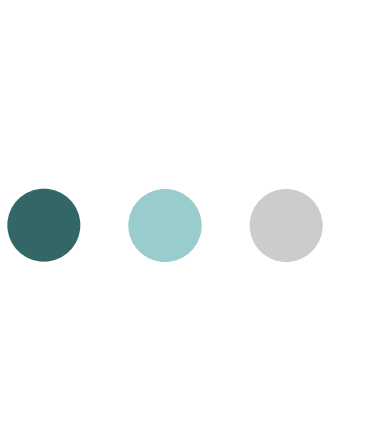


Multimedijalno inženjerstvo – master strukovne studije



Digitalni komunikacioni sistemi: **Lekcija 3: Mreže sa paketskom komutacijom**

zima 2018/2019

Branimir M. Trenkić

Paketska komutacija

Kako prevazići ne-efikasnost komutacije kola?

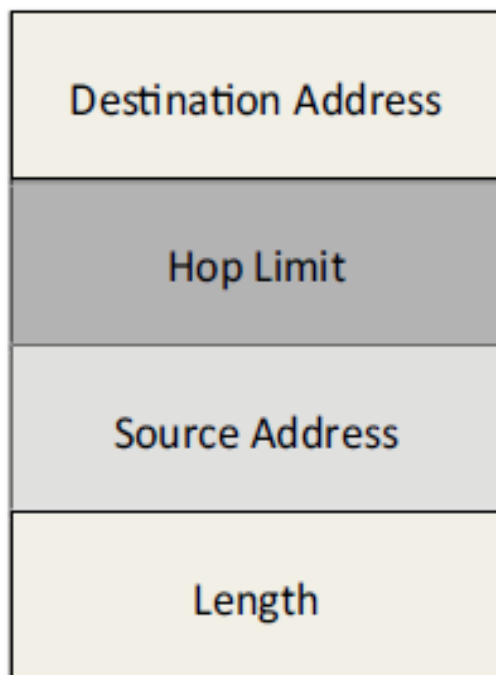
- Dozvoliti predajnicima da šalju podatke u svakom trenutku (*dodela resursa* tek na zahtev)
- Da i dalje bude *omogućeno deljenje linka*
- Paketska komutacija je način prenosa koja to dozvoljava
- Koristi vrlo jednostavnu ideju:- *svakom okviru* podataka se dodaje jedna *manja količina informacija* na bazi koje komutatori vrše upućivanje tog okvira

Paketska komutacija

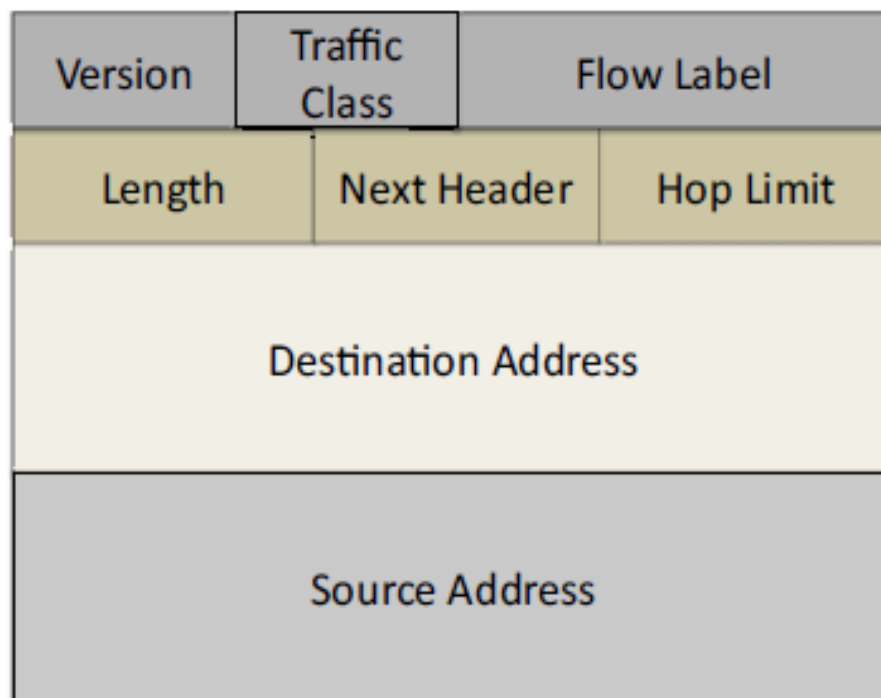
- ***Predhode*** korisničkim podacima i
- Smeštaju se u posebnom delu okvira koji se naziva – ***zaglavlje***
- Tako formatiran okvir se naziva – ***paket***
- Najčešće zaglavlje svakog paketa ***sadrži adresu odredišta*** - komutatori koriste ovu informaciju radi ***prosleđivanja paketa***
- Zaglavlje često ***sadrži i adresu izvorišta*** - kako bi se omogućilo prijemniku paketa da jednostavno ***vрати poruku nazad*** do predajnika

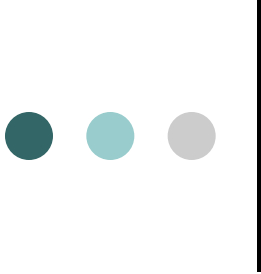
Paketska komutacija

Primer zaglavlja paketa:



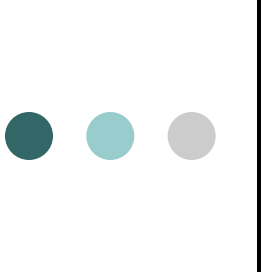
Zaglavlje paketa koje se koristi u IPv6:





Paketska komutacija – uloga komutatora

- ***Koristi odredišnu adresu*** kao ***ključ u pretraživanju*** strukture podataka koja se naziva – ***ruting tabela***
- ***Rezultat pretraživanja*** je ***identifikator odlaznog linka*** po kome paket treba uputiti kako bi se on preneo do željene destinacije
- Postoji ***više načina implementacije operacije pretraživanja*** ruting tabele
 - Najjednostavniji način podrazumeva takvu ruting tabelu koja direktno preslikava adresu destinacije u jedan od linkova (portova) na komutatoru



Paketska komutacija – uloga komutatora

Dakle,

- **Prosleđivanje** je relativno **jednostavno** - pretraživanjem strukture podataka
- **Problem je u formiranju ruting tabele**
- Ideja: Koristi se **ruting protokol** koji uređuje sve aspekte **distribuiranog procesa** koji se (I) odvija **u pozadini**; (II) **implementira na komutatorima**
- **Komutatori** u mrežama sa paketskom komutacijom koji implementiraju ove funkcije se nazivaju još i **ruteri**

Statističko multipleksiranje

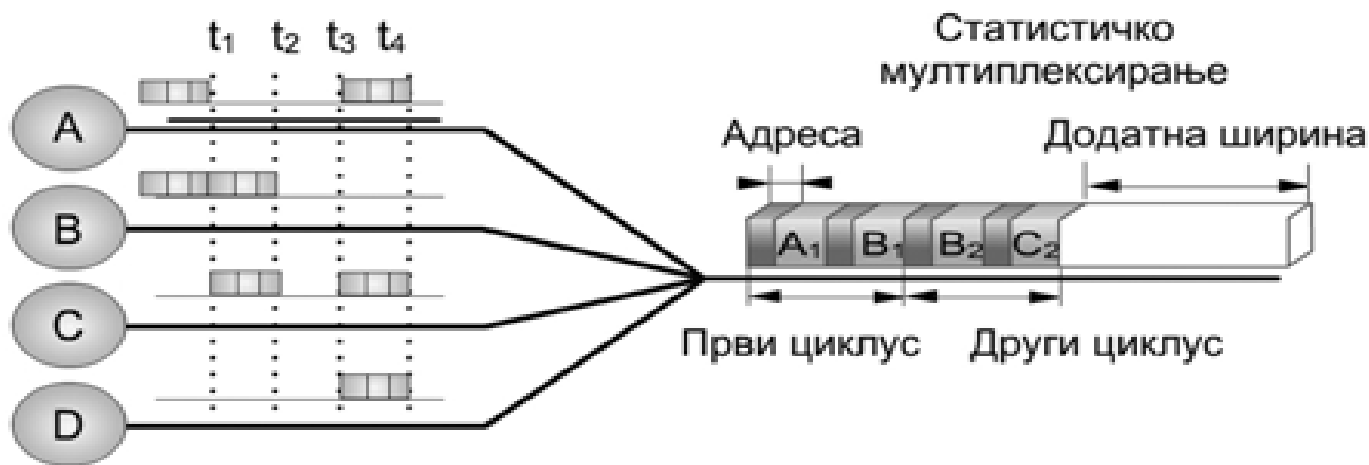
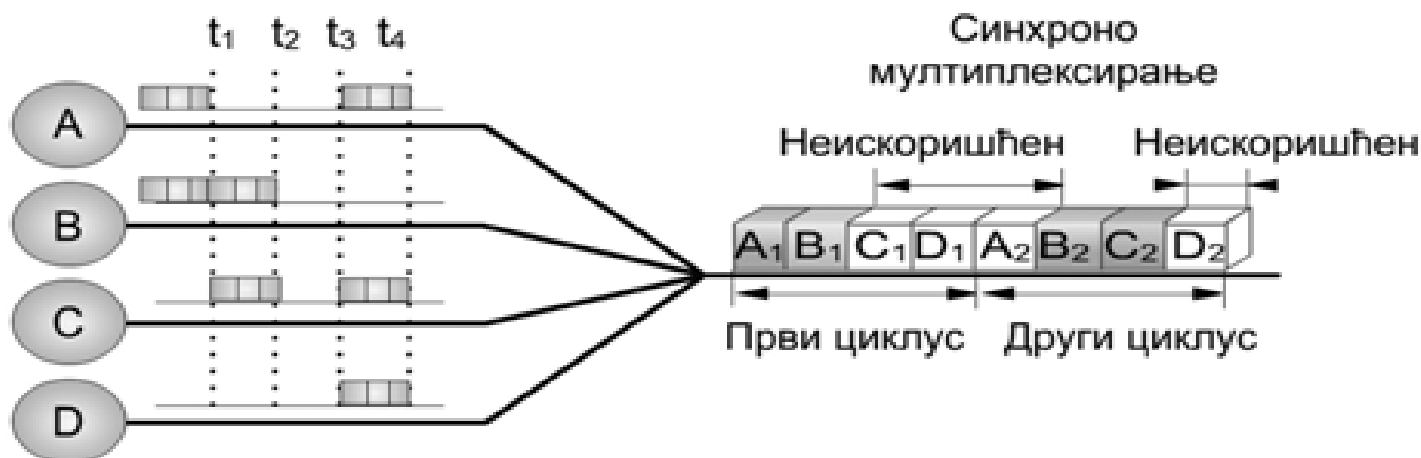
- Statistički multiplekser **dinamički dodeljuje vremenske slotove** – samo ako se zahteva prenos
- Ima veći broj **ulazno/izlaznih (multipleksiranih) linija** velikih brzina
- Svaka **linija poseduje** svoj **bafer**
- **Na strani ulaza** zadatak multipleksera je **da iz bafera očitava prispele okvire**
- Pre prosleđivanja, na strani izlaza **formira se ram podataka** (jedan ciklus) u izlaznom memorijskom prostoru

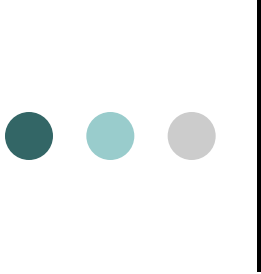
Statističko multipleksiranje

- Paketska komutacija **ne obezbeđuje iluziju namenskog linka** za bilo koji par hostova koji komuniciraju, ali
 - I. **Ne troši kapacitet** bilo kog linka zato što je svaki komutator u stanju da **šalje bilo koji paket kome je link potreban** (sledeći slajd)
 - II. **Ne zahteva faze** uspostave i raskidanje veze, dakle, omogućuje **prenos bez „overhead“-a**
 - III. Može da **omogućiti različite protoke** podataka za različite sesije komunikacije u suštini „na zahtev“

Statističko multipleksiranje

Statističko multipleksiranje - Efikasno korišćenje komunikacionog linka



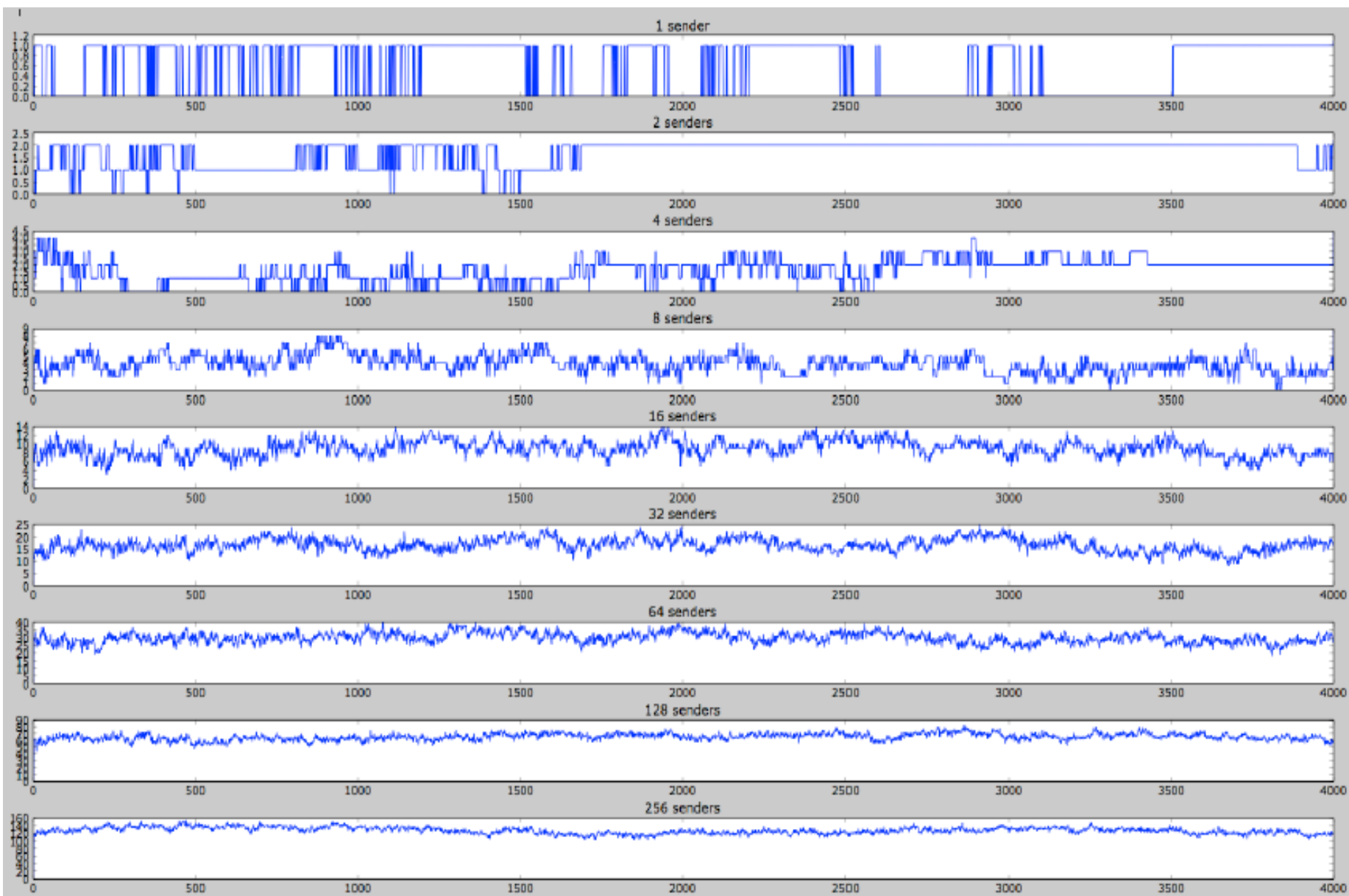


Statističko multipleksiranje

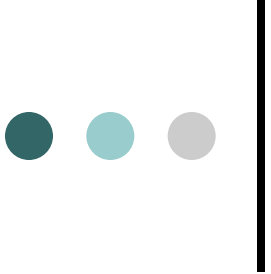
- *Ne predviđa nikakvo predhodno zauzimanje resursa* - *paketi mogu nailaziti brže nego što oni mogu biti poslati* na odlazni link
- Komutator mora biti u stanju da odgovori na ovakve situacije

Statističko multipleksiranje

- Omoгуćuje krajnjim tačkama da **šalju podatke promenljivim intezitetom**
- Sinhronizacijom takvih izvora (sinhronizovano slanje – koriste link istovremeno) – **potrebno je obezbediti link** koji je u mogućnosti da **upravlja vršnim intezitetom** kako bi se obezbedila potrebna usluga za sve istovremene konekcije
- Ovakva sinhronizacija je malo verovatna
- Čak i u slučaju on-off izvora saobraćaja – **zbirni saobraćaj više izvora teži ujednačavanju**

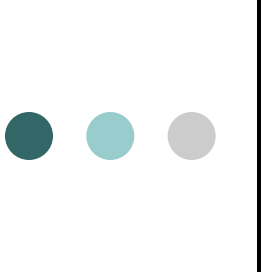


Izvor: on-off, 1Mb/s u on stanju



Paketska komutacija

- Postoje *dve tehnike prenosa* bazirane na komutaciji paketa:
 - *datagramski* pristup
 - “*virtuelni kanal*” pristup



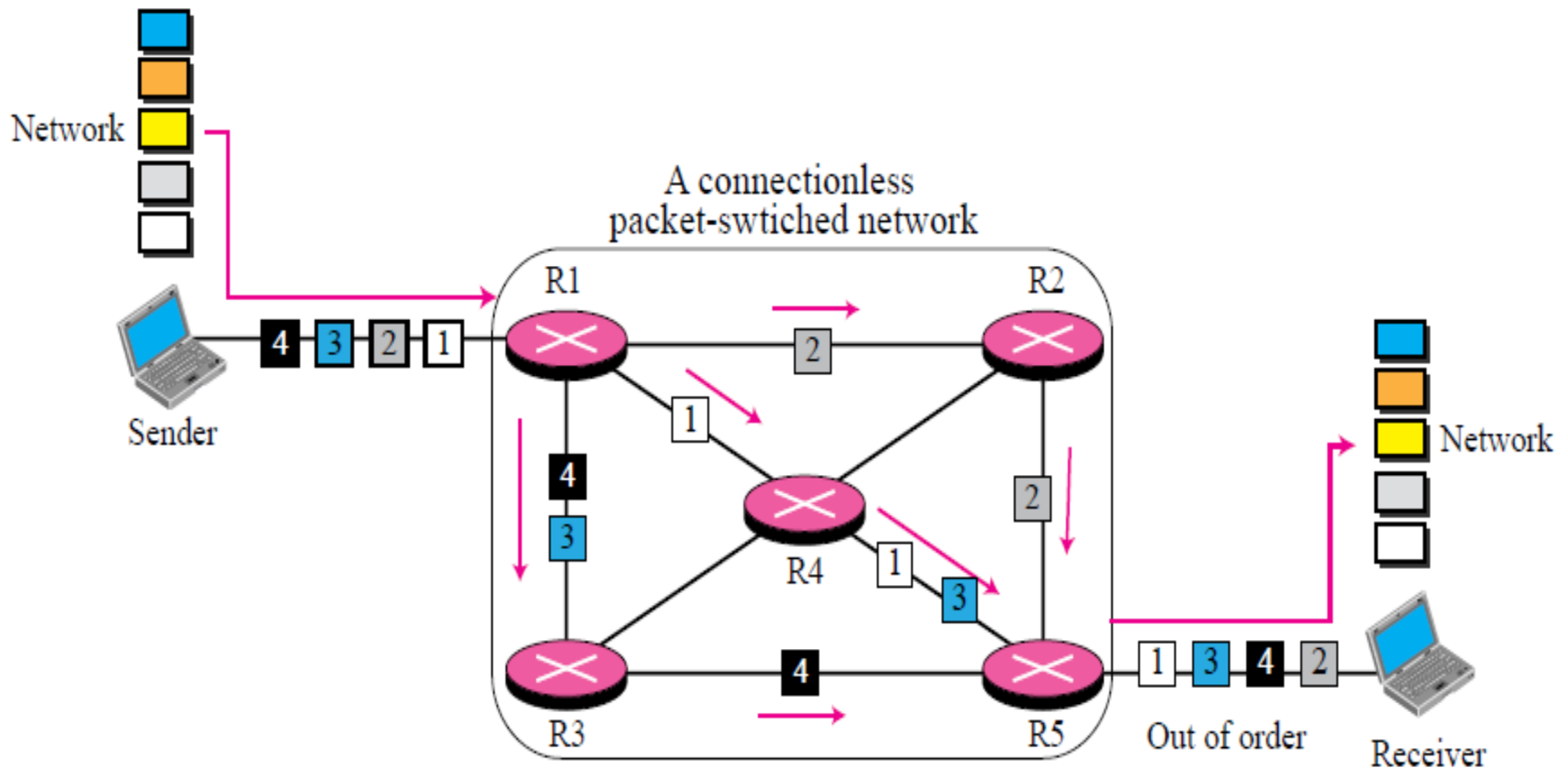
Paketska komutacija

Komutacija paketa – *datagramski* pristup

- Kod mreža sa komutacijom paketa (*datagramski* pristup), svaki paket se u svakom ruteru nezavisno obrađuje
- Način na koji će ruter postupiti prema datom paketu ne zavisi od toga kako je postupao prema prethodnim paketima

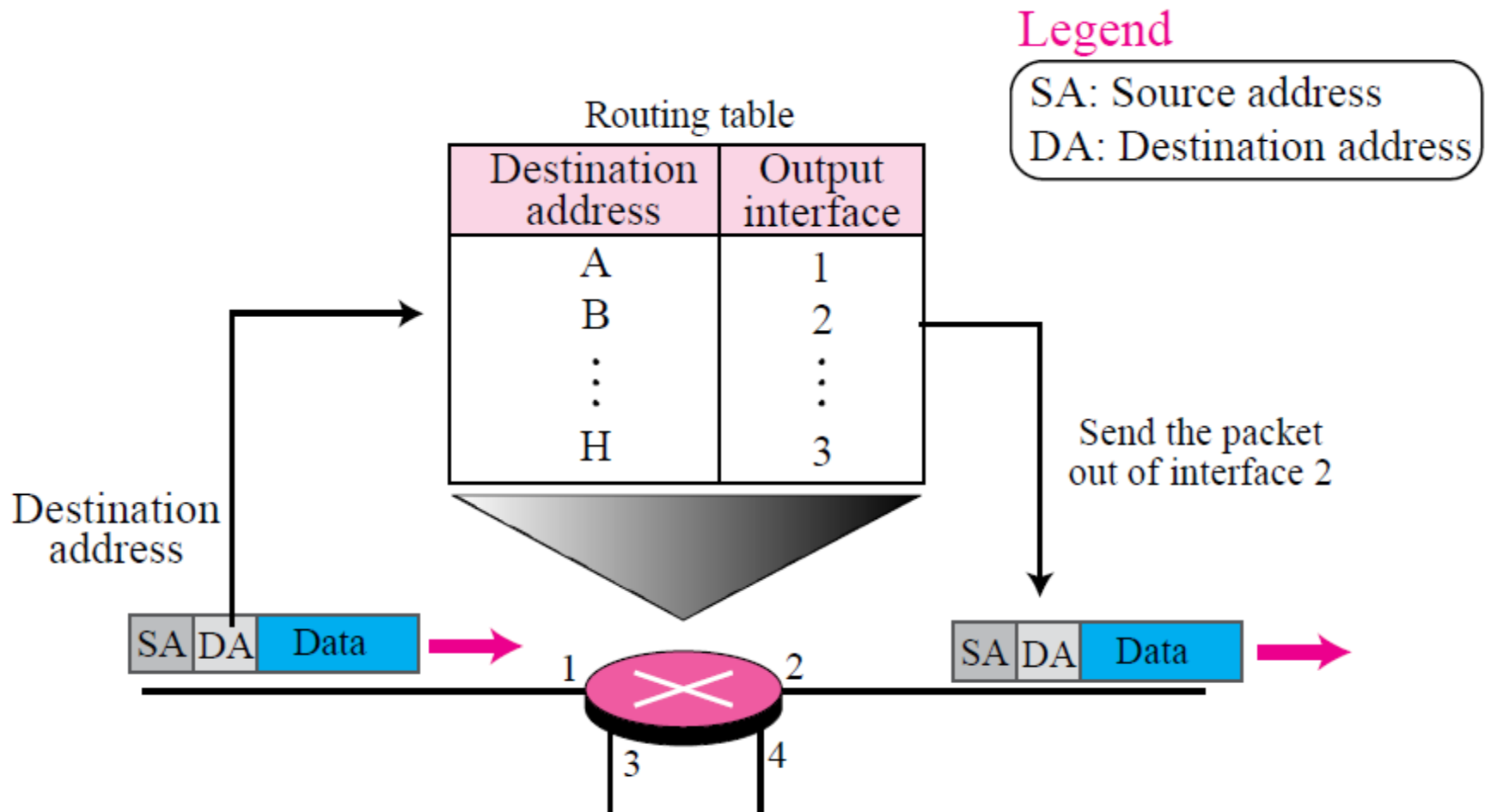
Paketska komutacija

Komutacija paketa – datagramski pristup



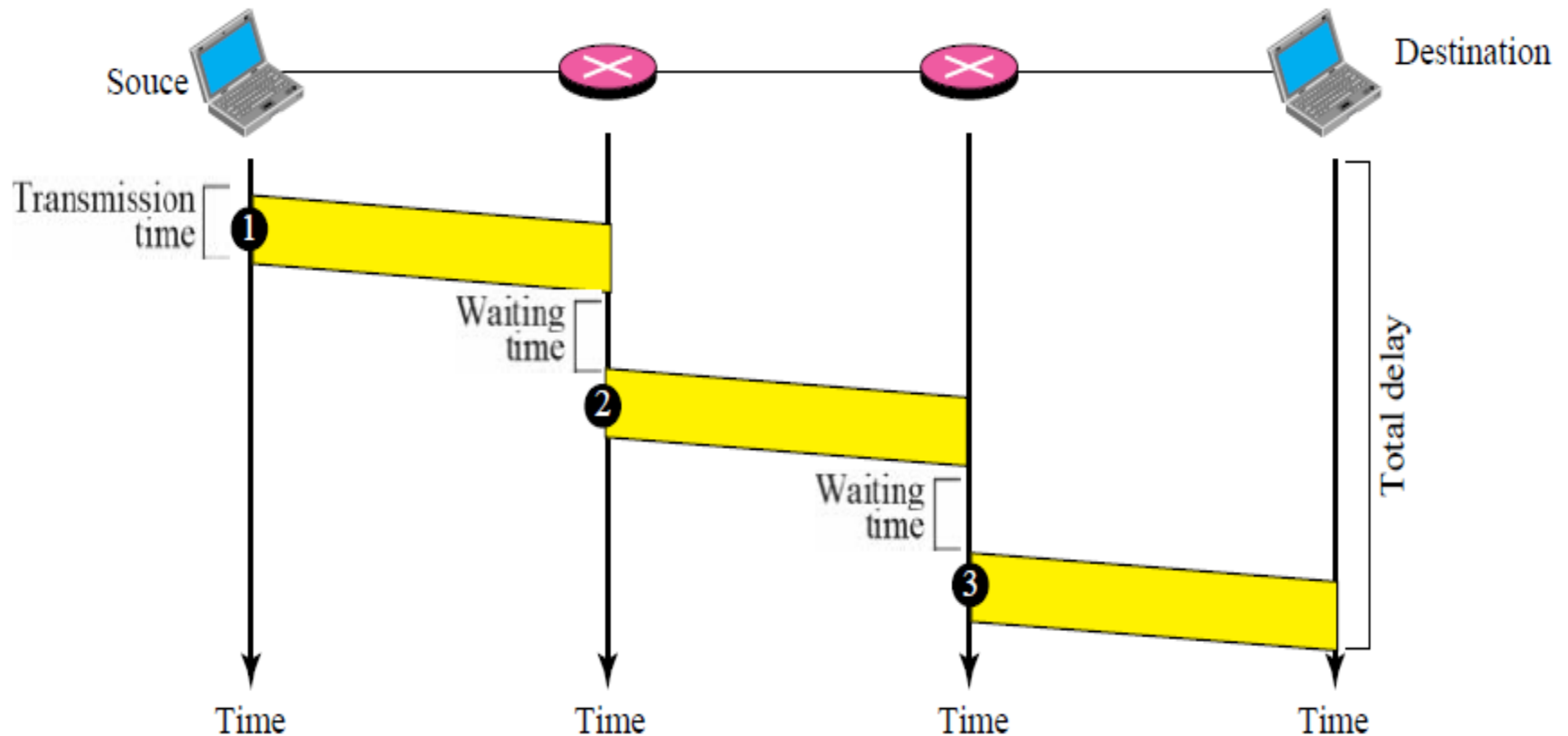
Paketska komutacija

Komutacija paketa – datagramski pristup



Paketska komutacija

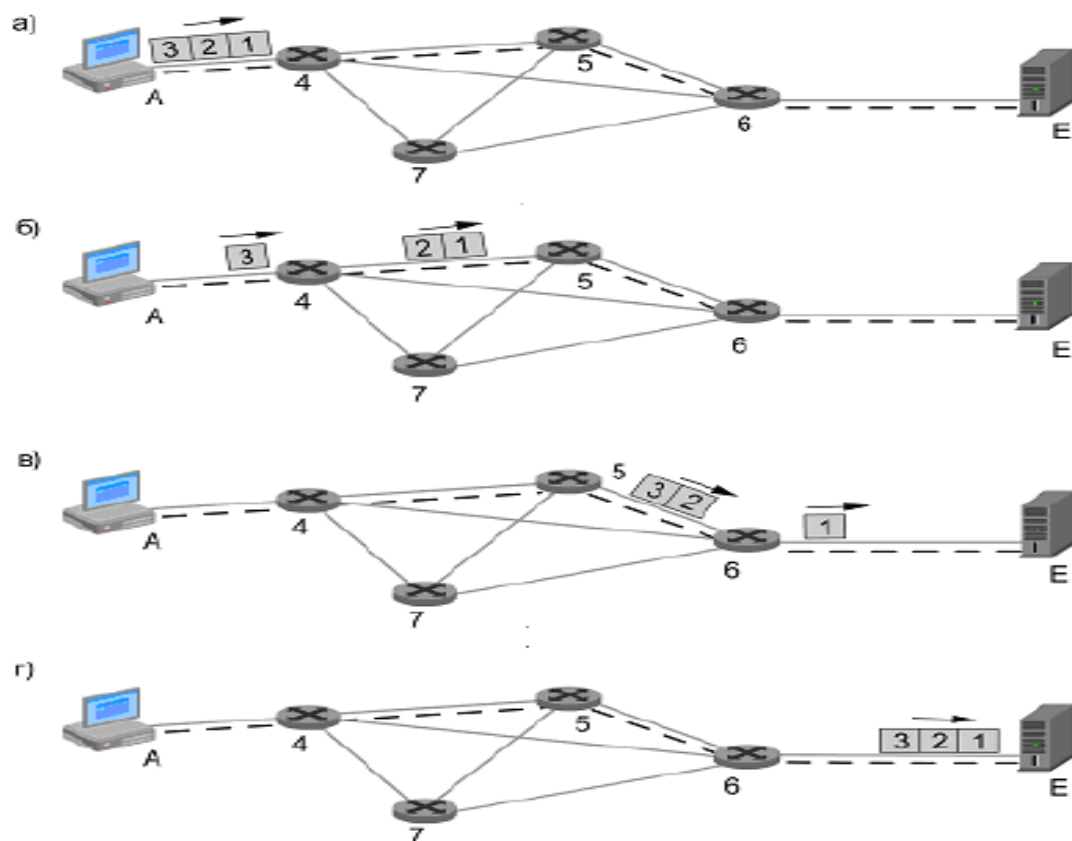
Kašnjenje kod datagramskog pristupa

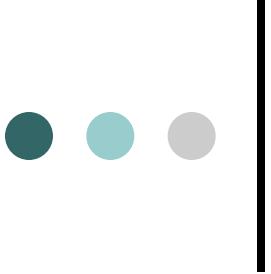


Mrežne konfiguracije

Komutacija paketa – “virtuelni kanal” pristup

Pre nego što se svi datagrami poruke mogu slati, **neophodno je kreirati virtuelnu konekciju** kojom se **definiše put datagrama** od izvorišta do odredišta





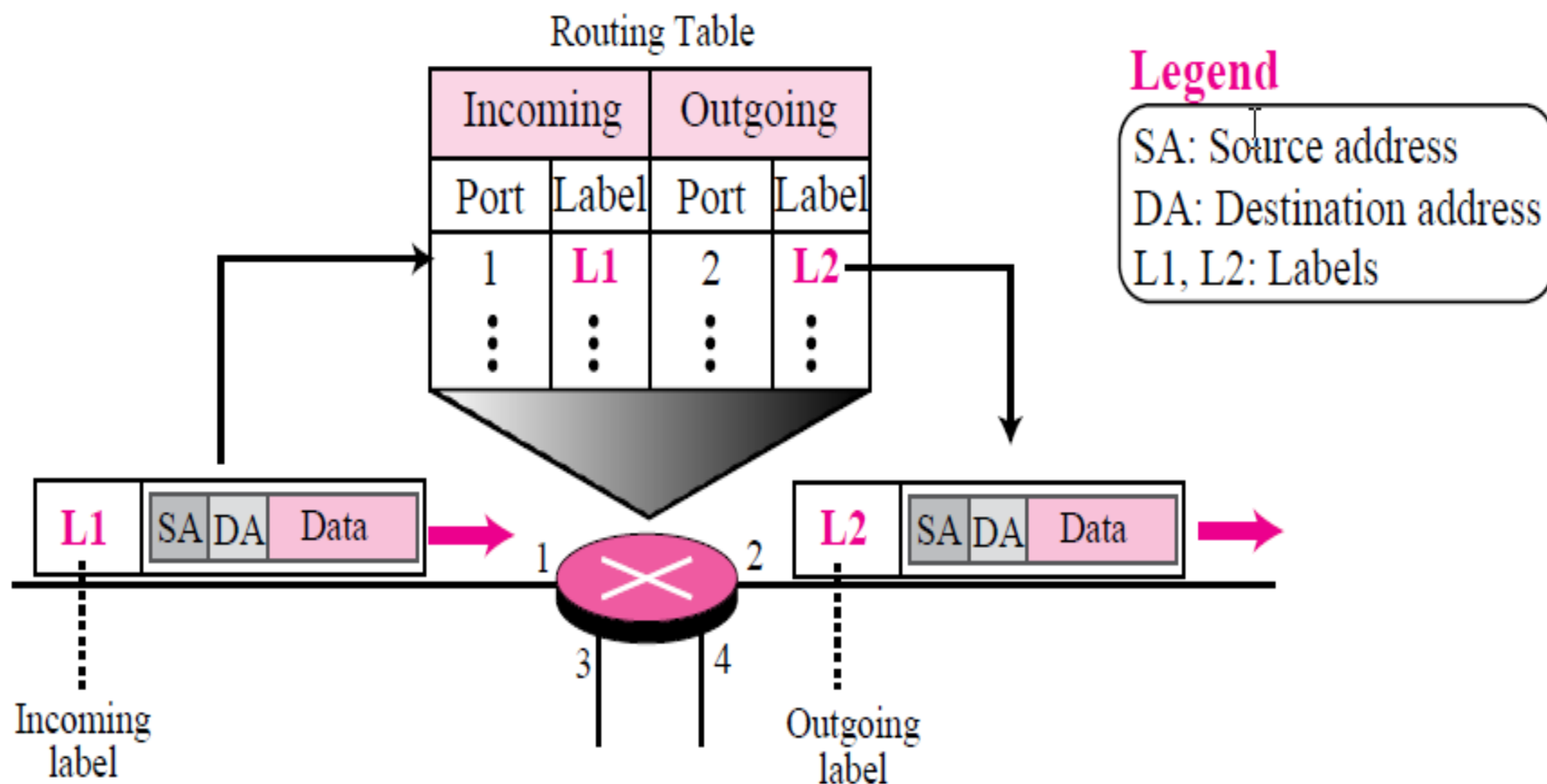
Paketska komutacija

Komutacija paketa – “**virtuelni kanal**” pristup

- Nakon što je konekcija uspostavljena, datagrami putuju po istom putu
- Kod ovog tipa prenosa, paket ne sadrži samo informaciju o izvorišnoj i odredišnoj adresi nego i identifikator virtuelnog kanala (flow label, tj., *virtual circuit identifier*) kojim se definiše virtuelni put paketa

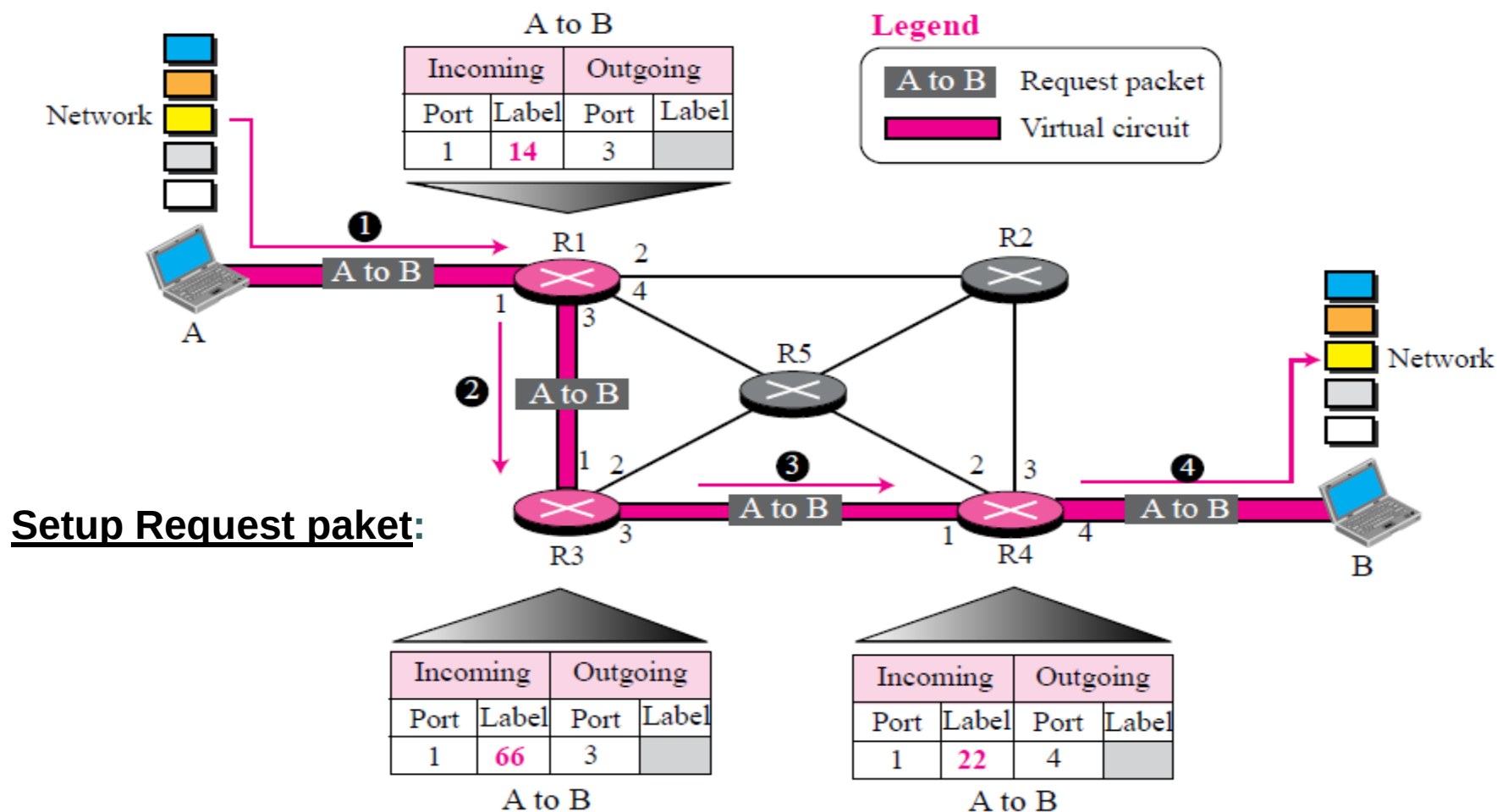
Paketska komutacija

Komutacija paketa – “**virtuelni kanal**” pristup



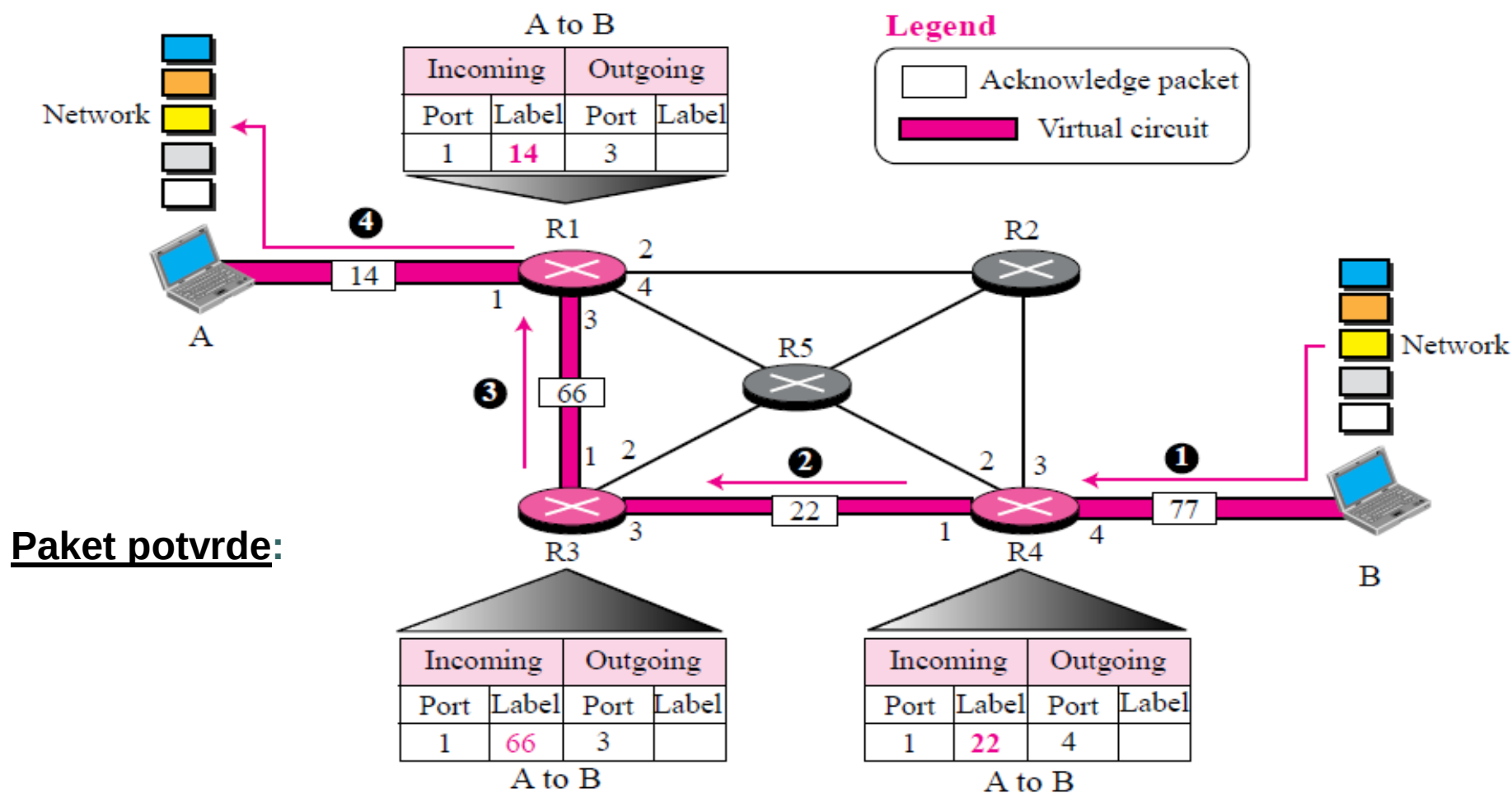
Paketska komutacija

“virtuelni kanal” pristup – faza uspostave veze



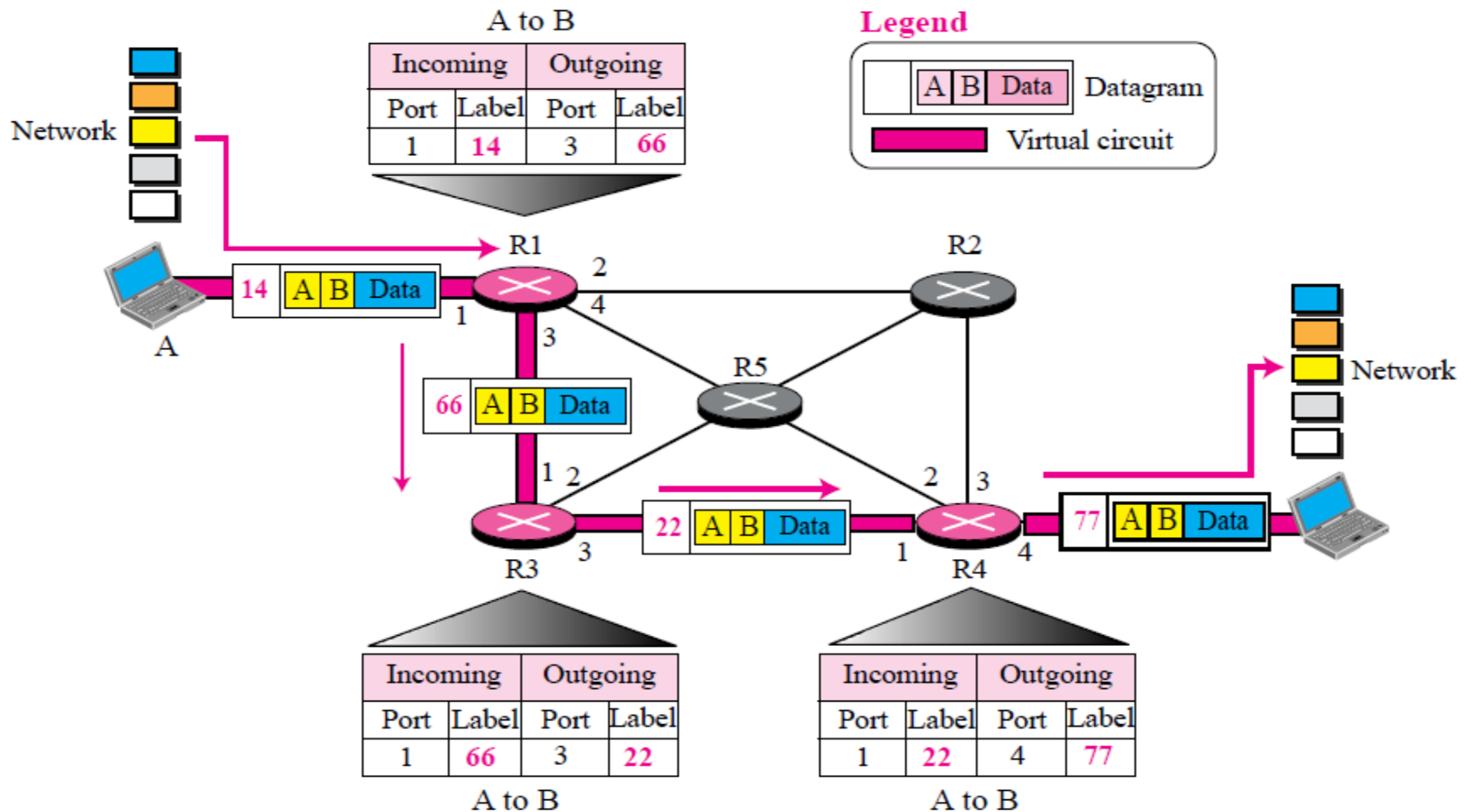
Paketska komutacija

“virtuelni kanal” pristup – faza uspostave veze



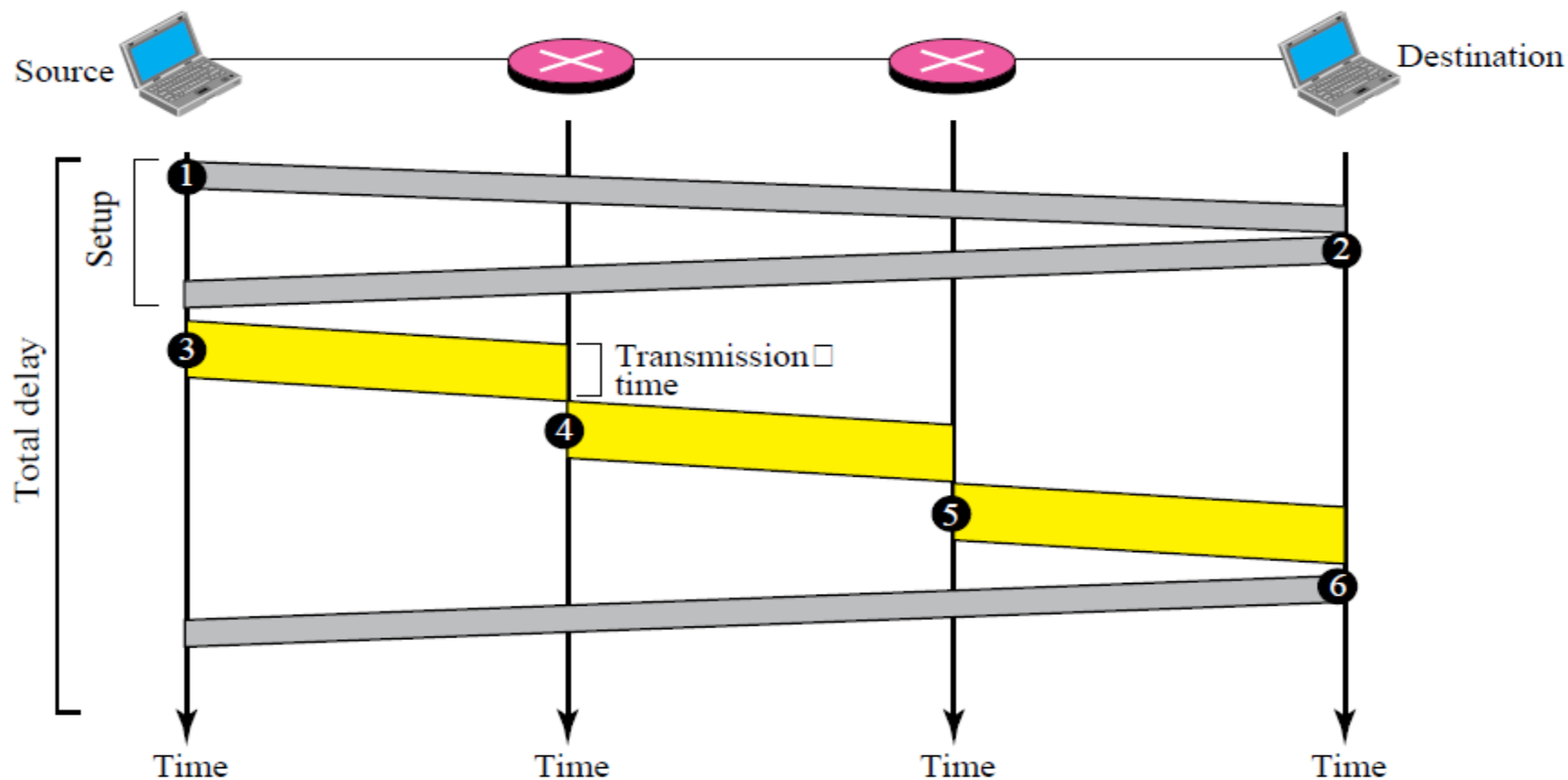
Paketska komutacija

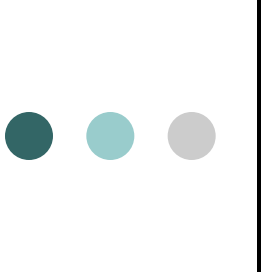
“virtuelni kanal” pristup – faza prenosa podataka



Paketska komutacija

Kašnjenje kod “virtuelni kanal” pristupa





Paketska komutacija

Karakteristike paketskog prenosa

- Princip komutacije paketa omogućava **uvodenje prioriteta**
- **Ruter**, umesto da se prilikom slanja paketa na izlaznu liniju drži striktnog redosleda paketa u redu čekanja, **može dati prednost paketima sa visokim prioritetom**
- Paket visokog prioriteta biće izabran za slanje **bez obzira na njegovu poziciju** u redu čekanja
- Na taj način, paketi višeg prioriteta prenosiće se brže kroz mrežu nego paketi niskog prioriteta

Paketska komutacija

Karakteristike paketskog prenosa - *nedostaci*

- **Kašnjenje u prenosu** je jednako količniku dužine paketa i brzine prenosa preko dolazne linije - vreme koje je potrebno da se paket u celosti pošalje iz jednog čvora ka drugom čvoru

$$\text{kašnjenje} = \text{dužine paketa} / \text{brzine prenosa}$$

Paketska komutacija

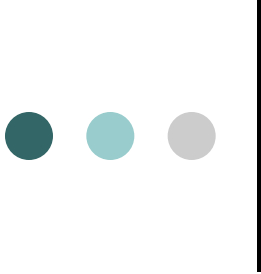
Karakteristike paketskog prenosa - *nedostaci*

- Prolazak paketa kroz ruter unosi dodatno kašnjenje u prenosu
- Na kašnjenje u prenosu *treba dodati vreme*
 1. Procesiranja (obrade) paketa i
 2. Vreme čekanja paketa u redu čekanja, koje je promenljivo i uslovljeno trenutnim uslovima u mreži
- Generalno: ukupno **vreme kašnjenja paketa** jednako je **zbiru kašnjenja paketa kroz svaki ruter** na putanji koju paket prolazi + prostiranje

Paketska komutacija

Karakteristike paketskog prenosa – *nedostaci*

- Paketi:
 - Mogu se *razlikovati po dužini*,
 - Mogu se prenositi *različitim putanjama* i
 - Mogu biti izloženi *promenljivim kašnjenjima u ruterima*
- Uslovljavajući da –
- **Sveukupno vreme prenosa** paketa od datog para izvor-odredište, može značajno da **varira od paketa do paketa**



Paketska komutacija

Karakteristike paketskog prenosa – *nedostaci*

- Ova *pojava* se naziva treperenje ili džiter (*jitter*) i može biti nepoželjna kod izvesnih aplikacija, kao što su aplikacije koje zahtevaju prenos podataka u relanom vremenu (telefonija, video, audio, ..)

Paketska komutacija

Karakteristike paketskog prenosa - *nedostaci*

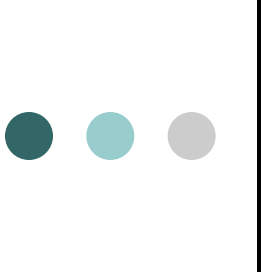
- ***Problem overhead-a***
- ***overhead*** = zaglavlje / (zaglavlje + payload)
- Da bi se ***omogućilo usmeravanje paketa*** kroz mrežu, svaki paket osim podataka mora sadržati i ***dodatne kontrolne informacije*** (npr. adresa odredišta, redni broj paketa u poruci i sl.)
- Za prenos kontrolnih informacija troši se **deo komunikacionog kapaciteta prenosnih linija**, čime se smanjuje raspoloživ kapacitet za prenos korisničkih podataka (payload)

Paketska komutacija

Karakteristike paketskog prenosa - *nedostaci*

Primer:

- Šaljemo e-mail poruku veličine **10KB**, gde su **paketi** koji se šalju maksimalne **veličine 1024 bita** (**128 bita** zauzima **zaglavlje**) - što ostavlja **896 bita** za korisnički podaci - **payload** (1024-128)
- Pretvorimo 10KB u bitove $10 * 1024 * 8 = \mathbf{81920}$ **bitova**
- Kada podelimo celobrojno 81920 na 896 dobijamo $81920 / 896 = 91 + 384$ bita ostatka



Paketska komutacija

Karakteristike paketskog prenosa - *nedostaci*

Primer:

To znači da će:

- email poruka veličine 10KB biti podeljena u 92 paketa
- komutacijom paketa za 10KB tj. 81920 bitova bit neophodno poslati 93696 bita,
- Što ***je više od 11% od veličine originalne poruke!***

Paketska komutacija

- Dinamika saobraćaja
- Slika koja sledi prikazuje **zbirnu količinu podataka** (u bajtovima) koja se prenosi kroz mrežu - **kao funkcija vremena**
- Saobraćaj se meri u periodima različitog trajanja
 - Prvi grafikon - 10ms
 - Drugi grafikon – 100ms
 - Treći grafikon – 1s

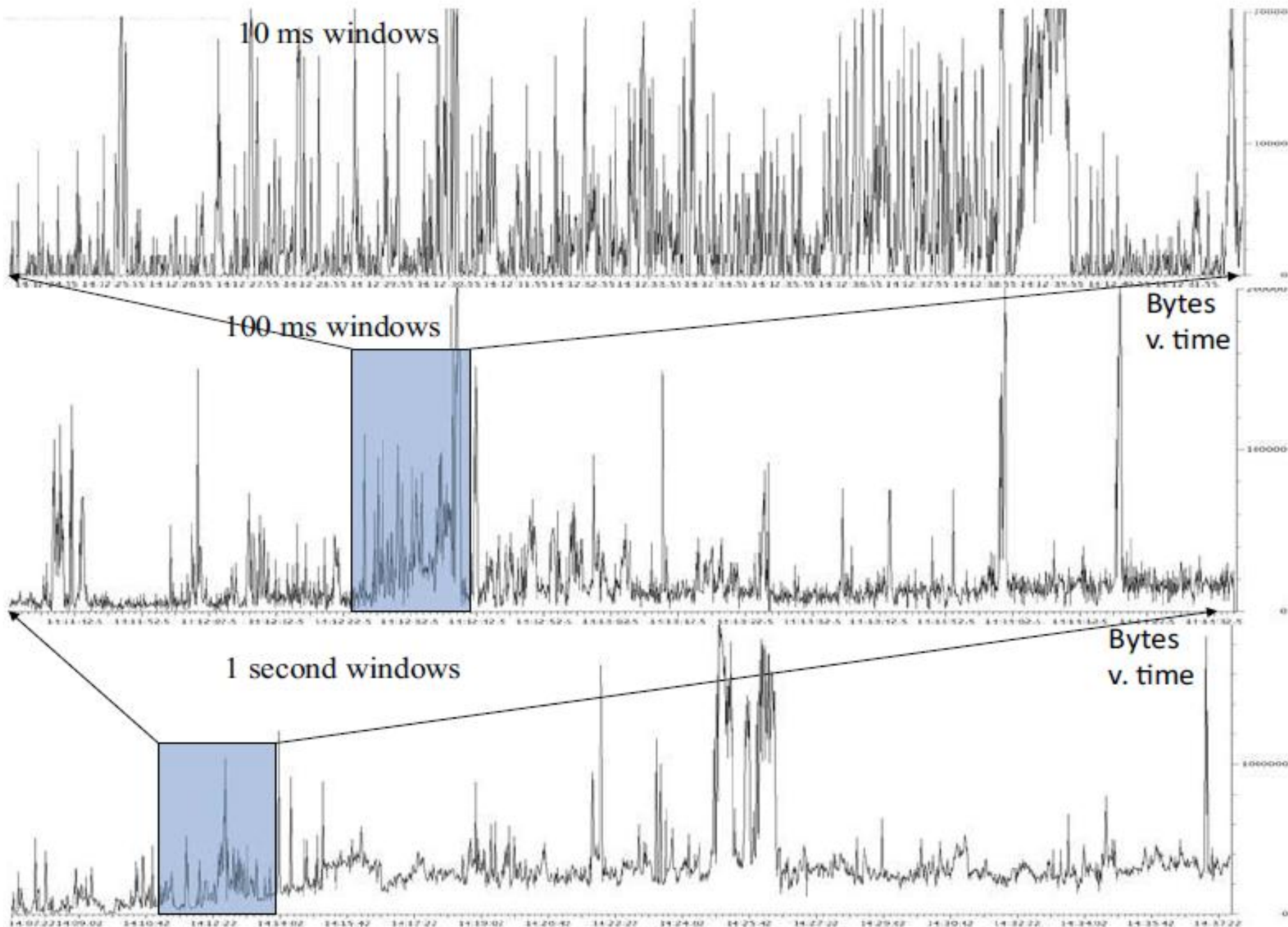
10 ms windows

100 ms windows

1 second windows

Bytes
v. time

Bytes
v. time



Paketska komutacija

○ Dinamika saobraćaja

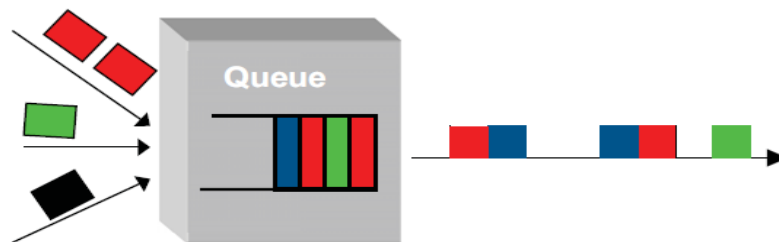
- I. Evidentno ***postojanje velike varijabilnosti*** u intervalima posmatranja – ***posledica grupnih nailazaka (sporadičnog saobraćaja)***
 - Maksimalna količina podataka u jednom intervalu je 50.000 bajtova, ali postoje uzastopni intervali u kojima količina podataka je između 20.000 i 0 bajtova
- II. Varijabilnost je i dalje očigledna ali je ***varijansa je redukovana***
- III. Ista manifestacija i dalje traje, iako ***varijabilnost ne nestaje***

Paketska komutacija

- Dinamika saobraćaja
- Ovi podaci nedvosmisleno ***ukazuju na dinamiku saobraćaja*** koju planeri mreže moraju ***uzeti u obzir prilikom projektovanja mreže***
- Kako projektovati ***kapacitet odlaznog linka***
 - mora biti **veća od maksimuma** koji se očekuje u kratkim vremenskim intervalima
 - ili
 - znatno manji ali uz korišćenje redova čekanja koji bi ***apsorbovali pikove grupnih nailazaka***

Apsorpcija grupnih nailaska

- **Redovi čekanja** (*baferi*) su ključna komponenta svake mreže sa paketskom komutacijom
- Oni u komutatorima ***apsorbuju grupne nailaske podataka***



- Kada ***paketi nailaze*** na odlaznom linku ***brže nego što je kapacitet*** tog linka - red čekanja za taj link memoriše te pakete
- Ako paket nailazi u trenutku punog reda čekanja – tada se paket jednostavno odbacuje

● ● ● | Apsorpcija grupnih nailaska

Može se doći u iskušenje!

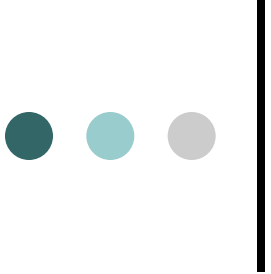
- Redovima čekanja ***dodeliti veliku količinu memorijskog prostora***
- Time bi se ***izbegao gubitak paketa*** (što je očigledno loša stvar)
- Ako je ***malo memorije*** - veliki broj paketa će biti odbačeno
- Ako je ***previše memorije*** - kašnjenje paketa može biti jako veliko

Kako odrediti dužinu reda čekanja?

● ● ● | Apsorpcija grupnih nailaska

Kako odrediti dužinu reda čekanja?

- Odgovor *nije lak*
- *Jedan način* - znati *maksimalno dozvoljeno kašnjenje* paketa, i na osnovu tog podatka odrediti dužinu reda čekanja
- Redovi čekanja
 - mogu sprečiti gubitak paketa, ali
 - prouzrokuju kašnjenje u prenosu
- Kašnjenje je, dakle, „nužno zlo“



Apsorpcija grupnih nailaska

Pored toga,

- ***Kašnjenja su promenljiva***
- Generalno, vremena čekanja svakog paketa u redu čekanja su različita
- Kao rezultat, ***analiziranje performansi mreže nije jednostavan posao***

Mere performansi mreže

- Procena: ***“Da li mreža funkcioniše dobro ili ne?”***
- Da bi uradili taj posao - ***potrebno je definisati neke veličine*** koje ste u stanju da izmerite – pa ***na osnovu njih*** da procenjujemo performanse mreže
- Kao korisnik, ako želite da isporučite ili preuzmete neke podatke kroz mrežu, ***prirodna mera*** koju možete koristiti je ***brzina kojom je to moguće uraditi*** - ***vreme koje je potrebno da se taj prenos (isporuka) izvrši***

Mere performansi mreže

- **Podaci** koje treba isporučiti **su dužine S bajtova**
- Potrebno je **T sekundi za isporuku** tih podataka
- **Protok ili propusnost** (*throughput*) prenosa
- Može biti zadat kao:
 - **Intezitet prenosa** podataka - **S/T bajtova/sekundi**
 - Kao **vreme prolaska** jedinice podataka (*throughput time*) kroz sistem
- Što je protok veći, to je zadovoljstvo sa radom mreže veće, i obrnuto

Mere performansi mreže

- **Protok** prenosa je ograničen odozgo **bitskom brzinom najsporijeg linka** na putanji između predajnika i prijemnika
- **Protokoli** pokušavaju da optimizuju protok prenosa velike količine podataka
- Optimizacija se, uglavnom, bazira na dva faktora:
 - I. **kašnjenje** na nivou paketa, i
 - II. intezitet **gubitaka** paketa

Mere performansi mreže

Intezitet gubitaka paketa

- **Broj odbačenih paketa** u mreži duž njegove putanje od predajnika **do prijemnika podeljen sa ukupnim brojem poslatih paketa**

- **Tumačenje:**

(1) preko količine prenetih podataka

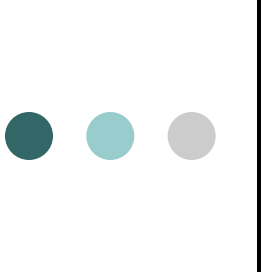
- Predajnik šalje S_t paketa a prijemnik dobija S_r paketa
- Intezitet gubitaka paketa = $1 - S_r/S_t = (S_t - S_r)/S_t$
- Kao verovatnoća ili u procentima

Mere performansi mreže

Intezitet gubitaka paketa

(2) preko ***predajnog i prijemnog inteziteta***
(***ekvivalentno tumačenje***)

- ***Intezitet nailaska paketa*** u predajni bafer na predajnoj strani – ***A paketa/sek***
- ***Intezitet odlazaka paketa*** iz prijemnog bafera na prijemnoj strani – ***D paketa/sek.***
- Intezitet gubitaka paketa = ***1 – D/A***



Mere performansi mreže

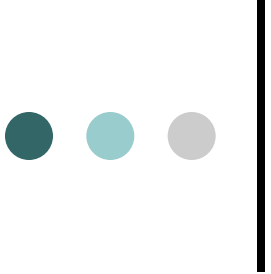
Kašnjenje u prenosu paketa

- Kašnjenje u prenosu paketa po putanji jednako je ***zbiru kašnjenja prouzrokovanih iz četiri izvora:***
 - 1) prostiranje (propagation),***
 - 2) prenosa (transmission),***
 - 3) obrade (processing) i***
 - 4) čekanja u baferu (redu čekanja, queueing)***

Mere performansi mreže

Kašnjenje u prenosu paketa – usled prostiranja

- **Brzina prostiranja signala kroz prenosni medijum je limitirana**
- **Žičani** - brzina svestlosti kroz taj materijal (za optičke linkove, to je **uglavnom 2/3 brzine prostiranja svetlosti kroz vakum**)
- **Radio komunikacije** - brzina svetlosti kroz vakum (vazduh), oko **3×10^8 metara/sek**
- Vreme kašnjenja usled prostiranja jednako je vremenu koje je **potrebno da prvi bit prenosa dostigne željeno odredište**



Mere performansi mreže

Kašnjenje u prenosu paketa – usled prostiranja

- *Za putanju* koja se sastoji *od više redno organizovanih linkova i komutatora*
- Kašnjenje usled prostiranja na putanji jednak je *zbiru kašnjenja na pojedinačnim linkovima*

Mere performansi mreže

Kašnjenje u prenosu paketa – usled obrade

- Ulaskom paketa u komutator - ***potrebno ga je obraditi pre slanja*** ka odredišnom linku
- U mrežama sa paketskom komutacijom, ta ***obrada***, u najmanju ruku, ***uključuje***
 - ***pretragu odgovarajuće tabele*** kako bi se odredio odlazni link
 - obrada može zahtevati i ***modifikaciju zaglavlja paketa***

Mere performansi mreže

Kašnjenje u prenosu paketa – usled prenosa

- **Vreme** potrebno **da paket dužine S bitova bude poslat (u celosti)** preko datog linka
- **Bitska brzina** linka **R b/s** (bitski interval $1/R$ sek.),
- Kašnjenje usled prenosa = **S/R sekundi**
- Napomenimo da kašnjenje usled prenosa **zavisi od tehnologije izrade komutatora**

Mere performansi mreže

Kašnjenje u prenosu paketa – usled prenosa

- **Store-and-forward** komutatori
 - **Povećava** kašnjenje
 - Svaki **paket se primi (memoriše) u celosti pre obrade**
- **Cut-through** komutatori
 - Sa **ekstremno malim kašnjenjem** usled prenosa
 - Obrada paketa počinje **prijemom destinacionih informacija iz zaglavlja** a paket se šalje ka odlaznom linku bez predhodnog memorisanja

Mere performansi mreže

Kašnjenje u prenosu paketa – usled prenosa

- ***Cut-through*** komutatori
- Komutator kao da spoji pokretnom trakom prenosom paketa po jednom linku sa prijemom na drugi link
- Obrada u jednom komutatoru je na isti način spojena sa prijemom na odlaznom linku, tako da
- ***Kašnjenje*** paketa ***s kraja na kraj je manje*** od ***prostog zbira*** individualnih izvora kašnjenja

Mere performansi mreže

Kašnjenje u prenosu paketa – usled baferovanja

- **Baferi** (redovi čekanja) su **fundamentalne strukture podataka** u mrežama sa paketskom komutacijom
- Cilj im je da **apsorbuju grupne nailaske** paketa na odlazni link
 - **Brzina nailaska** paketa, u tom intervalu, **je veća od** prenosnog **kapaciteta** tog linka
- Vreme koje paket provede u baferu naziva se - kašnjenje usled čekanja u baferu

Mere performansi mreže

Kašnjenje u prenosu paketa – usled baferovanja

- Za razliku od drugih komponenti
- ***Kašnjenje usled čekanja u baferu*** je često ***promenljivo***
- ***Može biti dominantan izvor kašnjenja***, sa učestvovanjem od oko 50% u ukupnom kašnjenju paketa ***u slučaju nagomilavanja u mreži***
 - U nekim mrežama, kao što su one sa ***satelitskim*** linkovima, kašnjenje usled prostiranja može biti dominantan izvor ukupnog kašnjenja

Little-ova formula

- *Odnos između* prosečnih vrednosti
- $\bar{N}$ – prosečan broj paketa u sistemu
- $\bar{D}$ – prosečno kašnjenje u sistemu
- λ – prosečan intezitet nailaska paketa u sistem
- *Little-ova formula:*

$$\bar{N} = \lambda \times \bar{D}$$

Little-ova formula

- *Formula* je vrlo **očigledna**, to pokazuje sledeći **neformalni dokaz**:
- Pretpostavimo da poslati **paketi u proseku provedu u sistemu $\bar{D}$** sekundi
- Novi **paketi nailaze intezitetom** u proseku λ paketa u sekundi
- **Odlazeći paket iz sistema**, u sistemu **ostavlja prosečan broj paketa $\bar{N}$**

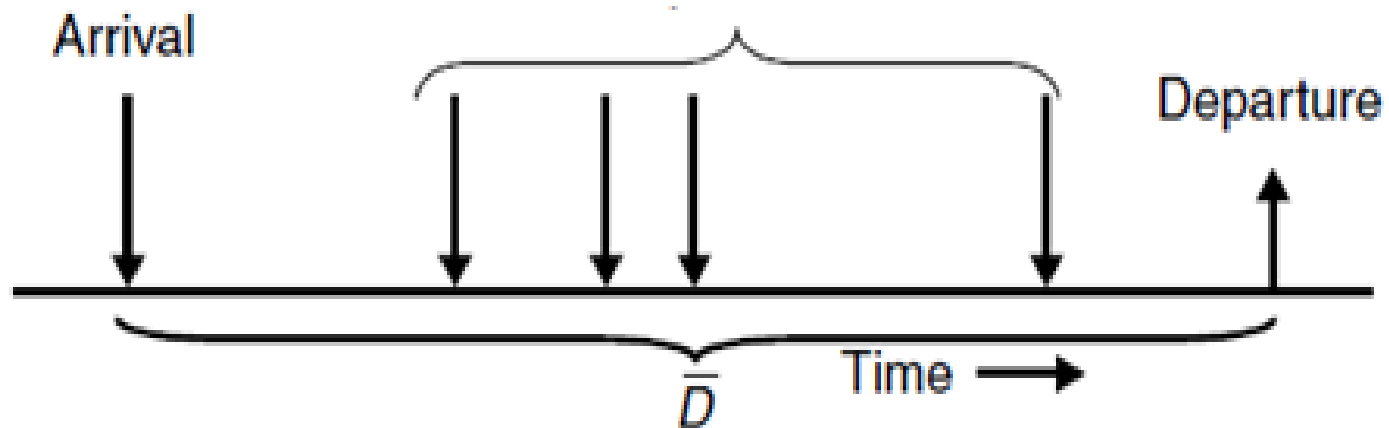
Little-ova formula

 $\bar{N}$ $=$ λ $\times$ $\bar{D}$

prosečan broj u sistemu

prosečan intezitet nailaska

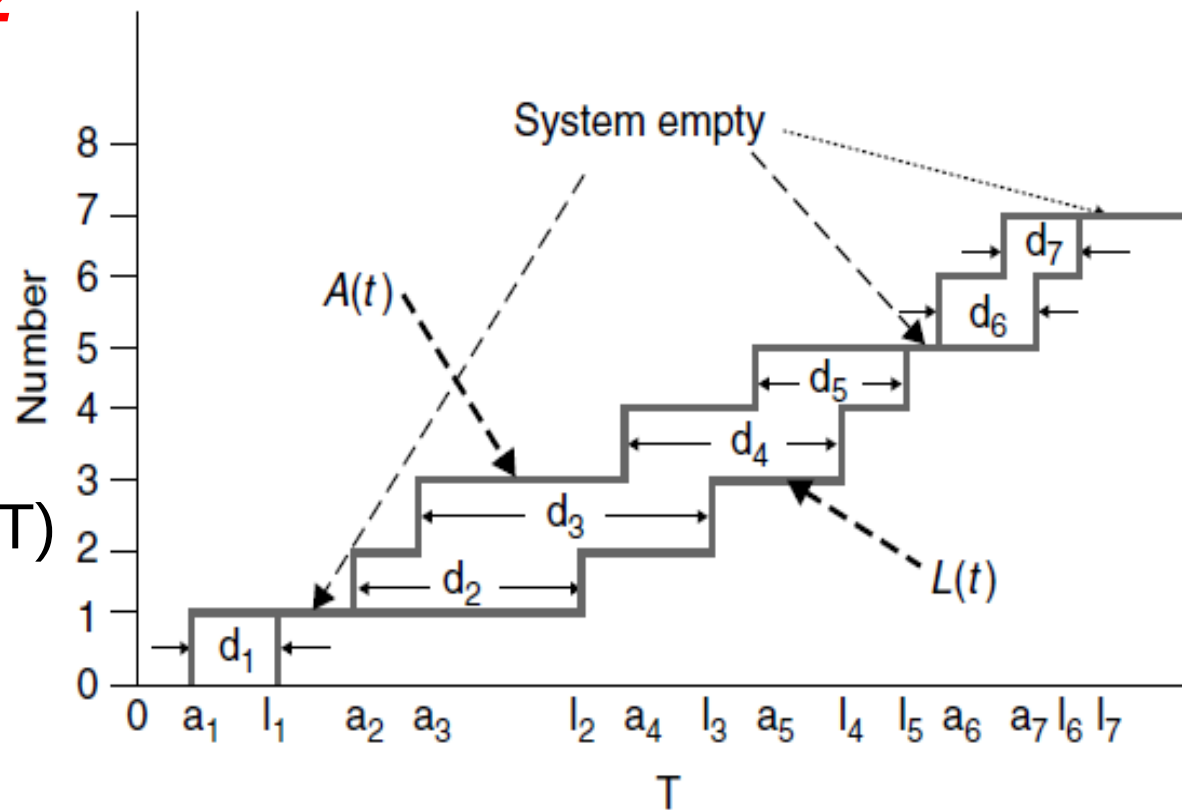
prosečno kašnjenje



Little-ova formula

Grafički dokaz

Na slici su prikazani
nailasci paketa i
odlasci paketa iz
inicijalno praznog
sistema u intervalu $(0, T)$
Predpostavimo
FCFS disciplinu



Little-ova formula

$A(t)$ označava kumulativni proces broja nailaska paketa do trenutka t . Svakim nailaskom $A(t)$ se inkrementira za 1. $A(T)$ označava ukupan broj nailazaka u intervalu $(0, T)$.

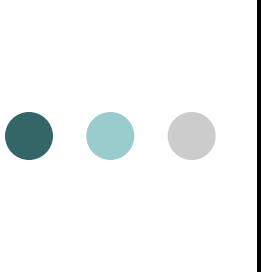
Grafikon funkcije $L(t)$ označava broj paketa koji su napustili sistem do trenutka t .

Funkcija $N(t) = A(t) - L(t)$ predstavlja broj paketa u sistemu u trenutku t .

Usled FCFS discipline, vremenski intervali d_i predstavljaju vreme boravka i -tog paketa u sistemu.

Neka je $\Delta(T)$ površina između grafikona $A(t)$ i $L(t)$.

$$\Delta(T) = d_1 + d_2 + \dots + d_n$$



Little-ova formula

Prosečan broj paketa na intervalu $(0, T)$ u sistemu je po definiciji

$$\bar{N}(T) = \frac{1}{T} \int_0^T N(t) dt$$

Ako sada iskoristimo vrednost $\Delta(T)$, dobijamo

$$\bar{N}(T) = \frac{\Delta(T)}{T}$$

Dalje, srednje vreme kašnjenja u sistemu možemo izraziti preko $\Delta(T)$

$$\bar{D}(T) = \frac{\Delta(T)}{A(T)}$$

Little-ova formula

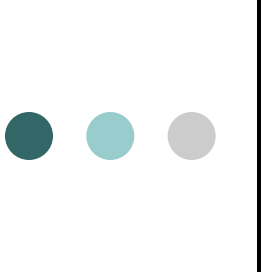
Definišimo $\lambda(T)$ kao prosečan intezitet nailaska paketa u intervalu $(0, T)$, sledi

$$\lambda(T) = \frac{A(T)}{T}$$

Ako povežemo sve ove formule,

$$\bar{N}(T) = \frac{\Delta(T) A(T)}{A(T) T} = \lambda(T) \bar{D}(T)$$

Sada, pustimo da $T \rightarrow \infty$, ako sledeće granične vrednosti postoje,



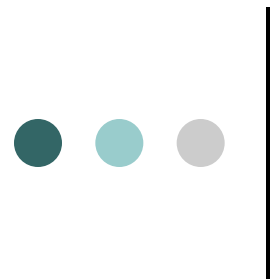
Little-ova formula

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \lambda(T) = \lambda,$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \bar{D}(T) = \bar{D}$$

Tada postoji i granična vrednost,

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \bar{N}(T) = \bar{N} = \lambda \cdot \bar{D}$$



Little-ova formula

- Grafički dokaz