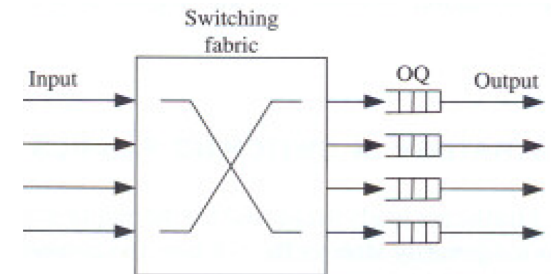


Performanse komutatora sa baferima na izlazu

- Postavljanjem bafera (FIFO, FIRO,...) širine b na izlaze komutacionog uređaja, mogu se dobiti značajno bolje performanse od performansi komutatora sa odbacivanjem ćelija u koliziji
- Ako je brzina prenosa podataka na ulaznim/izlaznim linijama V tada brzina komutiranja u ovom komutatoru mora biti $L V$ gdje se L kreće između 2 i N . Teorijski se tolika brzina može dobiti ubrzavanjem vertikalnih magistrala na nivo $L V$ i ubrzavanjem linijskih kontrolera koji bi u toku trajanja paketa morali da obrade i prihvate do L zahtjeva za prenosom po jednoj izlaznoj magistrali.
- To znači da je brzina memorije u kojoj se realizuju baferi $(L+1)V$, uz pretpostavku da je memorija dvoportna (istovremeno se vrši čitanje i upis). Ukoliko u baferu nema dovoljno mjesta "suvišne" ćelije, koje se biraju na određeni način, se odbacuju.
- Sa stanovišta praktične realizacije zahtjevi za ubrzavanjem vertikalnih magistrala sa jedne strane i brzim memorijama predstavljaju problem. Zbog toga je u interesu minimizirati veličinu L , tako da ona još uvijek ispunjava zahtijevani nivo performansi.
- Analiza ovog komutatora, u slučaju uniformnog dolaznog saobraćaja, koja slijedi počinje određivanjem minimalno "potrebnih" vrijednosti L . Uzimanje većih vrijednosti, kako se navodi u literaturi ne donosi isplativ nivo poboljšanja performansi.

Komutacija paketa

Performanse komutatora sa baferima na izlazu



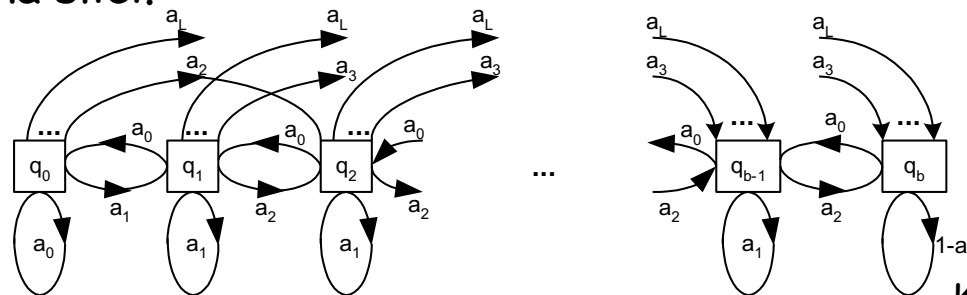
- Vjerovatnoća dolaska k paketa na jedan izlaz je jednaka

$$a_k \square \begin{cases} p_k, & k \square L \\ \sum_{k \square L}^N p_k, & k \square L \end{cases}$$

- gdje je

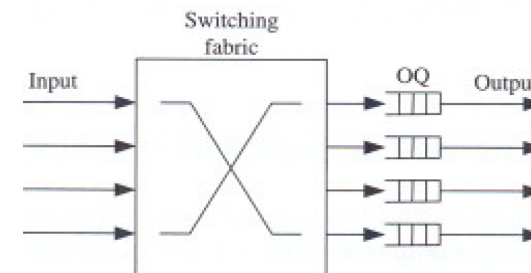
$$p_k \square \binom{N}{k} \left(\frac{p}{N}\right)^k \left(1 - \frac{p}{N}\right)^{N-k} \underset{N \rightarrow \infty}{\square} \frac{e^{-p} p^k}{k!}$$

- Zbog uniformnosti dolaznog saobraćaja analiza samo jednog izlaznog bafera je validna za razmatranje čitavog skupa izlaznih bafera. Proizvoljan izlazni bafer se modeluje konačnim diskretnim Markovljevim lancem, pri čemu se stanje definiše kao broj ćelija u izlaznom baferu. Očigledno treba da bude $b \geq L$. Dijagram stanja ovog modela je prikazan na slici.



Komutacija paketa

Performanse komutatora sa baferima na izlazu



- Na osnovu metoda za rješavanje Markovljevih lanaca mogu se napisati jednačine

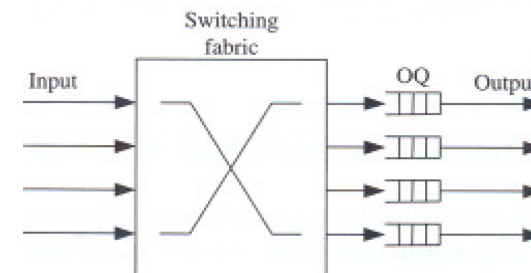
$$q_1 = q_0 \frac{a_1 \dots a_L}{a_0}$$

$$q_i = \frac{1}{a_0} \left[q_{i-1}(1 - a_1) - \sum_{k=1}^{i-2} q_k a_{i-k-1} - q_0 a_{i-1} \right] \quad 1 \leq i \leq L$$

$$q_i = \frac{1}{a_0} \left[q_{i-1}(1 - a_1) - \sum_{k=i-L}^{i-2} q_k a_{i-k} \right] \quad L \leq i \leq b$$

$$q_0 = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^b \frac{q_k}{q_0}}$$

Komutacija paketa



Performanse komutatora sa baferima na izlazu

- Korišćenjem prethodnih jednačina mogu se odrediti performanse
- propusnost komutatora je jednaka propusnosti izlaznog bafera i data je relacijom

$$\rho \leq 1 - q_0$$

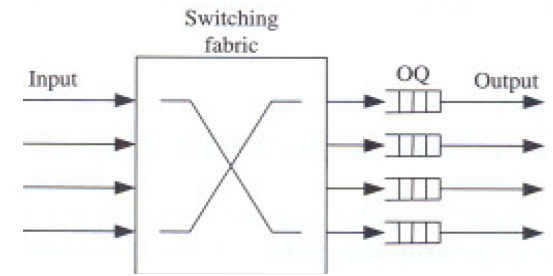
- vjerovatnoća gubitka ćelija je data jednačinom konzervacije protoka

$$P_L \leq \frac{\rho - \rho}{\rho}$$

- polazeći od poznate Litlove formule srednje kašnjenje ćelije zbog komutiranja je dato formulom

$$\bar{T} \leq \frac{\sum_{i=1}^b iq_i}{\rho}$$

Komutacija paketa



Performanse komutatora sa baferima na izlazu

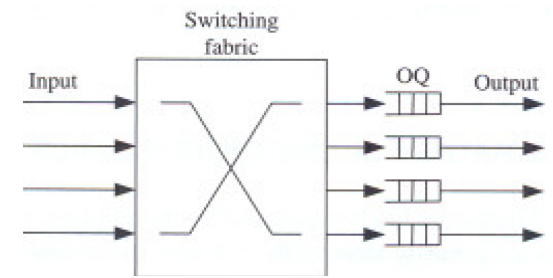
- Brzina komutiranja L se bira tako da vjerovatnoća gubitka ćelije u komutatoru ne prelazi definisani nivo od 10^{-8} za vjerovatnoću gubitka ćelija pri ulaznom opterećenju $p \leq 0.95$.

$$P_{L1} \approx \frac{1}{p} \sum_{k=L+1}^N (k-L) \binom{N}{k} \left(\frac{p}{N}\right)^k \left(1 - \frac{p}{N}\right)^{N-k}, \quad N \rightarrow \infty$$

$$P_{L1} \approx \frac{1}{p} \sum_{k=L+1}^{\infty} (k-L) \frac{e^{-p} p^k}{k!}, \quad N \rightarrow \infty$$

N	2	4	8	16	32	64	128	256	512	∞
L_{\min}	2	4	8	9	10	10	10	10	10	11

Komutacija paketa



Performanse komutatora sa baferima na izlazu

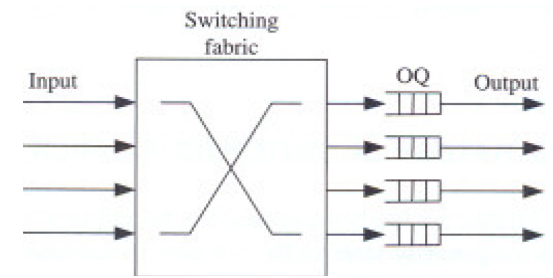
- Minimalne vrijednosti veličine izlaznog bafera za različite parove (N, L_{min}) koje imaju $P_L < 10^{-8}$ pri ulaznom opterećenju $p \leq 0.95$.

N, L_{min}	2,2	4,4	8,8	16,9	32,10	64,10	128,10	256,10	512,10	$\infty, 11$
b_{min}	77	114	133	146	148	155	160	165	171	173

- Vrijednosti za srednje čekanje pri ulaznom opterećenju 0.95 za minimalne vrijednosti veličine bafera b i brzine L

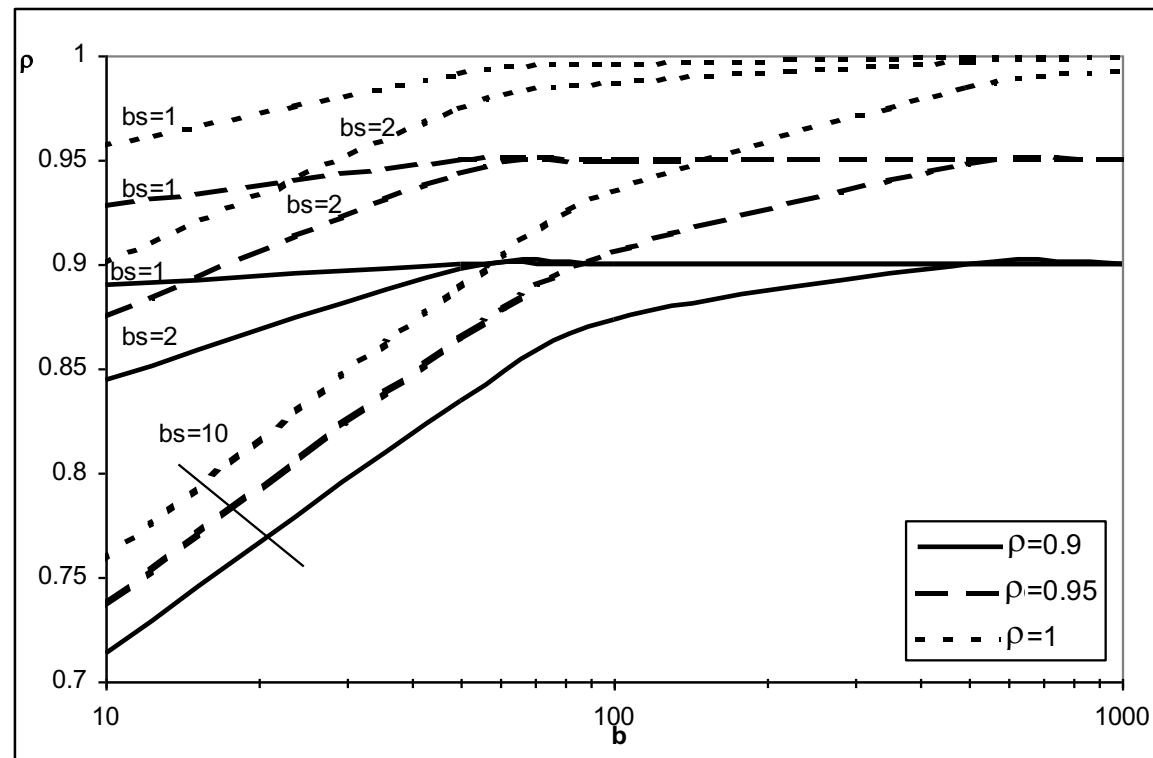
N	2	4	8	16	32	64	128	256	512	∞
\bar{T}	6	8	10	11	12	12	12	12	12	12

Komutacija paketa

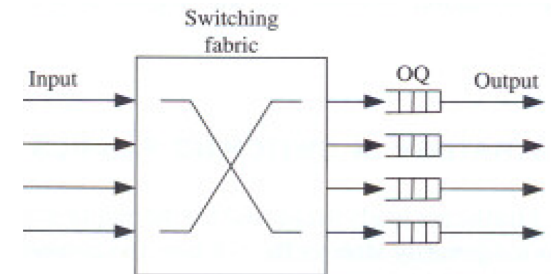


Performanse komutatora sa baferima na izlazu

- Propusnost komutatora ($N=8, L=8$) sa baferima na izlazima u funkciji veličine bafera, vrijednosti ulaznog opterećenja i srednje veličine grupe ON-OFF saobraćaja

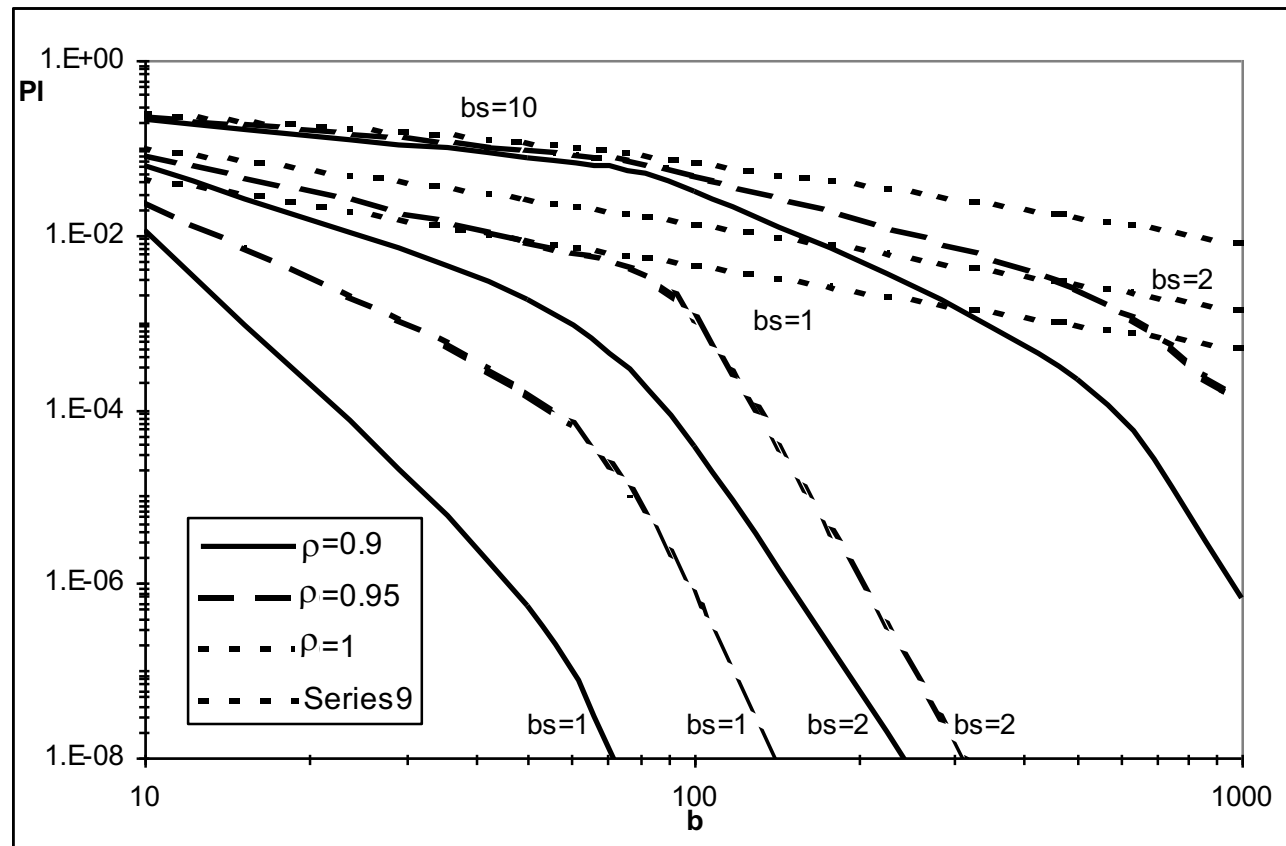


Komutacija paketa

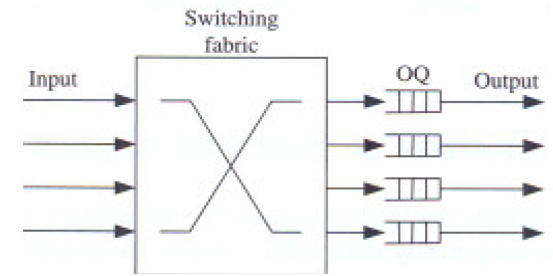


Performanse komutatora sa baferima na izlazu

- Vjerovatnoća gubitka paketa u krosbaru ($N=8, L=8$) sa baferima na izlazima u funkciji veličine bafera za različite vrijednosti ρ i b_s

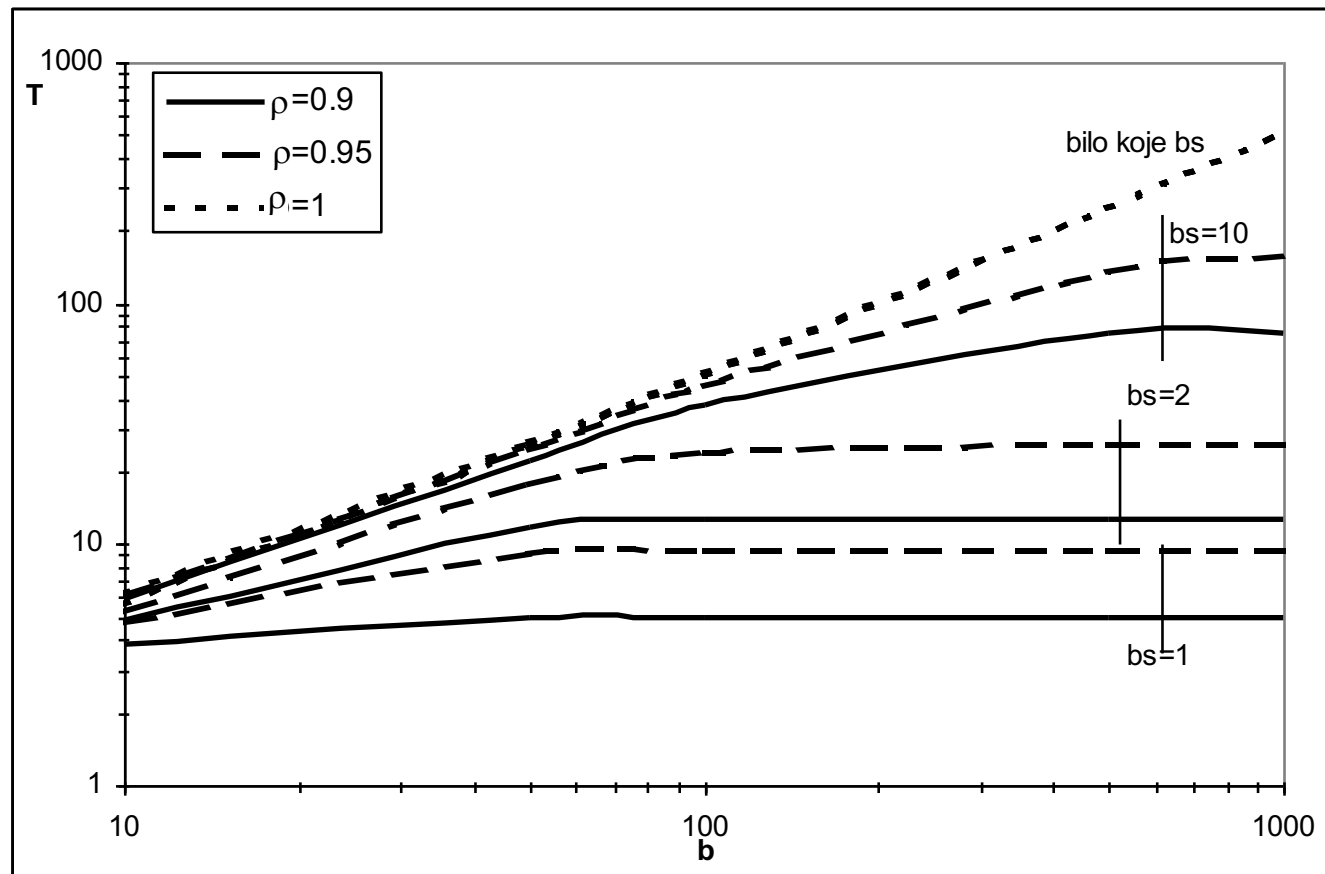


Komutacija paketa

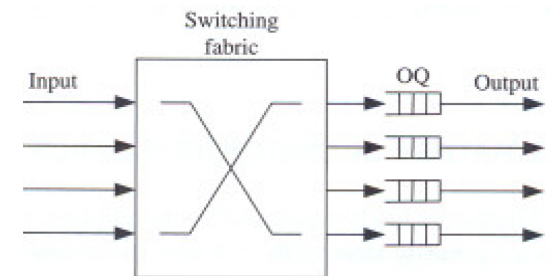


Performanse komutatora sa baferima na izlazu

- Srednje kašnjenje u prenosu uslijed baferovanja krosbaru ($N=8, L=8$) sa baferima na izlazima u funkciji veličine bafera za različite vrijednosti ρ i b_s



Komutacija paketa

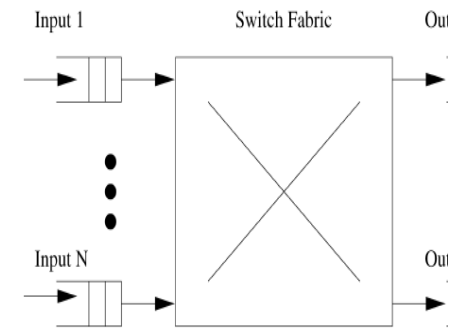


Performanse komutatora sa baferima na izlazu (još jedan pristup)

$$\bar{Q} = \frac{N-1}{N} \frac{p^2}{2(1-p)} = \frac{N-1}{N} \bar{Q}_{M/D/1}$$

$$\bar{W} = \frac{N-1}{N} \frac{p}{2(1-p)} = \frac{N-1}{N} \bar{W}_{M/D/1}$$

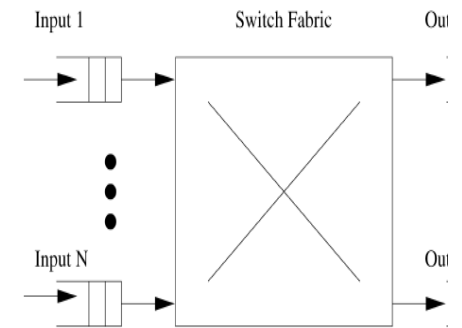
Komutacija paketa



Performanse komutatora sa baferima na ulazu

- ❑ FIFO baferi
- ❑ Samo se HOL ćelije (paketi fiksne dužine) takmiče za izlaze
- ❑ Samo jedna od ćelija u koliziji dobija pravo da bude proslijeđena na izlaz
- ❑ Cilj je izračunati maksimalnu propusnost uz pretpostavke
 - Na ulaz u svakom slotu dolazi ćelija.
 - Ako k HOL ćelija čeka da bude proslijeđeno prema istom izlazu samo će jedna biti izabrana sa vjerovatnoćom $1/k$
- ❑ U sistemu ima N HOL ćelija, koje se u nekom uočenom slotu m grupišu u N grupa (svaku grupu čine ćelije adresirane za isti izlaz)
- ❑ B_m^i je broj ćelija u grupi koju čine ćelije adresirane prema izlazu i u slotu m
- ❑ B^i je broj ćelija u grupi koju čine ćelije adresirane prema izlazu i u ravnotežnom stanju
- ❑ A_m^i je broj ćelija koje dolaze u grupu koju čine ćelije adresirane prema izlazu i u slotu m
- ❑ A^i je broj ćelija koje dolaze u grupu koju čine ćelije adresirane prema izlazu i u ravnotežnom stanju

Komutacija paketa



Performanse komutatora sa baferima na ulazu

$$B_m^i \square \max(0, B_{m-1}^i \square A_m^i - 1)$$

- Pretpostavlja se puno opterećenje (na svakom ulazu u svakom slotu postoji paket)
- Vjerovatnoća dolaska ćelija na posmatrani ulaz koja je adresirana na izlaz i je jednaka $1/N$
- Vjerovatnoća dolaska k ćelija u grupu HOL ćelija adresiranih na izlaz i, tokom slotu m je

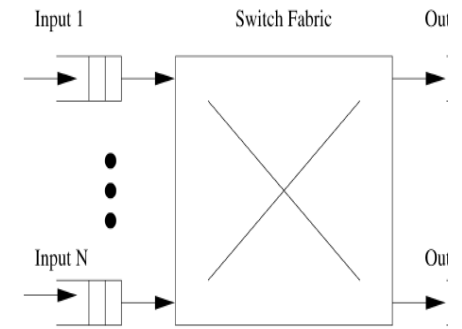
$$P[A_m^i \square k] \square \binom{F_{m-1}}{k} \left(\frac{1}{N} \right)^k \left(1 - \frac{1}{N} \right)^{F_{m-1} - k}, \quad k \square 0, 1, \dots, F_{m-1}$$

- Gdje F_{m-1} predstavlja broj ćelija koje su otišle iz komutatora tokom m-1 slotu, odnosno broj bafera koji tokom slotu m ima nove ćelije na HOL pozicijama

$$F_{m-1} \square N - \sum_{i \square 1}^N B_{m-1}^i$$

$$F_{m-1} \square \sum_{i \square 1}^N A_{m-1}^i$$

Komutacija paketa



Performanse komutatora sa baferima na ulazu

- Kada N teži ∞ , A_m^i ima Poasonovu raspodjelu parametra $\rho_i^m = F_{m-1}/N$.
- U ravnotežnom stanju A^i takođe ima Poasonovu raspodjelu parametra $\rho_0 = E(F)/N$
- $E(F)$ predstavlja srednji broj ćelija koje prolaze kroz komutator, a ρ_0 iskorišćenje izlaznih linija tj. normalizovanu propusnost komutatora
- B_m^i se može modelovati M/D/1 redom čekanja, kod kojeg za N teži ∞ srednji broj paketa u baferu je jednak

$$\bar{B}^i = \frac{\rho_0^2}{2(1-\rho_0)}$$

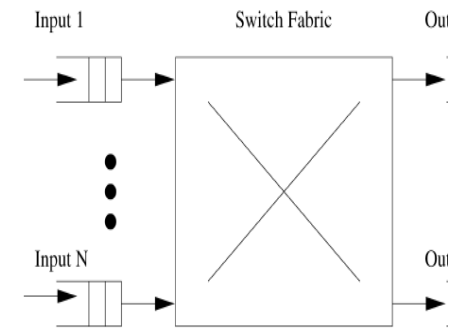
- U ravnotežnom stanju

$$\bar{F} = N - \sum_{i=1}^N \bar{B}^i$$

- Kako je zbog simetričnosti srednji broj \bar{B}^i jednak za sve izlaze

$$\bar{F} = N(1 - \bar{B}^i) \rightarrow \bar{B}^i = 1 - \frac{\bar{F}}{N} = 1 - \rho_0$$

Komutacija paketa



Performanse komutatora sa baferima na ulazu

- Izjedačnavanjem srednjeg broja paketa u grupi dobijenih u dvije prethodne relacije dobija se maksimalna propusnost od

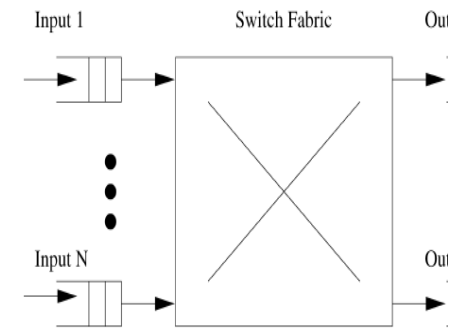
$$\rho_0 \approx 2 - \sqrt{2} \approx 0,586$$

- Kada je N malo i konačno, maksimalna propusnost komutatora se može dobiti korišćenjem Markovljevih lanaca. Numerički rezultati su dati u tabeli

N	Throughput
1	1.0000
2	0.7500
3	0.6825
4	0.6553
5	0.6399
6	0.6302
7	0.6234
8	0.6184
∞	0.586

- Maksimalna propusnost od 0,586 znači da kada je ulazno opterećenje manje od ove vrijednosti onda je propusnost 100%, a ako je veća iznosi maksimalno 0,586.

Komutacija paketa



Performanse komutatora sa baferima na ulazu

- Kašnjenje se u ovom komutatoru (za N teži beskonačno) modeluje *Geom/G/1* redom čekanja uz sledeće pretpostavke
 - Dolazni proces na svakom ulazu je Bernulijev proces, tj. vjerovatnoća p dolaska paketa u svakom vremenskom slotu je idnetična i nezavisna od prethodnog slotu.
 - Čelije su uniformno raspoređene prema izlazima.
 - Vrijeme koje ćelija provede u komutatoru se sastoji od vremena koje provede u baferu i trajanja jednog slotu za prosleđivanje kroz komutator
 - Kada N teži beskonačno broj HOL ćelija koje se adresirane na određeni izlaz imaju Poasonovu raspodjelu parametra p. Prema tome raspodjela kašnjenja modela *Geom/G/1* je jednaka raspodjeli kašnjenja modela *M/D/1*.
- Korišćenjem standardnih rezultata za *Geom/G/1* dobija se da je srednje kašnjenje koje unosi komutator sa baferima na ulazu:

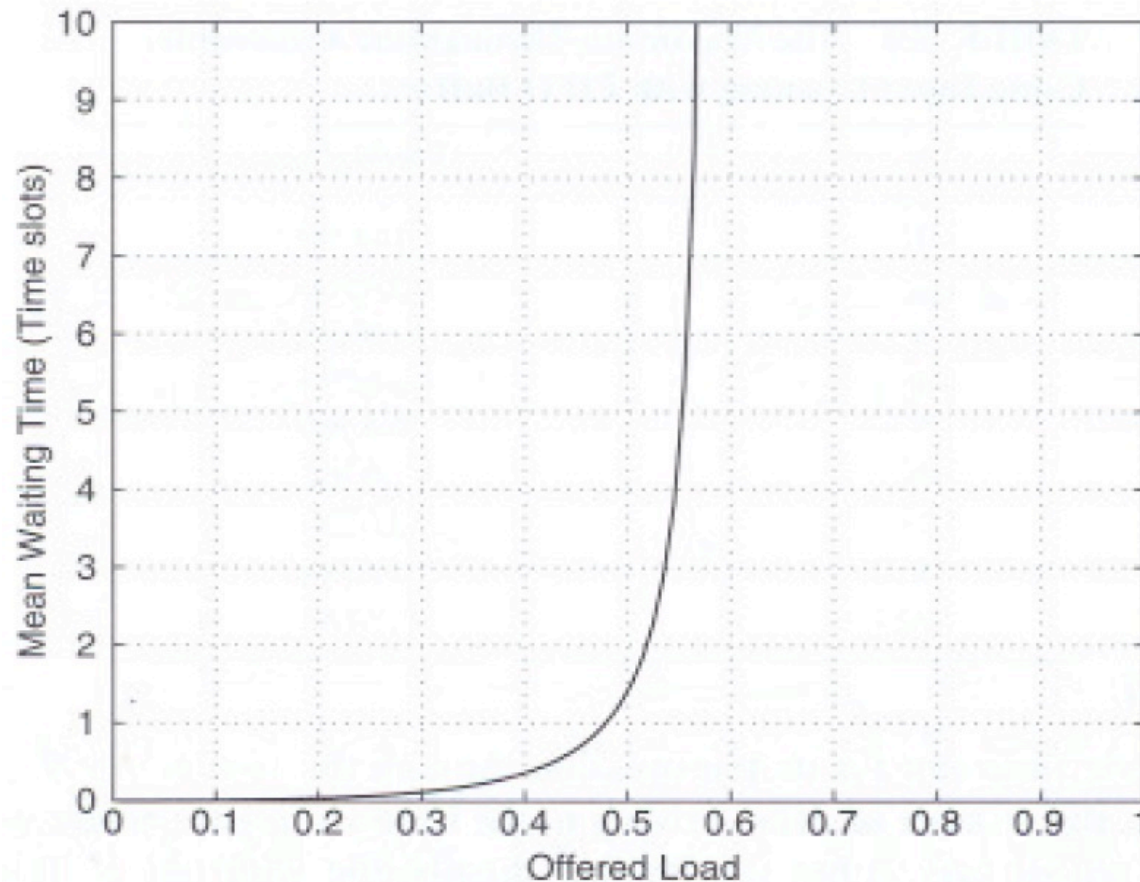
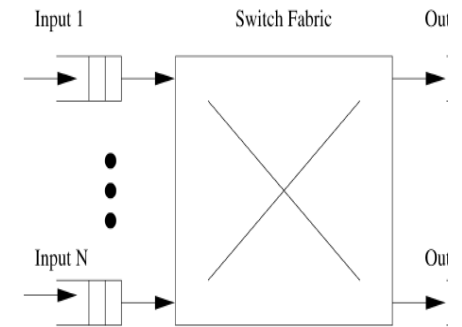
$$\bar{W} = \frac{\overline{pS(S-1)}}{1 - p\bar{S}} = \bar{S} - 1$$

- Gdje je *S* slučajna raspodjela koja ima vrijeme posluživanja koje se dobija iz *M/D/1* modela

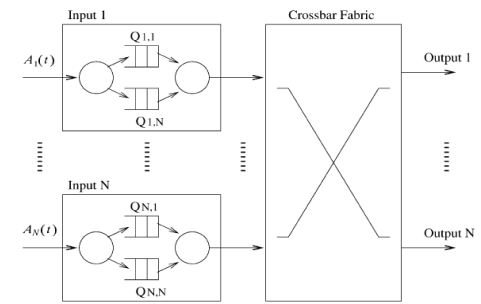
Komutacija paketa

Performanse komutatora sa baferima na ulazu

- Srednje kašnjenje koje unosi komutator sa baferima na ulazu za N teži beskonačno



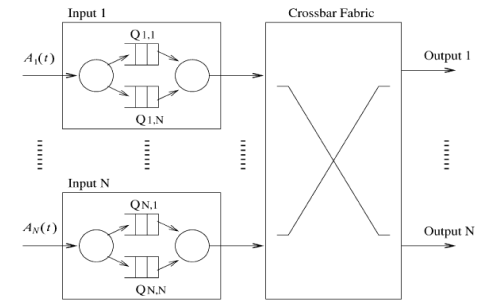
Komutacija paketa



Performanse komutatora sa višestrukim baferima na ulazu

- Jednokaskadni krosbar komutacioni uređaj sa višestrukim ulaznim baferima na svakom ulazu ima m ($2 \leq m \leq N$) odvojenih FIFO bafera. Svaki bafer je dodijeljen jednoj grupi izlaza koja sadrži N/m izlaznih portova. Parametar m se još naziva i bifurkacioni parametar.
- Analitički je pokazano da ovaj pristup, kada je bifurkacioni parametar dovoljno velik, obezbjeđuje 100% propusnost za uniformni dolazni saobraćaj bez dodatnog uslozňjavanja strukture komutatora (ubrzavanje ili proširenje).
- Analiza propusnosti poput jednokaskadnog matričnog komutacionog uređaja sa višestrukim ulaznim baferima se može sprovesti na sličan način kao što je u sprovedena analiza za jednostruko baferovanje na ulazu sa slučajnim izborom jedne od ćelija koje su u koliziji.
- Neka su:
 - $B_i(t)$ broj HOL ćelija adresiranih za izlaz i , koje nijesu u fazi arbitracije tokom vremenskog slota t odabrane,
 - $A_i(t)$ broj ćelija adresiranih za izlaz i , koje tokom vremenskog slota t dolaze na ulaz "slobodnog" bafera,
 - $F_i(t)$ broj HOL ćelija adresiranih za izlaz i , koje su tokom vremenskog slota t odabrane
 - m broj bafera na ulazu,
 - $M=N/m$.

Komutacija paketa

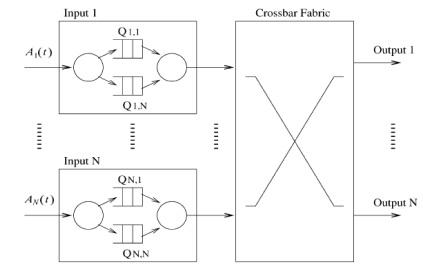


Performanse komutatora sa višestrukim baferima na ulazu

- ❑ Komutator $N \times N$ se može "podijeliti" na m podkomutatora $N \times M$ za slučaj uniformnog saobraćaja.
- ❑ Prethodno znači da se $1/m$ - ti dio ukupnog dolaznog saobraćaja nezavisno opslužuje $N \times M$ komutacionim uređajem.
- ❑ Propusnost $N \times N$ komutacionog uređaja je jednaka propusnosti bilo kojeg od $N \times M$ podkomutacionih uređaja.
- ❑ Virtuelni bafer blokiranih HOL ćelija adresiranih za posmatrani izlaz i se može dinamički modelovati na sledeći način:

$$B^i(t) = \max(0, B^i(t-1) + A^i(t) - 1)$$

Komutacija paketa



Performanse komutatora sa višestrukim baferima na ulazu

- Pretpostavljajući da je N vrlo veliko posmatrani bafer se može modelovati M/D/1 redom čekanja pa je srednji broj blokiranih HOL ćelija

$$E[B] = \frac{\rho^2}{2(1-\rho)}$$

- Takođe, važi:

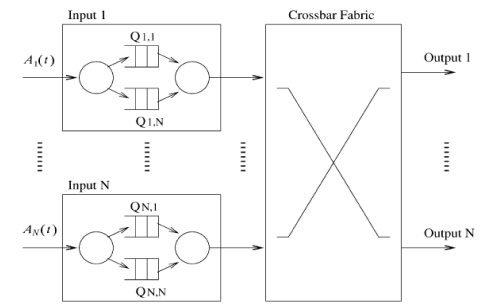
$$F_m + \sum_{i=1}^M B^i(t) = N$$

- U ravnoteži prethodna relacija se transformiše u:

$$E[F] M E[B] N \Rightarrow \frac{E[F]}{M} E[B] N$$

$$\Rightarrow \frac{E[F]}{M} E[B] m \Rightarrow E[B] m - \rho \Rightarrow \frac{\rho^2}{2(1-\rho)} m - \rho$$

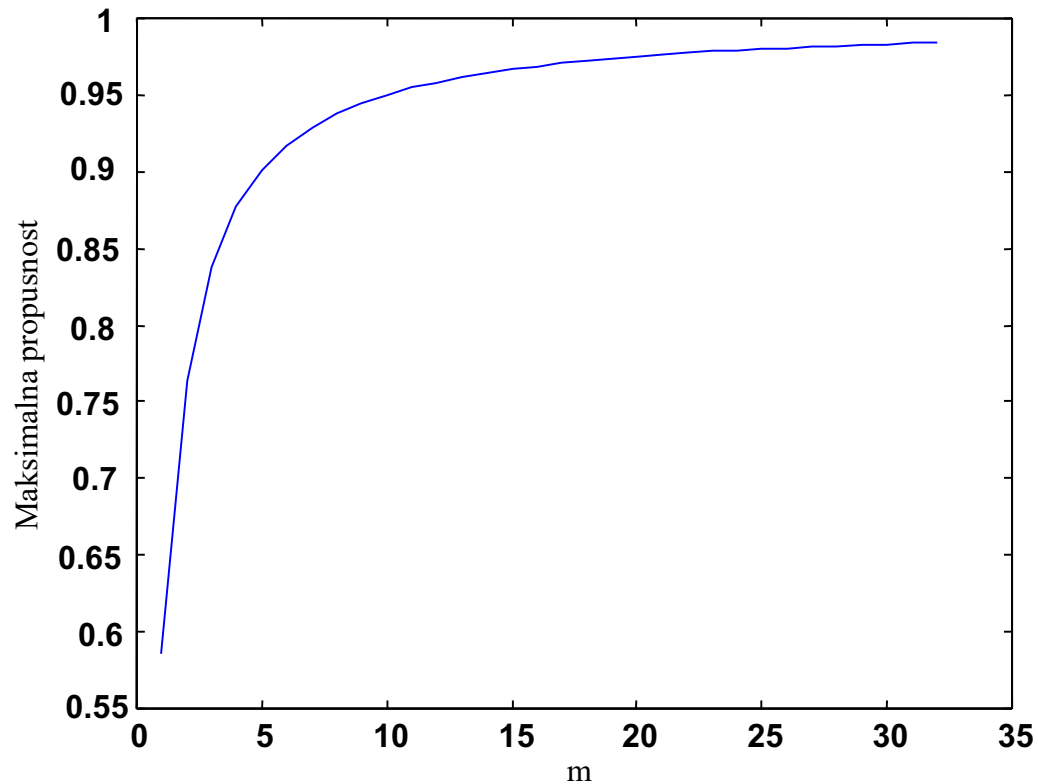
Komutacija paketa



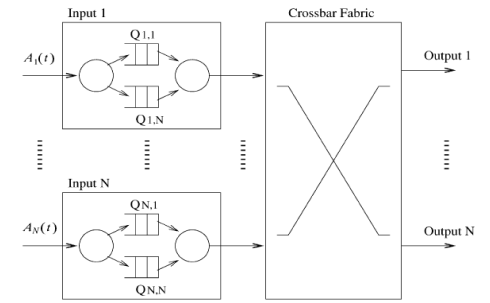
Performanse komutatora sa višestrukim baferima na ulazu

- Rješavanjem prethodne relacije dobija se da je maksimalna propusnost

$$\rho_m \leq 1 - \sqrt{1 - m^{-2}}$$



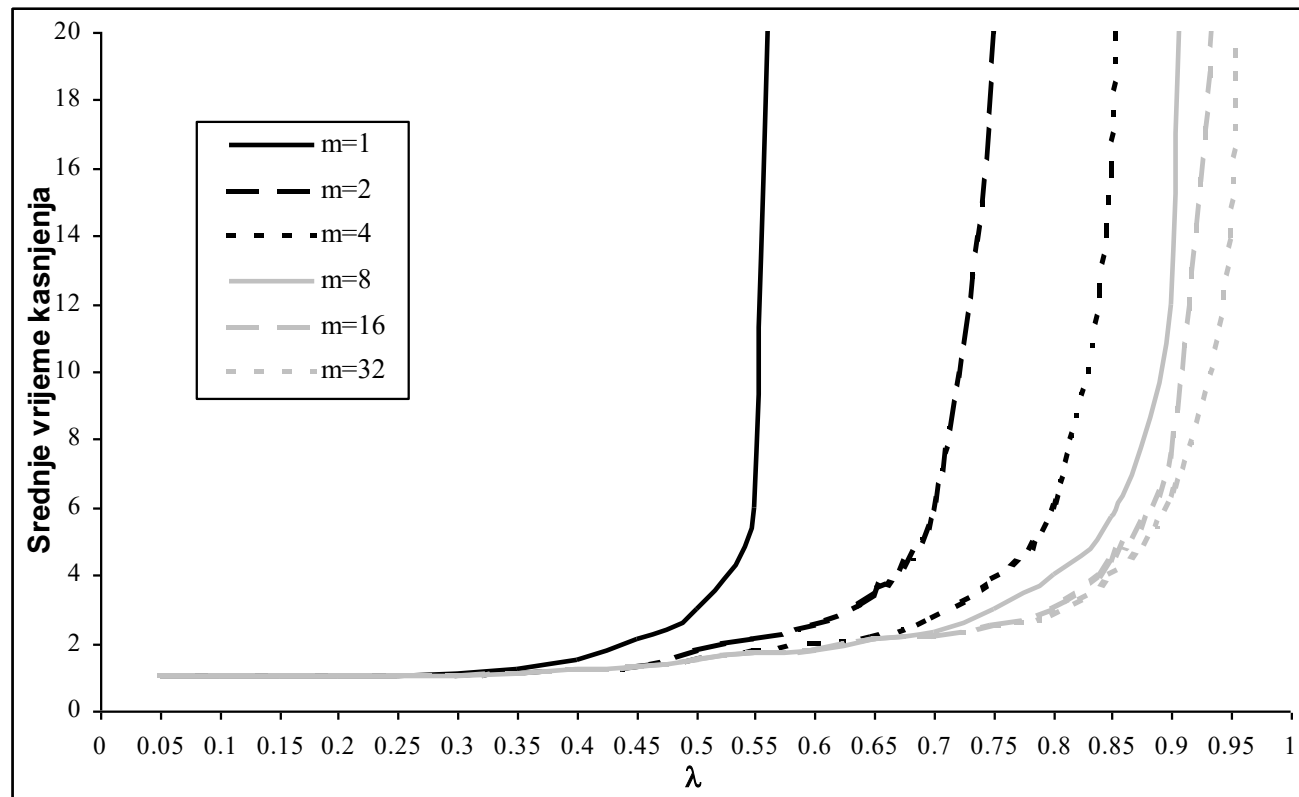
Komutacija paketa



Performanse komutatora sa višestrukim baferima na ulazu

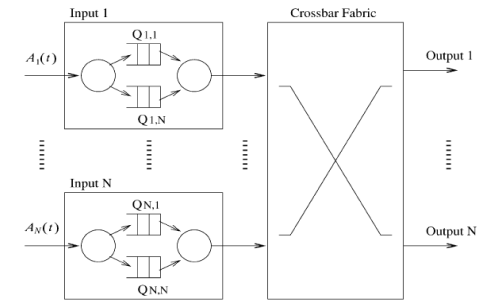
- Srednje kašnjenje (beskonačan broj ulaza N, Geo/Geo/1 model)

$$D = \frac{E[K]}{\lambda/m} \cdot \frac{m - \lambda}{m - \lambda} \cdot \frac{m - \lambda}{2m - 2(m-1)\lambda - \lambda^2}$$



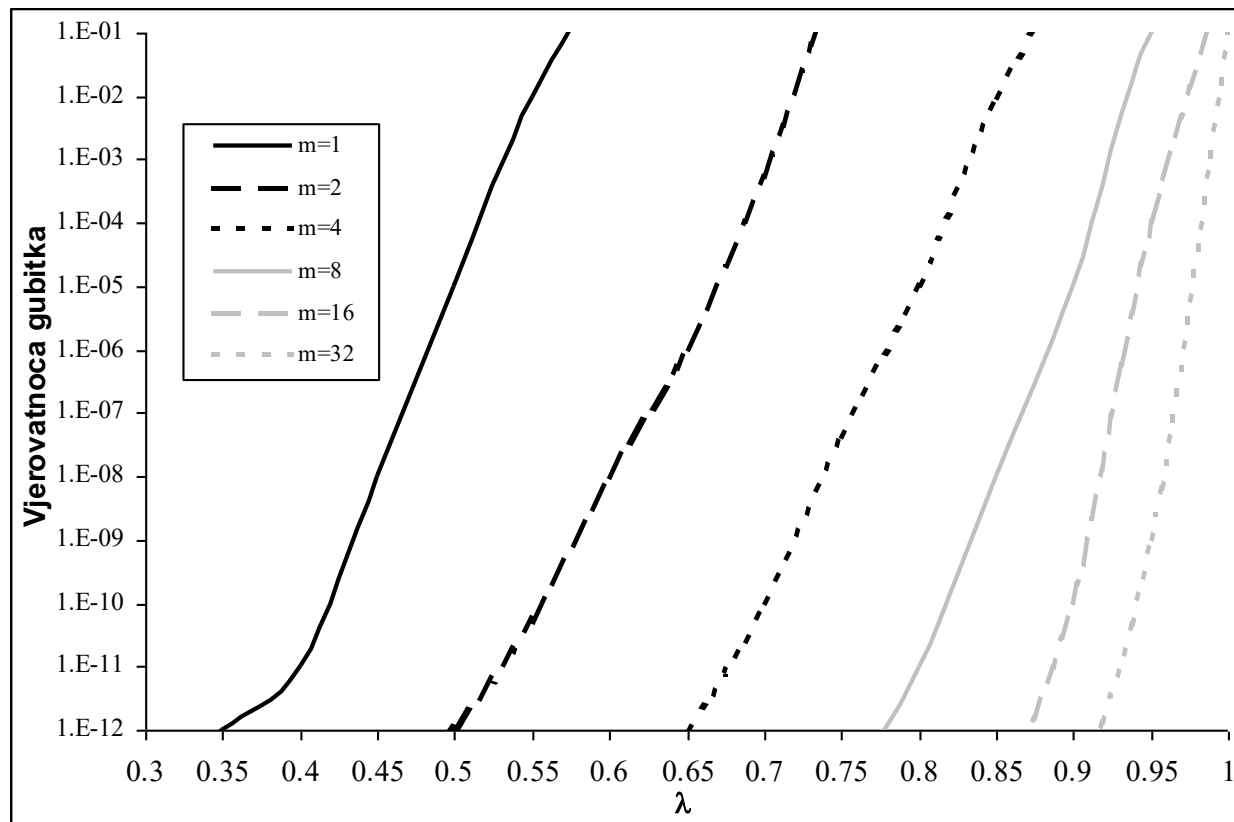
$$\square = \frac{2 - \lambda}{2 - \lambda}$$

Komutacija paketa

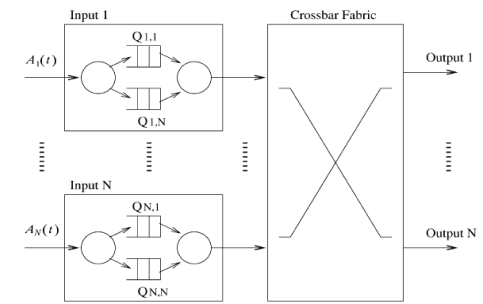


Performanse komutatora sa višestrukim baferima na ulazu

- Vjerovatnoća gubitaka (beskonačan broj ulaza N)

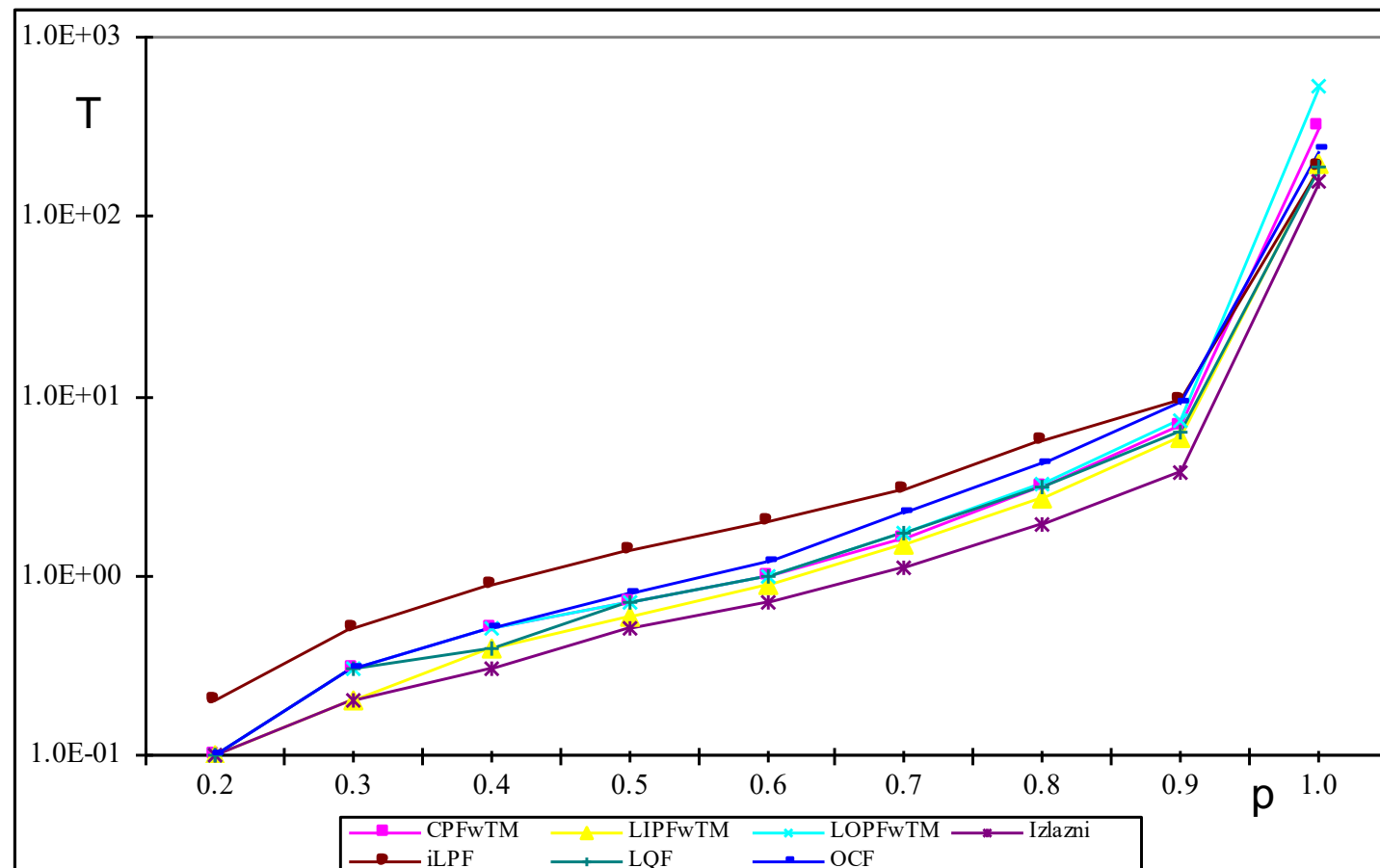


Komutacija paketa



Performanse komutatora sa višestrukim baferima na ulazu

- Srednje kašnjenje ćelija u komutatoru sa virtuelnim izlaznim baferima ($m=N$) u funkciji ulaznog opterećenja za $N=16$



Komutacija paketa

Sistematizacija prostornih komutatora

		Prostorni komutacioni uređaji					
		Krosbar		Banijan			
		Matrični	N^2 razdvojenih putanja	Bafer banijan	Baćer banijan	Prošireni banijan	
Sa jedinstvenom putanjom		<ul style="list-style-type: none"> Baferi na ulazu Baferi u ukrsnim tačkama Baferi na izlazu Baferi na ulazu i izlazu Baferi na ulazu i ukrsnim tačkama 	<ul style="list-style-type: none"> Knockout Lee Integrisani 	<ul style="list-style-type: none"> Baferi na ulazu Centralni baferi Baferi na izlazima 	<ul style="list-style-type: none"> u tri faze sa kružnom rezervacijom sa serijskom rezervacijom 	<ul style="list-style-type: none"> cut-through 	
	Sa višestrukim putanjama	U jednoj ravni					<ul style="list-style-type: none"> alt. pros. Tandem III BMSR
		Paralelne ravni	<ul style="list-style-type: none"> tandem – ukrsne tačke SATURN 				<ul style="list-style-type: none"> PIPn PDN
		Produžene				<ul style="list-style-type: none"> BNS 	<ul style="list-style-type: none"> St. Louis Tandem I, II Shuffleout I Rerutiranje I,II Beneš
		Sa recirkulacijom				<ul style="list-style-type: none"> Starlite Sunshine 	<ul style="list-style-type: none"> Sa povratnom petljom Tandem III Shuffleout II Sa neuralnim kontrolerom
Clos					<ul style="list-style-type: none"> 3-0 stepeni Knockout Generalizovani Knockout 		