



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
Fakultet  
elektrotehnike i  
računarstva

Preddiplomski studij

Računarstvo

# Komunikacijske mreže

4.

Mrežni sloj

Ak.g. 2023./2024.



### slobodno smijete:

- **dijeliti** — umnožavati, distribuirati i javnosti priopćavati djelo
- **remiksirati** — prerađivati djelo

### pod sljedećim uvjetima:

- **imenovanje**. Morate priznati i označiti autorstvo djela na način kako je specificirao autor ili davatelj licence (ali ne način koji bi sugerirao da Vi ili Vaše korištenje njegova djela imate njegovu izravnu podršku).
- **nekomercijalno**. Ovo djelo ne smijete koristiti u komercijalne svrhe.
- **dijeli pod istim uvjetima**. Ako ovo djelo izmijenite, preoblikujete ili stvarate koristeći ga, preradu možete distribuirati samo pod licencom koja je ista ili slična ovoj.

U slučaju daljnjeg korištenja ili distribuiranja morate drugima jasno dati do znanja licencijske uvjete ovog djela. Najbolji način da to učinite je poveznicom na ovu internetsku stranicu.

Od svakog od gornjih uvjeta moguće je odstupiti, ako dobijete dopuštenje nositelja autorskog prava. Ništa u ovoj licenci ne narušava ili ograničava autorova moralna prava.

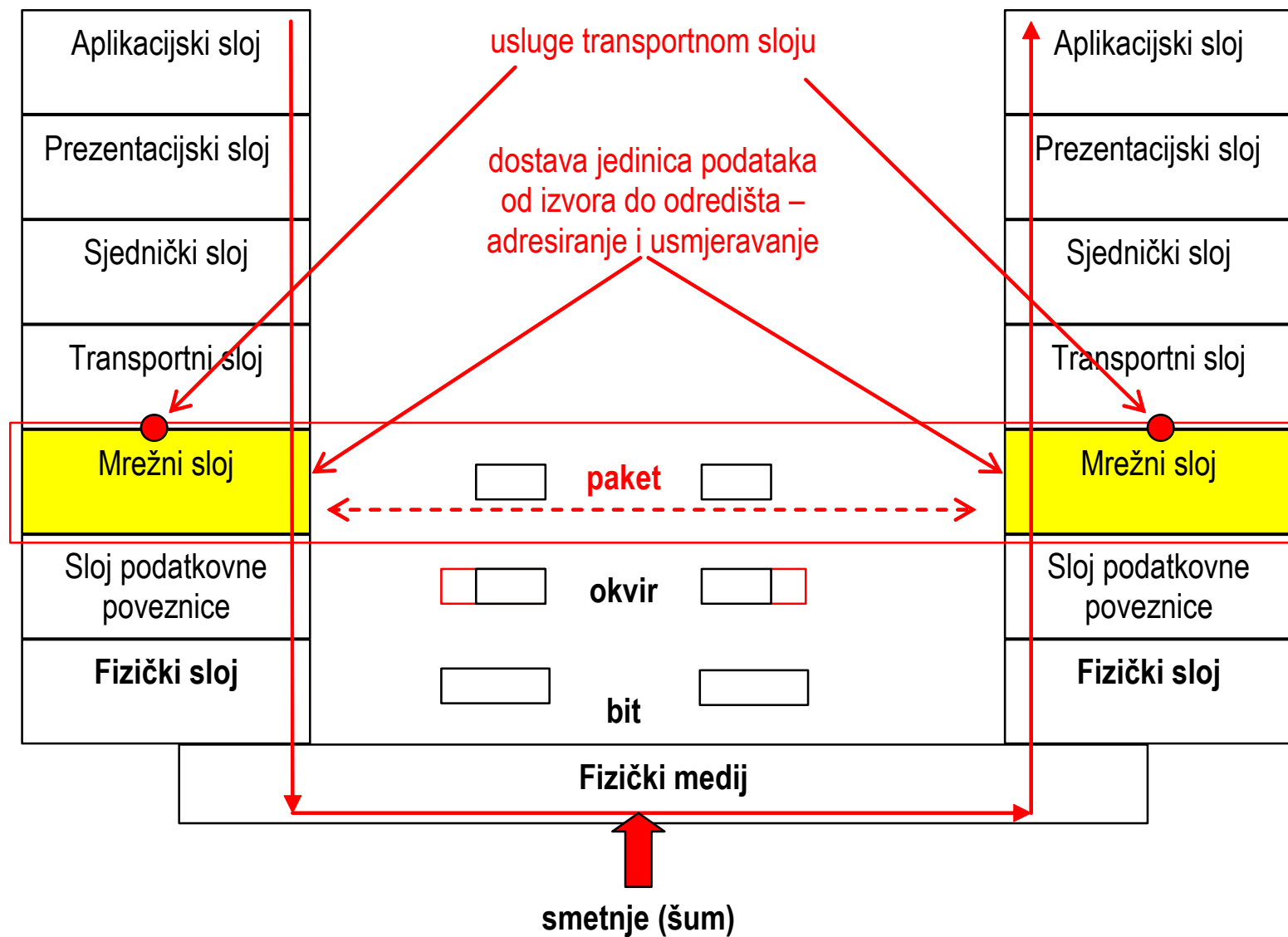
Tekst licence preuzet je s <http://creativecommons.org/>.

## Zadaća mrežnog sloja

- ◆ omogućiti komunikaciju između dva (krajnja, korisnička) čvora u mreži, izravno ili preko niza međučvorova
  - adresiranje
  - usmjeravanje jedinica podataka
  - upravljanje pogreškama
  - upravljanje tokom
  - upravljanje zagušenjem
  - međusobno povezivanje mreža i podmreža

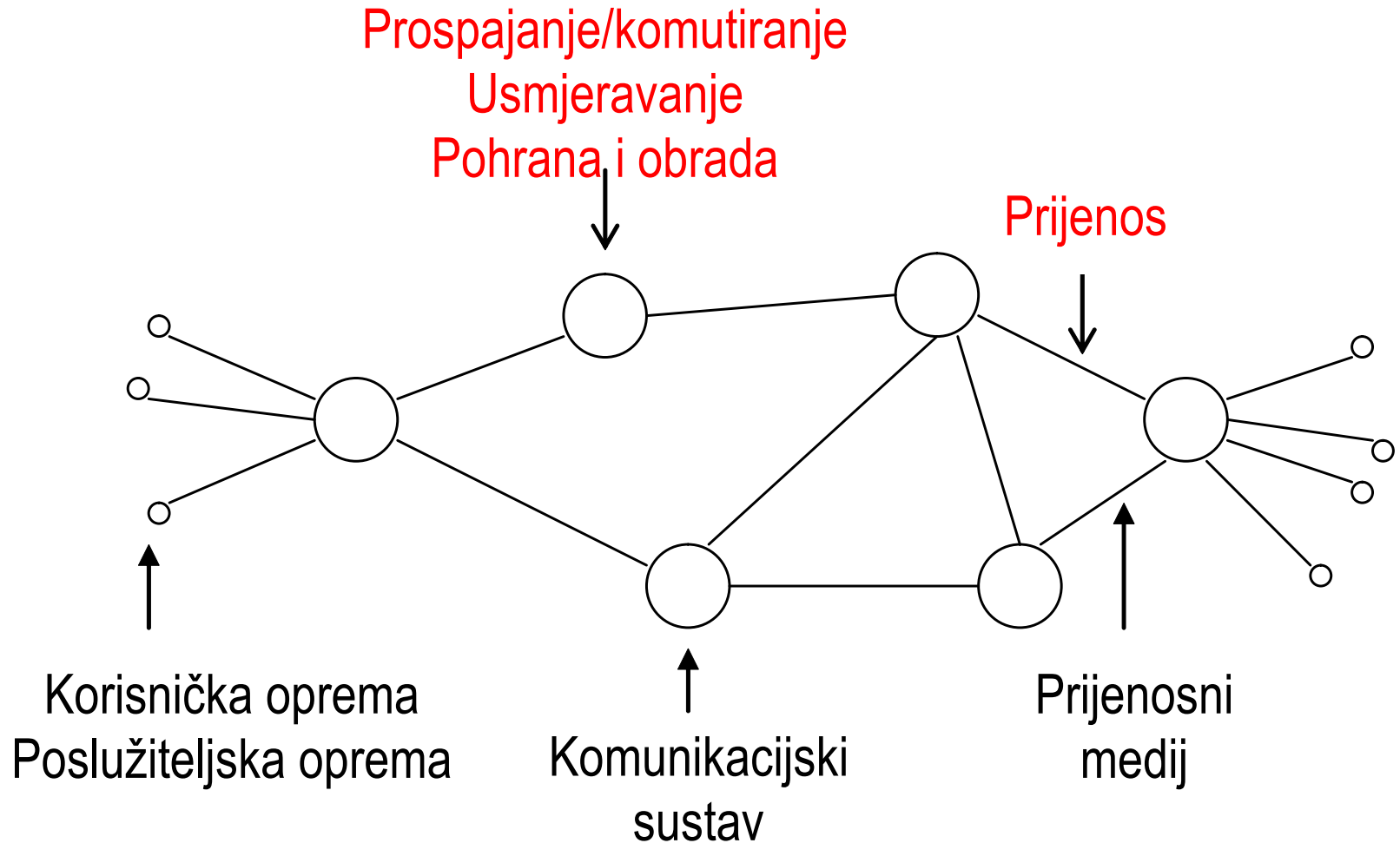
## Problemi:

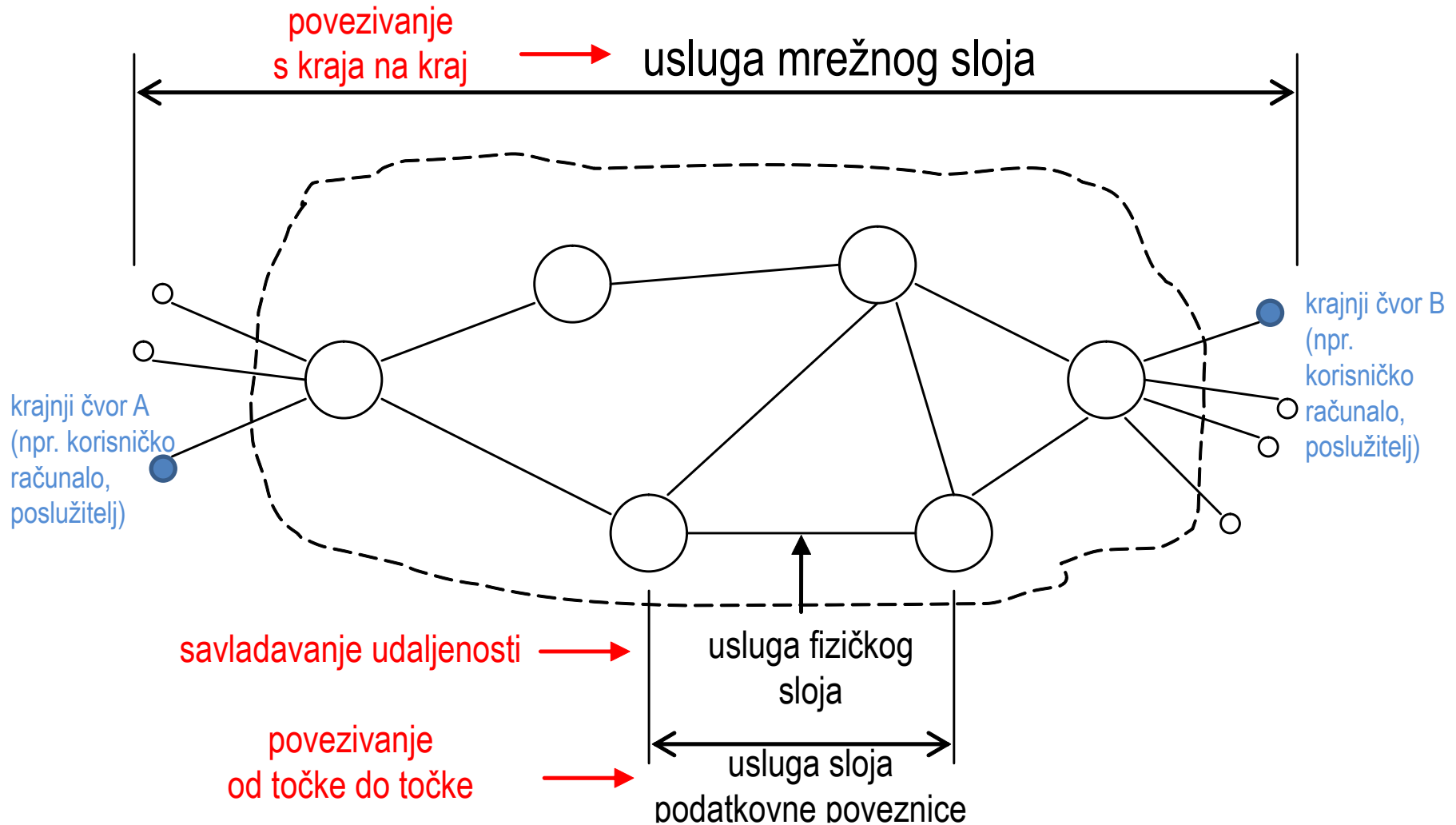
- ◆ znanje o topologiji, učinkovitost usmjeravanja, opterećenje poveznica, zagušenje, kvaliteta usluge ....



- ◆ Usluge mrežnog sloja (transportnom sloju)
  - ◆ Virtualni kanal i datagram, spojna usluga i nespojna usluga
- ◆ Komutacija paketa i usmjeravanje
- ◆ Načela upravljanja zagušenjem
- ◆ Međusobno povezivanje mreža i podmreža
  - ◆ Povezivanje podmreža, primjer – Internet

- ◆ osnovna zadaća mrežnog sloja: dostaviti pakete od izvorišnog krajnjeg čvora (npr. korisničkog računala) do odredišnog krajnjeg čvora, izravno ili preko niza međučvorova
- ◆ dvije vrste usluga:
  - spojna usluga
  - nespojna usluga ← mrežni sloj u Internetu
- ◆ izvedba usmjeravanja u (pod)mrežama s komutacijom paketa:
  - virtualnim kanalom
  - datagramski ← mrežni sloj u Internetu



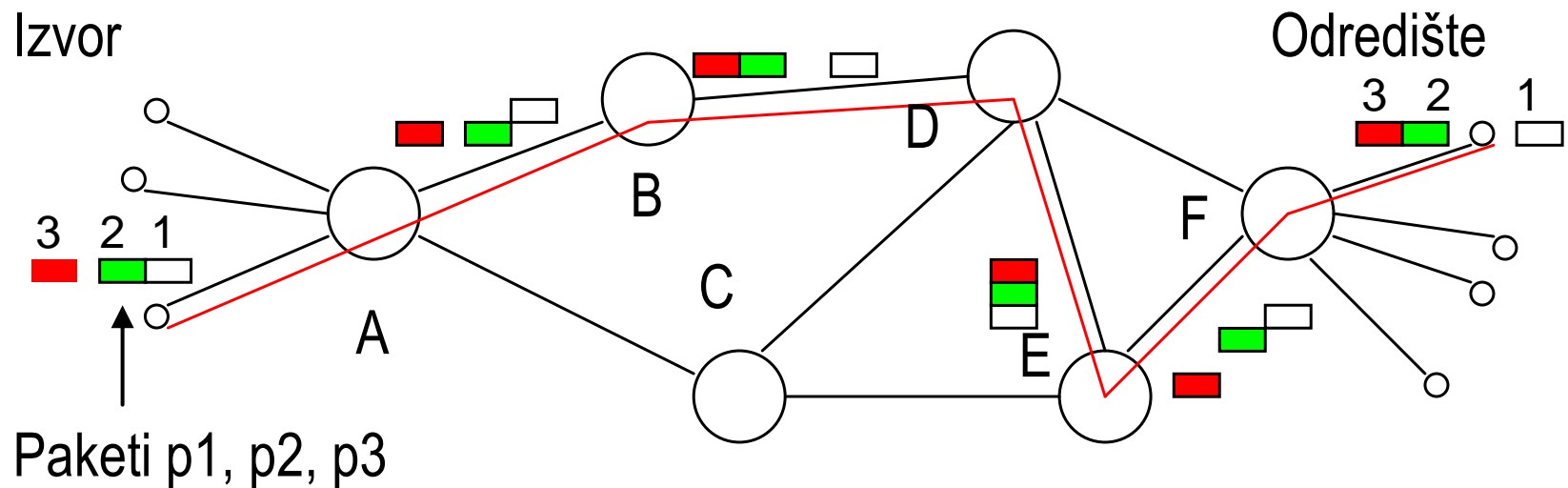




# Nespojna usluga izvedena virtualnim kanalom

Svi paketi usmjeravaju se istim putem - **virtualnim kanalom**.

Odluke o usmjeravanju donose se samo jednom, prilikom uspostavljanja novog virtualnog kanala.

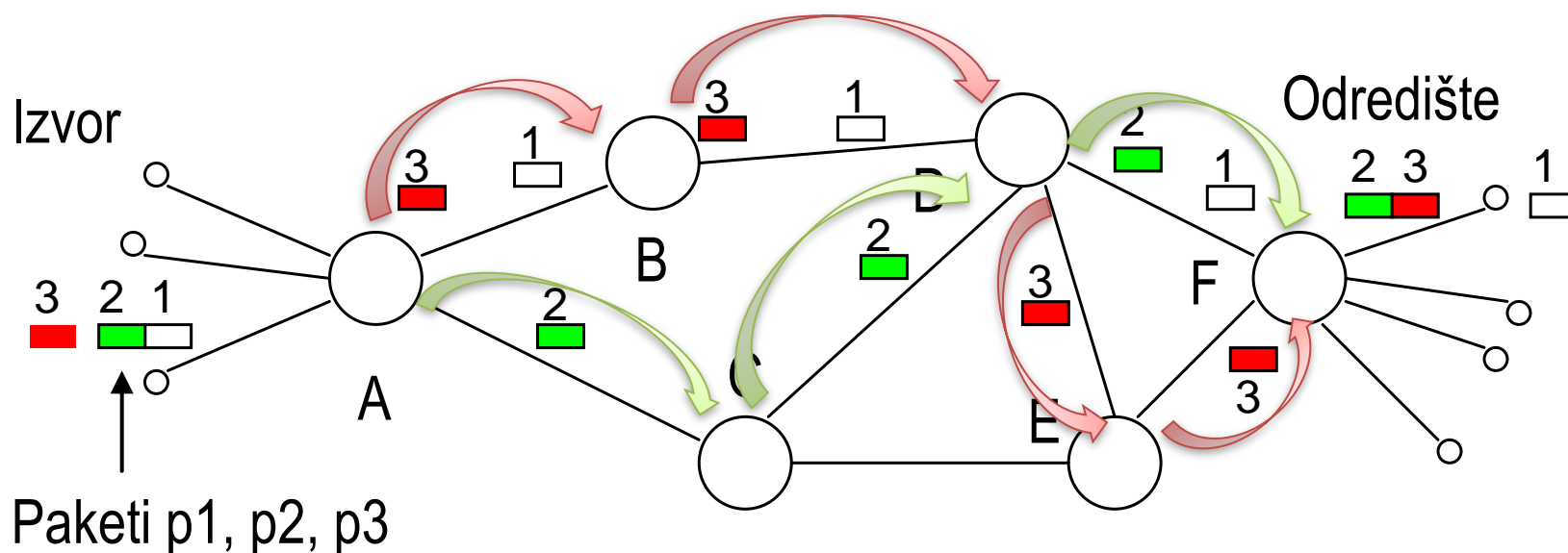


# Nespojna usluga izvedena datagramski (1/2)

Svaki datagram **usmjerava se zasebno** kroz mrežu

Svaki usmjeritelj odluku o usmjeravanju datagrama donosi neovisno.

Moguće je da uzastopni datagrami prolaze različitim putovima



datagrami

Potrebni algoritmi usmjeravanja!

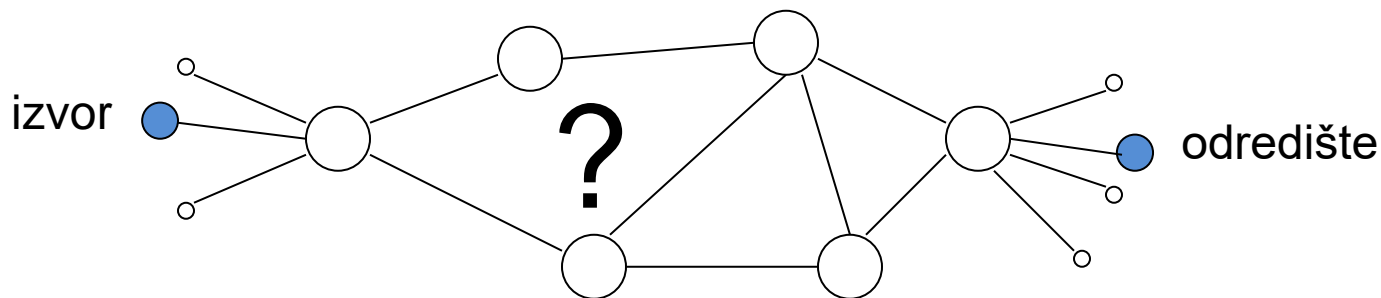
- ◆ minimalni skup funkcija za dostavu datagrama s kraja na kraj mreže
- ◆ mogući problemi:
  - povremeni gubitak paketa zbog pogreške, smetnji ili kvarova na nekoj od poveznica na putu
  - povremeni gubitak paketa zbog zagušenja u nekom od mrežnih čvorova na putu
  - povremena dostava paketa s narušenim redoslijedom u slučaju kad se izbor puta kroz mrežu promijeni tijekom komunikacije
  - veće kašnjenje u slučaju retransmisije s kraja na kraj mreže
  - pošiljalatelj nema povratnu informaciju o ishodu
- ◆ rješavanje ovih problema prepušta se transportnom sloju!

# Usporedba datagram – virtualni kanal

Značajka	Datagram	Virtualni kanal
Uspostava veze	Ne treba	Treba
Adresiranje	Svaki paket mora sadržavati potpunu adresnu informaciju (potpune mrežne adrese izvora i odredišta)	Svaki paket sadrži samo kratku oznaku virtualnog kanala
Informacija o stanju uspostavljenih veza	Usmjeritelji ne pohranjuju podatke o uspostavljenim vezama	Svakom virtualnom kanalu odgovara jedan unos u tablici usmjeravanja u usmjeritelju
Usmjeravanje	Svaki paket usmjerava se neovisno o drugima	Put se odabire prilikom uspostave veze, nakon toga svi paketi idu tim putem
Utjecaj kvara na usmjeritelju	Gubitak samo onih paketa koji su taj čas u obradi	Prekid svih uspostavljenih virtualnih kanala
Upravljanje zagušenjem Kvaliteta usluge	Složeno	Jednostavno, ako se potrebni resursi mogu unaprijed pridjeliti virtualnom kanalu

- ◆ Usluge mrežnog sloja (transportnom sloju)
  - ◆ Virtualni kanal i datagram, spojna usluga i nespojna usluga
- ◆ Komutacija paketa i usmjeravanje
- ◆ Načela upravljanja zagušenjem
- ◆ Međusobno povezivanje mreža i podmreža
  - ◆ Povezivanje podmreža, primjer – Internet

- **usmjeravanje** (engl. *routing*) – određivanje puta kroz mrežu kojim će proći paket na putu od izvora do odredišta
  - algoritmi kojima se računa taj put nazivaju se **algoritmima usmjeravanja** (engl. *routing algorithm*)
  - problem usmjeravanja se formulira pomoću grafa u kojem čvorovi predstavljaju usmjeritelje, a grane grafa veze među njima



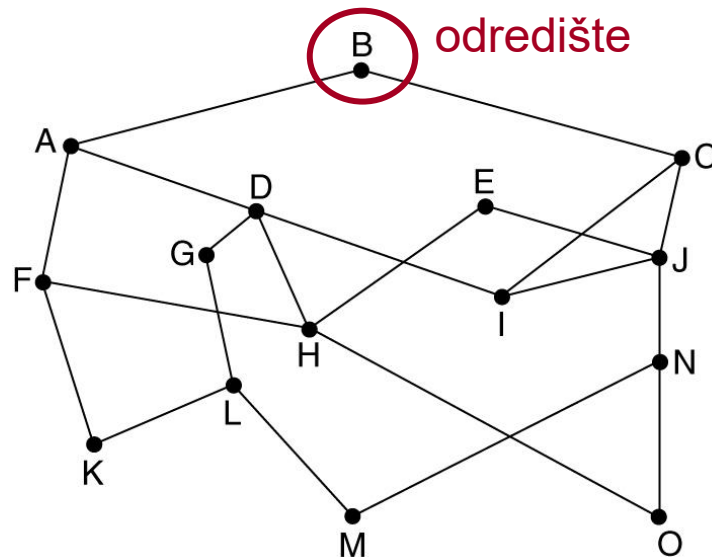
- **prosljeđivanje** (engl. *forwarding*) – odluka unutar čvora: određivanje na koje odlazno sučelje proslijediti paket

- ◆ Ako je usmjeritelj  $J$  na optimalnom putu od usmjeritelja  $I$  prema usmjeritelju  $K$ , onda je optimalni put od  $J$  do  $K$  dionica tog puta.
- ◆ jednostavni dokaz (kontradikcijom):
  - nazovimo dionicu puta od  $I$  do  $J$   $r_1$  i ostatak puta  $r_2$

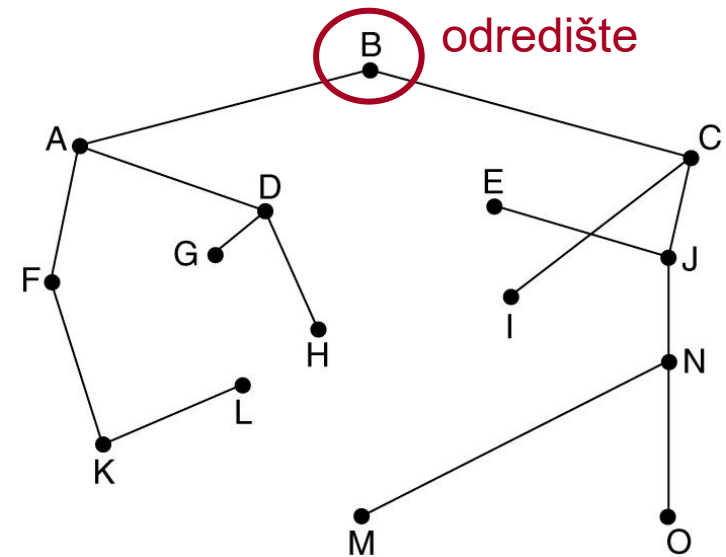
$$(I) \text{---} \dots r_1 \text{---} \dots (J) \text{---} \dots r_2 \text{---} \dots (K)$$

- ako bi postojao bolji put od  $r_2$  za dionicu od  $J$  do  $K$ , onda bi se taj put mogao nadovezati na  $r_1$  da bi poboljšao put od  $I$  do  $K$ , što je u kontradikciji s pretpostavkom da je  $J$  na optimalnom putu od  $I$  do  $K$

- ◆ za graf koji predstavlja mrežu i za zadano odredište, može se naći skup optimalnih puteva od svih izvora **prema zadanom odredištu**
- ◆ svi ti putevi čine stablo s korijenom u odredištu (engl. *sink tree*)
  - takvo stablo ne mora biti jedinstveno
  - cilj algoritama usmjeravanja: pronaći takvo stablo za sve usmjeritelje i iskoristiti ga za usmjeravanje (u praksi nije lako!)



graf koji predstavlja mrežu



stablo optimalnih puteva prema čvoru B

Primjer: A. Tanenbaum, „Computer Networks”



## ◆ neadaptivni (statički) algoritmi

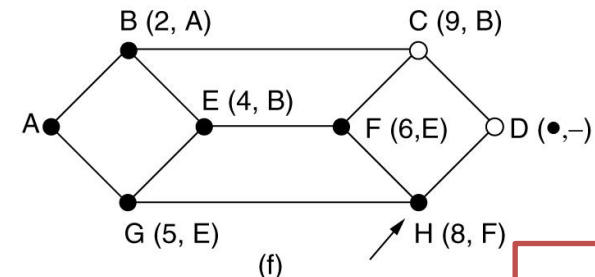
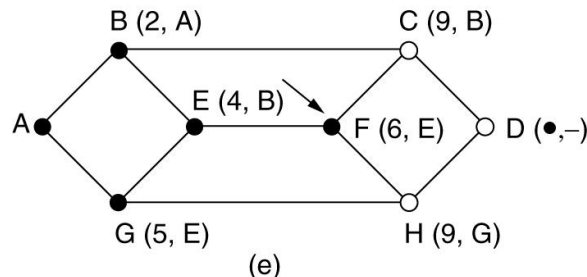
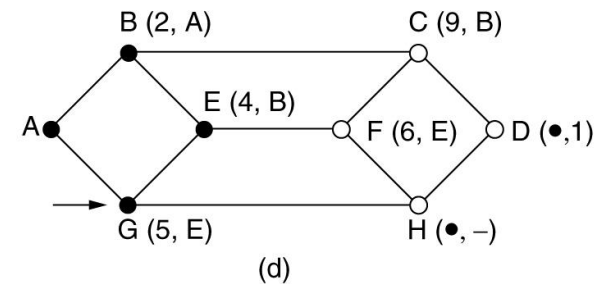
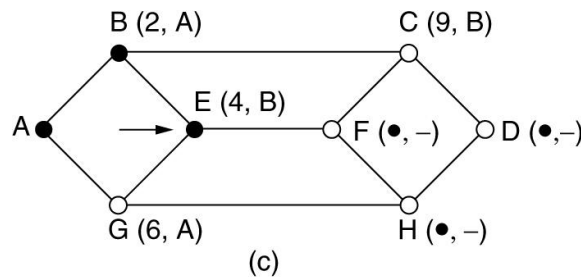
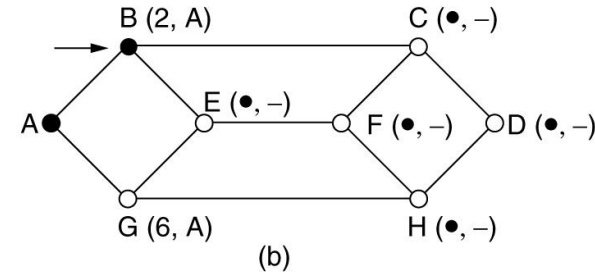
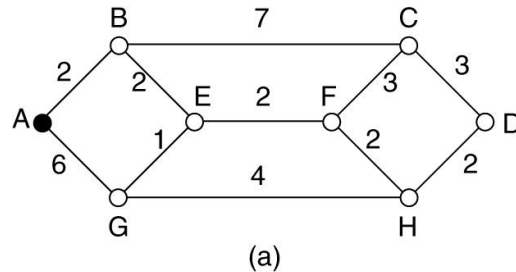
- unaprijed izračunati putevi na temelju nekog(ih) kriterija (npr. udaljenost, cijena, ...)
- putevi se postavljaju prilikom prvog pokretanja čvora i više se ne mijenjaju; ne uzimaju u obzir trenutno stanje

## ◆ adaptivni (dinamički) algoritmi

- donose odluke o usmjeravanju temeljene na mjerenjima ili procjeni važjećeg stanja u mreži (npr. aktualna topologija, opterećenje, ...)
- pitanja “skupljanja znanja” o stanju u mreži i prilagodbe:
  - što pratiti? (udaljenost, broj skokova, opterećenje, cijenu,...?)
  - koga pitati? (samo susjedne čvorove, sve čvorove, ...?)
  - kada reagirati? (periodički, na promjenu topologije - opterećenja, ...?)

- ◆ Usmjeravanje najkraćim putem
  - ◆ Preplavljivanje
  - ◆ Usmjeravanje prema vektoru udaljenosti
  - ◆ Usmjeravanje prema stanju poveznice
- } neadaptivni algoritmi
- } adaptivni algoritmi
- 
- ◆ Posebni slučajevi:
    - hijerarhijsko usmjeravanje
    - opće razašiljanje, difuzija (engl. *broadcast*)
    - višeodredišno razašiljanje (engl. *multicast*)
    - kada su krajnji čvorovi u pokretu (pristup Internetu u pokretu)
    - kada nema infrastrukture (*ad-hoc* mreže)

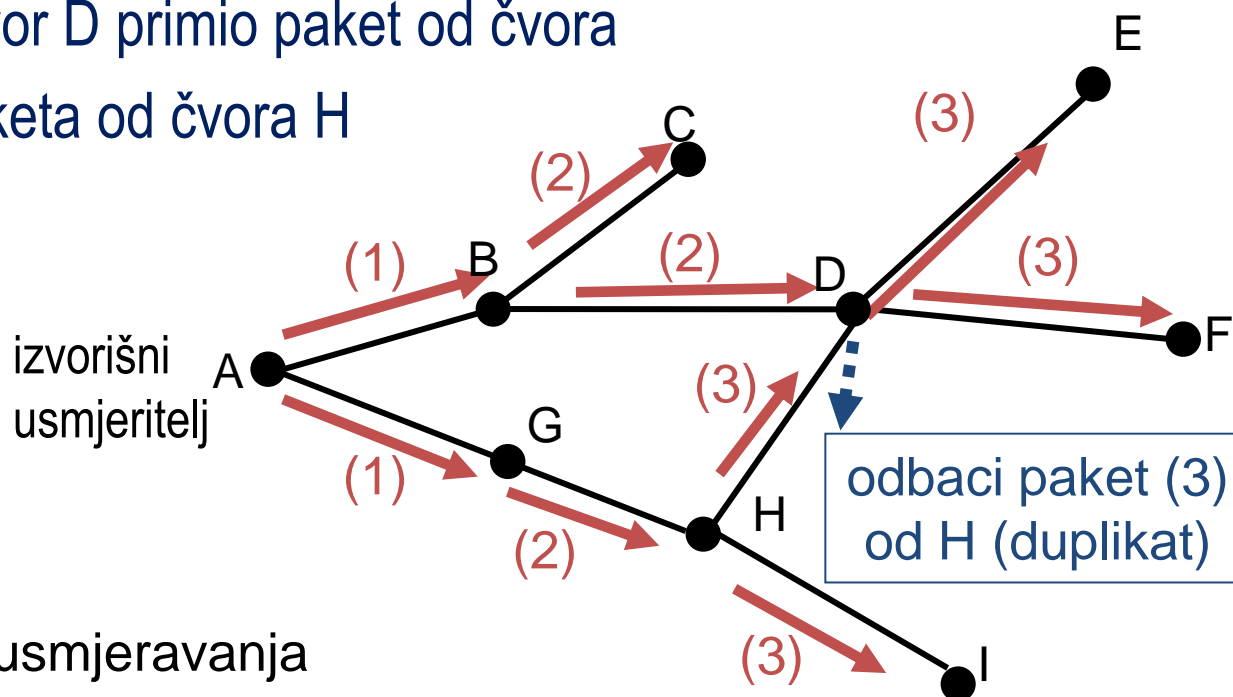
- ♦ statički; algoritam računa najkraći put od svih čvorova prema zadanom čvoru u grafu - poznati algoritam: Dijkstra (na slici prvih 5. koraka)



Primjer: A. Tanenbaum, „Computer Networks”

Primjer: KM-  
2015\_04\_dodatak\_dijkstra

- ◆ statički; algoritam prosljeđuje sve dolazne pakete na svako svoje odlazno sučelje, osim onog po kojem je primio paket
- ◆ paketi se označavaju i već viđeni paketi se odbacuju
- ◆ uvijek daje najkraći put!
- ◆ primjer: čvor D primio paket od čvora B prije paketa od čvora H

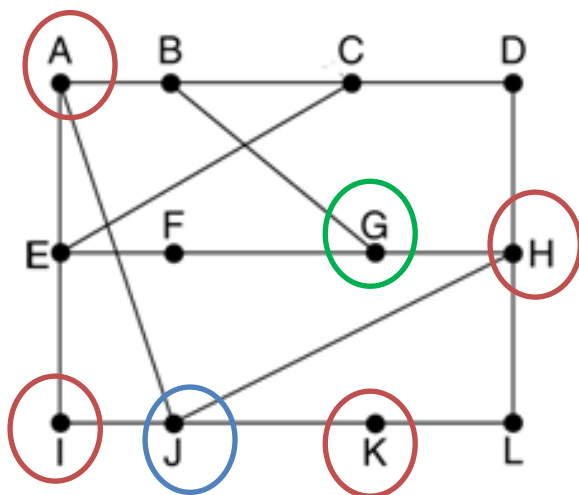


→ stablo usmjeravanja  
... odbacivanje

# Usmjeravanje vektorom udaljenosti (1/2)

- ♦ dinamički; svaki usmjeritelj ima tablicu (vektor) koji daje najbolju “poznatu udaljenost” za svako odredište i prvi korak ka njemu
- ♦ poznati algoritmi: Bellman-Ford i Ford-Fulkerson

graf mreže



To	A	I	H	K	New estimated delay from J ↓ Line	
A	0	24	20	21	8	A
B	12	36	31	28	20	A
C	25	18	19	36	28	I
D	40	27	8	24	20	H
E	14	7	30	22	17	I
F	23	20	19	40	30	I
G	18	31	6	31	18	H
H	17	20	0	19	12	H
I	21	0	14	22	10	I
J	9	11	7	10	0	–
K	24	22	22	0	6	K
L	29	33	9	9	15	K

JA delay is	JL delay is	JH delay is	JK delay is
8	10	12	6

Vectors received from J's four neighbors

New routing table for J

Primjer: A. Tanenbaum, „Computer Networks”

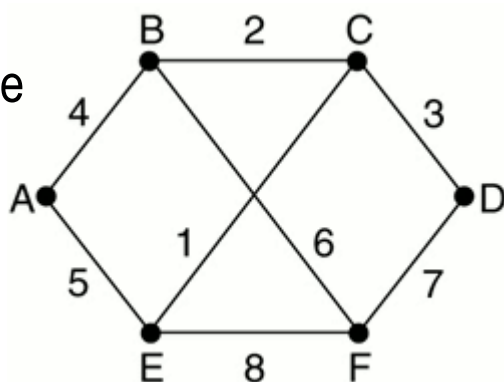
- ◆ algoritam konvergira prema pravom stanju, ali to čini sporo
- ◆ brzo reagira na dobre vijesti
  - npr. ako susjed A javi da ima kraći put do odredišta X, tablica se osvježava i promet za X se odmah počinje usmjeravati preko A
  - svaka sljedeća razmjena vektora propagira dobru vijest dalje
- ◆ sporo reagira na loše vijesti
  - npr. ako neki čvor ispadne, prvi susjed to zna, ali ne i drugi; nakon prve razmjene vektora, zna drugi susjed, ali ne i treći, itd. - u svakom slučaju razlika je uvijek jedan više
  - postoje neka rješenja, ali nijedno nije univerzalno učinkovito

- ◆ dinamički; temelji se na razmjeni podataka o topologiji i stvarno izmjerenih podataka o stanju poveznice (kašnjenje) među čvorovima i zatim primjeni Dijkstrinog algoritma za izračun najkraćeg puta prema svim ostalim čvorovima
  
- ◆ algoritam uzima u obzir stvarno stanje – bolja prilagodljivost, ali uz povećanu složenost
  - kada, odn. kako često slati podatke susjedima i osvježavati stanje?
    - periodički
    - u slučaju značajnih događaja kao npr. ispad ili dodavanje čvora
  - kako pouzdano distribuirati poruke sa stanjem poveznice?
    - numerirati pakete, uvesti potvrde, uvesti oznaku starosti poruke, poslužiti se preplavlivanjem (uz neka proširenja)

## ◆ Svaki čvor mora:

- otkriti svoje susjede i saznati njihove mrežne adrese
- izmjeriti kašnjenje (ili drugi dogovoreni parametar) prema svakom od njih
- stvoriti paket kojim javlja što je sve upravo saznao

graf mreže



poruke o stanju poveznice

A		B		C		D		E		F	
Seq.		Seq.		Seq.		Seq.		Seq.		Seq.	
Age		Age		Age		Age		Age		Age	
B	4	A	4	B	2	C	3	A	5	B	6
E	5	C	2	D	3	F	7	C	1	D	7
		F	6	E	1			F	8	E	8

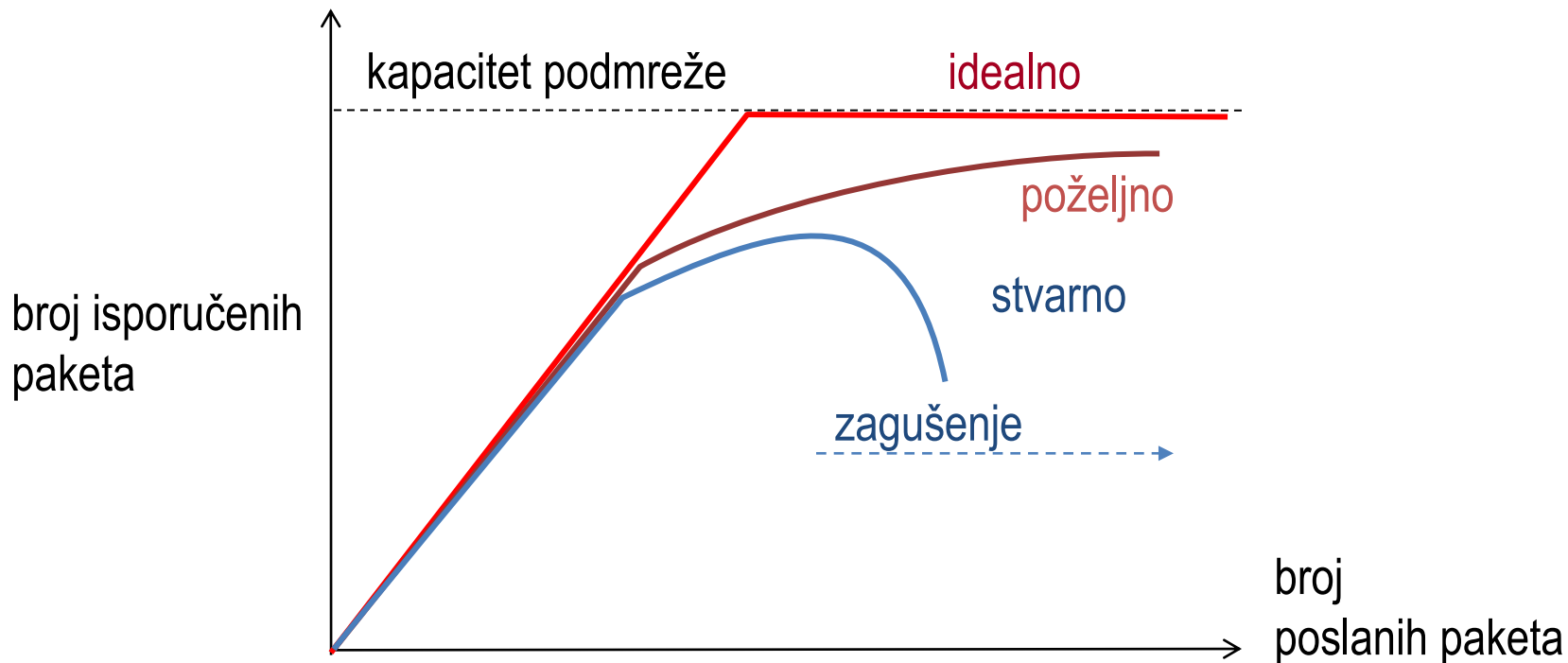
- razaslati paket svim ostalim čvorovima (ne samo susjedima!)
- izračunati najkraći put do svih ostalih čvorova (cijela topologija!)

Primjer: A. Tanenbaum, „Computer Networks”



- ◆ Usluge mrežnog sloja (transportnom sloju)
  - ◆ Virtualni kanal i datagram, spojna usluga i nespojna usluga
- ◆ Komutacija paketa i usmjeravanje
- ◆ Načela upravljanja zagušenjem
- ◆ Međusobno povezivanje mreža i podmreža
  - ◆ Povezivanje podmreža, primjer – Internet

- ◆ **zagušenje** (engl. *congestion*) je degradacija performansi mreže uzrokovana prevelikim brojem paketa u mreži
  - opterećenje je trenutno veće od onog koje je mrežna infrastruktura (čvorovi, poveznice) ili njen dio trenutno u stanju obraditi
- ◆ za razliku od kontrole toka, ovo je globalni problem!



- ◆ razni uzroci i razna rješenja, npr:
  - prometni tokovi iz raznih, neovisnih izvora u mreži mogu biti takvi da unutar nekog usmjeritelja konvergiraju na isto izlazno sučelje – stvara se rep čekanja:
    - nedovoljna količina memorije: odbacivanje paketa
    - više memorije sprečava odbacivanje, ali povećava kašnjenje zbog čekanja na obradu
    - povećano kašnjenje može uzrokovati istek vremenske kontrole i retransmisiju
- ◆ općenito, teži se ka smanjenju opterećenja (odbijanje/ograničavanje zahtjeva, smanjenje kvalitete, uvođenje prioriteta) i/ili povećanju resursa (brzina,...), ali to ne rješava sve probleme (npr. povećanje brzine neće nužno smanjiti kašnjenje!) → **upravljanje zagušenjem**

- ◆ upravljanje zagušenjem obuhvaća dva osnovna pristupa iz teorije upravljanja (engl. *control theory*):
  1. rješenja s otvorenom petljom
  2. rješenja sa zatvorenom petljom
  
- ◆ rješenja s otvorenom petljom temelje se na dobrom oblikovanju sustava s ciljem **izbjegavanja zagušenja**:
  - ograničeni prihvrat novih zahtjeva/prometnih tokova
  - odbacivanje paketa po potrebi (i odluka kojih)
  - oblikovanje prometa
  - raspoređivanje unutar mreže

- ◆ rješenja sa zatvorenom petljom temelje na **stalnom praćenju ponašanja mreže i povratnoj vezi**:
  - ponašanje
    1. nadziri sustav i detektiraj pojavu i mjesto zagušenja
    2. proslijedi tu informaciju na mjesto ili mjesta gdje se može djelovati
    3. prilagodi način rada sustava radi ispravljanja problema
  - izravne indikacije zagušenja pomoću upravljačkih paketa, npr. zahtjev pošiljatelju da smanji brzinu slanja
  - neizravne indikacije zagušenja na temelju praćenja ponašanja, npr. povećano prosječno kašnjenje, gomilanje u usmjeriteljima, učestali gubici i retransmisije, povećan % izgubljenih paketa i sl.

→ Teorija informacije, Informacijske mreže, Teorija prometa

- ◆ Usluge mrežnog sloja (transportnom sloju)
  - ◆ Virtualni kanal i datagram, spojna usluga i nespojna usluga
- ◆ Komutacija paketa i usmjeravanje
- ◆ Načela upravljanja zagušenjem
- ◆ Međusobno povezivanje mreža i podmreža
  - ◆ Povezivanje podmreža, primjer – Internet

Svaku mrežu obilježava:

- ◆ Organizacija:
  - ◆ struktura (spajanje korisničke opreme na mrežu, međusobna povezanost komunikacijskih sustava, povezivanje s drugim mrežama) korisnika
- ◆ Adresiranje:
  - mrežnih sustava i umreženih resursa
  - korisnika
- ◆ Mrežni protokol (komunikacijski protokol mrežnog sloja)

Pozor:

Načela slična (ista) – terminologija različita za različite mreže!

7 Aplikacijski sloj, sloj primjene
6 Prezentacijski sloj
5 Sloj sesije/sjednice
4 Transportni sloj
3 Mrežni sloj
2 Sloj podatkovnog linka/veze
1 Fizikalni/fizički sloj

- Prijenos informacije između dva čvora u mreži, izravno ili preko međučvorova
- Jedinica podataka: ovisna o vrsti mreže, npr. paket
- Usmjeravanje jedinica podataka
- Upravljanje pogreškama
- Upravljanje tokom
- Upravljanje zagušenjem
- Međusobno povezivanje mreža i podmreža



4 Aplikacijski sloj, sloj primjene	
3 Transportni sloj	TCP
2 Mrežni/Internetski sloj	IP
1 (sloj podatkovne poveznice i fizički sloj)	

- ◆ Internetski protokol (*Internet Protocol*, **IP**) i dodatni protokoli za usmjeravanje, kontrolu komunikacije i komunikaciju u skupini
- ◆ Međusobno povezivanje mreža/podmreža (engl. *internetworking*)
- ◆ Mreža s komutacijom paketa, svaki se paket usmjerava zasebno - datagram

Oznake:

IP – *Internet Protocol*

TCP – *Transmission Control Protocol*

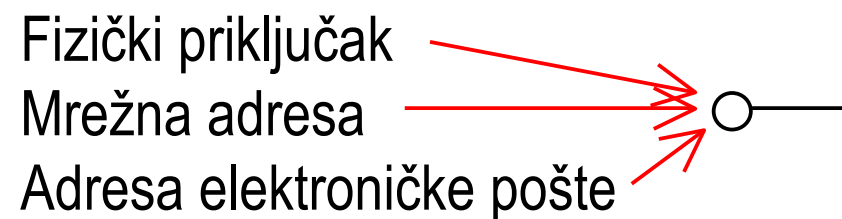
- ◆ mrežni sloj pruža uslugu transportnom sloju na sučelju između ta dva sloja
  - mrežni sloj daje transportnom **sloju jedinstveni adresni plan** (neovisno o broju podmreža, fizikalnom mediju, topologiji povezivanja i sl.) → **adresiranje**
  - mrežni sloj čini slojeve iznad, počevši od transportnog sloja, potpuno **odvojenima** i **neovisnima o izvedbenoj tehnologiji** mreže (protokol sloja podatkovne poveznice i prijenosni medij) → **pitanje fragmentacije**
  - sučelje mreža/transport je ujedno i **granica podmreže** prema krajnjim računalima (engl. *host*) → **povezivanje podmreža**
    - usmjeritelji imaju izvedene slojeve do (uključivo) mrežnog sloja
    - krajnja računala imaju izvedene sve slojeve

Jednoznačno označavanje komunicirajućih entiteta:

- ◆ Fizička adresa (mjesto priključka, pristupna točka)
- ◆ Mrežna adresa (točka u mreži) – logička adresa
- ◆ Adresa mrežnog/umreženog resursa:
  - Uslužna pristupna točka
  - Web stranica
  - ...
- ◆ Korisnička adresa:
  - Pozivni broj
  - Adresa elektroničke pošte
  - ...

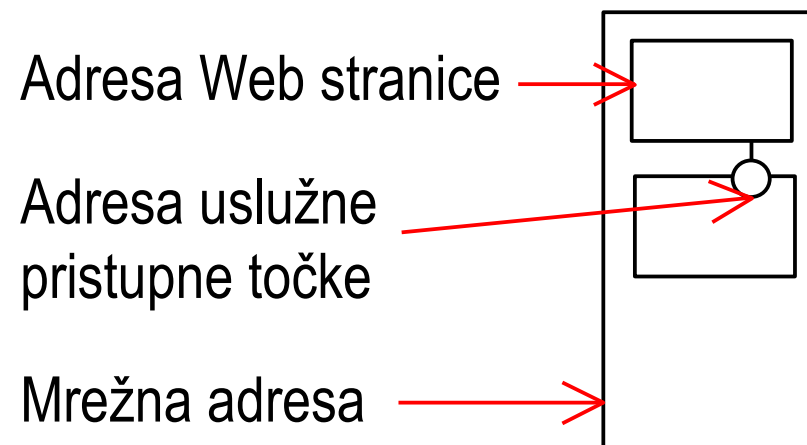
## Dinamička adresa:

- dodijeljena privremeno, tijekom pružanja usluge
- primjer: mrežna adresa (IP) kod pristupa Internetu preko ADSL-a, odn. telefonske mreže



## Statička adresa:

- dodijeljena trajno
- primjer: mrežna adresa Web poslužitelja i jedinstveni identifikator stranice

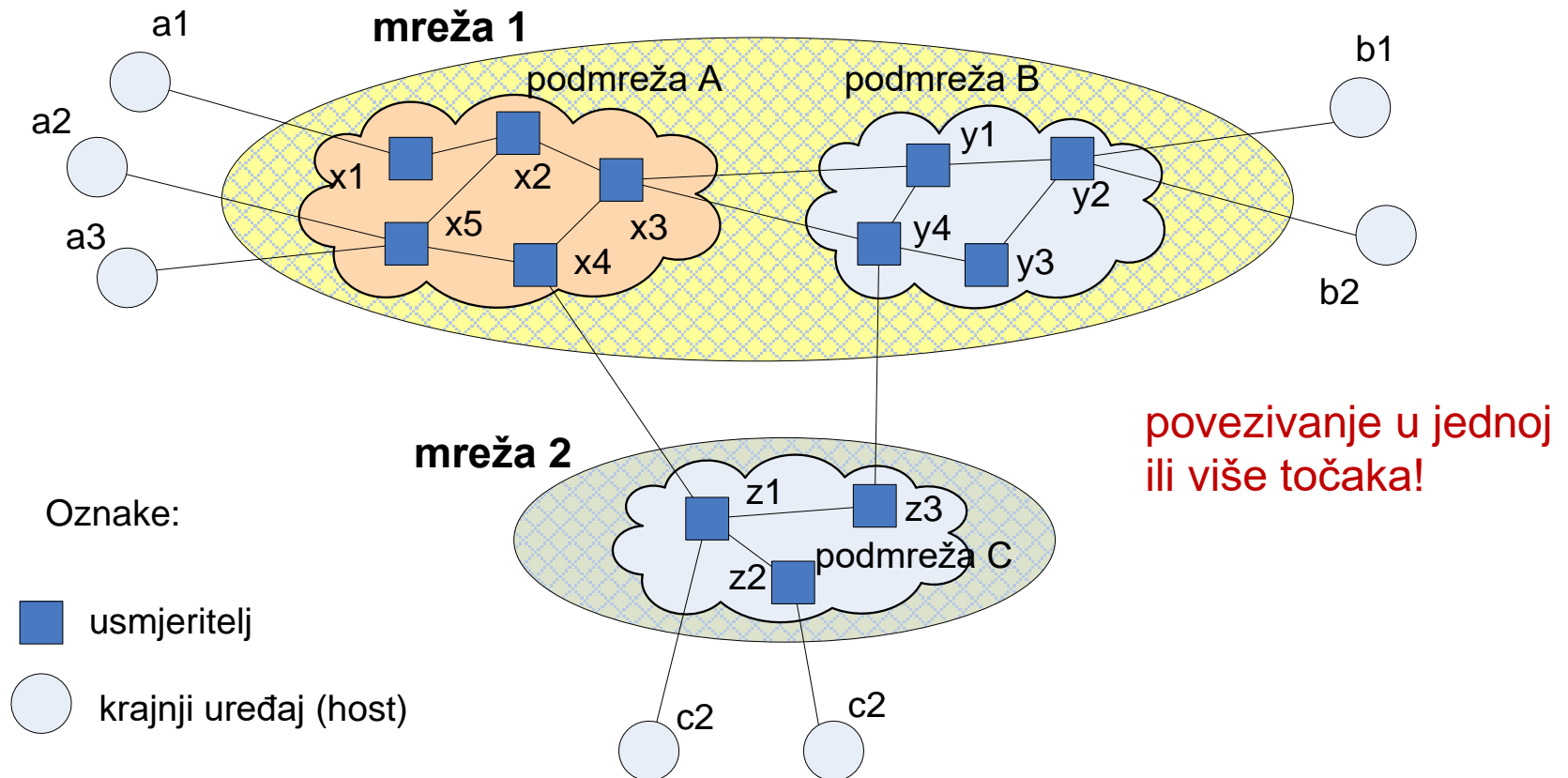


## IP-adresa - 32 bita (IPv4):

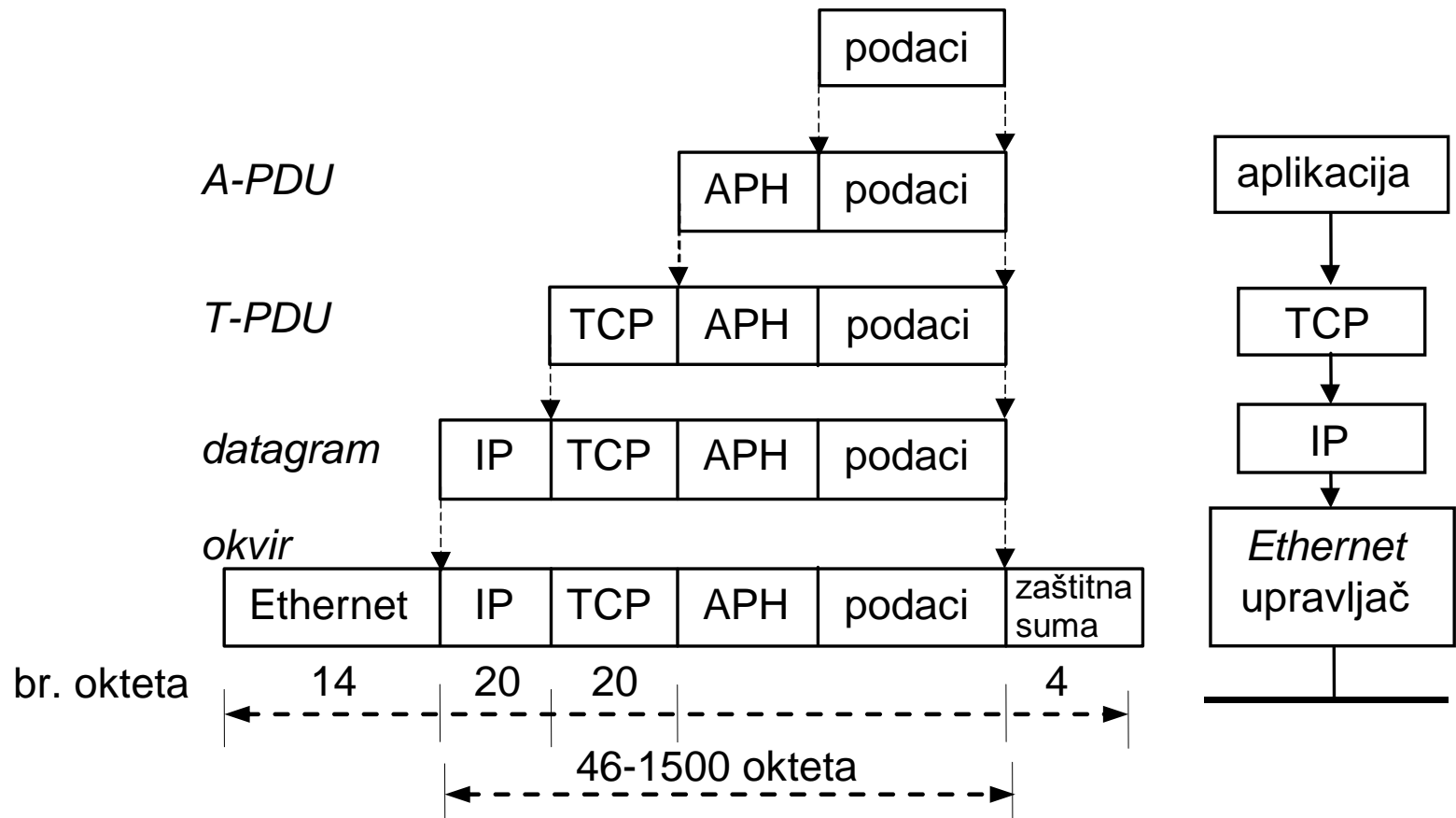
- ◆ identifikator koji globalno i jednoznačno određuje mrežno sučelje
  - krajnji sustav (npr. računalo priključeno na mrežu) obično ima jedno sučelje i jednu IP-adresu
  - mrežni čvor (npr. usmjeritelj) priključen na više (pod)mreža ima više sučelja i isto toliko IP-adresa
- ◆ način zapisa:
  - numerički zapis: binarni i dekadski

10100001 00110101 00010011 11001001  
└──┬──┘ └──┬──┘ └──┬──┘ └──┬──┘  
161 . 53 . 19 . 201

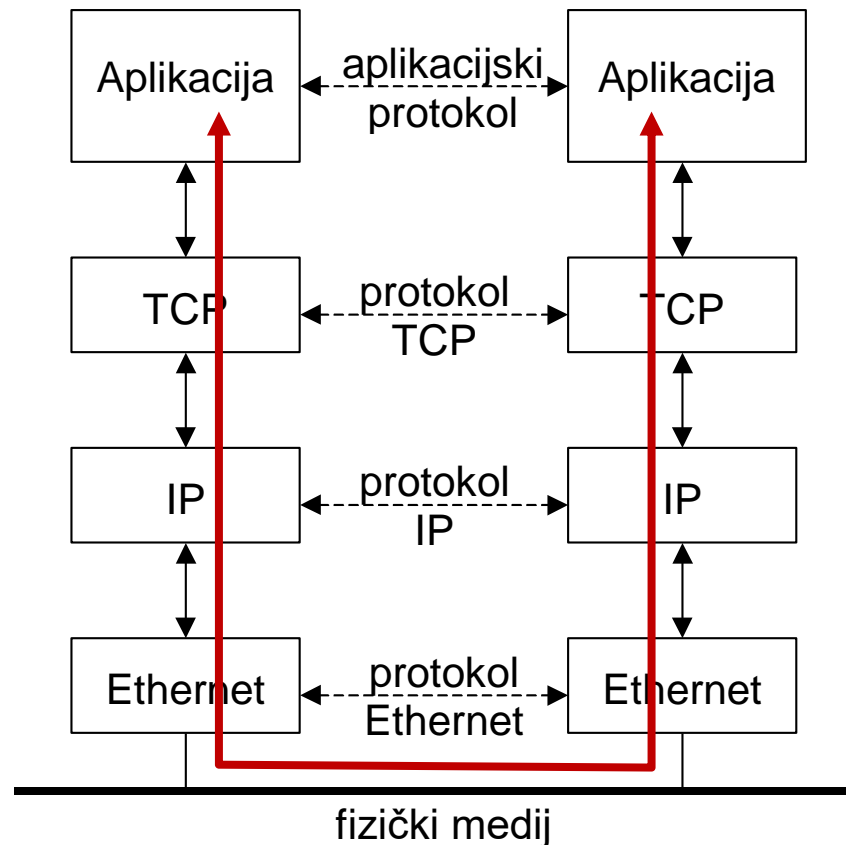
- simbolički zapis: lakše pamtljiv (npr. [www.fer.unizg.hr](http://www.fer.unizg.hr)) – veza numeričkog i simboličkog zapisa: **DNS**



# Obrada u krajnjem čvoru, protokolni složaj



Primjer: Izvorišni i odredišni čvor spojeni na istu podatkovnu poveznicu u lokalnoj mreži (*Ethernet*)

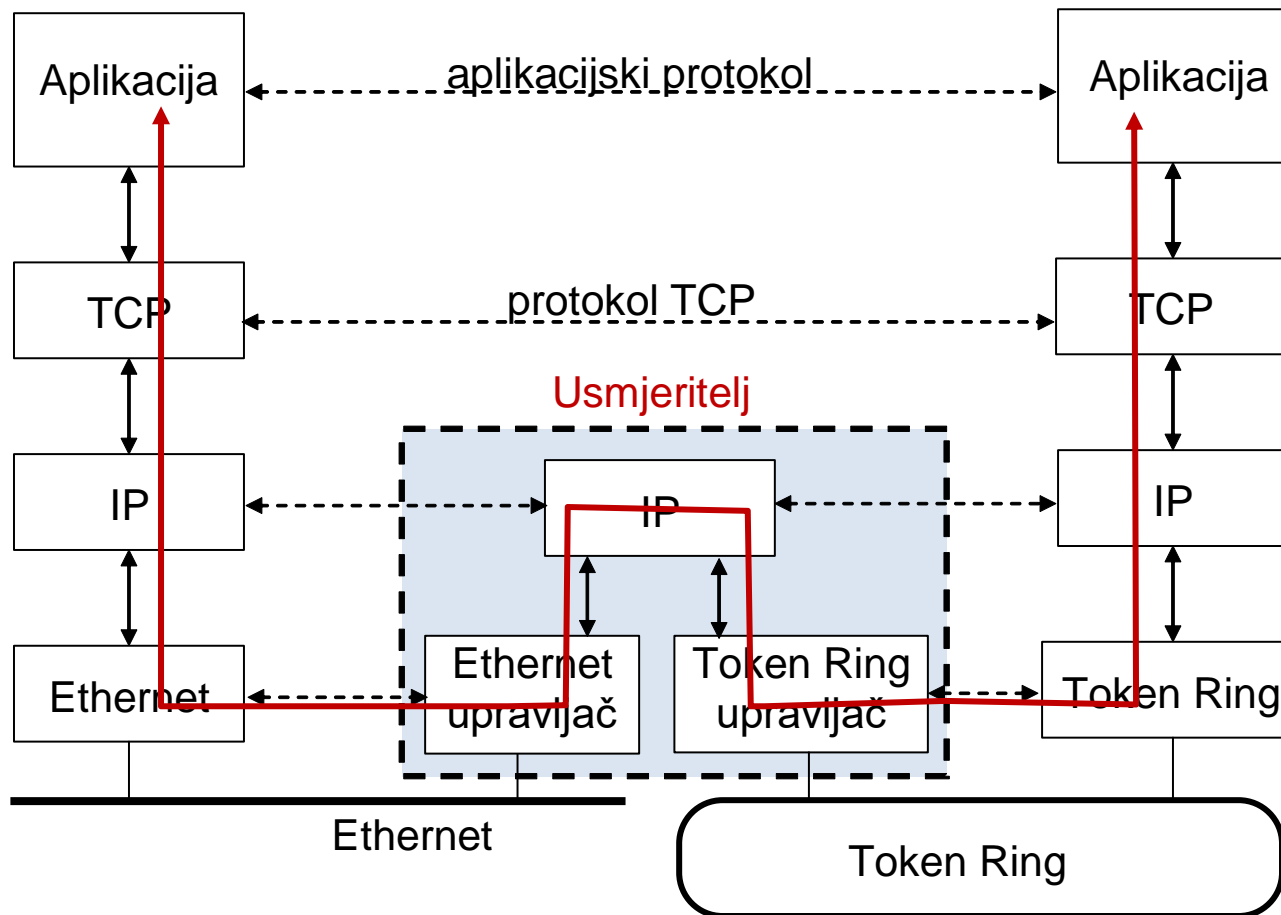


nema potrebe  
za usmjeriteljem!



# Usmjeravanje paketa preko usmjeritelja

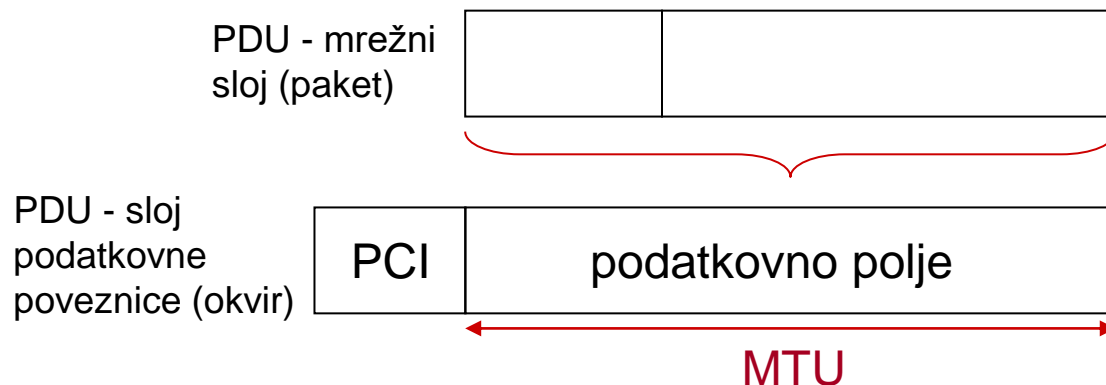
Primjer: Izvorišni i odredišni čvor spojeni na poveznice međusobno odvojene usmjeriteljem ili u lokalnim mrežama različite izvedbe (*Ethernet*, *Token Ring*)



- ◆ PDU mrežnog sloja (paket) smješta se u podatkovno polje PDU sloja podatkovne poveznice (okvir) ograničene duljine

- **pojam MTU** (*Maximum Transmission Unit*)

ovisi o tehnologiji izvedene mreže, npr. Ethernet/IEEE 802.3: MTU=1500 oktet



ako je veličina PDU veća od MTU, PDU se mora podijeliti na dijelove odgovarajuće veličine – **fragmente** (→ pitanje: *tko* i *gdje*?)

- ◆ transparentna fragmentacija

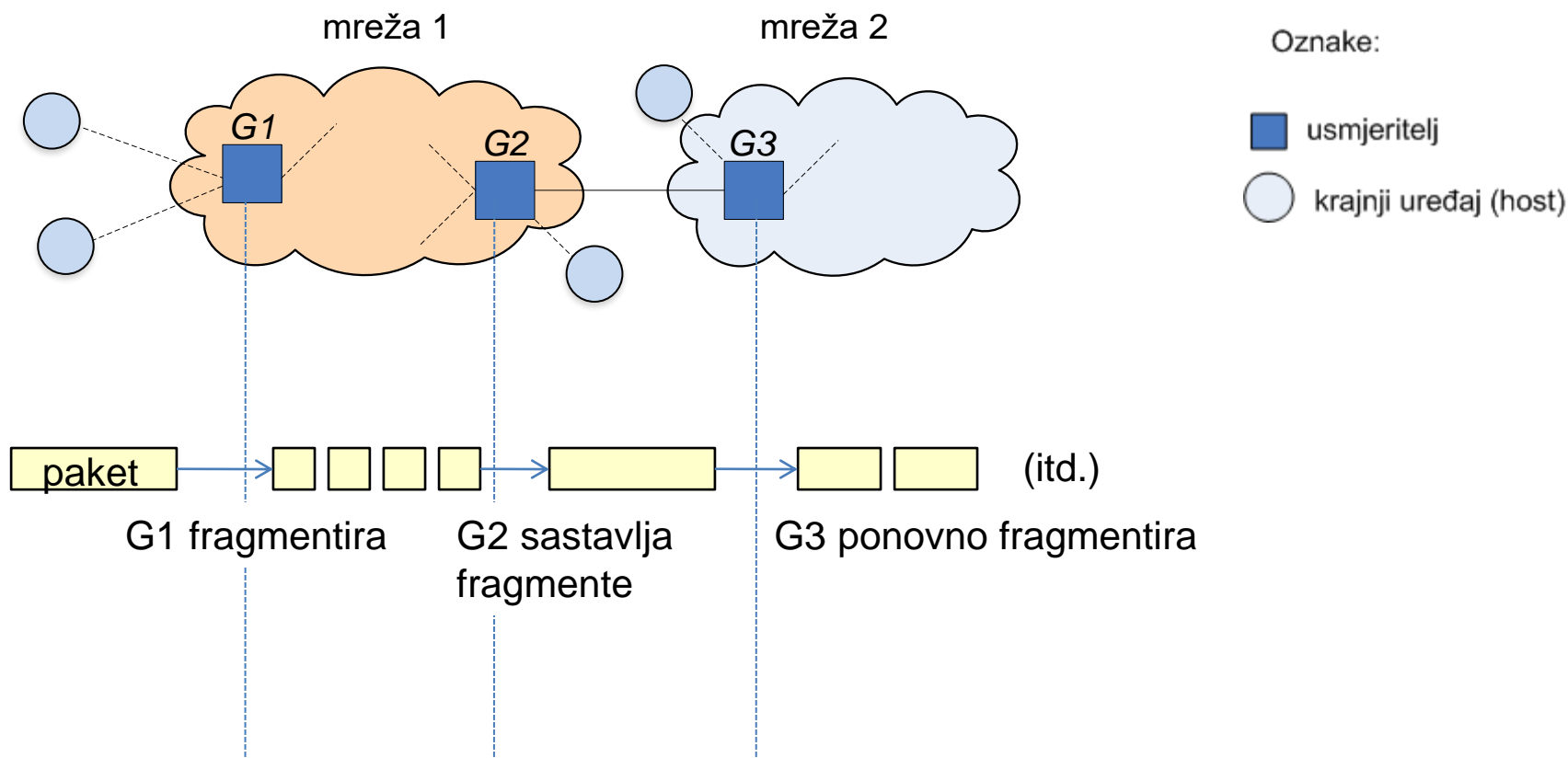
- fragmentacija i sastavljanje fragmenata na ulazu/izlazu iz svake podmreže

- ◆ netransparentna fragmentacija

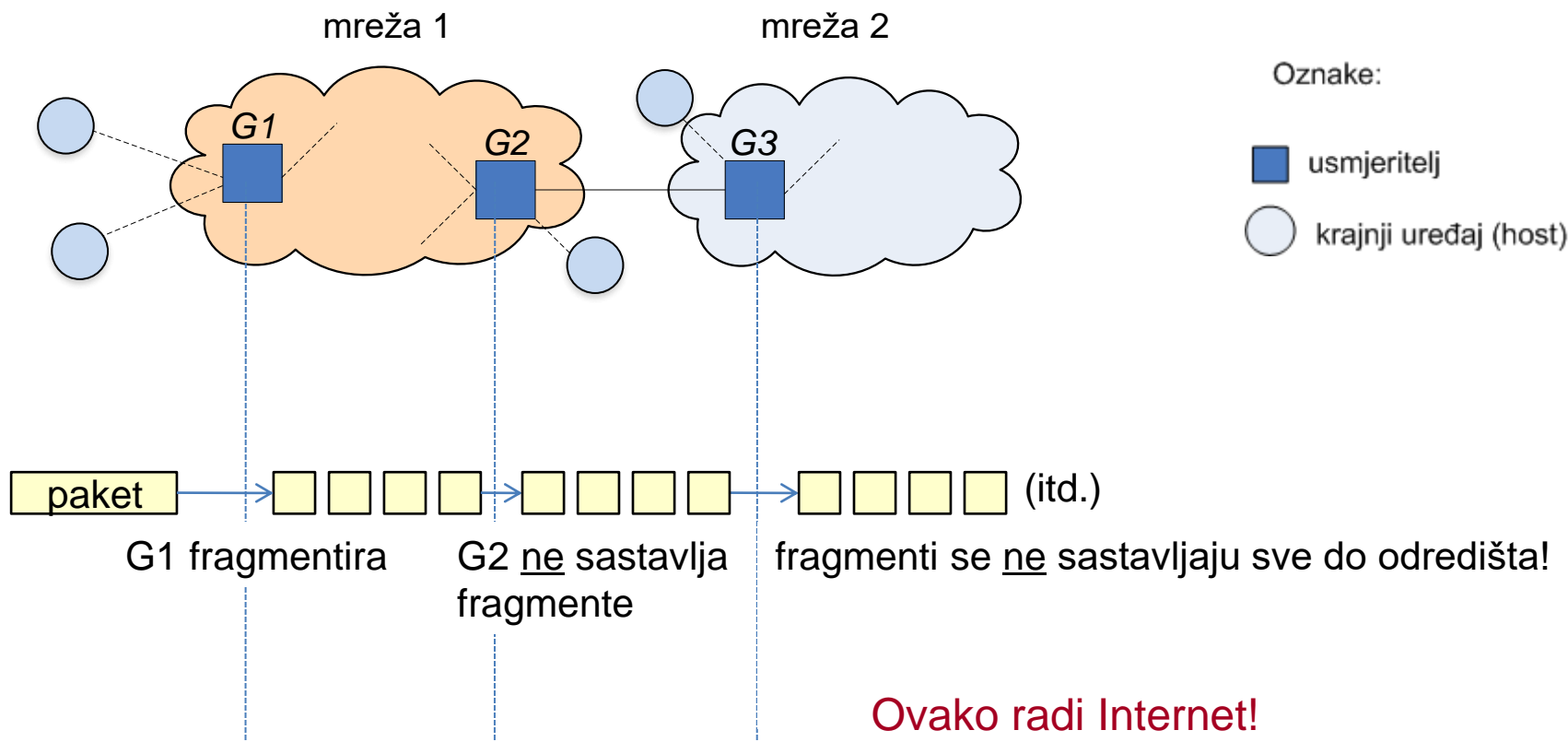
- fragmenti se sastavljaju tek na odredištu

# Transparentna fragmentacija

- ♦ tko: **usmjeritelj**
- ♦ gdje: fragmentacija i sastavljanje fragmenata obavlja se **na ulazu/izlazu** iz svake podmreže



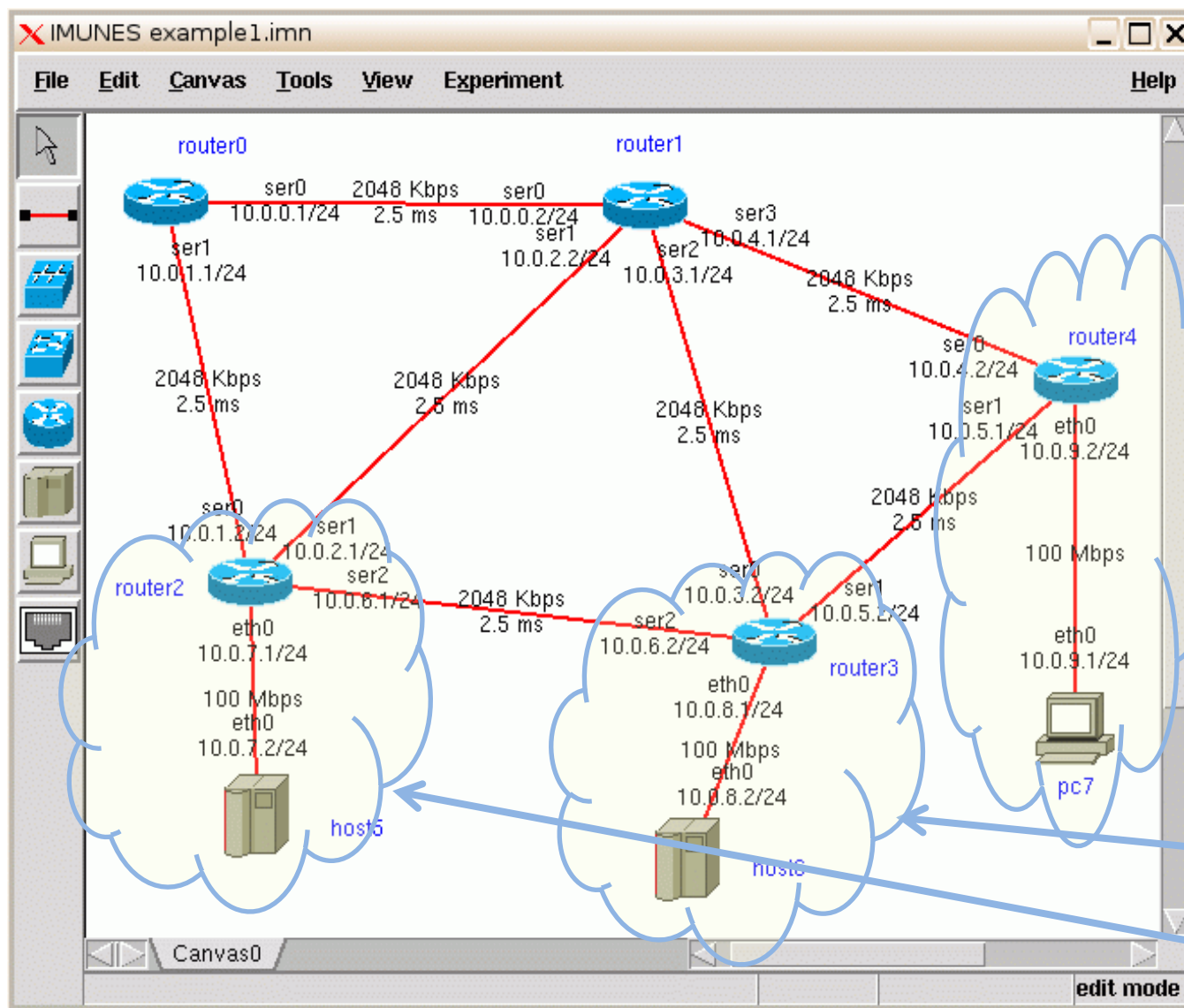
- ♦ tko: **usmjeritelj**
- ♦ gdje: fragmenti se šalju u novim, međusobno neovisnim datagramima i sastavljaju u originalni datagram **na odredištu**



- ◆ Usluge mrežnog sloja (transportnom sloju)
  - ◆ Virtualni kanal i datagram, spojna usluga i nespojna usluga
- ◆ Komutacija paketa i usmjeravanje
- ◆ Načela upravljanja zagušenjem
- ◆ Međusobno povezivanje mreža i podmreža
  - ◆ Povezivanje podmreža, primjer – Internet

# Povezivanje podmreža, primjer – Internet

Jedinstveni adresni prostor uz logičku podjelu na podmreže



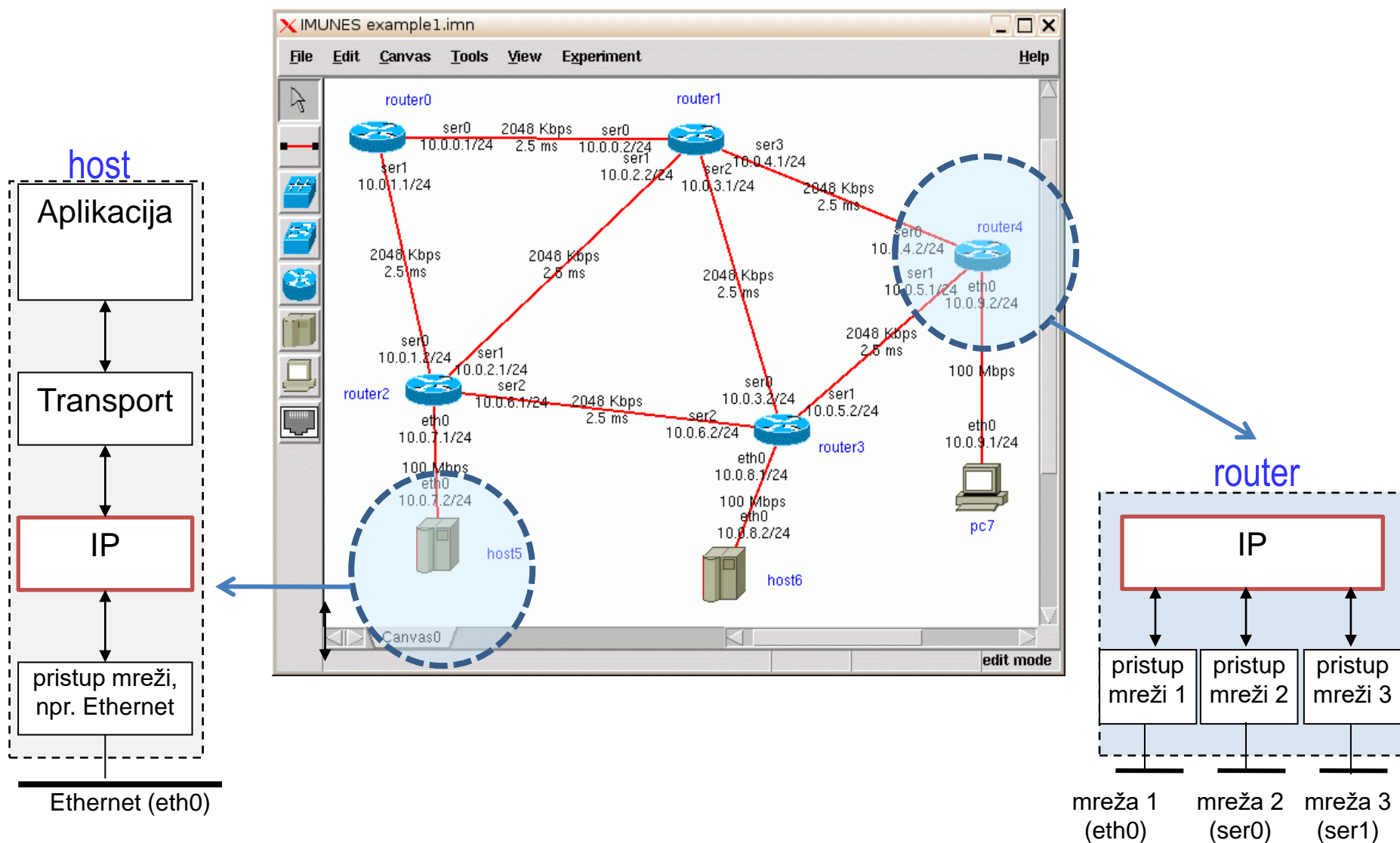
mreža davatelja  
internetske usluge  
(Internet Service  
Provider, ISP)  
(npr. CARNet)

podmreža 1  
(npr. FER)

podmreža 2  
(npr. FSB)  
podmreža 3  
(npr. FFZG)

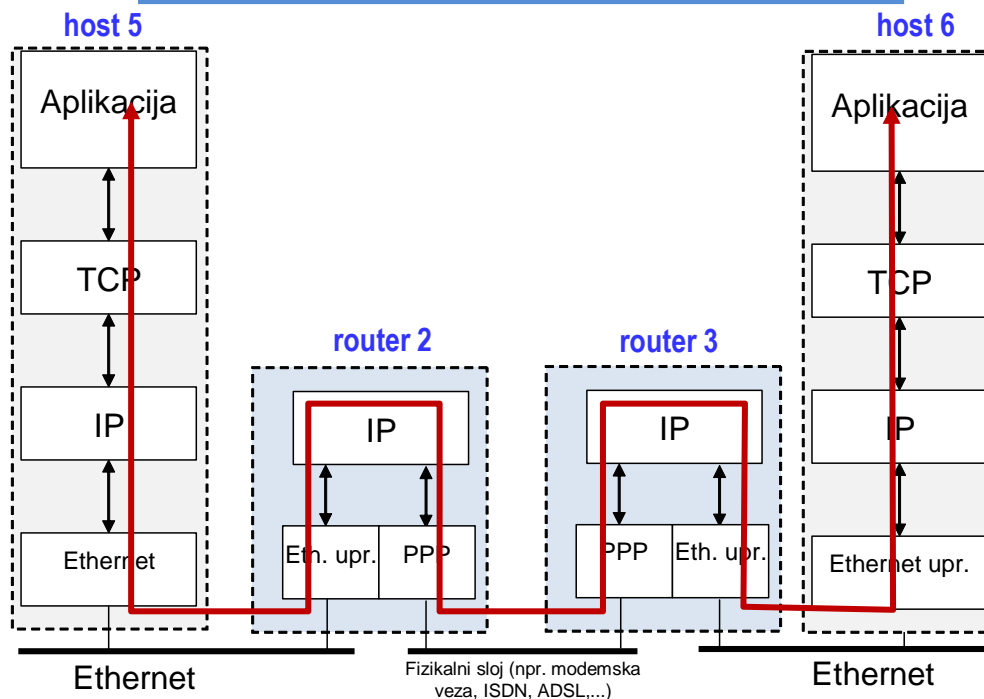
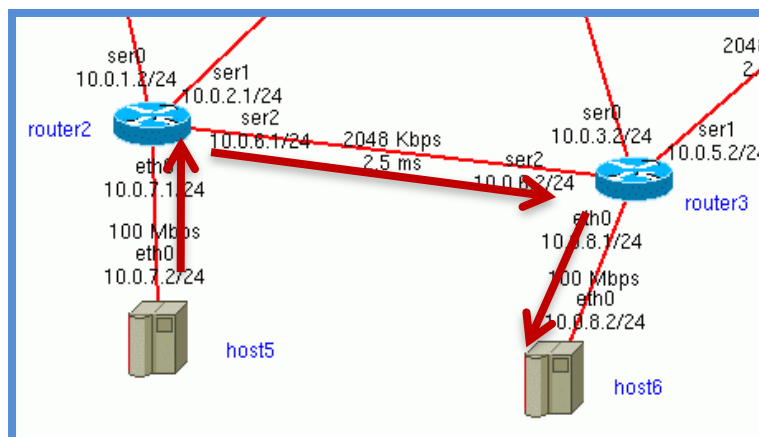
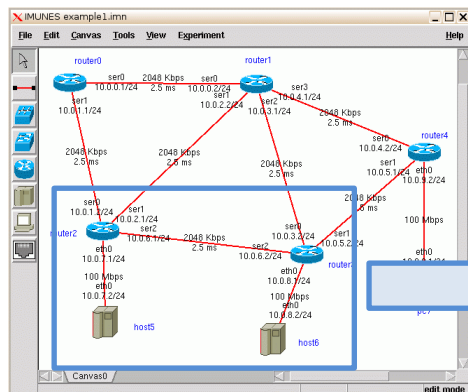
# Povezivanje podmreža, primjer – Internet

Izvedba mrežnog sloja u krajnjim računalima i usmjeriteljima



# Povezivanje podmreža, primjer – Internet

Usmjeravanje paketa s kraja na kraj mreže





- ◆ sl. 45
  - ◆ jedinstveni adresni prostor, hijerarhija adresa
  - ◆ što je zajedničko adresama unutar podmreže?
- ◆ sl. 46
  - ◆ veza IP-adrese i mrežnog sučelja?
  - ◆ veza IP i MAC-adrese?
- ◆ sl. 47
  - ◆ gdje se donosi odluka o usmjeravanju?
  - ◆ gdje bi moglo doći do fragmentacije?
  - ◆ kako izbjeći fragmentaciju?
- ◆ koji su mogući problemi?
  - ◆ zagušenje (gubici, kašnjenje, ...)?
  - ◆ prekidi u fizičkoj vezi?
  - ◆ problemi u usmjeravanju?
  - ◆ ...