

Glava 5: Mrežni nivo

5.1 Uvod

5.2 IP (*Internet Protocol*)

- Format datagrama
- IP adresiranje

5.3 Rutiranje

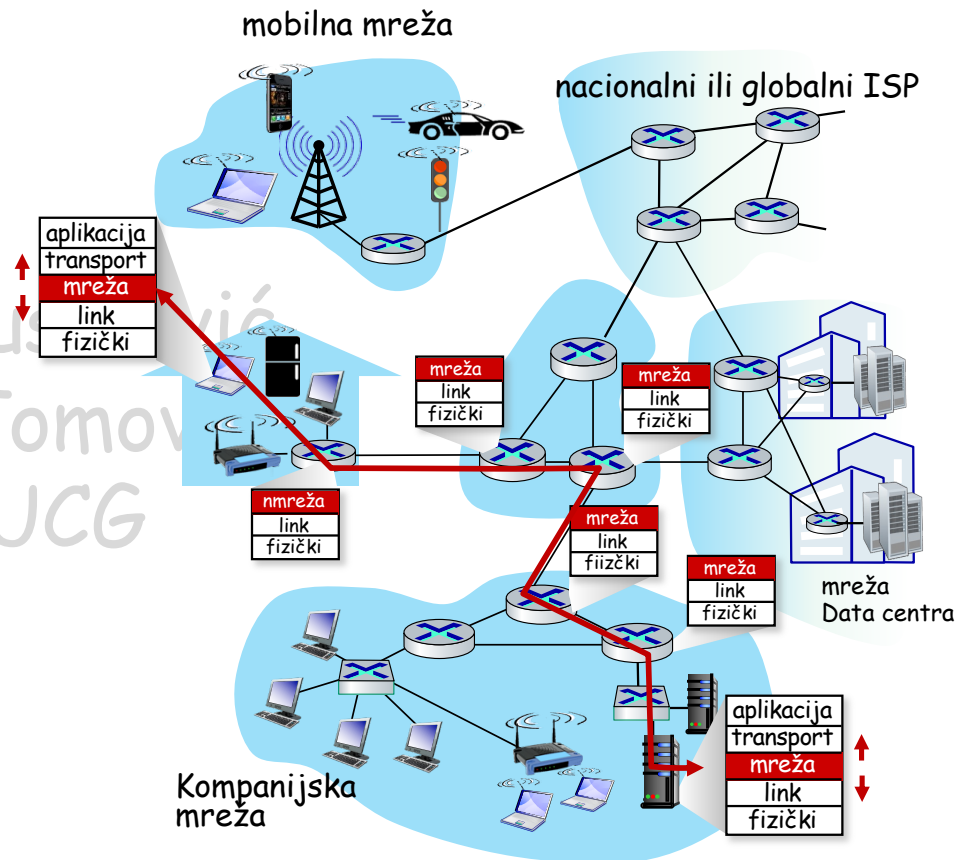
- *Link state*
- *Distance Vector*
- Hijerarhijsko rutiranje
- Protokoli rutiranja

5.4 Ruter

Igor Radusinović
Slavica Tomović
ETF, UCG

Mrežni nivo

- ❑ Prenos segmenta od pošiljaoca do odredišta
- ❑ Na strani koja šalje enkapsuliraju se segmenti primljeni sa transportnog nivoa u datagrame
- ❑ Na strani prijema predaja segmenata transportnom nivou
- ❑ Protokoli mrežnog nivoa su implementirani na *svakom* hostu, ruteru
- ❑ Ruter
 - ispituje polja zaglavlja svakog IP datagrama kojeg prosleđuje
 - prosleđuje paket na izlaz koji pripada odgovarajućoj ruti od izvora do destinacije



Ključne funkcije mrežnog nivoa

□ *prosleđivanje*: prenos paketa sa ulaza rutera na odgovarajući izlaz

□ *rutiranje*: izbor rute kojom se paketi prenose od izvora do destinacije.

○ *Algoritmi rutiranja*

analogija:

□ *rutiranje*: proces planiranja putovanja

□ *prosleđivanje*: proces prolaska kroz jednu raskrscopicu



prosleđivanje



rutiranje

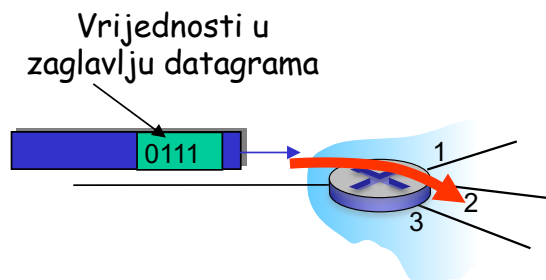
Mrežni nivo

5-3

Mrežni nivo: ravan podataka, ravan kontrole

Ravan podataka

- Lokalna funkcija rutera
- Određuje kako se datagram koji dolazi na ulazni port rutera prosleđuje na izlazni port
- Funkcija prosleđivanja

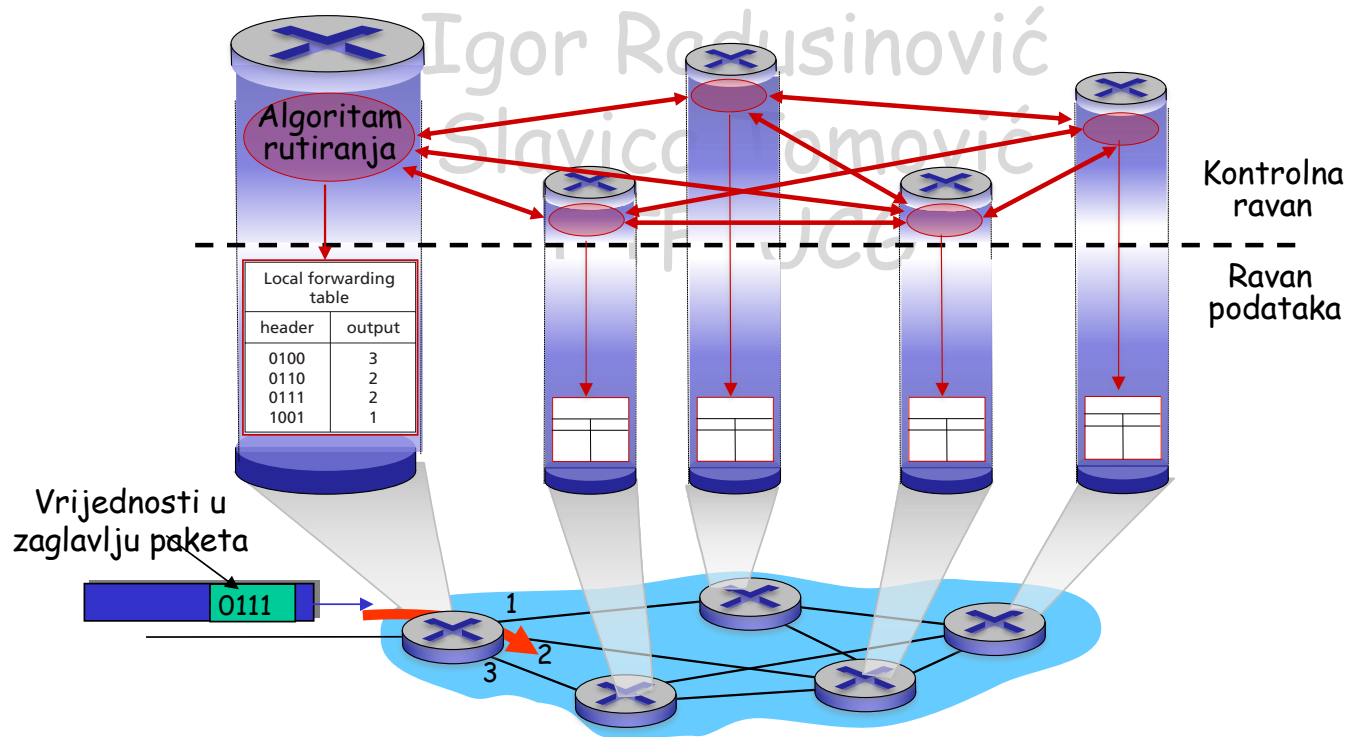


Kontrolna ravan

- Mrežna logika
- Određuje kako se datagram rutira duž putanje od kraja do kraja od izvorišnog do odredišnog hosta
- Dva pristupa:
 - Tradicionalni algoritmi rutiranja: implementirani u ruterima
 - *Software-Defined Networking (SDN)*: implementirani u udaljenim serverima

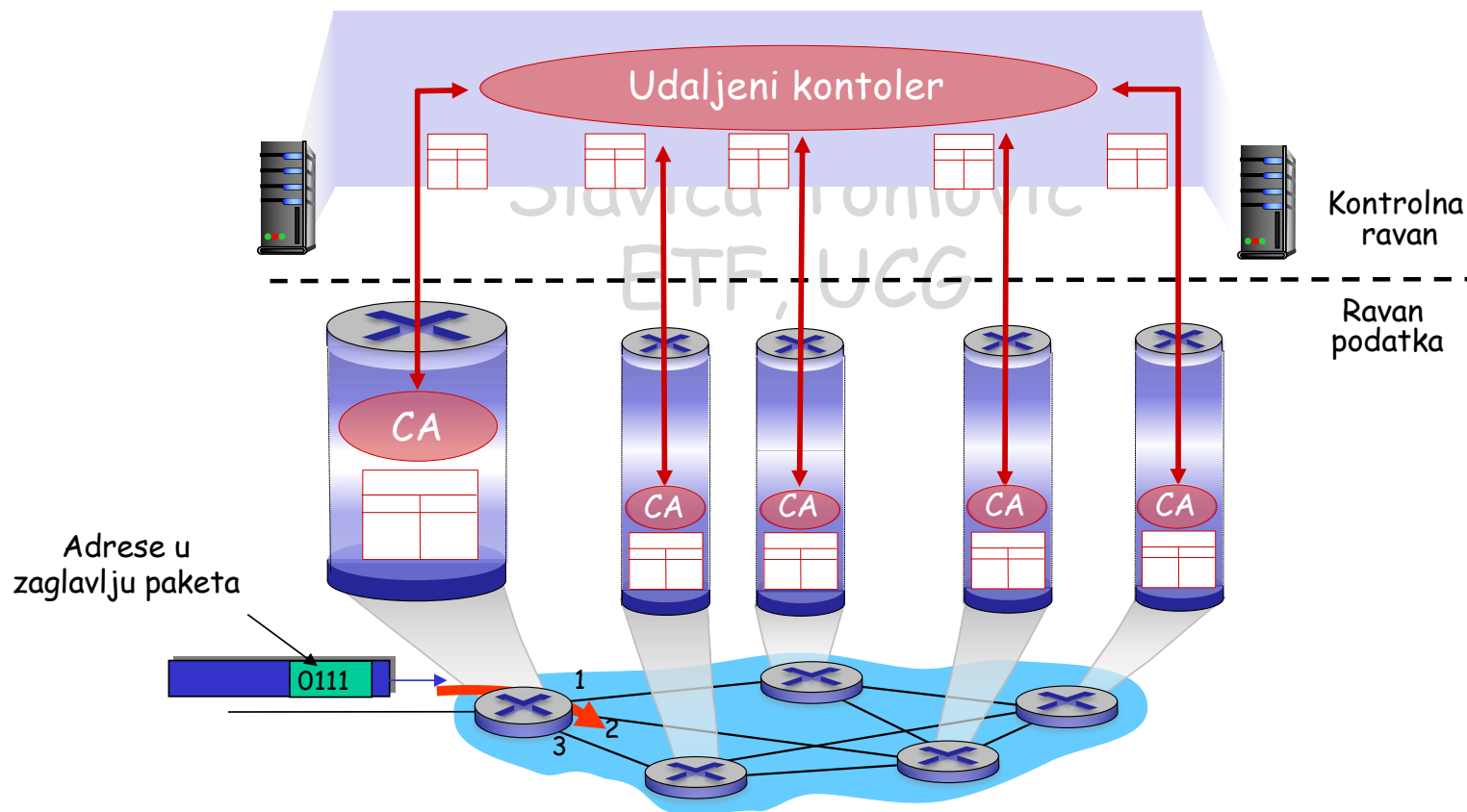
Distribuirana kontrolna ravan

Individualni algoritmi rutiranja se izvršavaju samostalno u svakom ruteru i međusobno interaguju u kontrolnoj ravni



Centralizovana kontrolna ravan

Udaljeni kontroler interaguje sa lokalnim kontrolnim agentima (CAs)



Mrežni servisni model

Koji *servisni model* nudi “kanal” koji transportuje datagrame od pošiljaoca do prijemnika?

Primjer servisa za individualne datagrame:

- Garantovana predaja
- Garantovana predaja sa kašnjenjem manjim od određene vrijednosti (recimo 40ms)

Primjer servisa za tok datagrama:

- Redosledna predaja datagrama
- Garantovani minimalni protok toka
- Ograničene promjene u kašnjenjima pakete
- Zaštita

Modeli servisa mrežnog nivoa:

Mrežna Arhitektura	Model Servisa	Garantovani QoS			"Congestion Feedback"	
		Brzina	Gub.	Red.		Tajm.
Internet	<i>best effort</i>	bez	ne	ne	ne	ne (preko gubitaka)
ATM	CBR	konstantna brzina	da	da	da	nema zagušenja
ATM	VBR	garantov. brzina	da	da	da	nema zagušenja
Internet	Intserv	da	da	da	da	ne
Internet	Diffserv	moгуće	mog.	mog.	ne	

Glava 5: Mrežni nivo

5.1 Uvod

5.2 IP (*Internet Protocol*)

- ❑ Format datagrama
- ❑ IP adresiranje

5.3 Rutiranje

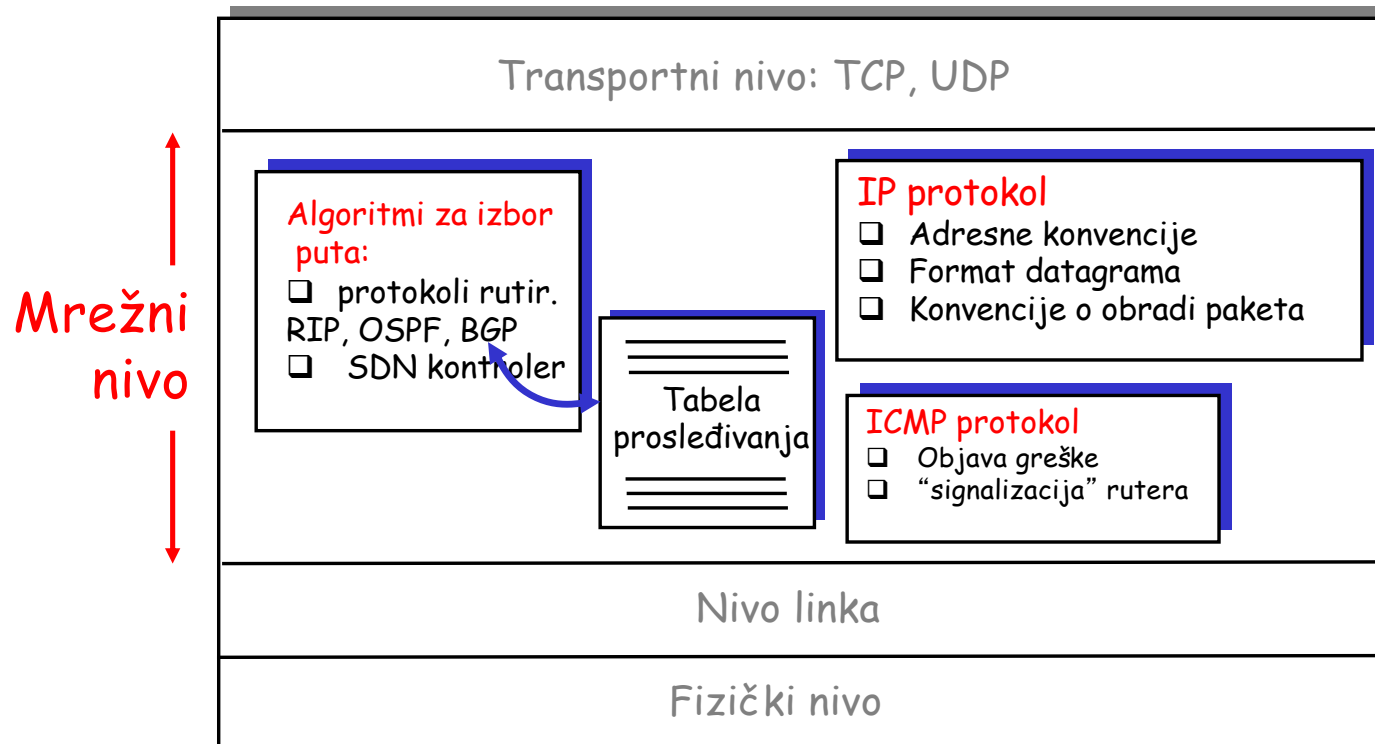
- ❑ *Link state*
- ❑ *Distance Vector*
- ❑ Hijerarhijsko rutiranje
- ❑ Protokoli rutiranja

5.4 Ruter

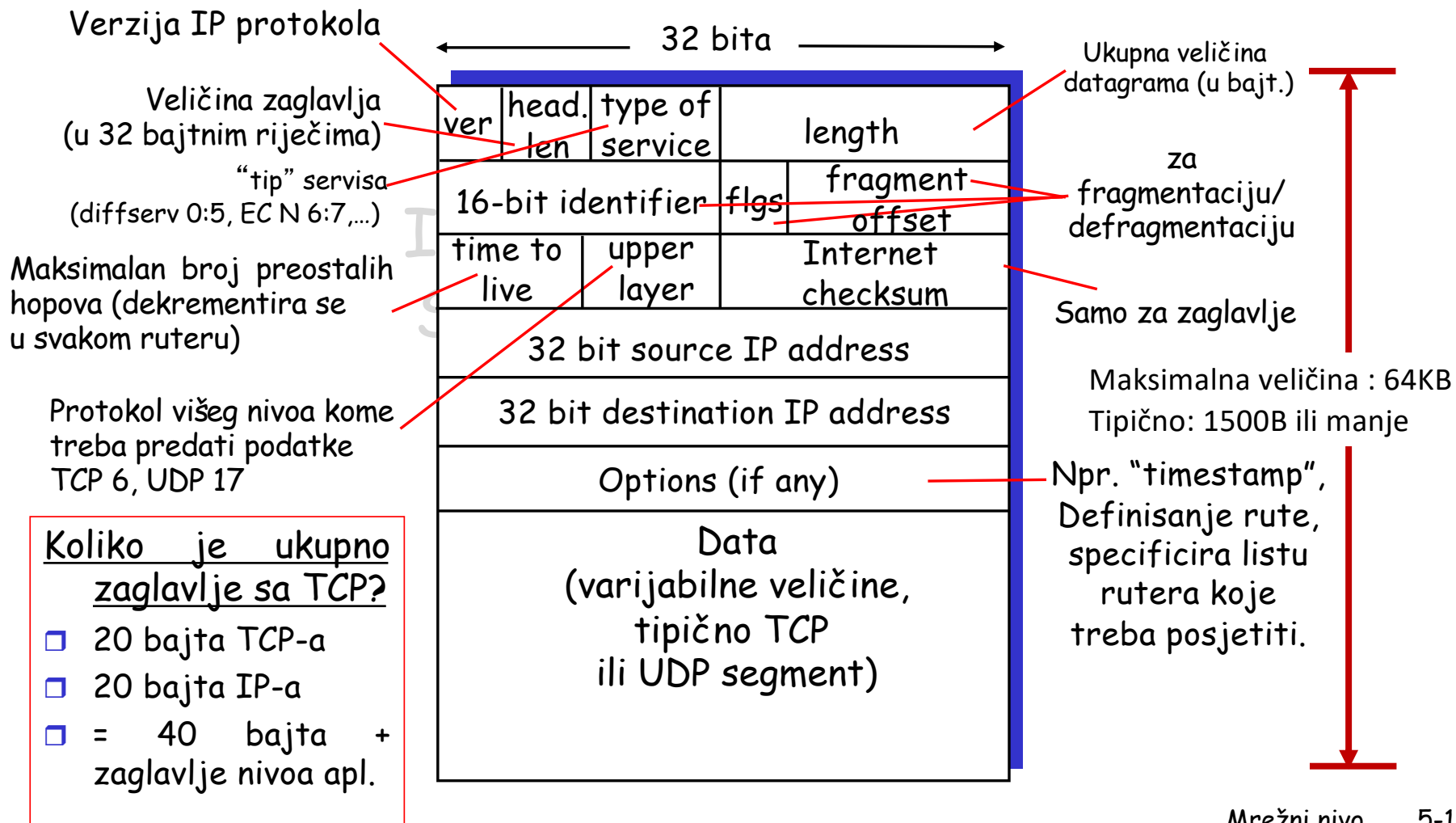
Igor Radusinović
Slavica Tomović
ETF, UCG

Internet mrežni nivo

Host, ruter funkcije mrežnog nivoa:

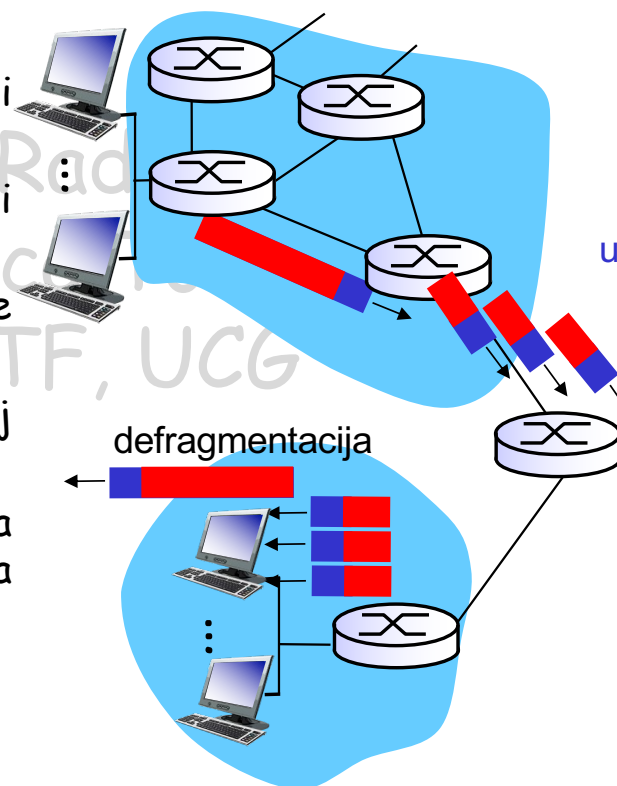


Format IP datagrama



IP Fragmentacija & Defragmentacija

- Mrežni linkovi imaju MTU (max.transfer unit) - najveći mogući okvir nivoa linka.
 - Različiti tipovi linkova, različiti MTU-ovi
- veliki IP datagram se dijeli (“fragmentira”) u okviru mreže
 - jedan datagram postaje više datagrama
 - “defragmentira” se samo na krajnjoj destinaciji
 - IP biti zaglavlja se koriste za identifikaciju redosleda vezanog za fragment



fragmentacija:
u: jedan veliki datagram
iz: 3 mala datagrama

IP fragmentacija, defragmentacija

Primjer:

- Datagram od 4000 B
- MTU = 1500 B

dužina	ID	fragflag	offset
=4000	=x	=0	=0

Jedan veliki datagram se dijeli na više manjih datagrama

1480 B u polju podataka

offset = 1480/8

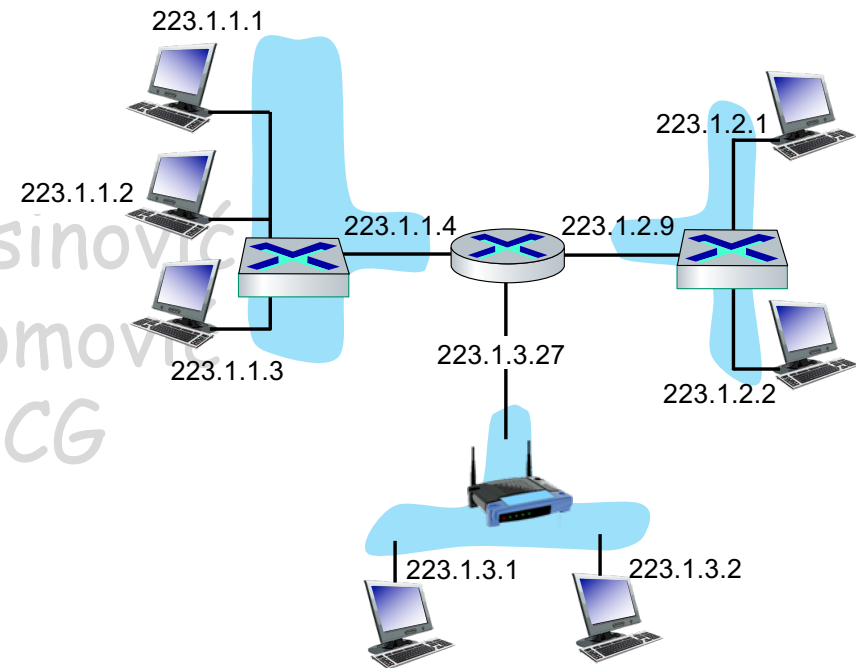
dužina	ID	fragflag	offset
=1500	=x	=1	=0

dužina	ID	fragflag	offset
=1500	=x	=1	=185

dužina	ID	fragflag	offset
=1040	=x	=0	=370

IP Adresiranje: uvod

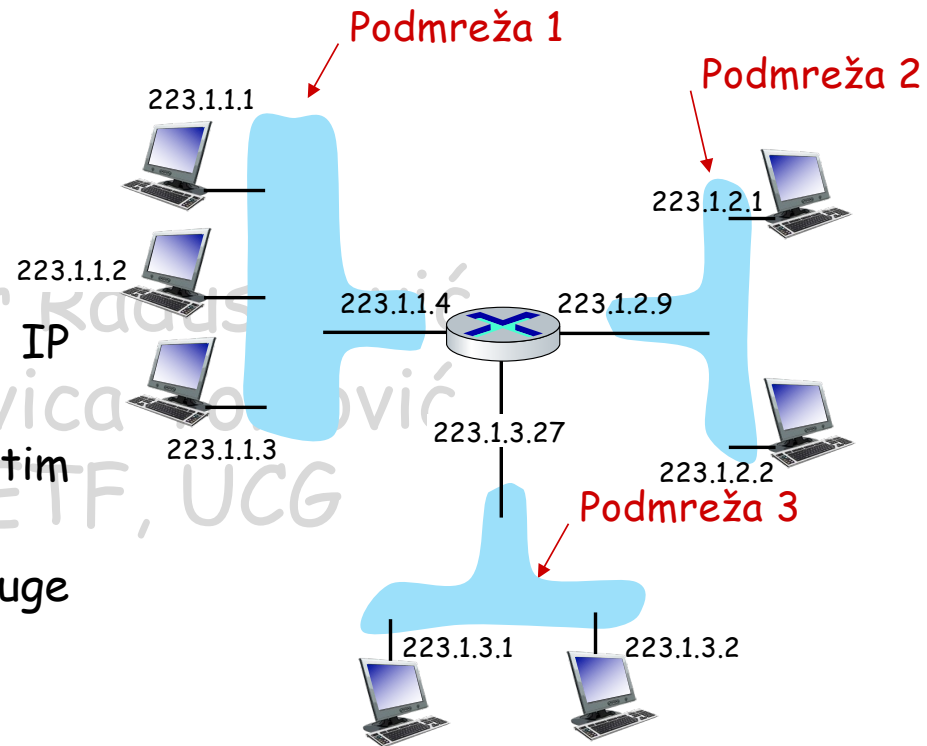
- IP adresa: 32-bitni identifikator za host ili ruter *interfejs*
- *interfejs*: veza između host/rutera i fizičkog linka
 - ruteri tipično imaju više interfejsa
 - i host može imati više interfejsa
 - IP adrese su vezane za svaki interfejs



$$223.1.1.1 = \underbrace{11011111}_{223} \underbrace{00000001}_1 \underbrace{00000001}_1 \underbrace{00000001}_1$$

IP Adresiranje

- IP adresiranje:
 - Mrežni dio (biti višeg reda)
 - Dio hosta (biti nižeg reda)
- Šta je mreža? (iz perspektive IP adrese)
 - Interfejsi uređaja sa istim mrežnim dijelom IP adrese
 - mogu fizički dosegnuti jedni druge bez učešća rutera

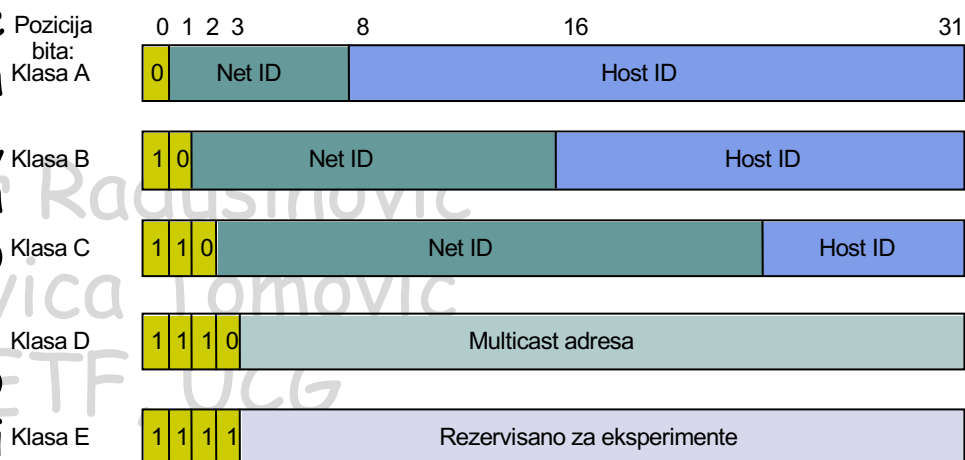


Mreža se sastoji od 3 IP podmreže
(prvih 24 bita su mrežna adresa)

Classful IP Adresiranje

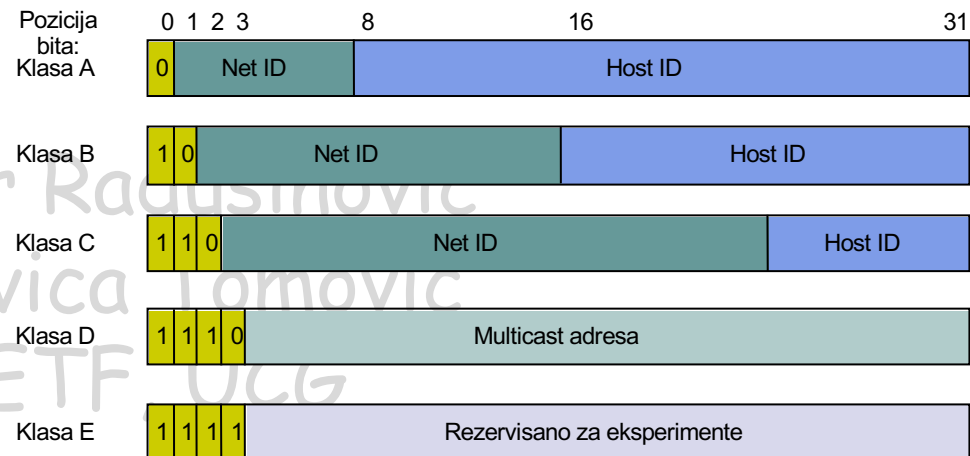
□ IPver4 adresna struktura je podijeljena na pet adresnih klasa: A, B, C, D i E, identifikacijom najznačajnijih bita adrese kao što je prikazano na slici.

□ Klasa A ima 8 bita za mrežni ID i 24 bita za host ID, što znači $2^7 - 2 = 126$ mreža i $2^{24} - 2 = 16777214$ hostova. U klasu A spadaju adrese čiji je prvi bit uvijek 0. Ova klasa je namijenjena velikim organizacijama. Opseg validnih mrežnih adresa klase A je od 1.0.0.0 do 126.0.0.0.



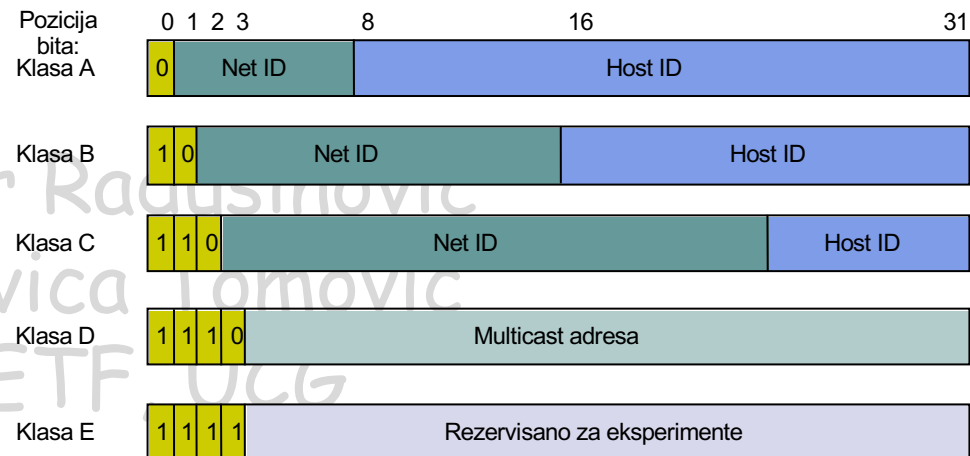
Classful IP Adresiranje

- Klasa B ima 16 bita za mrežni ID, što znači $2^{14}-2=16382$ mreža i $2^{16}-2=65534$ hostova. U klasu B spadaju adrese čija su prva dva bita uvijek 10. Ova klasa je namijenjena organizacijama srednje veličine. Opseg validnih mrežnih adresa klase B je od 128.1.0.0 do 191.254.0.0.
- Klasa C ima 21 bit za mrežni ID i 8 bita za host ID, što znači $2^{21}-2=2097150$ mreža i $2^8-2=254$ hostova. U klasu C spadaju adrese čija su prva tri bita uvijek 110. Ova klasa je namijenjena malim organizacijama. Opseg validnih mrežnih adresa klase C je od 192.0.1.0 do 223.255.254.0.



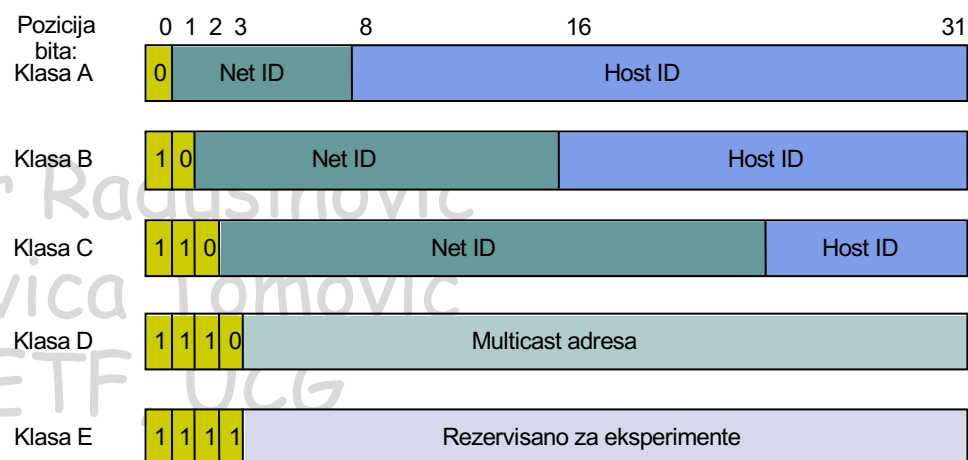
Classful IP Adresiranje

- ❑ Klasa D se koristi za multikast servis koji omogućava da host šalje paket grupi hostova koji pripadaju istoj multikast grupi. U klasu D spadaju adrese čija su prva četiri bita uvijek 1110. Ova klasa je namijenjena za multicast grupe. Opseg adresa koji pripadaju ovoj klasi je od 224.0.0.0 do 239.255.255.255. Ove adrese nijesu za komercijalnu upotrebu.
- ❑ Klasa E je rezervisana za eksperimente. U klasu E spadaju adrese čiji su prvih pet bita uvijek 11110. Ova klasa je namijenjena za multicat grupe. Opseg adresa koji pripadaju ovoj klasi je od 240.0.0.0 do 254.255.255.255. Ove adrese takođe nijesu za komercijalnu upotrebu.



Classful IP Adresiranje

- ID koji imaju sve jedinice i sve nule imaju specijalnu namjenu.
- Host ID koji se sastoji od svih jedinica znači da se paket *broadcast*-uje svim hostovima mreže čiji je mrežni ID specificiran.
- Ako se mrežni ID sastoji od svih jedinica to znači da se paket *broadcast*-uje svim hostovima lokalne mreže.
- Host ID koji se sastoji od svih 0 odgovara adresi mreže.



Classful IP Adresiranje

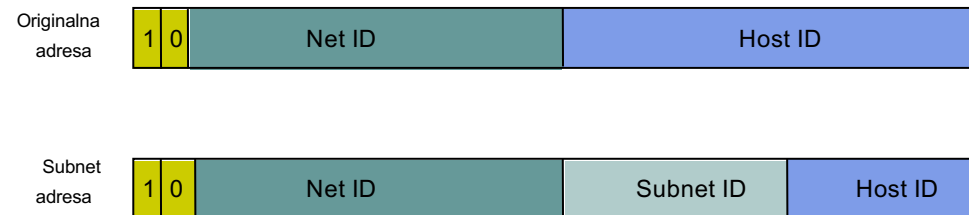
- IP adrese se najčešće pišu u formi tačka-decimalnog zapisa koji je pogodan za korišćenje od strane čovjeka. Adresa se dijeli na četiri bajta, pri čemu svaki bajt predstavlja decimalni broj, koji su razdvojeni tačkama. Na primjer adresa
- 10000000 10000111 01000100 00000101
○ 128 . 135 . 68 . 5
- Klasa adrese se lako određuje ispitivanjem prvog okteta adrese. U IP adresi 128.135.68.5 prvi oktet je 128. Kako 128 pada između 128 i 191, jasno je da je ovo IP adresa klase B.

Classful IP Adresiranje

- ❑ Određeni opsezi adresa su namijenjeni za privatne mreže (RFC1918).
- ❑ Ove adrese se koriste unutar mreža koje se ne vezuju direktno na Internet ili u mrežama u kojima je implementiran NAT.
- ❑ Ove adrese nijesu registrovane i ruteri na Internetu moraju odbacivati pakete sa ovakvim adresama. Opsezi privatnih adresa su: 10.0.0.0 - 10.255.255.255 (A klasa), 172.16.0.0 - 172.31.255.255 (B klasa) i 192.168.0.0 - 192.168.255.255 (C klasa - najčešće se primjenjuje u kućnim mrežama)

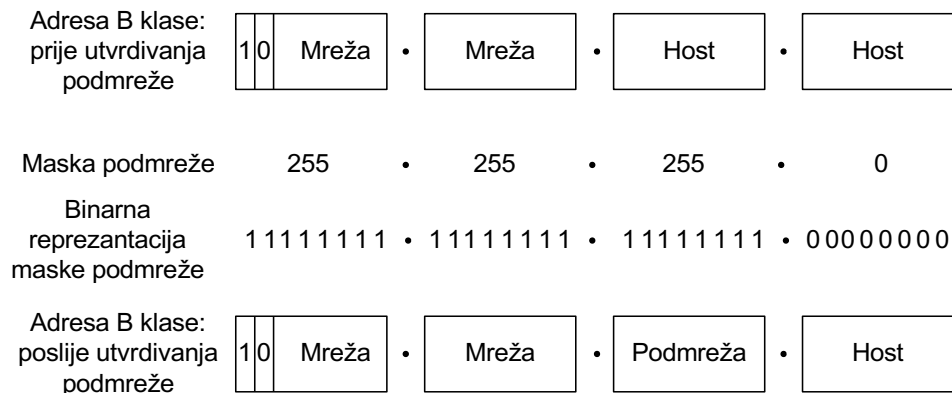
Classful IP Adresiranje

- ❑ Opisano IP adresiranje ima više nedostataka.
- ❑ Ovo adresiranje može biti vrlo neefikasno. Na primjer, dodjela B klase jednoj akademskoj instituciji koja ima jednu ili više lokalnih računarskih mreža je besmislena.
- ❑ Rješenje ovog problema je razvijeno 1980-tih kada je usvojen koncept podmreže (subnetting) kada sa dodaje još jedan hijerarhijski nivo subnet (podmreža).
- ❑ Sjajna stvar ovog koncepta je njena transparentnost na Internetu. Naime, Internet "vidi" i dalje samo dva nivoa hijerarhije. Unutar intraneta mrežnom administratoru se ostavlja mogućnost kombinovanja veličina subnet i host polja.



Classful IP Adresiranje

- To znači da dodijeljena mrežna adresa može biti podijeljena na više podmreža. Tako na primjer, 172.16.1.0, 172.16.2.0 i 172.16.3.0 predstavljaju podmreže mreže 172.16.0.0.
- Adresa podmreže se dobija "posuđivanjem" bita iz dijela koji se odnosi na host i njihovo dodjeljivanje podmreži.
- Broj "posuđenih" bita iz dijela koji se odnosi na host varira i zavisi od maske podmreže (subnet mask).
- Maska podmreže ima isti format i koncepciju kao i IP adrese. Razlika je u tome što sve jedinice označavaju polja koja pripadaju mreži i podmreži, dok 0 specificiraju polje adrese koje pripada hostu.



Classful IP Adresiranje

U tabeli je prikazana je veza između binarne i decimalne reprezentacije maske pod mreže.

	128	64	32	16	8	4	2	1	
	1	0	0	0	0	0	0	0	128
	1	1	0	0	0	0	0	0	192
	1	1	1	0	0	0	0	0	224
	1	1	1	1	0	0	0	0	240
	1	1	1	1	1	0	0	0	248
	1	1	1	1	1	1	0	0	252
	1	1	1	1	1	1	1	0	254
	1	1	1	1	1	1	1	1	255

- Default maske pod mreža su:
- - 255.0.0.0 (A klasa)
- - 255.255.0.0 (B klasa)
- - 255.255.255.0 (C klasa)

Classful IP Adresiranje

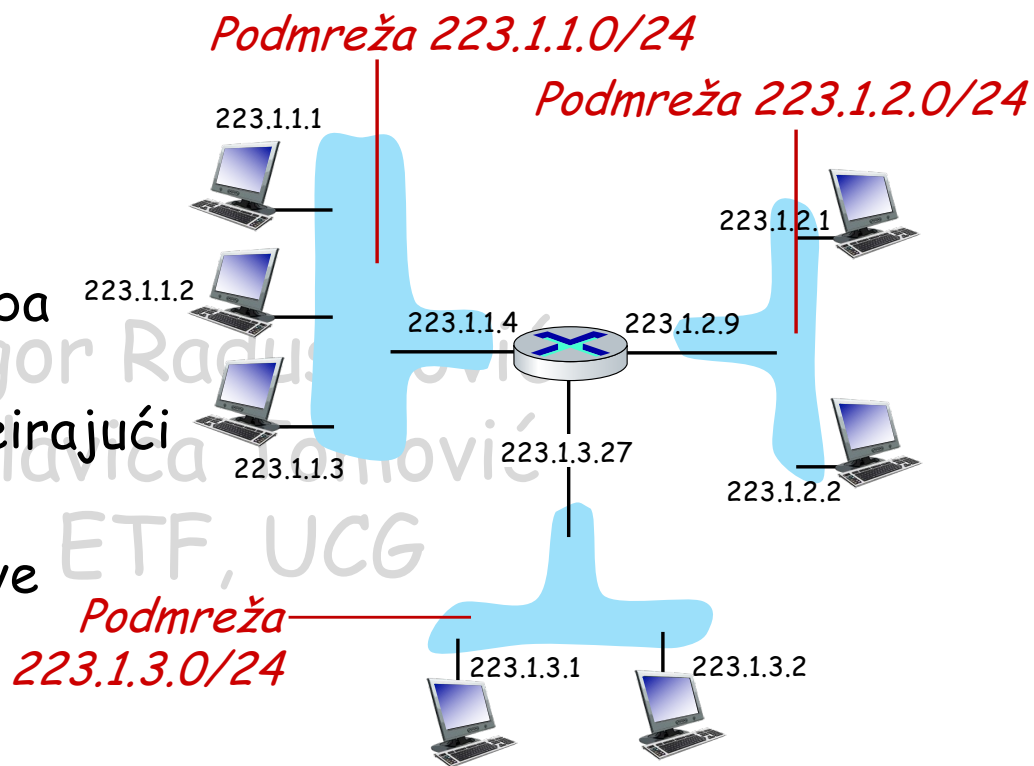
172	16	125	1	zadata adresa u decimalnom formatu
10101100	00010000	01111101	00000001	zadata adresa u binarnom formatu
255	255	0	0	default maska podmreže u decimalnom formatu
11111111	11111111	00000000	00000000	default maska podmreže u binarnom formatu
10101100	00010000	0	0	adresa mreže u binarnom formatu
172	16	0	0	adresa mreže u decimalnom formatu
<hr/>				
172	16	125	1	zadata adresa u decimalnom formatu
10101100	00010000	01111101	00000001	zadata adresa u binarnom formatu
255	255	224	0	zadata maska podmreže u decimalnom formatu
11111111	11111111	11100000	00000000	zadata maska podmreže u binarnom formatu
10101100	00010000	01100000	00000000	adresa podmreže u binarnom formatu
172	16	96	0	adresa podmreže u decimalnom formatu

Broadcast adresa u ovoj podmreži je 172.16.127.255 (10101100.00010000.01111111.11111111). Opseg adresa koje pripadaju ovoj podmreži je od 172.16.96.1 (10101100.00010000.01100000.00000001) do 172.16.127.254 (10101100.00010000.01111111.11111110).

Podmreža

Napomena

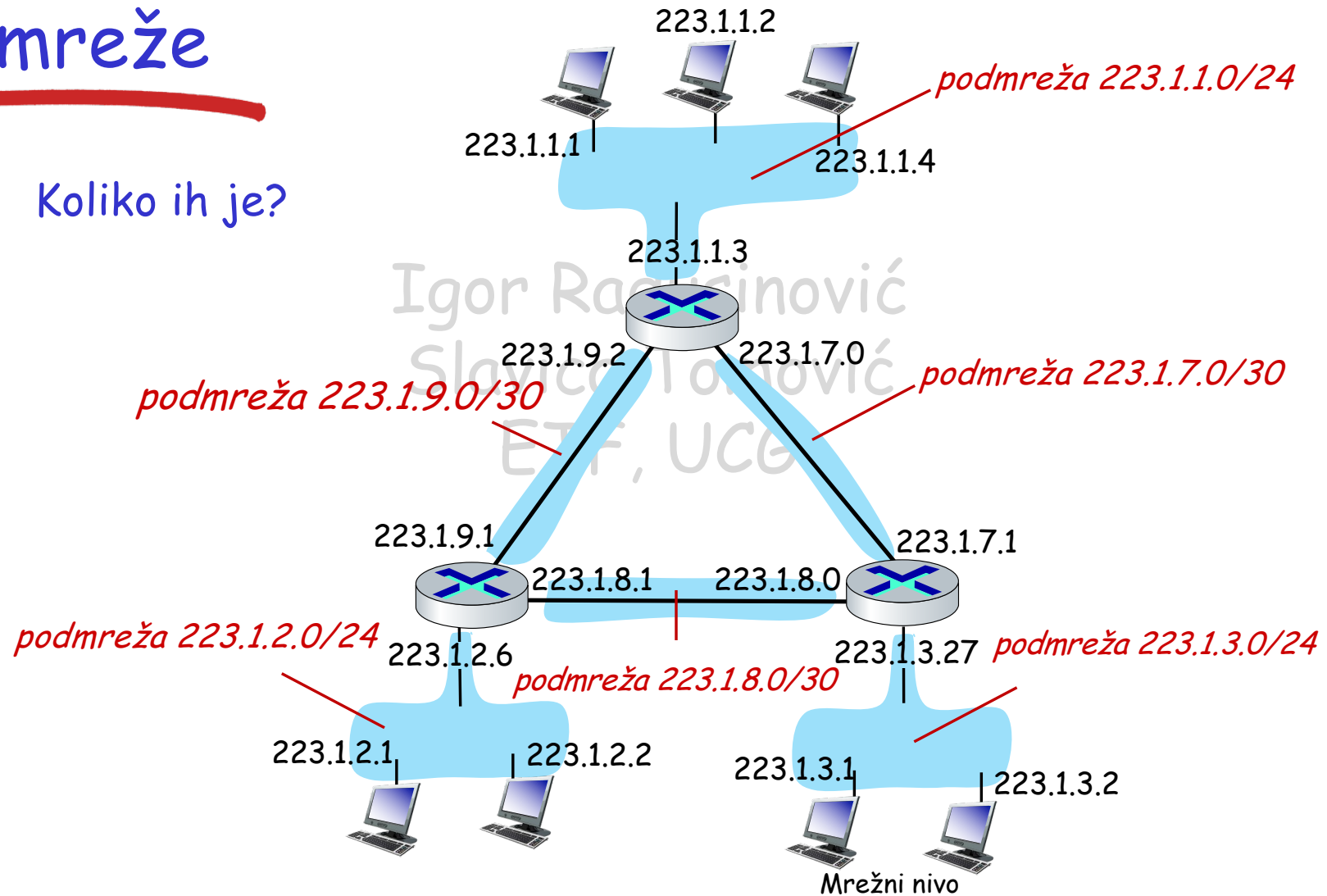
- Da bi odredili podmreže, treba razdvojiti svaki interfejs od njegovog hosta ili rutera, kreirajući ostrva izolovanih mreža.
- Svaka izolovana mreža se zove **podmreža**.



Maska podmreže: /24

Podmreže

Koliko ih je?

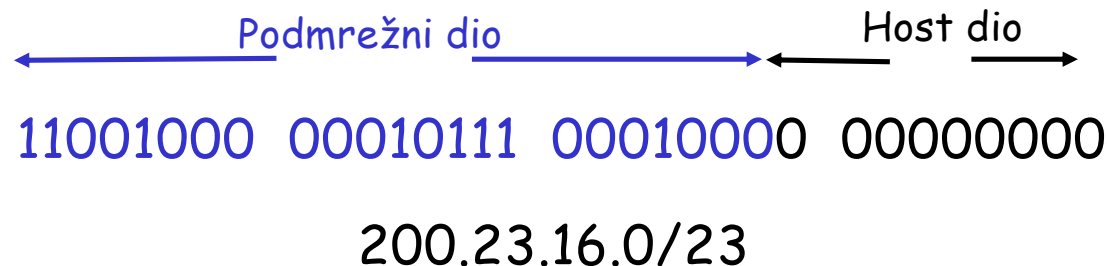


IP adresiranje: CIDR

CIDR: Classless InterDomain Routing

- Podmrežni dio adrese je proizvoljne veličine
- Format adrese: a.b.c.d/x, gdje je x broj bita u mrežnom dijelu adrese

Tyler Radusinović
Slavica Tomović
ETF, UCG



IP adrese: kako dobiti IP adresu?

Kako *host* dobija IP adresu?

- ❑ od strane sistem administratora
 - Win1: control-panel->network->configuration->tcp/ip->properties
 - UNIX: /etc/rc.config
- ❑ dinamički od DHCP servera
 - DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*)
 - *plug-and-play*

DHCP: Dynamic Host Configuration Protocol

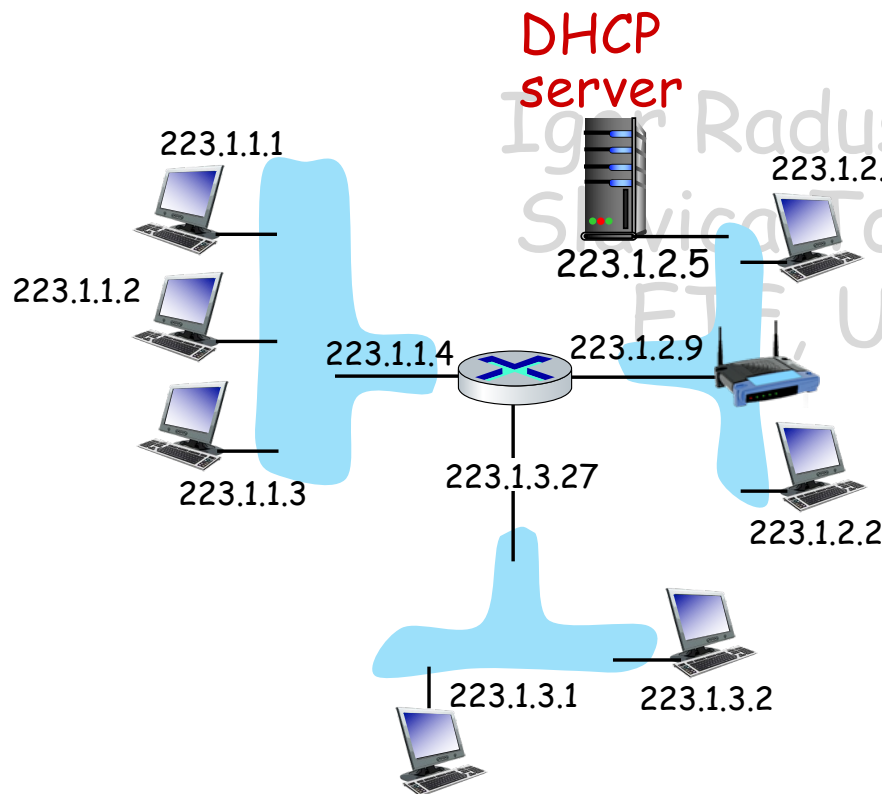
Cilj je omogućiti hostu dinamičko dobijanje adresa, prilikom povezivanja na mrežu, od DHCP servera

- Može obnoviti adresu koju je već koristio
- Omogućava "reuse" adresa (host zadržava adresu dok je uključen)
- Olakšava pristup mobilnim korisnicima koji se pridružuju mreži

Pregled DHCP:

- host opciono svima šalje "DHCP discover" poruku (UDP segment na port 67)
- DHCP server opciono odgovara "DHCP offer" porukom
- host zahtijeva IP adresu "DHCP request" porukom
- DHCP server šalje adresu "DHCP ack" porukom

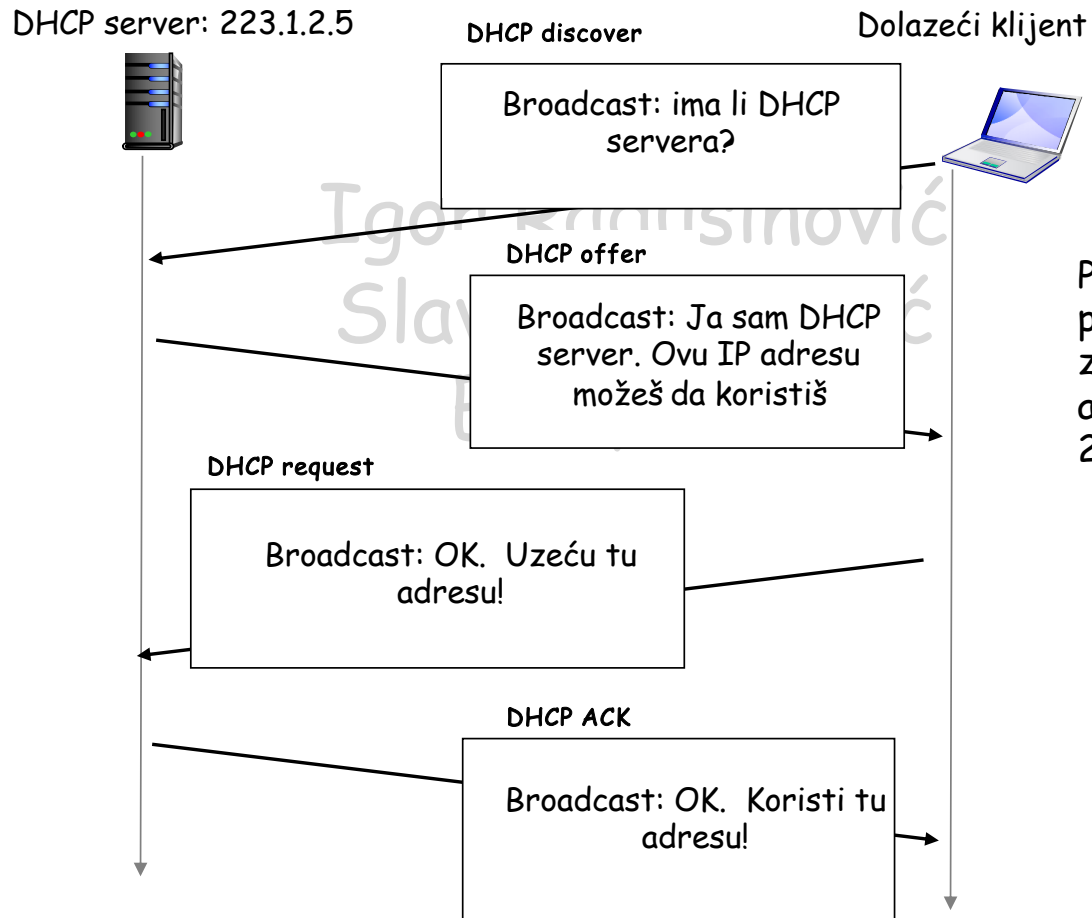
DHCP klient-server scenario



Uobičajeno, DHCP server, smješten unutar rutera, opslužuje sve podmreže na koje je ruter povezan

dolazećem DHCP klijentu treba adresa u ovoj mreži

DHCP klijent-server scenario



Prva dva koraka mogu biti preskočena "ako je klijent zapamtio i želi da koristi ranije alociranu mrežnu adresu" [RFC 2131]

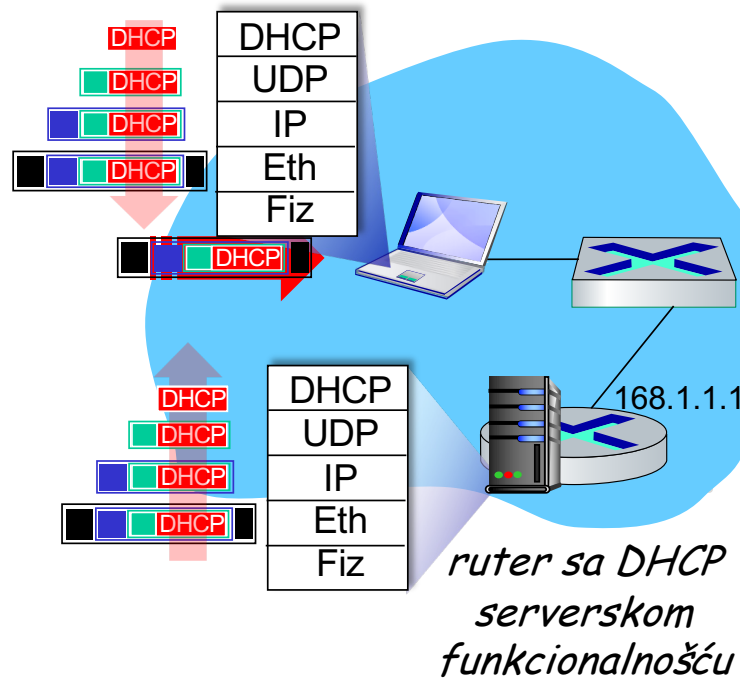
DHCP nudi više od IP adrese

DHCP obezbeđuje više od same alokacije IP adrese u podmreži:

- Adresu *gateway* rutera podmreže
- Ime i IP adresu DNS servera
- *Subnet* masku (indicira mrežni dio adrese)

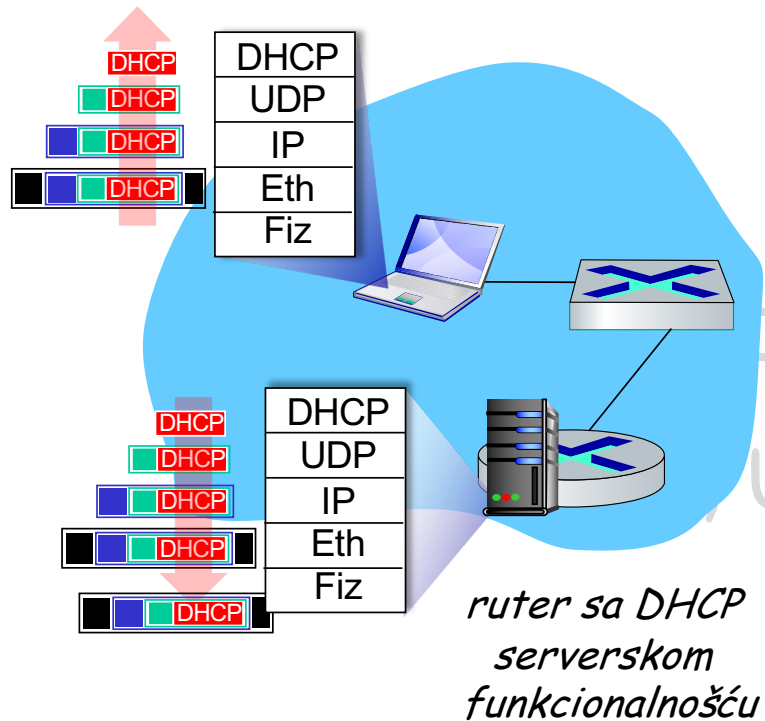
Igor Radausinović
Slavica Tomović
ETF, UCG

DHCP: primjer



- Laptopu je potrebna IP adresa, adresa gateway-a i adresa DNS servera
- Koristi DHCP
- DHCP zahtjev se enkapsulira u UDP segment, pa u IPdatagram, a zatim u IEEE 802.3 Ethernet frejm
- Ethernet frejm se šalje svim interfejsima u LAN-u i prima od strane DHCP servera
- Obavlja se suprotan proces enkapsulaciji

DHCP: primjer



- DHCP server kreira DHCP potvrdu koja sadrži klijentsku IP adresu, IP adresu *gateway* rutera, ime i IP adresu DNS servera
- Frejm se prosleđuje do klijenta koji ga otvara
- Klijentu je poznata IP adresa, ime i IP adresa DNS servera, IP adresa *gateway* rutera

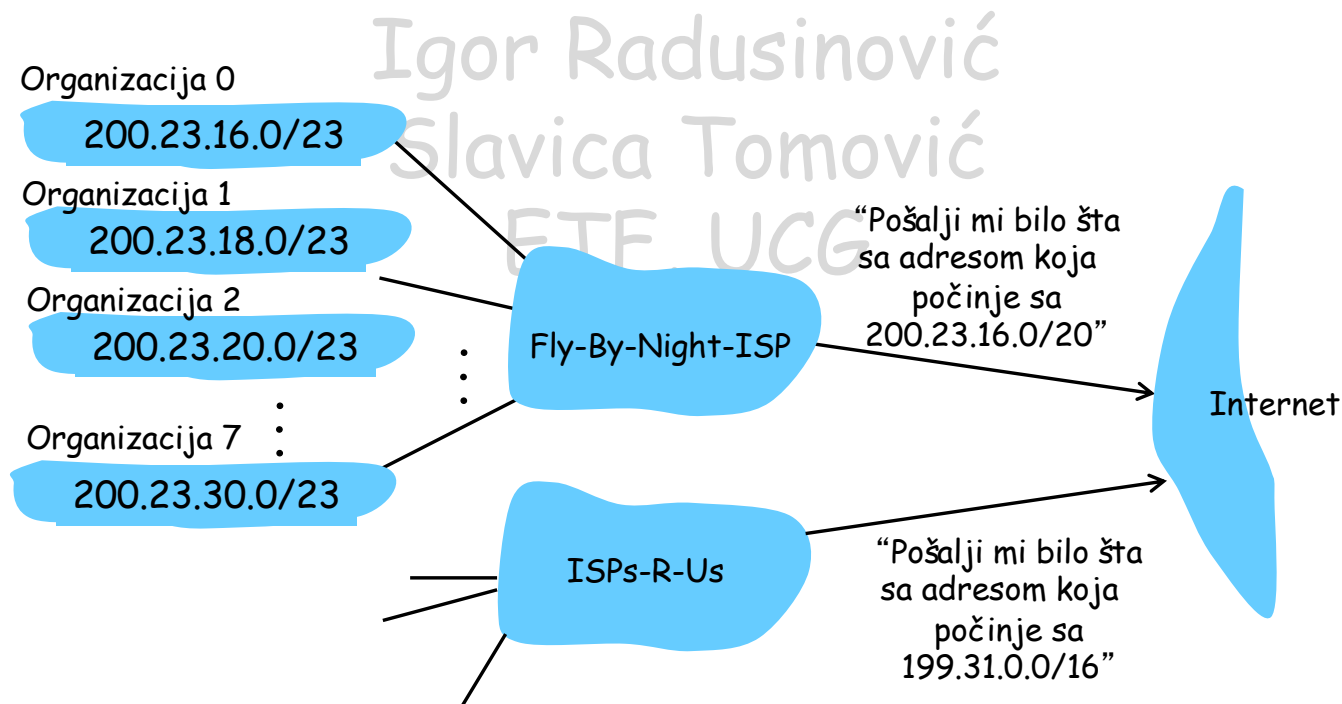
IP adrese: kako dobiti IP adresu?

P: Kako mreža dobija podmrežni dio IP adrese?

ISP-ov blok:	<u>11001000 00010111 00010000 00000000</u>	200.23.16.0/20
Organizacija 0	<u>11001000 00010111 00010000 00000000</u>	200.23.16.0/23
Organizacija 1	<u>11001000 00010111 00010010 00000000</u>	200.23.18.0/23
Organizacija 2	<u>11001000 00010111 00010100 00000000</u>	200.23.20.0/23
...
Organizacija 7	<u>11001000 00010111 00011110 00000000</u>	200.23.30.0/23

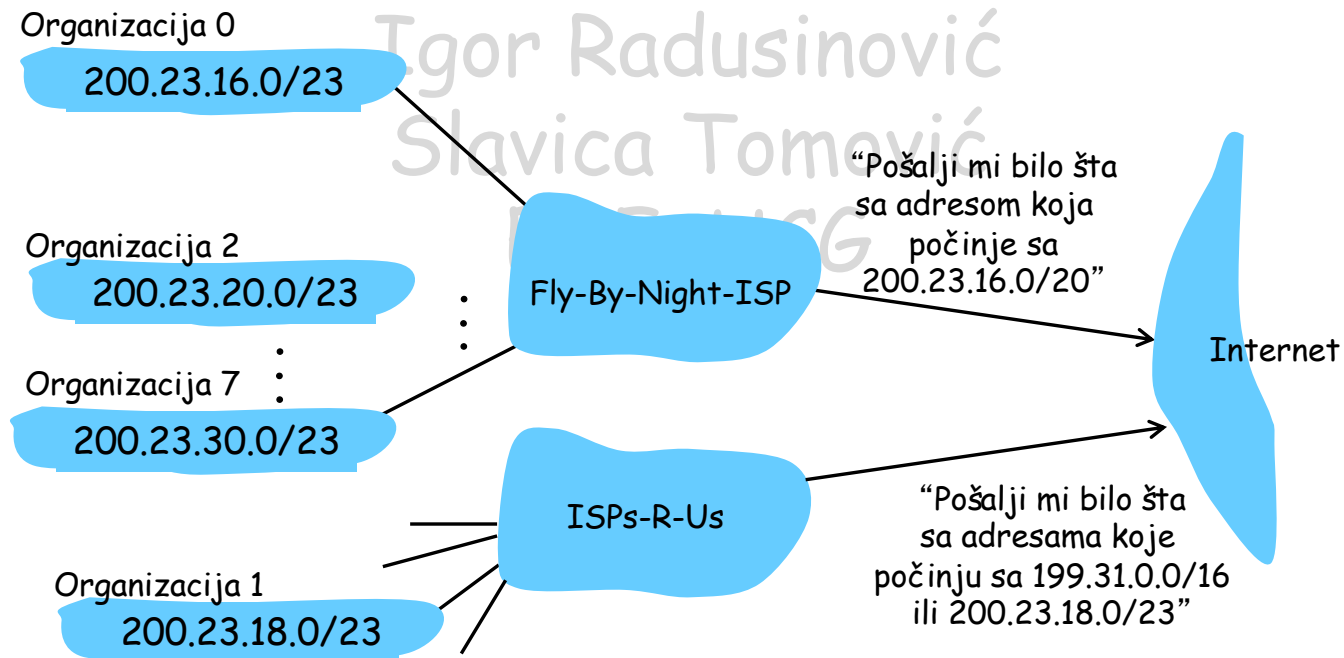
Hijerarhijsko adresiranje: agregacija ruta

Hijerarhijsko adresiranje dozvoljava efikasno oglašavanje informacije potrebne za rutiranje:



Hijerarhijsko adresiranje: specifičnije rute

ISPs-R-Us ima više specifičnih ruta do Organizacije 1



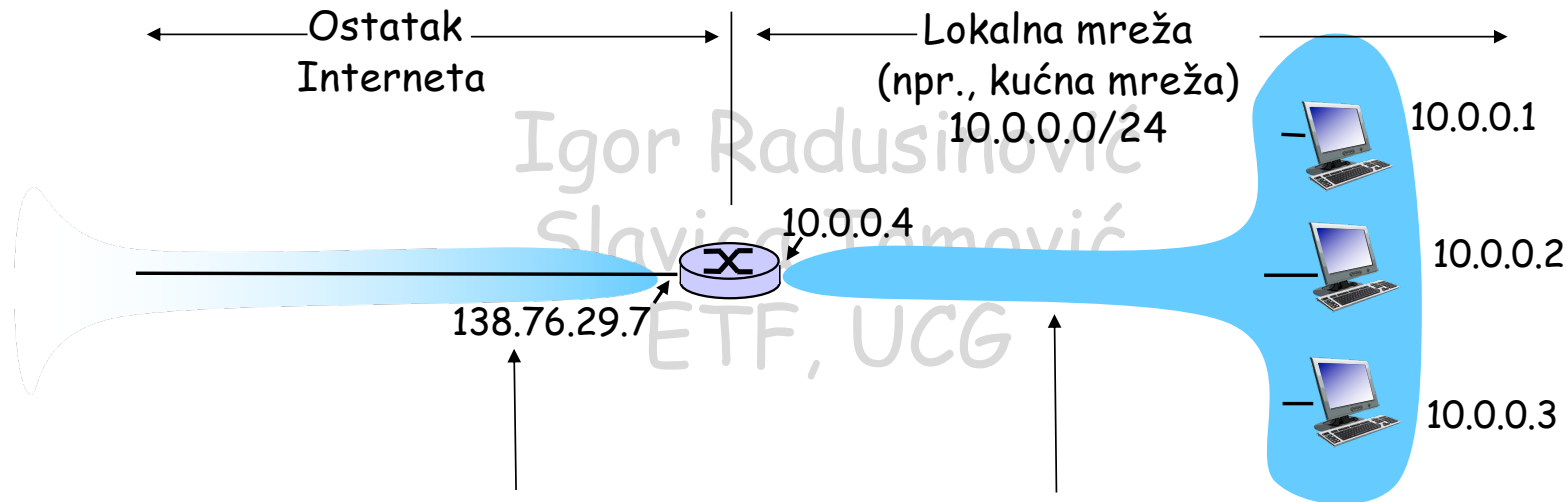
ICANN

Kako ISP dobija svoj blok adresa?

ICANN (Internet Corporation for Assigned Names and Numbers)

- Alocira IP adrese preko 5 regionalnih registara (ARIN, RIPE, APNIC, LACNIC i AFRINIC)
- Upravlja DNS root serverima
- Dodjeljuje imena domena
- Razrešava sporove
- Poslednje IPv4 adrese je dodijelila 2011. godine

NAT: Network Address Translation



Svi datagrami napuštaju lokalnu mrežu imajući istu jedinstvenu izvorišnu adresu NAT IP: 138.76.29.7 ali različite brojeve izvorišnih portova

Datagrami sa izvorima ili destinacijama u ovoj mreži imaju 10.0.0.0/24 adresu za izvor, destinaciju (kao što je uobičajeno)

NAT: Network Address Translation

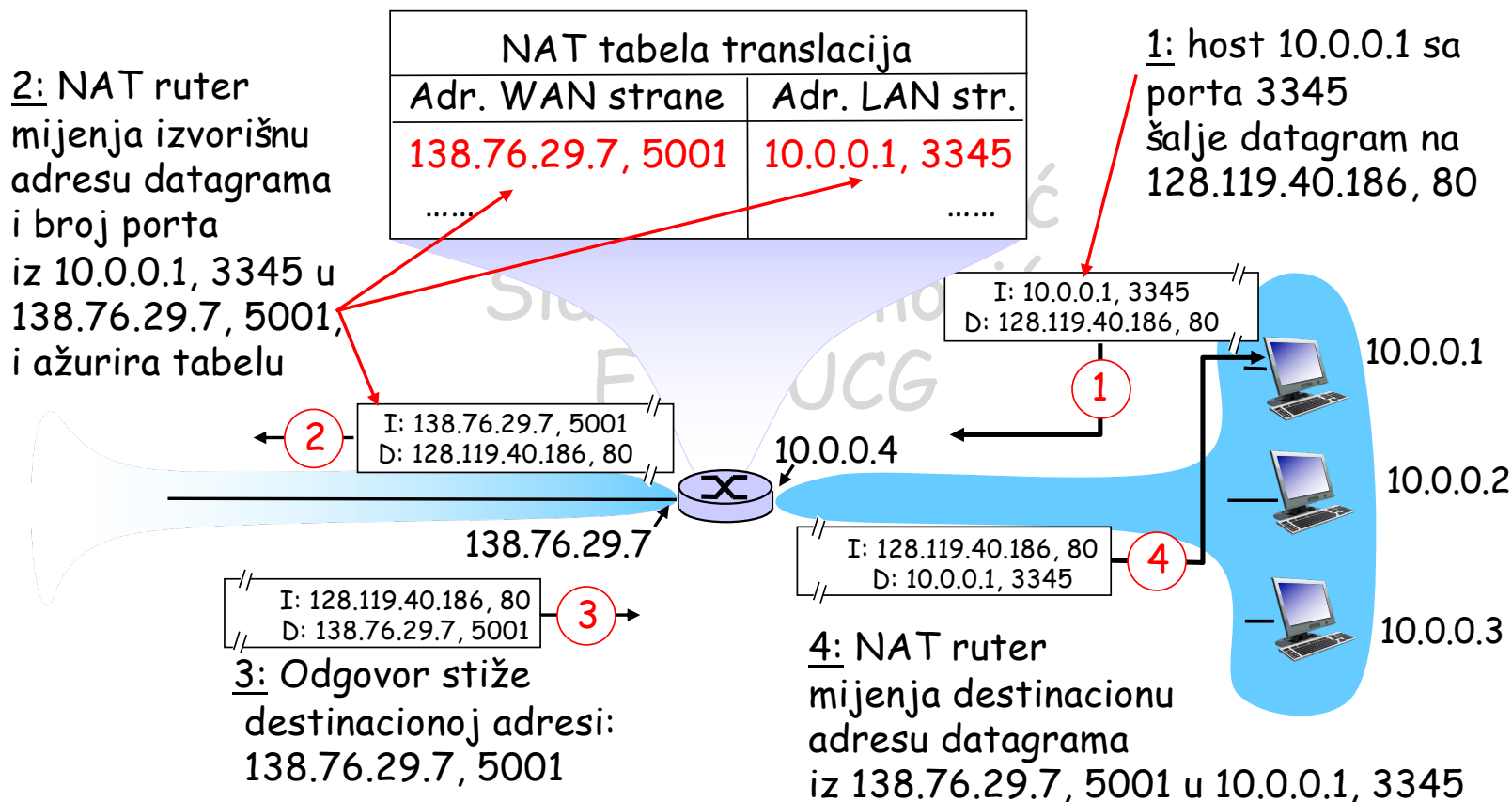
- Lokalna mreža koristi samo jednu javnu IP adresu
 - Nema potrebe za dodjelu opsega adresa od strane ISP (samo jedna IP adresa se koristi za sve uređaje)
 - Mogu mijenjati adrese uređaja u lokalnim mrežama bez obavještanja "ostatka svijeta"
 - Mogu mijenjati ISP bez mijenjanja adresa uređaja u lokalnim mrežama
 - Uređaji u mreži se eksplicitno ne adresiraju, na vidljiv način "ostatku svijeta" (plus u smislu zaštite).

NAT: Network Address Translation

Implementacija: NAT ruter mora:

- ❑ *odlazni datagrami: zamijeniti* (izvorišnu IP adresu, broj port) svakog odlaznog datagrama sa (NAT IP adresom, novim brojem porta)
 - udaljeni klijenti/serveri će odgovoriti korišćenjem (NAT IP adrese, novi broj porta) kao adrese destinacije.
- ❑ *zapamtiti (u NAT tabeli translacija)* svaki (izvorišna IP adresa, broj porta) i (NAT IP adresa, novi broj porta) u vidu translacionog para
- ❑ *dolazeći datagrami: zamijeniti* (NAT IP adresu, novi broj porta) u polju destinacije svakog dolaznog datagrama sa odgovarajućim (izvorišna IP adresa, broj porta) smještenim u NAT tabeli

NAT: Network Address Translation



NAT: Network Address Translation

- 16-bitno polje broja porta:
 - 65536 simultanih veza sa jednom adresom sa LAN strane!
- NAT je kontraverzan:
 - Ruteri bi trebali vršiti obradu samo do nivoa 3
 - Narušava prirodu od kraja do kraja
 - NAT mora biti uzet u obzir od strane dizajnera aplikacija, npr., P2P aplikacija
 - Oskudica adresa se može ublažiti i prije upotrebe IPv6
 - Broj porta se posredno koristi za adresiranje računara
- NAT se masovno koristi u kućnim, kompanijskim, 4G/5G mrežama,...

IPv6

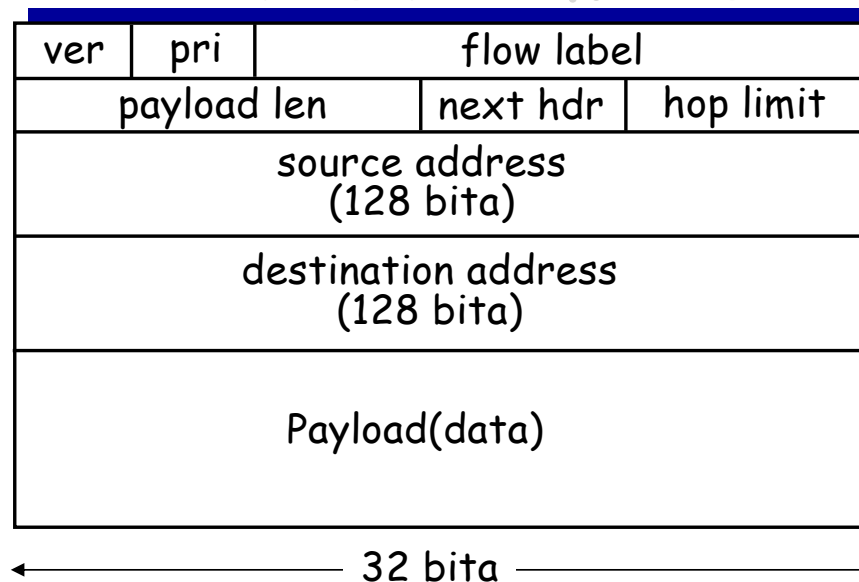
- ❑ Inicijalna motivacija: 32-bitni adresni prostor će vrlo brzo u potpunosti biti dodijeljen.
- ❑ Dodatna motivacija:
 - Format zaglavlja pomaže obradi/prosleđivanju
 - Promjene zaglavlja uključuju QoS
 - Omogućava nivou mreže da kreira saobraćajne tokove
- ❑ IPv6 format datagrama:
 - Zaglavlje fiksne dužine od 40B
 - Nije dozvoljena fragmentacija

IPv6 zaglavlje (nastavak)

Priority: identifikuje prioritet između datagrama u "toku"

Flow Label: identifikuje datagrame u istom "toku" (koncept "toka" nije precizno definisan).

Next header: identifikuje protokol višeg nivoa čiji su podaci u korisnom dijelu paketa



Druge izmjene u odnosu na IPv4

- **Checksum:** potpuno uklonjena kako bi se smanjila obrada na svakom hopu
- **Options:** dozvoljene, ali van zaglavlja, indicirano sa “Next Header” poljem
- **ICMPv6:** nova verzija ICMP
 - dodatni tipovi poruka, npr. “Packet Too Big”
 - funkcija upravljanja multicast grupama

IPv6 adresiranje

- ❑ RFC 4291 (Februar 2006)
- ❑ 128 bita
- ❑ Predstavlja se u vidu 8 grupa po četiri heksadecimalna broja
- ❑ X:X:X:X:X:X:X:X
- ❑ 1111111000011010 0100001010111001 00000000000011011
00000000000000000 00000000000000000 0001001011010000
00000000001011011 0000011010110000
- ❑ FE1A:42B9:001B:0000:0000:12D0:005B:06B0
- ❑ FE1A:42B9:001B:0:0:12D0:005B:06B0 (grupa od četiri 0 se može prikazati jednom 0)
- ❑ FE1A:42B9:1B::12D0:5B:6B0 (više susjednih grupa od četiri 0 se prikazuje sa ::, koja se može pojaviti samo jednom)
- ❑ 2001:4C::50:0:0:741
- ❑ 2001:004C::0050:0000:0000:0741
- ❑ 2001:004C:0000:0000:0050:0000:0000:0741

IPv6 adresiranje

IPv6 prefiks:

- ❑ Slično kao kod IPv4: IPv6adresa/dužina prefiksa
- ❑ 200C:001b:1100:0:0:0:0:0/40 ili 200C:1b:1100::/40
- ❑ Koristi se CIDR rutiranje

Slavica Tomović
ETF, UCG

IPv6 adresiranje

Tri tipa adresa:

- *unicast* - označava adresu jednog interfejsa na uređaju
- *multicast* - označava grupu interfejsa (uglavnom na različitim računarima) tako da paket poslat na ovu adresu stiže do svih adresiranih interfejsa koji pripadaju istom multicast stablu
- *anycast* - paket poslat na *anycast* adresu stiže do jednog od interfejsa opisanih ovom adresom (po pravilu najbližeg definisano pojmom rastojanja u protokolu rutiranja)

Nema više broadcast adrese. Njenu funkciju preuzima multicast adresa, čime se stvara mogućnost korišćenja adresa koje se sastoje od svih nula i jedinica.

IPv6 adresiranje

Dodjela IPv6 adresa:

- Kombinacija alokacije i automatske dodjele.
- Prvih nekoliko bita (Format prefiks) se koriste za alokaciju adresa.

Tip adrese	Binarni prefiks	IPv6 notacija
Unspecified	00...0 (128 bita)	::/128
Loopback	00...1 (128 bita)	::1/128
Multicast	11111111	FF00::/8
Link-Local unicast	1111111010	FE80::/10
Global Unicast	(sve ostalo)	

IPv6 adresiranje

Unspecified Adresa

- ❑ Adresa sa svim nulama: 0:0:0:0:0:0:0:0.
- ❑ Označava da IPv6 adresa nije definisana za interfejs. Datagrame sa ovom odredišnom adresom ne prosleđuje IPv6 ruter.

Loopback Adresa

- ❑ IPv6 loopback adresa je 0:0:0:0:0:0:0:1.
- ❑ Njeno korišćenje je slično korišćenju IPv4 loopback adrese 127.0.0.1.

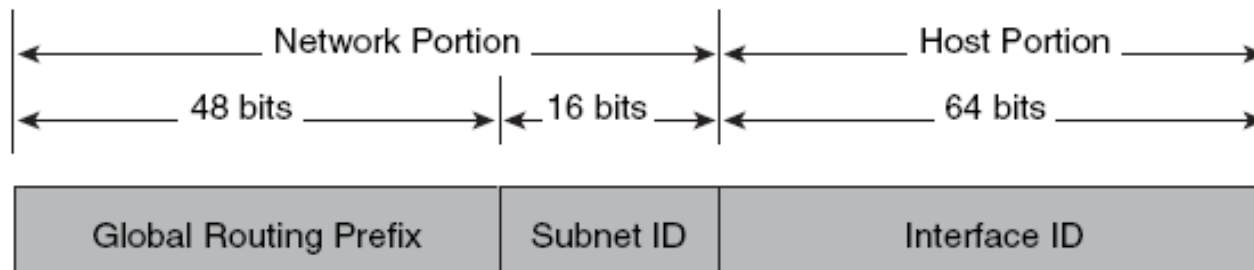
IPv4 mapirane adrese:

- ❑ Prvih 80 bita su nule
- ❑ Sledećih 16 bita su jedinice
- ❑ Ostalih 32 bita su jednaki bitima odgovarajuće IPv4 adrese
- ❑ 100.1.1.1 = 01100100 00000001 00000001 00000001=6401:0101
- ❑ 0000:0000:0000:0000:0000:FFFF:6401:0101 ili
- ❑ 0:0:0:0:0:FFFF:6401:0101 ili ::FFFF:6401:0101 ili ::FFFF:100.1.1.1

IPv6 adresiranje

IPv6 globalna adresa

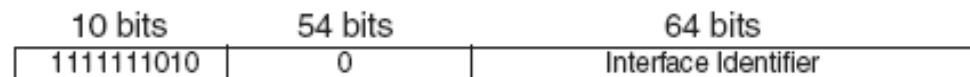
- ❑ Koristi se za povezivanje na javnu mrežu.
- ❑ Ove unicast adrese su jedinstvene i na bazi njih ruteri mogu prosleđivati pakete.
- ❑ RFC 2374, RFC 3587
- ❑ Globalni prefiks rutiranja (generalno je dužine 48 bita), identifikator subneta (dužine 16 bita) i identifikator interfejsa (dužine 64 bita)



IPv6 adresiranje

IPv6 *link-local* adresa

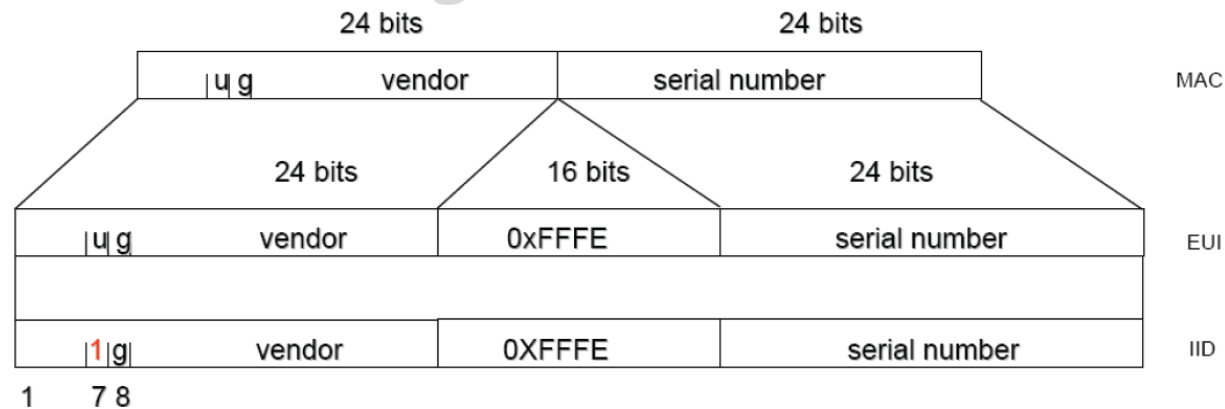
- ❑ Koriste se za adresiranje na jednom linku (mrežni segment bez rutera, npr. LAN).
- ❑ Značajne samo za čvorišta u okviru jedne LAN mreže.
- ❑ Ruteri ne prosleđuju pakete sa ovim izvorišnim ili odredišnim adresama van LAN-a.
- ❑ Koriste se za automatsko dodjeljivanje adresa, otkrivanje susjeda ili kada nema rutera u mreži.
- ❑ Ove adrese su identifikovane sa FE8 heksadecimalnim brojevima (10 bita) na početku.
- ❑ Konfiguriraju se automatski ili manuelno.
- ❑ 111111010 + 54 nule i 64-bitni identifikator interfejsa.
- ❑ Identifikator interfejsa se dobija automatski, komunikacijom sa drugim čvorištem na linku.



IPv6 adresiranje

Identifikator interfejsa

- U modifikovanom EUI-64 formatu
- Jedinствен unutar jedne podmreže



- u=1, adresa se formira na bazi MAC adrese (global scope)
- u=0, adresa se formira na slučajan način (local scope)

IPv6 adresiranje

IPv6 *multicast* adresa

- Ista funkcija kao IPv4 multicast adresa

11111111	Flag	Scope	Group ID
8 bits	4 bits	4 bits	112 bits

FF00::/8 addresses are multicast addresses

Flag bits: 0 R P T

T = 0 permanent addresses (managed by IANA)

T = 1 transient multicast addresses

• **P = 1** derived from unicast prefix (RFC3306)

• **R = 1** embedded RP addresses (I-D)

Scope

0 : Reserved

1 : Interface-local

2 : Link-local

3 : Subnet-local

4 : Admin-local

5 : Site-local

8 : Organization-local

E : Global

F : Reserved

Glava 5: Mrežni nivo

5.1 Uvod

5.2 IP (Internet Protocol)

- Format datagrama
- IP adresiranje

5.3 Rutiranje

- *Link state*
- *Distance Vector*
- Hijerarhijsko rutiranje
- Protokoli rutiranja

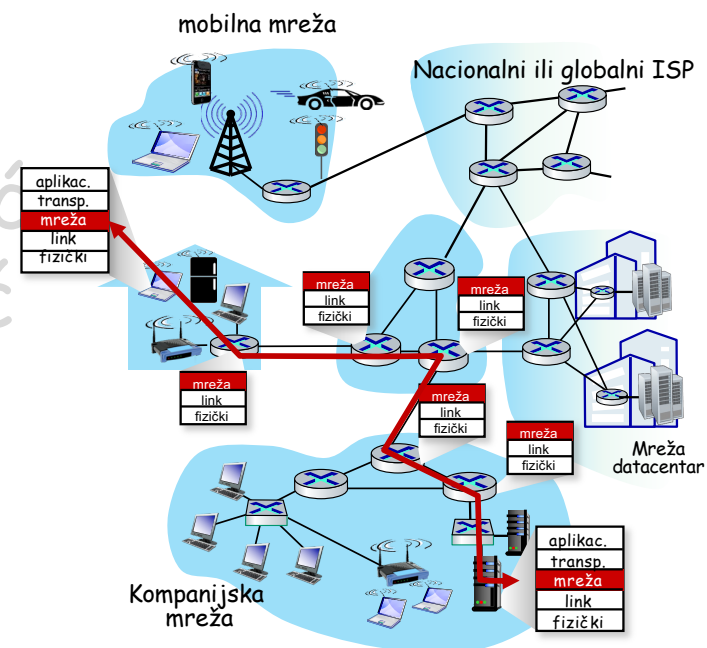
5.4 Ruter

Igor Radusinović
Slavica Tomović
ETF, UCG

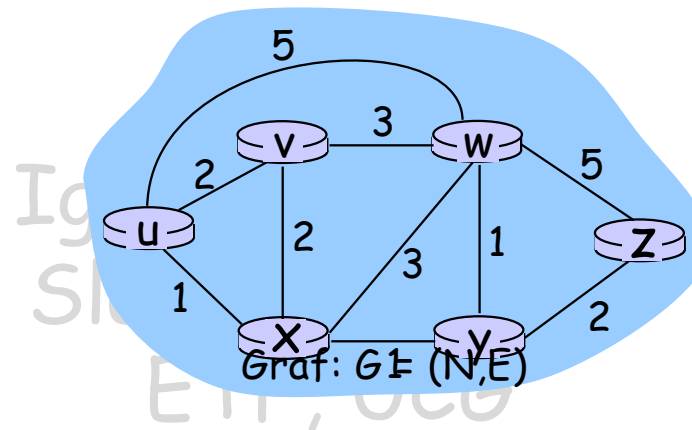
Protokoli rutiranja

Protokol rutiranja određuju rutu između izvorišnog i odredišnog hosta koja sadrži jedan ili više rutera.

- Put predstavlja niz rutera preko kojih se paket može prenijeti od izvora do destinacije
- Ruta je put koji je po nekom kriterijumu najbolji (npr. najmanji broj rutera)
- Rutiranje je jedan od 10 najvećih izazova na Internetu.



Abstrakcija pomoću grafa



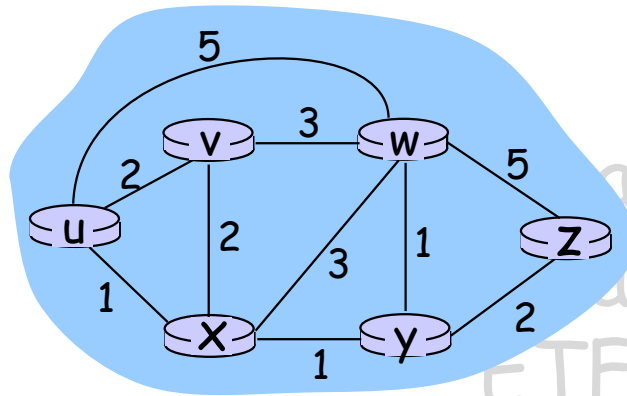
$N = \text{skup rutera} = \{ u, v, w, x, y, z \}$

$E = \text{skup linkova} = \{ (u,v), (u,x), (v,x), (v,w), (x,w), (x,y), (w,y), (w,z), (y,z) \}$

Napomena: Abstrakcija pomoću grafa je korisna i u drugim mrežnim kontekstima.

Primjer: P2P, gdje je N skup peer-ova, a E skup TCP konekcija

Abstrakcija pomoću grafa: težinski faktori



• $c(x,x')$ = težinski faktor (cost) linka (x,x')

- npr., $c(w,z) = 5$

• težinski faktor može biti uvijek 1, ili recipročan protoku, ili proporcionalan kašnjenju

Težinski faktor puta $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_p) = c(x_1, x_2) + c(x_2, x_3) + \dots + c(x_{p-1}, x_p)$

Pitanje: Koji je put sa najmanjim težinskim faktorom između u i z ?

Algoritam rutiranja je algoritam koji pronalazi put sa najmanjim težinskim faktorom

Klasifikacija algoritama rutiranja

Globalna ili decentralizovana informacija?

Globalna:

- ❑ svi ruteri posjeduju kompletnu topologiju mreže sa informacijama o težinskim faktorima linkova
- ❑ *link state algoritmi*

Decentralizovani:

- ❑ ruter poznaje fizički povezane susjede i težinske faktore linkova do susjeda
- ❑ iterativni proces izračunavanja, razmjena informacija sa susjedima
- ❑ *distance vector algoritmi*

Statički ili dinamički?

Statički:

- ❑ Rute se sporo mijenjaju

Dinamički:

- ❑ Rute se mijenjaju mnogo brže
 - periodični *update*
 - kao odgovor na promjene težinskih faktora linkova

Link-State algoritam rutiranja

Dijkstra algoritam

- Centralizovan algoritam kod koga su mrežna topologija i težinski faktori linkova poznati svim čvorištima
 - Dobijeni preko *link state broadcast* poruke
 - Sva čvorišta imaju istu informaciju
- Proračunava puteve najmanjih težinskih faktora od jednog čvorišta ("izvor") do svih ostalih čvorova
 - generiše tabelu rutiranja za to čvorište
- iterativni: poslije k iteracija, poznat je put sa najmanjim težinskim faktorom do k destinacija

Notacija:

- $c_{x,y}$: težinski faktor linka od čvorišta x do y koji ima beskonačnu vrijednost ukoliko čvorišta nijesu susjedi
- $D(A)$: trenutna vrijednost težinskog faktora puta od izvorišta do destinacije A
- $p(A)$: sledeće čvorište duž puta od izvorišta do čvorišta A , koje je susjed A
- N' : skup čvorišta čiji su najniži težinski faktori puta poznati

Dijsktra Algoritam (na čvoru u)

1 *Inicijalizacija:*

2 $N' = \{u\}$

3 Za sva čvorišta A

4 Ako je A susjed čvorištu u

5 tada $D(A) = c_{u,A}$

6 else $D(A) = \infty$

7

8 *Petlja*

9 Pronađi B koje nije u N' tako da je $D(B)$ minimalno

10 dodati B skupu N'

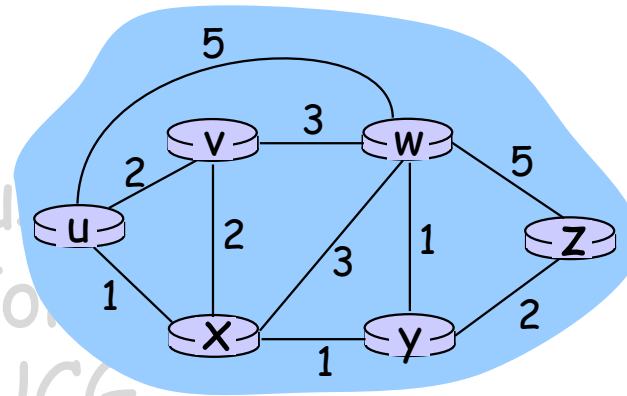
11 update $D(A)$ za sve A susjede B koji nijesu u N' :

12 $D(A) = \min(D(A), D(B) + c_{B,A})$

13 /* novi težinski faktori za A su ili stari težinski faktori za A ili su poznati

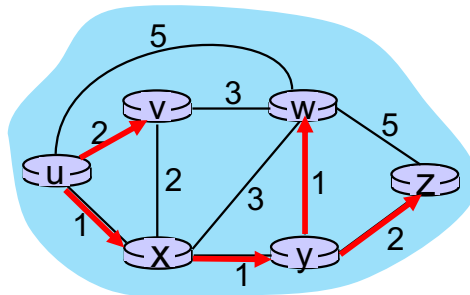
14 najmanji težinski faktori puta do B plus težinski faktori od B do A */

15 *dok sva čvorišta ne postanu članovi skupa N'*



Dijkstra algoritam

Step	N'	$D(v), p(v)$	$D(w), p(w)$	$D(x), p(x)$	$D(y), p(y)$	$D(z), p(z)$
0	u	2, u	5, u	1, u	∞	∞
1	u, x	2, u	4, x		2, x	∞
2	u, x, y	2, u	3, y			4, y
3	u, x, y, v		3, y			4, y
4	u, x, y, v, w					4, y
5	u, x, y, v, w, z					



Inicijalizacija (korak 0)

Za sve A : ako je A susjed tada je $D(A) = c_{u,A}$

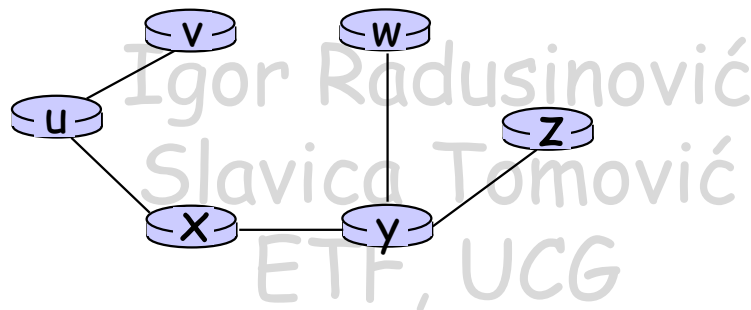
Pronaći A sa minimalnim $D(A)$ koji nije u N'
dodaj A u N'

ažurirati $D(B)$ za sve B susjede A koji nisu u N' :

$$D(B) = \min(D(B), D(A) + c_{A,B})$$

Dijkstra algoritam (čvorište u)

Rezultantna *shortest-path* topologija iz čvorišta u:

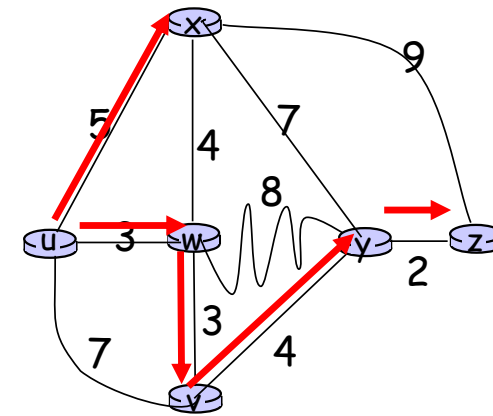


Rezultantna tabela prosleđivanja u čvorištu u:

destinacija	link
v	(u,v)
x	(u,x)
y	(u,x)
w	(u,x)
z	(u,x)

Dijkstra algoritam: primjer

Korak	N'	$D(v), p(v)$	$D(w), p(w)$	$D(x), p(x)$	$D(y), p(y)$	$D(z), p(z)$
0	u	7, u	3, u	5, u	∞	∞
1	uw	6, w		5, u	11, w	∞
2	uwX	6, w			11, w	14, x
3	uwXv				10, v	14, x
4	uwXvy					12, y
5	uwXvyz					



Napomene:

- Pronaći najkraći put praćenjem prethodnih čvorišta
- Linkovi mogu biti prekinuti

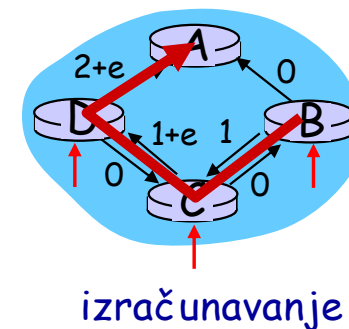
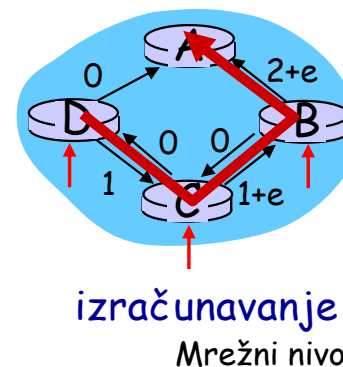
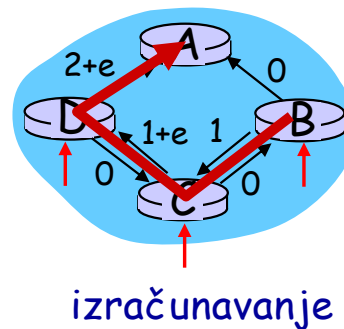
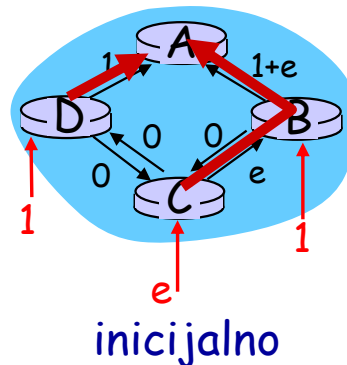
Dijkstra's algoritam, diskusija

Kompleksnost algoritma: n čvorišta

- Tokom svake od n iteracija je potrebno provjeriti sva čvorišta koja nijesu u N'
- $n*(n+1)/2$ komparacija tako da je kompleksnost proporcionalna n^2
- Moguće su efikasnije implementacije čija su kompleksnosti proporcionalne $n \log n$

Kompleksnost poruka

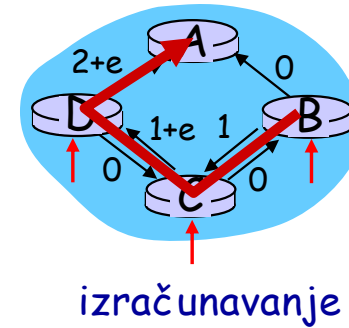
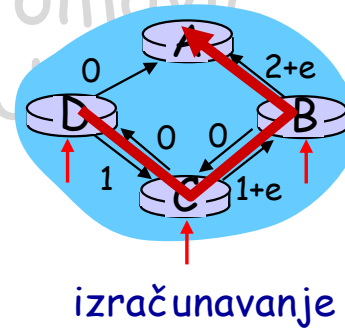
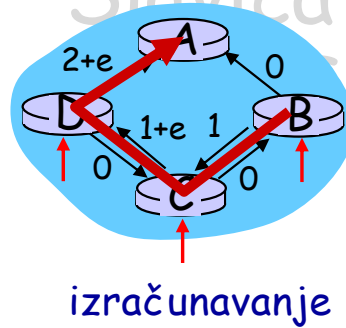
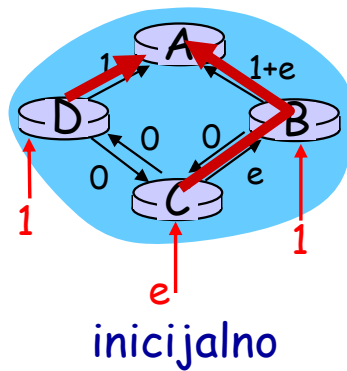
- Svaki ruter mora poslati svim ruterima stanje svojih linkova
- Poruka svakog rutera mora preći n linkova



Dijkstra's algorithm, diskusija

Moguće su oscilacije:

- npr., težinski faktor linka = količina prenešenog saobraćaja



Distance Vector algoritam (1)

Bellman-Ford jednačina (dinamičko programiranje)

Neka je

$D_x(y)$:= težinski faktor puta sa najmanjim troškovima od x do y

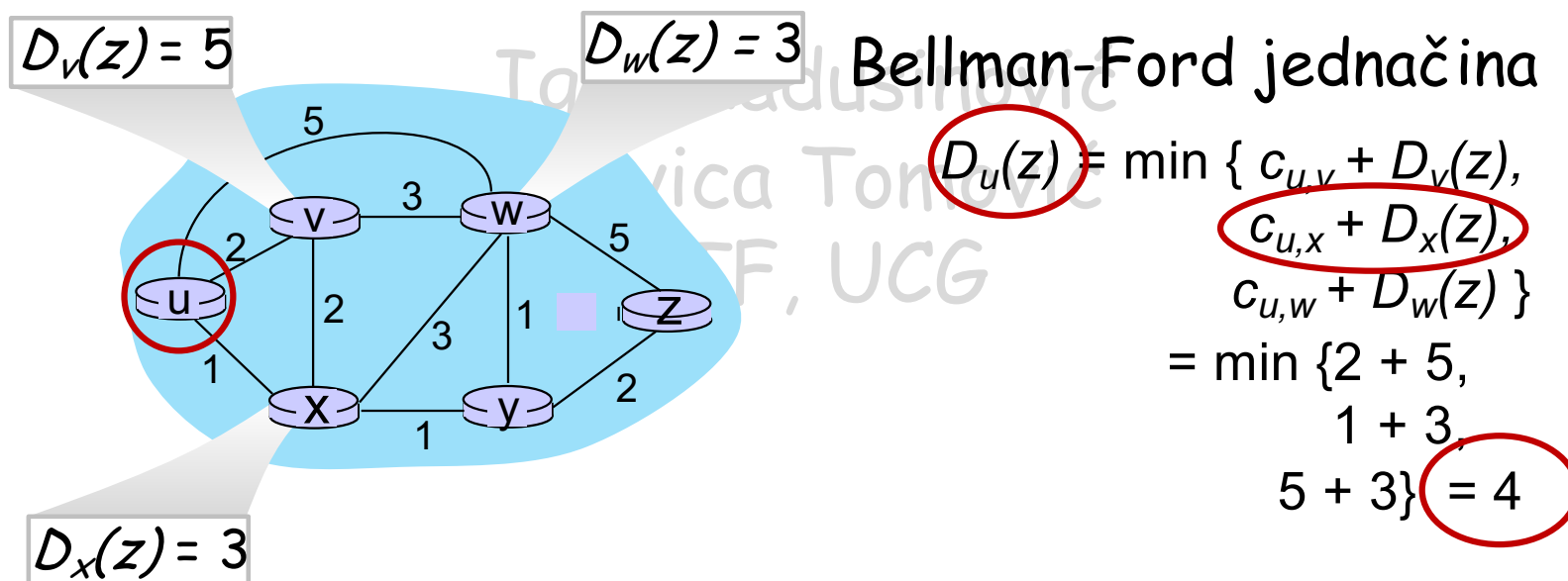
Tada

$$D_x(y) = \min_v \{c_{x,v} + D_v(y)\}$$

Gdje se \min_v uzima u odnosu na sve susjede v rutera x

Distance Vector algoritam (2)

Neka susjedi rutera u (x,v,w) znaju za destinaciju z:



Čvorište koje dostigne minimum je sledeći korak (hop) na najkraćem putu → tabela prosleđivanja

Distance Vector algoritam (3)

- $D_x(y)$ predstavlja procjenu najmanjeg težinskog faktora od x do y
- *Distance vector*: $D_x = [D_x(y): y \in N]$
- Čvorište x poznaje težinske faktore do svakog svog susjeda v : $c(x,v)$
- Čvorište x nadzire $D_x = [D_x(y): y \in N]$
- Čvorište x takođe nadzire *distance vector*-e svojih susjeda
 - Za svakog susjeda v , x nadzire $D_v = [D_v(y): y \in N]$

Distance vector algoritam (4)

Osnovna ideja:

- Svako čvorište periodično šalje procjenu svog *distance vector*-a svojim susjedima
- Kada čvorište x primi novu DV estimaciju od svog susjeda v , ažurira svoj sopstveni DV korišćenjem B-F jednačine:

$$D_x(y) \leftarrow \min_v \{c_{x,v} + D_v(y)\} \quad \text{za svako čvorište } y \in N$$

- U većem broju slučajeva, pod normalnim okolnostima, procjena $D_x(y)$ konvergira stvarnom najmanjem težinskom faktoru $d_x(y)$

Distance Vector algoritam (5)

Iterativni, asinhron:

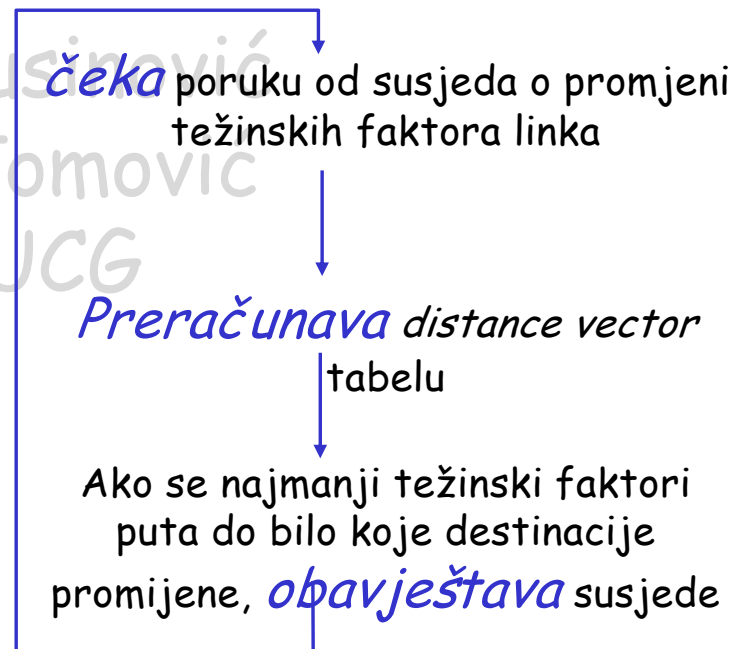
svaka lokalna iteracija je uzrokovana:

- lokalni težinski faktori linka su promjenljivi
- porukama od susjeda: najmanji težinski faktori puta su promijenjeni

Distribuiran:

- svako čvorište obavještava susjeda *samo* kada se njegov put sa najmanjim težinskim faktorom promijeni
 - susjedi informišu susjede ako je to potrebno
 - nema akcije bez dobijanja obavještenja

Svako čvorište:



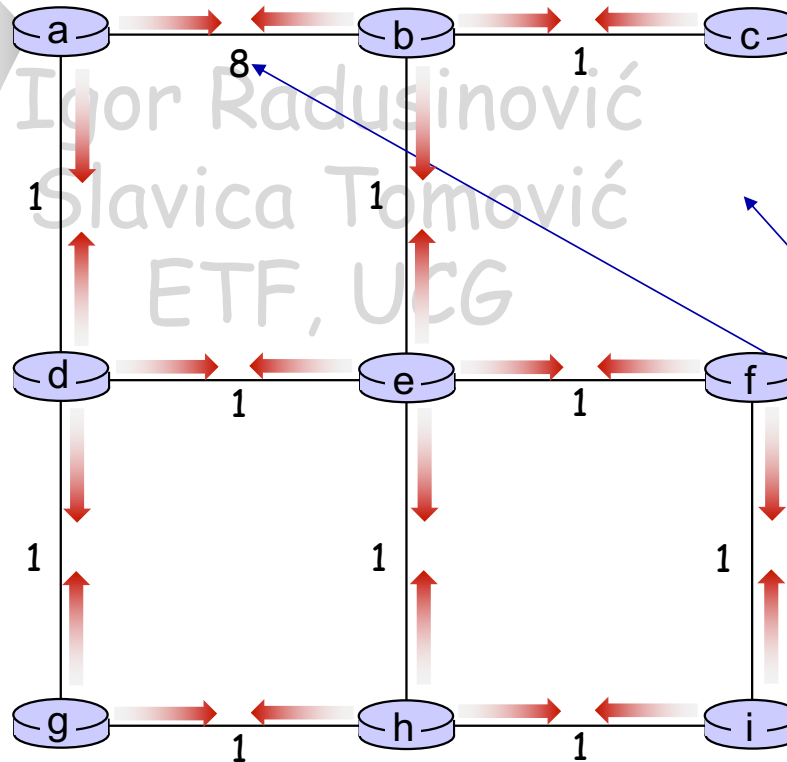
Distance vector: primjer



t=0

- Svi ruteri imaju procijenjena rastojanja do najbližih rutera
- Svi ruteri šalju svojim susjedima distance vector

DV u a:
$D_a(a)=0$
$D_a(b)=8$
$D_a(c)=\infty$
$D_a(d)=1$
$D_a(e)=\infty$
$D_a(f)=\infty$
$D_a(g)=\infty$
$D_a(h)=\infty$
$D_a(i)=\infty$



Nekoliko nesimetričnosti:

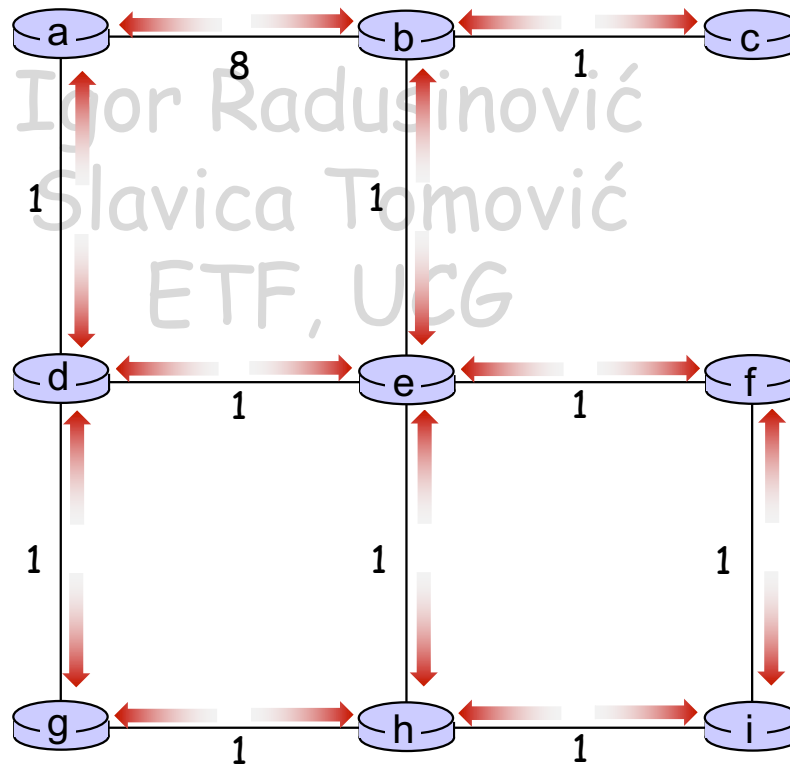
- Nedostaje link
- Veći težinski faktor

Distance vector primjer: iteracija



t=1

Svi ruteri:
Primanju DV-ove
od svojih susjeda
Izračunavaju svoje
DV
Šalju svoj DV
susjedima



Distance vector primjer: iteracija



$t=1$

Svi ruteri:

Primanju DV-ove od svojih susjeda

Izračunavaju svoje DV

Šalju svoj DV susjedima

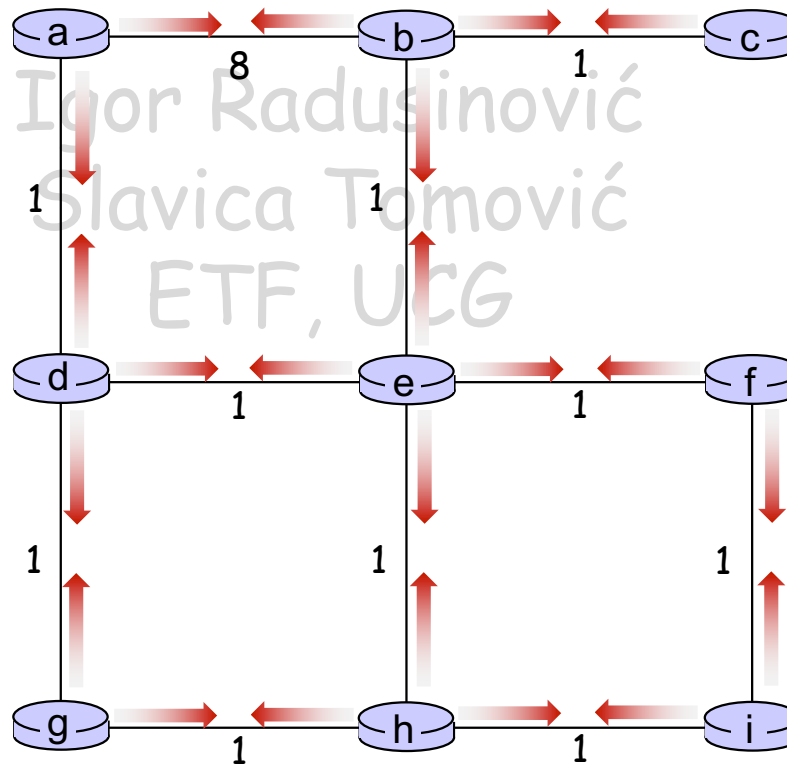


Distance vector primjer: iteracija



t=1

Svi ruteri:
Primanju DV-ove od
svojih susjeda
Izračunavaju svoje DV
Šalju svoj DV
susjedima

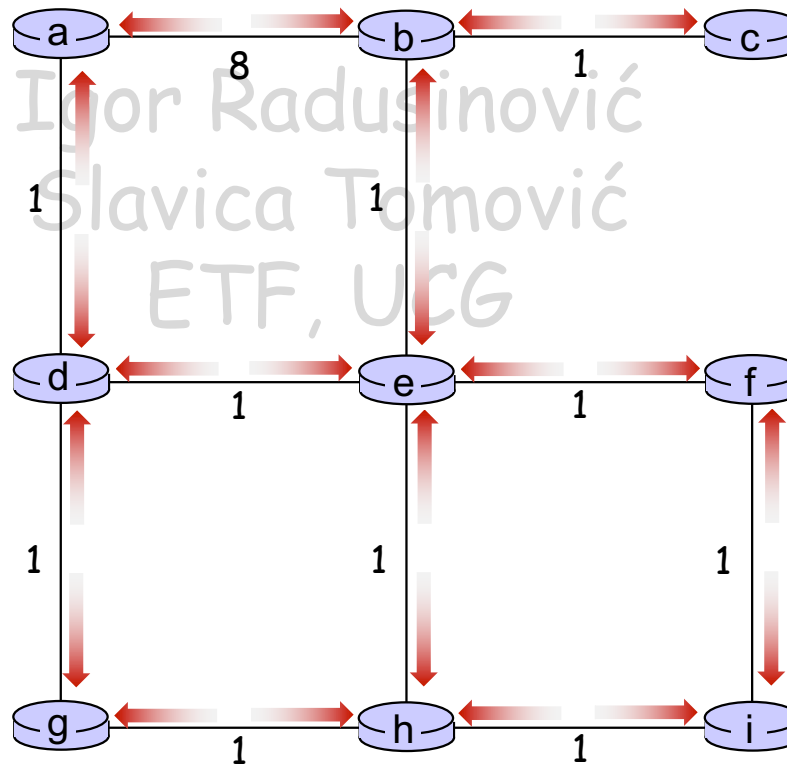


Distance vector primjer: iteracija



t=2

Svi ruteri:
Primanju DV-ove od
svojih susjeda
Izračunavaju svoje DV
Šalju svoj DV
susjedima



Distance vector primjer: iteracija



t=2

Svi ruteri:

Primanju DV-ove od svojih susjeda

Izračunavaju svoje DV

Šalju svoj DV susjedima

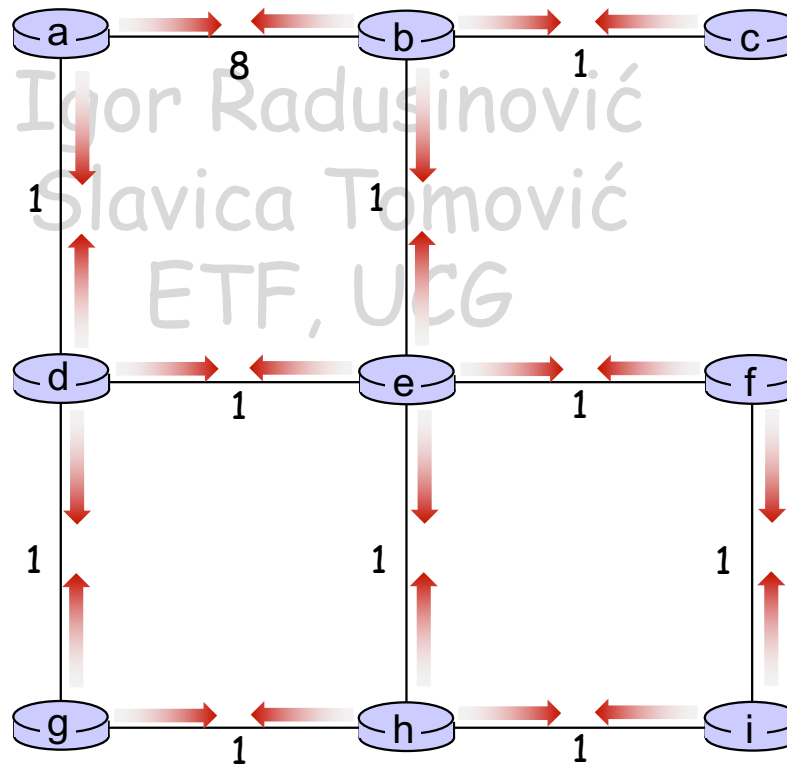


Distance vector primjer: iteracija



t=2

Svi ruteri:
Primanju DV-ove od
svojih susjeda
Izračunavaju svoje
DV
Šalju svoj DV
susjedima



Distance vector primjer: iteracija

.... i tako dalje

Igor Radušinović

Sada treba vidjeti kako izgleda izračunavanje u ruterima

Slavica Tomović

ETF, UCG

Distance vector primjer:



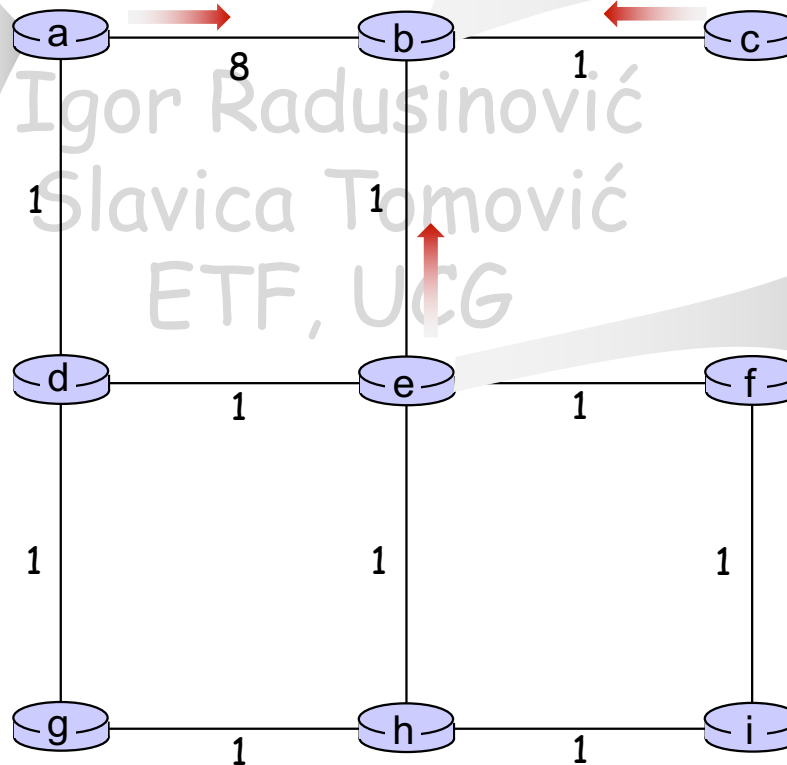
t=1

- b prima DV-ove od a, c, e

DV u a:	
$D_a(a) = 0$	
$D_a(b) = 8$	
$D_a(c) = \infty$	
$D_a(d) = 1$	
$D_a(e) = \infty$	
$D_a(f) = \infty$	
$D_a(g) = \infty$	
$D_a(h) = \infty$	
$D_a(i) = \infty$	

DV u b:	
$D_b(a) = 8$	$D_b(f) = \infty$
$D_b(c) = 1$	$D_b(g) = \infty$
$D_b(d) = \infty$	$D_b(h) = \infty$
$D_b(e) = 1$	$D_b(i) = \infty$

DV u c:	
$D_c(a) = \infty$	
$D_c(b) = 1$	
$D_c(c) = 0$	
$D_c(d) = \infty$	
$D_c(e) = \infty$	
$D_c(f) = \infty$	
$D_c(g) = \infty$	
$D_c(h) = \infty$	
$D_c(i) = \infty$	



DV u e:	
$D_e(a) = \infty$	
$D_e(b) = 1$	
$D_e(c) = \infty$	
$D_e(d) = 1$	
$D_e(e) = 0$	
$D_e(f) = 1$	
$D_e(g) = \infty$	
$D_e(h) = 1$	
$D_e(i) = \infty$	

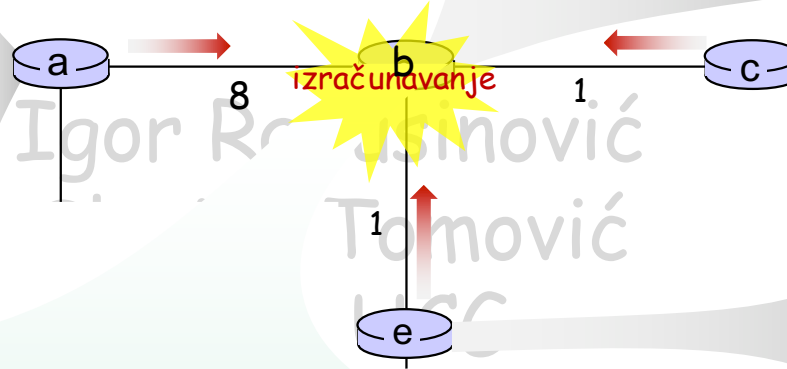
Distance vector primjer:



t=1

- b prima DV-ove od a, c, e i računa:

DV u a:
$D_a(a)=0$
$D_a(b)=8$
$D_a(c)=\infty$
$D_a(d)=1$
$D_a(e)=\infty$
$D_a(f)=\infty$
$D_a(g)=\infty$
$D_a(h)=\infty$
$D_a(i)=\infty$



DV u b:	
$D_b(a)=8$	$D_b(f)=\infty$
$D_b(c)=1$	$D_b(g)=\infty$
$D_b(d)=\infty$	$D_b(h)=\infty$
$D_b(e)=1$	$D_b(i)=\infty$

DV u c:
$D_c(a)=\infty$
$D_c(b)=1$
$D_c(c)=0$
$D_c(d)=\infty$
$D_c(e)=\infty$
$D_c(f)=\infty$
$D_c(g)=\infty$
$D_c(h)=\infty$
$D_c(i)=\infty$

DV u e:
$D_e(a)=\infty$
$D_e(b)=1$
$D_e(c)=\infty$
$D_e(d)=1$
$D_e(e)=0$
$D_e(f)=1$
$D_e(g)=\infty$
$D_e(h)=1$
$D_e(i)=\infty$

$$D_b(a) = \min\{c_{b,a}+D_a(a), c_{b,c}+D_c(a), c_{b,e}+D_e(a)\} = \min\{8, \infty, \infty\} = 8$$

$$D_b(c) = \min\{c_{b,a}+D_a(c), c_{b,c}+D_c(c), c_{b,e}+D_e(c)\} = \min\{\infty, 1, \infty\} = 1$$

$$D_b(d) = \min\{c_{b,a}+D_a(d), c_{b,c}+D_c(d), c_{b,e}+D_e(d)\} = \min\{9, 2, \infty\} = 2$$

$$D_b(e) = \min\{c_{b,a}+D_a(e), c_{b,c}+D_c(e), c_{b,e}+D_e(e)\} = \min\{\infty, \infty, 1\} = 1$$

$$D_b(f) = \min\{c_{b,a}+D_a(f), c_{b,c}+D_c(f), c_{b,e}+D_e(f)\} = \min\{\infty, \infty, 2\} = 2$$

$$D_b(g) = \min\{c_{b,a}+D_a(g), c_{b,c}+D_c(g), c_{b,e}+D_e(g)\} = \min\{\infty, \infty, \infty\} = \infty$$

$$D_b(h) = \min\{c_{b,a}+D_a(h), c_{b,c}+D_c(h), c_{b,e}+D_e(h)\} = \min\{\infty, \infty, 2\} = 2$$

$$D_b(i) = \min\{c_{b,a}+D_a(i), c_{b,c}+D_c(i), c_{b,e}+D_e(i)\} = \min\{\infty, \infty, \infty\} = \infty$$

DV u b:	
$D_b(a)=8$	$D_b(f)=2$
$D_b(c)=1$	$D_b(g)=\infty$
$D_b(d)=2$	$D_b(h)=2$
$D_b(e)=1$	$D_b(i)=\infty$

Distance vector primjer:



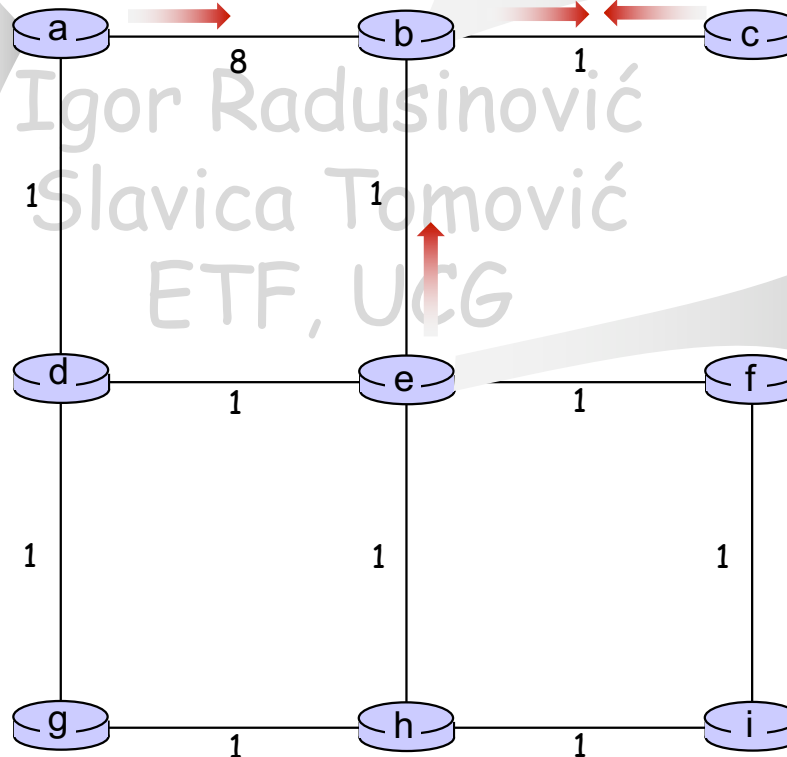
$t=1$

- c prima DV-ove od b

DV u a:	
$D_a(a) = 0$	
$D_a(b) = 8$	
$D_a(c) = \infty$	
$D_a(d) = 1$	
$D_a(e) = \infty$	
$D_a(f) = \infty$	
$D_a(g) = \infty$	
$D_a(h) = \infty$	
$D_a(i) = \infty$	

DV u b:	
$D_b(a) = 8$	$D_b(f) = \infty$
$D_b(c) = 1$	$D_b(g) = \infty$
$D_b(d) = \infty$	$D_b(h) = \infty$
$D_b(e) = 1$	$D_b(i) = \infty$

DV u c:	
$D_c(a) = \infty$	
$D_c(b) = 1$	
$D_c(c) = 0$	
$D_c(d) = \infty$	
$D_c(e) = \infty$	
$D_c(f) = \infty$	
$D_c(g) = \infty$	
$D_c(h) = \infty$	
$D_c(i) = \infty$	



DV u e:	
$D_e(a) = \infty$	
$D_e(b) = 1$	
$D_e(c) = \infty$	
$D_e(d) = 1$	
$D_e(e) = 0$	
$D_e(f) = 1$	
$D_e(g) = \infty$	
$D_e(h) = 1$	
$D_e(i) = \infty$	

Mrežni nivo

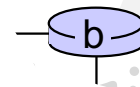
Distance vector primjer:



t=1

- c prima DV od b i izračunava:

$$\begin{aligned} D_c(a) &= \min\{c_{c,b} + D_b(a)\} = 1 + 8 = 9 \\ D_c(b) &= \min\{c_{c,b} + D_b(b)\} = 1 + 0 = 1 \\ D_c(d) &= \min\{c_{c,b} + D_b(d)\} = 1 + \infty = \infty \\ D_c(e) &= \min\{c_{c,b} + D_b(e)\} = 1 + 1 = 2 \\ D_c(f) &= \min\{c_{c,b} + D_b(f)\} = 1 + \infty = \infty \\ D_c(g) &= \min\{c_{c,b} + D_b(g)\} = 1 + \infty = \infty \\ D_c(h) &= \min\{c_{c,b} + D_b(h)\} = 1 + \infty = \infty \\ D_c(i) &= \min\{c_{c,b} + D_b(i)\} = 1 + \infty = \infty \end{aligned}$$



1

izračunavanje

DV u b:	
$D_b(a) = 8$	$D_b(f) = \infty$
$D_b(c) = 1$	$D_b(g) = \infty$
$D_b(d) = \infty$	$D_b(h) = \infty$
$D_b(e) = 1$	$D_b(i) = \infty$

DV u c:
$D_c(a) = \infty$
$D_c(b) = 1$
$D_c(c) = 0$
$D_c(d) = \infty$
$D_c(e) = \infty$
$D_c(f) = \infty$
$D_c(g) = \infty$
$D_c(h) = \infty$
$D_c(i) = \infty$

DV u c:
$D_c(a) = 9$
$D_c(b) = 1$
$D_c(c) = 0$
$D_c(d) = 2$
$D_c(e) = \infty$
$D_c(f) = \infty$
$D_c(g) = \infty$
$D_c(h) = \infty$
$D_c(i) = \infty$

* Pogledati:
http://gaia.cs.umass.edu/kurose_ross/interactive/

Distance vector primjer:



$t=1$

- e prima DV-ove od b, d, f, h

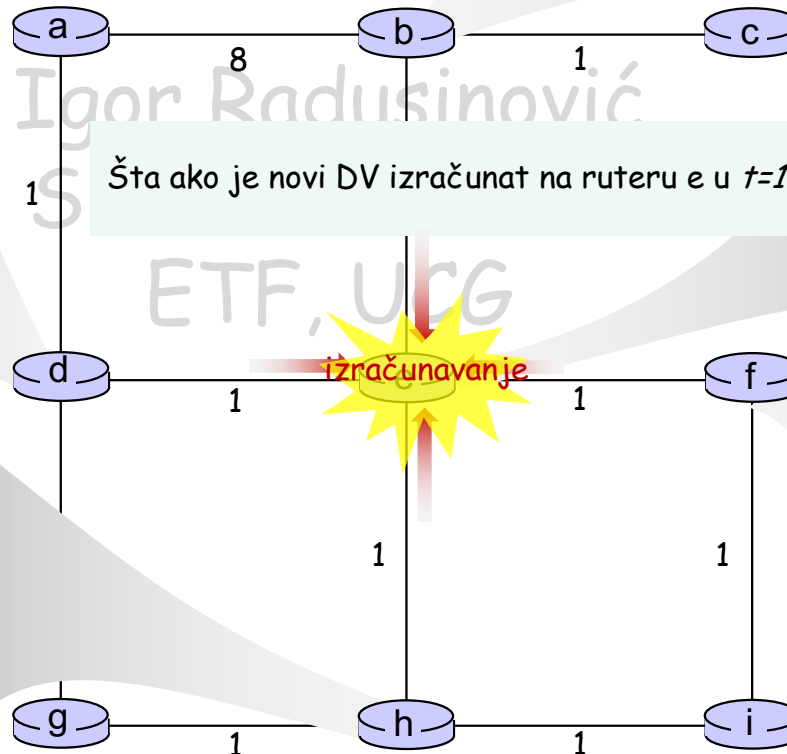
DV u d:	
$D_c(a) = 1$	
$D_c(b) = \infty$	
$D_c(c) = \infty$	
$D_c(d) = 0$	
$D_c(e) = 1$	
$D_c(f) = \infty$	
$D_c(g) = 1$	
$D_c(h) = \infty$	
$D_c(i) = \infty$	

DV u h:	
$D_c(a) = \infty$	
$D_c(b) = \infty$	
$D_c(c) = \infty$	
$D_c(d) = \infty$	
$D_c(e) = 1$	
$D_c(f) = \infty$	
$D_c(g) = 1$	
$D_c(h) = 0$	
$D_c(i) = 1$	

DV u b:	
$D_b(a) = 8$	$D_b(f) = \infty$
$D_b(c) = 1$	$D_b(g) = \infty$
$D_b(d) = \infty$	$D_b(h) = \infty$
$D_b(e) = 1$	$D_b(i) = \infty$






DV u e:	
$D_e(a) = \infty$	
$D_e(b) = 1$	
$D_e(c) = \infty$	
$D_e(d) = 1$	
$D_e(e) = 0$	
$D_e(f) = 1$	
$D_e(g) = \infty$	
$D_e(h) = 1$	
$D_e(i) = \infty$	

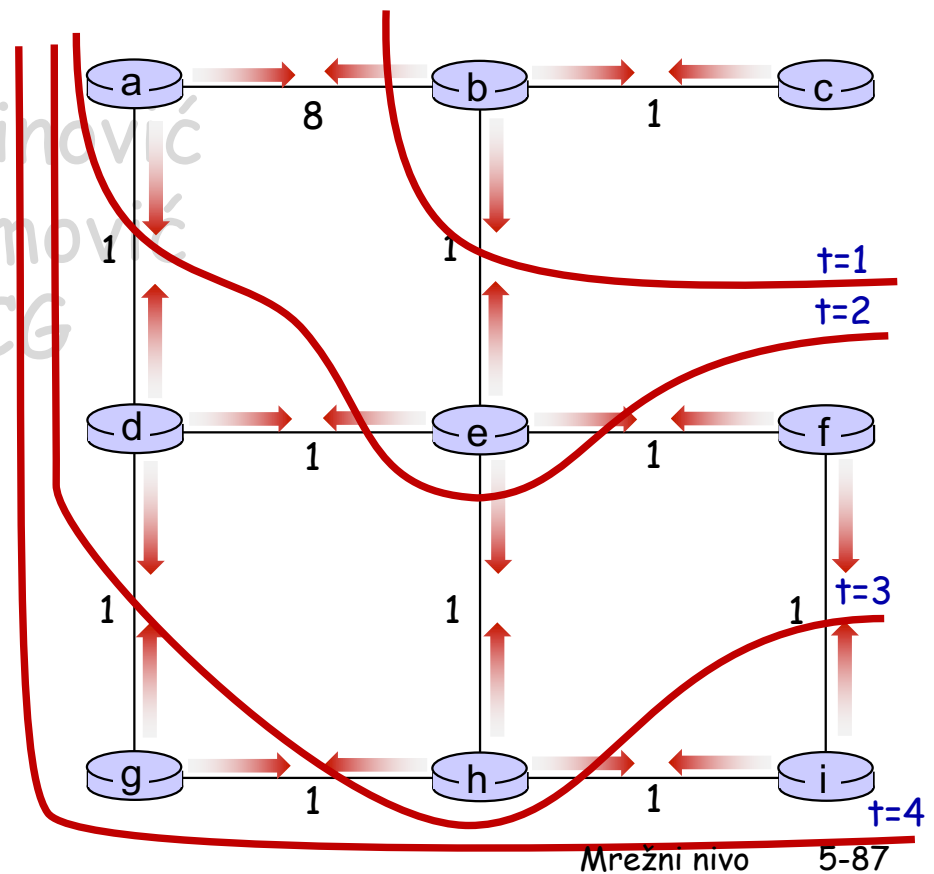
DV u f:	
$D_c(a) = \infty$	
$D_c(b) = \infty$	
$D_c(c) = \infty$	
$D_c(d) = \infty$	
$D_c(e) = 1$	
$D_c(f) = 0$	
$D_c(g) = \infty$	
$D_c(h) = \infty$	
$D_c(i) = 1$	



Distance vector: širenje informacije o stanju

Iterativna komunikacije, rezultati izračunavanja se u koracima šire kroz mrežu :

-  t=0 Stanje rutera c je u t=0 samo na rutera c
-  t=1 Stanje rutera c se u trenutku t=0 šalje rutera b, i može uticati na izračunavanja DV-a rutera na hopu **1**, npr. Na b
-  t=2 Stanje rutera c u t=0 može sada uticati na izračunavanje DV-a rutera udaljenih do **2** hopa, npr., na b ali i na a, e takođe
-  t=3 Stanje rutera c u t=0 može uticati na izračunavanje DV na ruterima udaljenim do **3** hopa, npr., d, f, h
-  t=4 Stanje rutera c u t=0 može uticati na izračunavanje DV na ruterima udaljenim do **4** hopa, npr g, i



$$D_x(y) = \min\{c_{x,y} + D_y(y), c_{x,z} + D_z(y)\} = \min\{2+0, 7+1\} = 2 \quad D_x(z) = \min\{c_{x,y} + D_y(z), c_{x,z} + D_z(z)\} = \min\{2+1, 7+0\} = 3$$

Tabela čvorišta x

		Tež. fakt. do		
		x	y	z
od	x	0	2	7
	y	∞	∞	∞
	z	∞	∞	∞

Tabela čvorišta y

		Tež. fakt. do		
		x	y	z
od	x	∞	∞	∞
	y	2	0	1
	z	∞	∞	∞

Tabela čvorišta z

		Tež. fakt. do		
		x	y	z
od	x	∞	∞	∞
	y	∞	∞	∞
	z	7	1	0

		Tež. fakt. do		
		x	y	z
od	x	0	2	3
	y	2	0	1
	z	7	1	0

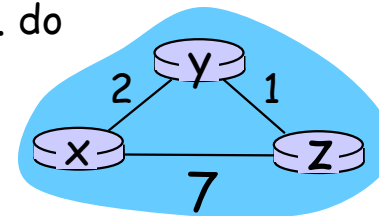
		Tež. fakt. do		
		x	y	z
od	x	0	2	7
	y	2	0	1
	z	7	1	0

		Tež. fakt. do		
		x	y	z
od	x	0	2	7
	y	2	0	1
	z	3	1	0

		Tež. fakt. do		
		x	y	z
od	x	0	2	3
	y	2	0	1
	z	3	1	0

		Tež. fakt. do		
		x	y	z
od	x	0	2	3
	y	2	0	1
	z	3	1	0

		Tež. fakt. do		
		x	y	z
od	x	0	2	3
	y	2	0	1
	z	3	1	0

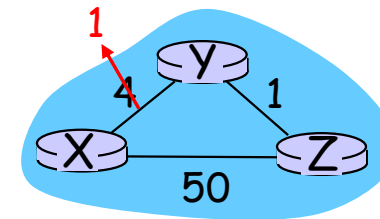


→ vrijeme

Distance Vector: promjene težinskih faktora linka

Promjene težinskih faktora linka:

- ❑ Čvorište detektuje lokalne promjene težinskih faktora linka
- ❑ ažuriranje *distance* tabele
- ❑ Ako se težinski faktori promijene na putu sa najmanjim težinskim faktorom, obaviještava susjede



“dobre
vijesti
brzo
putuju”

U trenutku t_0 , y detektuje promjenu težinskog faktora linka, ažurira svoj DV, i informiše susjede.

U trenutku t_1 , z prima update od y i ažurira svoju *distance* tabelu. Izračunava novi najmanji težinski faktor do x i šalje svojim susjedima svoj DV.

U trenutku t_2 , y prima od z *update* i ažurira svoju *distance* tabelu. Y -ov najmanji težinski faktor se ne mijenja i stoga y ne šalje nikakvu poruku ruteru z .

Distance Vector: promjene težinskih faktora linka

Promjene troškova linka:

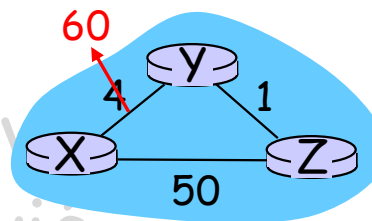
- ❑ dobre vijesti se brzo prenose
- ❑ loše vijesti se sporije prenose - problem "brojanje do ∞ "!
- ❑ 44 iteracije do stabilizacije algoritma

Tehnika split-horizon

- ❑ Update ruta šalje težinske faktore ruta koje se mogu doseći preko drugih portova.

Poissoned reverse (lažno rastojanje):

- ❑ Ako Z rutira preko Y do X :
 - Z govori Y da je njegova (Z-ova) udaljenost do X beskonačna (tako da Y ne bi rutirala do X preko Z)
- ❑ Da li će to riješiti problem brojanja do beskonačnosti?



Poređenje LS i DV algoritama

Kompleksnost poruke

- LS: sa n čvorišta, šalje se n^2 poruka
- DV: razmjena samo između susjeda
 - Konvergencija varira u vremenu

Brzina konvergencija

- LS: $O(n^2)$ algoritam zahtijeva $O(n^2)$ poruka
 - Mogu imati oscilacije
- DV: konvergencija varira u vremenu
 - Može biti petlji
 - Problem brojanja do ∞

Robustnost: šta se dešava kada ruter otkáže?

LS:

- Čvorište može objaviti težinski faktor neispravnog *linka*
- Svako čvorište proračunava svoju sopstvenu tabelu

DV:

- DV čvorište može objaviti težinski faktor neispravnog *linka*
- Tabelu svakog čvorišta koriste drugi
 - Greška se prenosi kroz mrežu

Skalabilno rutiranje

Prethodna analiza je bila - idealizacija

- ❑ Svi ruteri su identični
- ❑ *flat mreža*

... *praksa je drugačija*

veličina: milijarde destinacija:

- ❑ ne mogu se sve destinacije smjestiti u tabele rutiranja!
- ❑ razmjena tabela rutiranja može oboriti linkove!
- ❑ LS može izazvati potiskivanje saobraćaja na račun *broadcasta* tabela
- ❑ DV teško može konvergirati

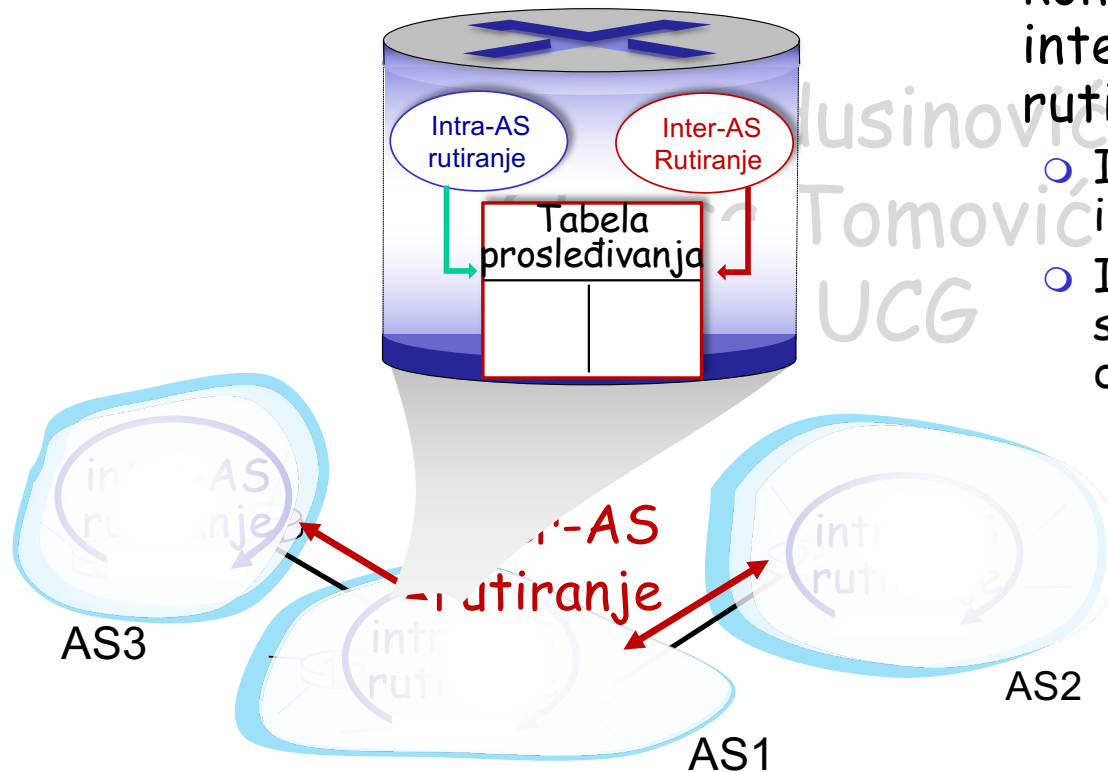
administrativna autonomija

- ❑ internet = mreža svih mreža
- ❑ svaki mrežni administrator želi
 - kontrolu rutiranja u svojoj mreži
 - sakriti mrežnu organizaciju od ostalih

Internet pristup skalabilnom rutiranju

- grupe rutere u regione, “autonomni sistemi” (AS)
 - ruteri u AS izvršavaju isti protokol rutiranja
 - “intra-AS” protokol rutiranja se slično ponaša objašnjenim idealizovanim modelima
 - ruteri u različitim AS mogu izvršavati različite intra-AS protokole rutiranja
- Gateway ruter
- Rutiraju u AS
 - Rutiranju između AS

Međupovezivanje AS-ma



- Tabela prosleđivanja se konfigurira i sa intra- i sa inter-AS algoritmom rutiranja
 - Intra-AS setuje sadržaje za interne destinacije
 - Inter-AS & Intra-AS setuju sadržaje za eksterne destinacije

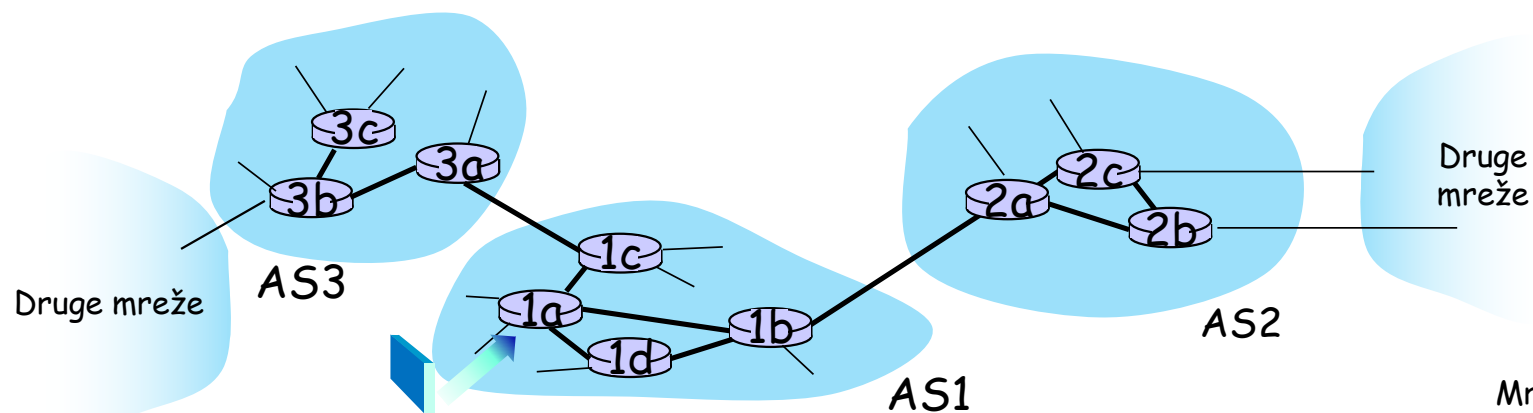
Inter-AS zadaci

- Neka ruter u AS1 primi datagram za koji je destinacija van AS1
 - Ruter bi trebao proslijediti paket prema *gateway* ruteru. Kojem?

Ruteri AS1 treba:

1. da nauče koje su destinacije dostižne preko AS2, a koje preko AS3
2. da proslijede te informacije o mogućnosti dosezanja do svih rutera u AS1

Posao inter-AS rutiranja!



Intra-AS rutiranje

- ❑ Poznato kao **Interior Gateway Protocols (IGP)**
- ❑ Najpozantiji Intra-AS protokoli rutiranja:
 - RIP: Routing Information Protocol
 - DV (razmjena svakih 30s)
 - Rijetko se koristi
 - OSPF: Open Shortest Path First
 - Link state
 - EIGRP: Enhanced Interior Gateway Routing Protocol
 - DV
 - Nekada vlasništvo CISCA a od 2013. javni protocol (RFC 7868)
 - IS-IS: Intermediate system to intermediate system
 - ISO standard veoma sličan OSPF

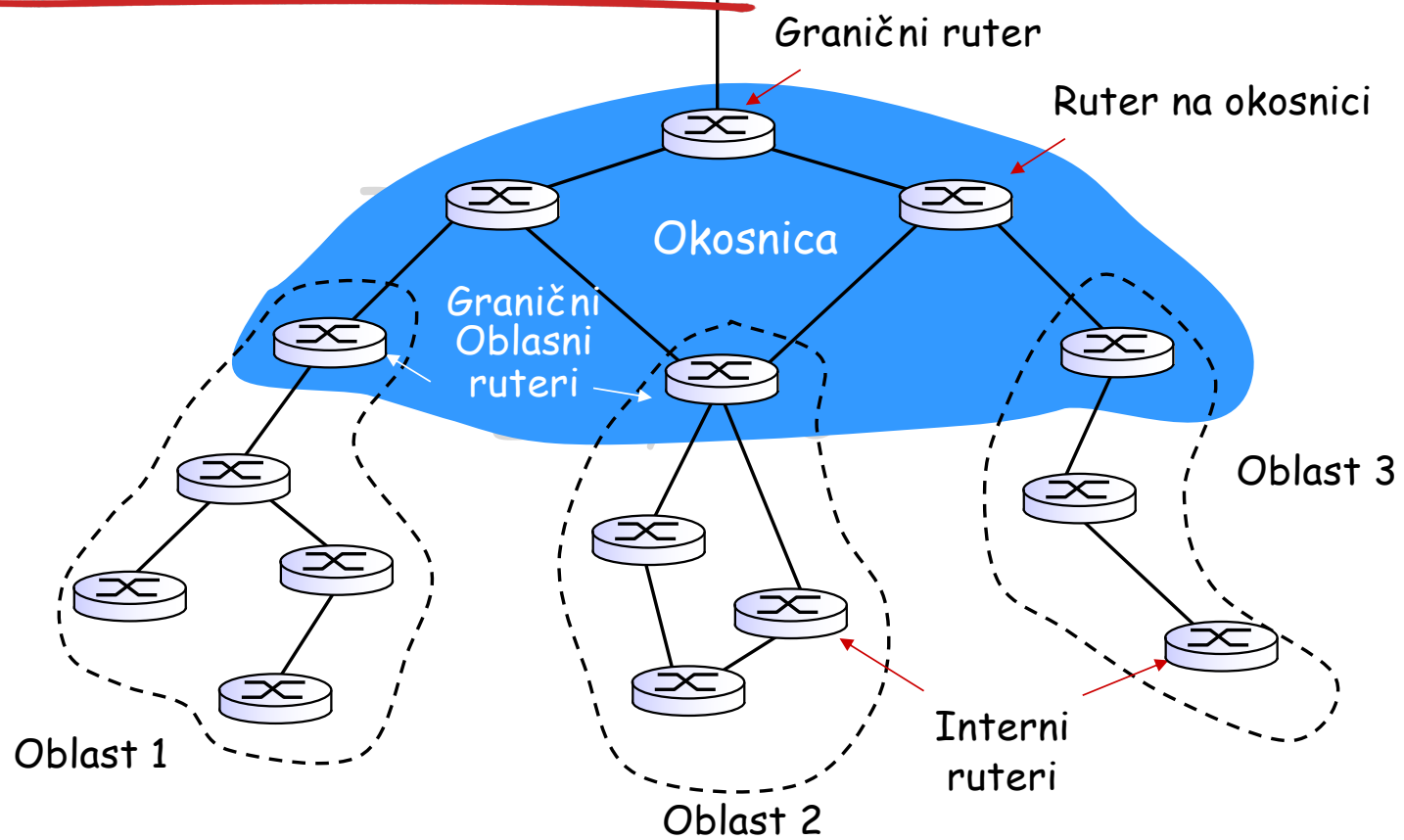
OSPF (Open Shortest Path First)

- ❑ Interior Gateway Protocol (IGP)
- ❑ “open”: javno dostupan
- ❑ Verzija 2 (RFC 2328) iz 1998
- ❑ Verzija 3 (RFC2740) iz 1999 podržava IPv4 i IPv6
- ❑ Koristi se u velikim kompanijskim mrežama zbog brze konvergencije, rješavanja problema petlji i balansiranja saobraćaja, dok operatori koriste IS-IS koji je pogodan za stabilne mreže
- ❑ Koristi “Link State” algoritam
 - LS širenje paketa
 - Mapa topologije na svakom čvorištu
 - Proračun rute korišćenjem Dijkstra algoritma
 - Broadcast svakih 30min
- ❑ OSPF oglašavanja nose po jednu informaciju po susjednom ruteru
- ❑ Širenje oglašavanja preko **čitavog** AS (“flooding”)
 - Nose se u OSPF porukama direktno preko IP (a ne preko TCP ili UDP) pri čemu potrebne kontrole obavlja OSPF
- ❑ Radi smanjenja saobraćaja može se koristiti koncept DR (*designated router*) i *multicast* tabele.

Napredne OSPF karakteristike (nema ih RIP)

- **Sigurnost:** za sve OSPF poruke se mora znati izvor (prevencija malicioznih aktivnosti) pri čemu se koriste lozinke ili MD5 kodiranje
- **Više** puteva sa istim troškovima je dozvoljeno (samo jedan put u RIP)
- Za svaki link, više metrika troškova za različiti **TOS** (npr., troškovi satelitskog linka su podešeni na “nisko” za *best effort*, visoko za servis u realnom vremenu)
- Integrisana uni- i **multicast** podrška:
 - *Multicast* OSPF (MOSPF) koristi istu bazu podataka o topologiji kao OSPF
- **Hijerarhijski** OSPF u velikim domenima.

Hijerarhijski OSPF



Hijerarhijski OSPF

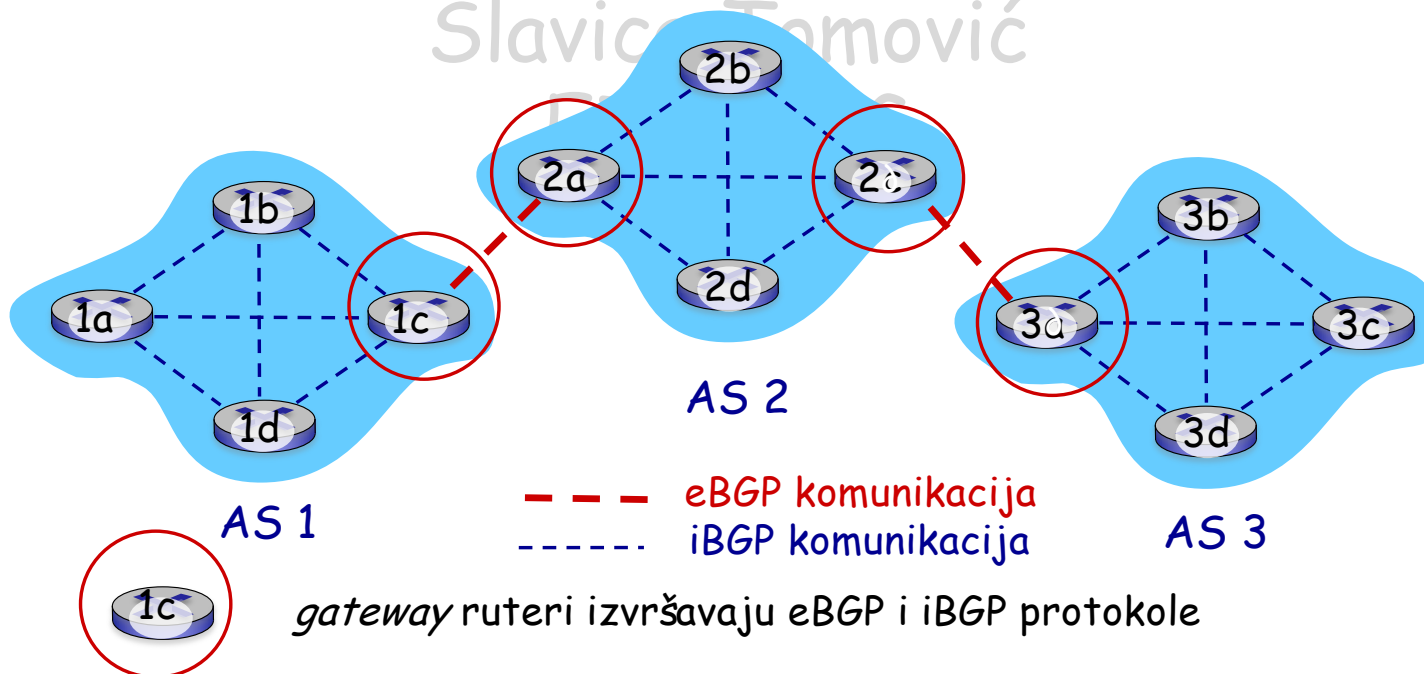
- **Hijerarhija u dva nivoa:** lokalna mreža (oblast) i okosnica.
 - Oglašavanja o stanju linka samo u lokalnoj mreži (oblasti)
 - Svako čvorište ima detaljnu topologiju mreže; samo poznaje najkraći put do mreža u drugim mrežama.
- **Ruter na granici lokalne mreže:** “sumira” rastojanja do mreža u sopstvenoj zoni odgovornosti i to oglašava drugim ruterima na granicama lokalnih mreža.
- **Ruteri okosnice:** izvršavaju OSPF rutiranje samo na okosnici.
- **Granični ruteri:** povezivanje na druge AS.

Internet inter-AS rutiranje: BGP

- ❑ **BGP (Border Gateway Protocol):** *de facto* standard
- ❑ Verzija 4 (RFC1771) iz 1994. je doživjela preko 20 korekcija, pri čemu je posljednja RFC4271 (iz 2006.)
- ❑ <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc4271>
- ❑ CIDR i agregacija ruta
- ❑ Naslijedio EGP čime je napravljena potpuna decentralizacija Interneta
- ❑ Mogu ga koristiti i kompanije kada OSPF nije dovoljno dobar i kada se radi o *multihomed* mreži (bolja redundansa).
- ❑ BGP omogućava svakom AS:
 1. Dobijanje informacije o dostižnosti sa susjednih AS-ova.
 2. Prosleđivanje prethodne informacije svim ruterima u okviru AS.
 3. Utvrđivanje “dobre” rute do podmreža baziranih na informaciji o dostižnosti i politici.
- ❑ Dozvoljava podmreži oglašavanje svog prisustva ostatku Interneta: *“Ovdje sam”*

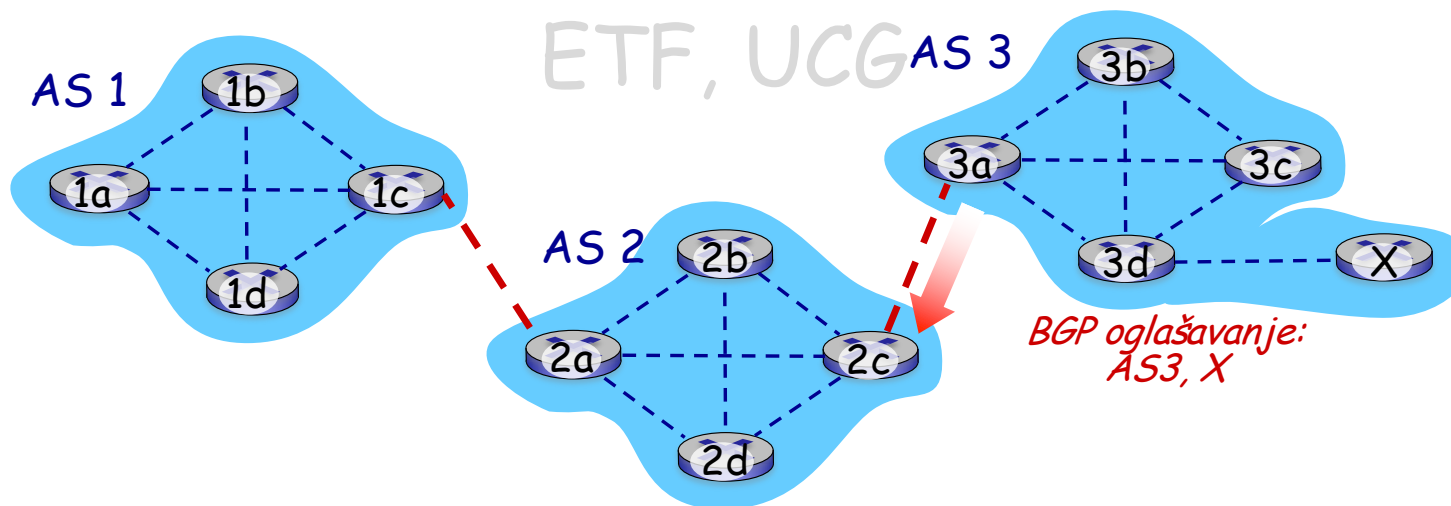
BGP osnove

- Parovi rutera (BGP peer-ovi) razmjenjuju informaciju rutiranja preko semi-permanentne TCP konekcije (port 179): **BGP sesije**
- Svakih 60s šalje **keep alive** poruku
- **Napomena:** BGP sesije ne odgovaraju fizičkim linkovima.
- Kada AS2 oglasi prefiks do AS1, AS2 **obećava** da će proslijediti bilo koji datagram koji je adresiran do tog prefiksa preko sebe.
 - AS2 može agregirati prefikse u oglašavanjima



Distribuirana informacija o dostižnosti

- ❑ Sa eBGP sesijom između 3a i 1c, AS3 šalje informaciju o dostižnosti prefiksa do AS1.
- ❑ 1c može tada koristiti iBGP za distribuciju ove nove informacije o dostizanju prefiksa do svih rutera u AS1
- ❑ 1b može tada ponovo oglasiti novu informaciju o dostizanju do AS2 preko 1b-2a eBGP sesije
- ❑ Kada ruter stekne znanje o novom prefiksu, kreira sadržaj za taj prefiks u tabeli rutiranja.



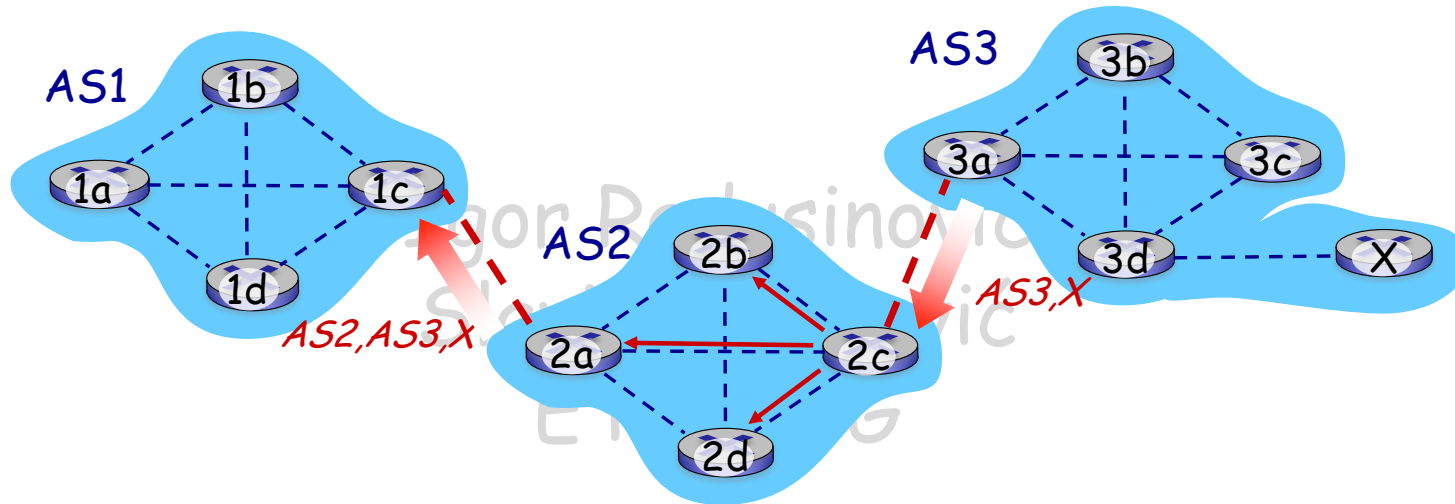
Atributi puta & BGP rute

- Kada oglašava prefiks, oglašavanje uključuje BGP attribute.
 - prefix + atributi = “ruta”
- Dva važna atributa:
 - **AS-PATH**: sadrži AS-ove preko kojih je oglašavanje prefiksa prošlo: AS67 AS17
 - **NEXT-HOP**: Indicira specifični interni-AS ruter do *next-hop* AS. (Može biti više linkova od trenutne AS do *next-hop* AS.)
- Kada *gateway* ruter primi oglašavanje rute, koristi **politiku importovanja** za potvrdu/odbijanje.

BGP izbor rute

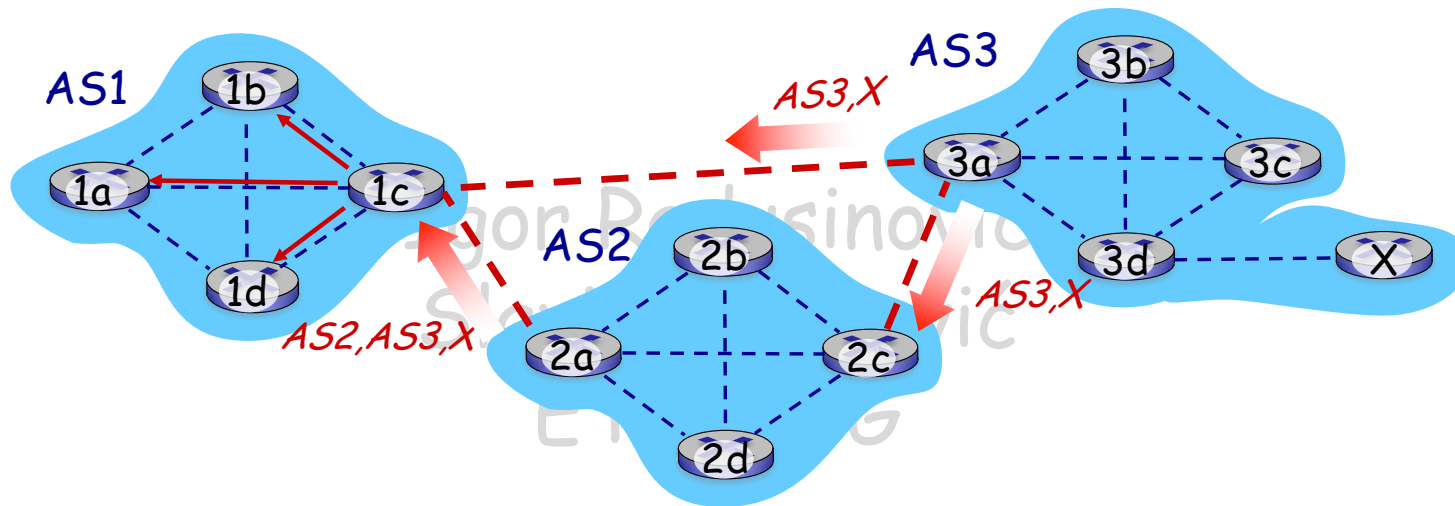
- ❑ Ruter može naučiti više od jedne rute do istog prefiksa. Ruter mora odabrati rutu.
- ❑ Pravila eliminacije:
 1. Vrijednost atributa lokalne reference: odluka politike
 2. Najkraći AS-PATH
 3. Najbliži NEXT-HOP ruter: "vrući krompir" rutiranje
 4. Dodatni kriterijum

BGP oglašavanje puta



- AS2 ruter 2c dobija oglašavanje puta **AS3,X** (preko eBGP) od AS3 rutera 3a
- Bazirano na AS2 politici, AS2 ruter 2c prihvata put **AS3,X**, prosleđuju (preko iBGP) do svih AS2 rutera
- Bazirano na AS2 politici, AS2 ruter 2a oglašava (preko eBGP) put **AS2, AS3, X** do AS1 rutera 1c

BGP oglašavanja ruta



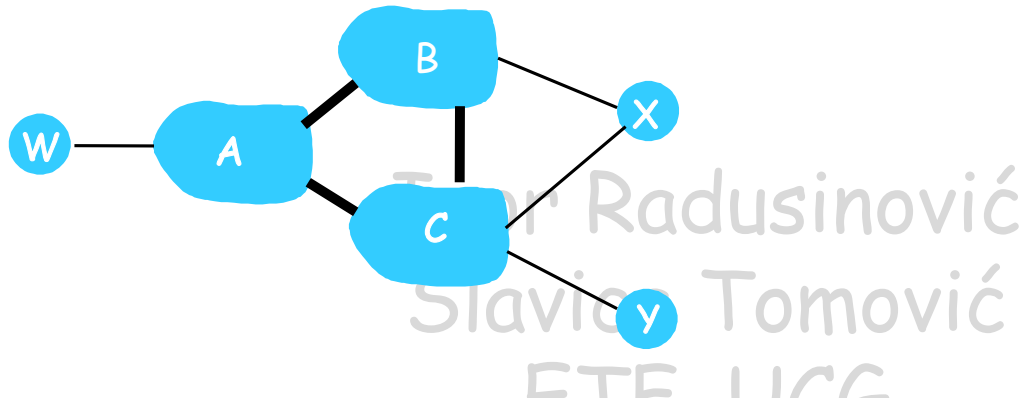
gateway ruter može naučiti **više** puteva do destinacija:

- AS1 gateway ruter 1c uči put *AS2,AS3,X* od 2a
- AS1 gateway ruter 1c uči put *AS3,X* od 3a
- Bazirano na politici, AS1 gateway ruter 1c bira put *AS3,X*, i oglašava put kroz AS1 preko iBGP

BGP poruke

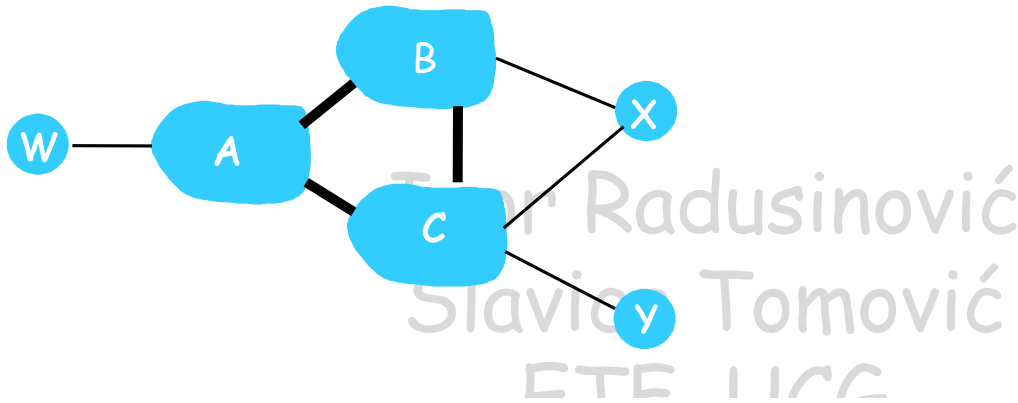
- BGP poruke se razmjenjuju preko TCP.
- BGP poruke:
 - **OPEN**: otvara TCP vezu sa peer i vrši identifikaciju pošiljaoca
 - **UPDATE**: oglašava novi put (ili odbacuje stari)
 - **KEEPALIVE** održava vezu u odsustvu UPDATE poruka, a potvrđuje i OPEN zahtjev
 - **NOTIFICATION**: izvještava o greškama u prethodnoj poruci, a takođe se koristi za raskidanje veze

BGP politika rutiranja



- A,B,C su mreže provajdera
- x,w,y su korisnici (mreža provajdera)
- x je *dual-homed*: povezan na dvije mreže
 - x ne želi da se saobraćaj rutira od B preko x do C
 - .. tako x neće oglašavati B rutu do C

BGP: kontroliš ko rutira do tebe



- ❑ A oglašava B put Aw
- ❑ B oglašava X put BA_w
- ❑ Da li će B oglašavati C put BA_w?
 - Neće! B ne dobija “profit” za rutiranje CBA_w pošto w i C nisu B-ovi korisnici
 - B želi da prinudi C da rutira do w preko A
 - B želi da rutira *samo* do/od njegovih korisnika!

Zašto različito Intra- i Inter-AS rutiranje ?

Politika:

- ❑ Inter-AS: administrator želi kontrolu nad načinom rutiranja saobraćaja i time ko rutira kroz njegovu mrežu.
- ❑ Intra-AS: jedan administrator, nema potrebe za političkim odlukama

Veličina:

- ❑ hijerarhijsko rutiranje čuva veličinu tabele, smanjuje saobraćaj koji se odnosi na ažuriranje

Performanse:

- ❑ Intra-AS se može fokusirati na performanse
- ❑ Inter-AS politika može dominirati u odnosu na performanse

Glava 5: Mrežni nivo

5.1 Uvod

5.2 IP (Internet Protocol)

- ❑ Format datagrama
- ❑ IP adresiranje

5.3 Rutiranje

- ❑ *Link state*
- ❑ *Distance Vector*
- ❑ Hijerarhijsko rutiranje
- ❑ Protokoli rutiranja

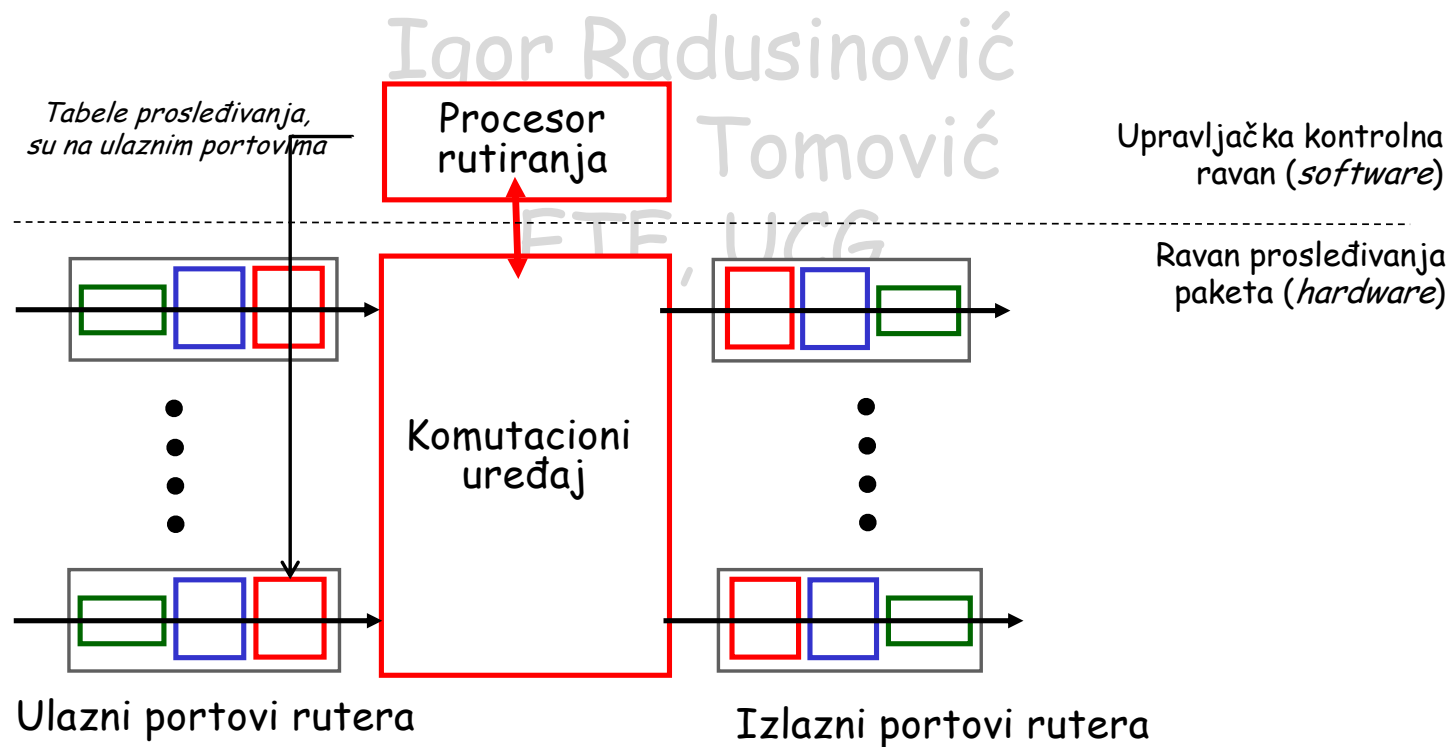
5.4 Ruter

Igor Radusinović
Slavica Tomović
ETF, UCG

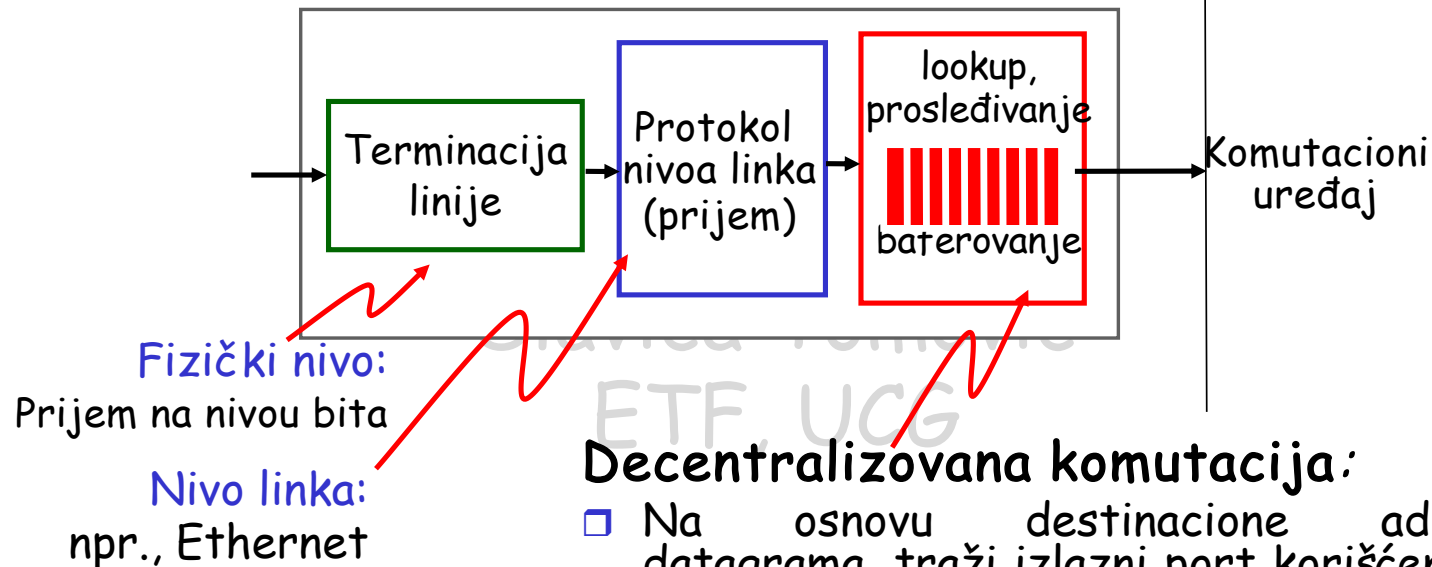
Pregled arhitekture rutera

Dvije ključne funkcije rutera:

- Izvršava algoritme/protokole rutiranja (RIP, OSPF, BGP)
- *Prosleđuje (komutira)* datagrame sa ulaznog na izlazni link



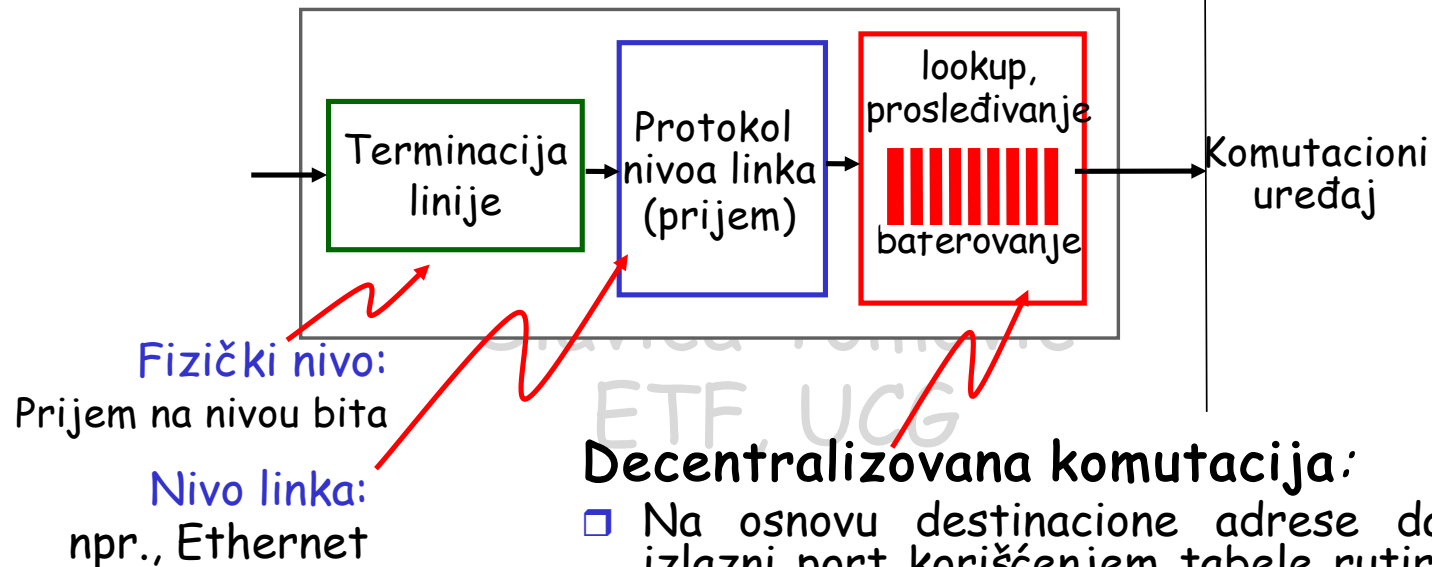
Funkcije ulaznog porta



Decentralizovana komutacija:

- Na osnovu destinacione adrese datagrama, traži izlazni port korišćenjem tabele rutiranja u memoriji ulaznog porta
- Cilj: kompletirati obradu na ulaznom portu u skladu sa brzinom na linku
- Red čekanja (bafer): ako datagrami pristižu brže nego što je brzina prosleđivanja u komutacionom uređaju

Funkcije ulaznog porta



Decentralizovana komutacija:

- Na osnovu destinacione adrese datagrama, traži izlazni port korišćenjem tabele rutiranja u memoriji ulaznog porta
- **Prosleđivanje na bazi destinacije:** prosleđivanje na bazi destinacione IP adrese (tradicionalni pristup)
- Generalizovano prosleđivanje: prosleđivanje na bazi bilo kojeg seta identifikatora u zaglavlju

Prosleđivanje na bazi destinacije

forwarding table

Destination Address Range	Link Interface
11001000 00010111 00010000 00000000 through 11001000 00010111 00010000 00000100	n
11001000 00010111 00010000 00000111	3
11001000 00010111 00011000 11111111	
11001000 00010111 00011001 00000000 through 11001000 00010111 00011111 11111111	2
otherwise	3

Šta ako opsezi adresa nijesu fino podijeljeni?

Longest prefix matching

longest prefix match

Kada se traži zapis u tabeli za datu destinacionu adresu bira se *najduži* mrežni prefix koji odgovara destinacionoj adresi

Destination Address Range	Link interface
11001000 00010111 00010 *** *****	0
11001000 00010111 00011000 *****	1
11001000 00010111 00011 *** *****	2
otherwise	3

primjeri:

11001000 00010111 00010110 10100001

Koji interfejs?

11001000 00010111 00011000 10101010

Koji interfejs?

Longest prefix matching

longest prefix match

Kada se traži zapis u tabeli za datu destinacionu adresu bira se *najduži* mrežni prefix koji odgovara destinacionoj adresi

Destination Address Range	Link interface
11001000 00010111 00010 *** *****	0
11001000 00010111 00011000 *****	1
11001000 0 <i>match!</i> 0011 *** *****	2
otherwise	3

primjeri:

11001000 00010111 00010110 10100001

Koji interfejs?

11001000 00010111 00011000 10101010

Koji interfejs?

Longest prefix matching

longest prefix match

Kada se traži zapis u tabeli za datu destinacionu adresu bira se *najduži* mrežni prefix koji odgovara destinacionoj adresi

Destination Address Range	Link interface
11001000 00010111 00010 *** *****	0
11001000 00010111 00011000 *****	1
11001000 00010111 00011 *** *****	2
otherwise	3

match!

primjeri:

11001000 00010111 00010110 10100001
 11001000 00010111 00011000 10101010

Koji interfejs?

Koji interfejs?

Longest prefix matching

longest prefix match

Kada se traži zapis u tabeli za datu destinacionu adresu bira se *najduži* mrežni prefix koji odgovara destinacionoj adresi

Destination Address Range	Link interface
11001000 00010111 00010 *** *****	0
11001000 00010111 00011000 *****	1
11001000 00010111 00011 *** *****	2
otherwise	3

↑
match!
↓

primjeri:

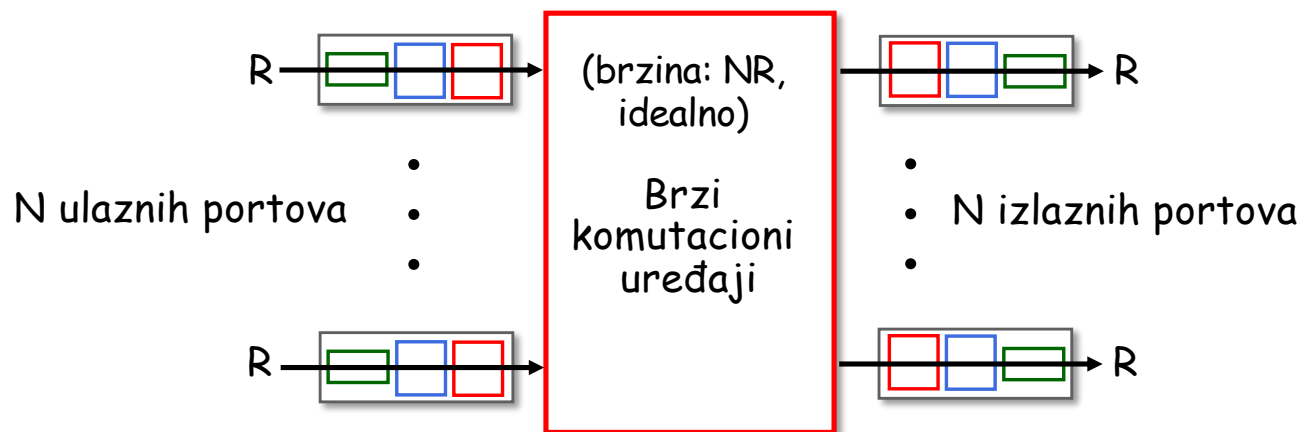
11001000 00010111 00010110 10100001
11001000 00010111 00011000 10101010

Koji interfejs?

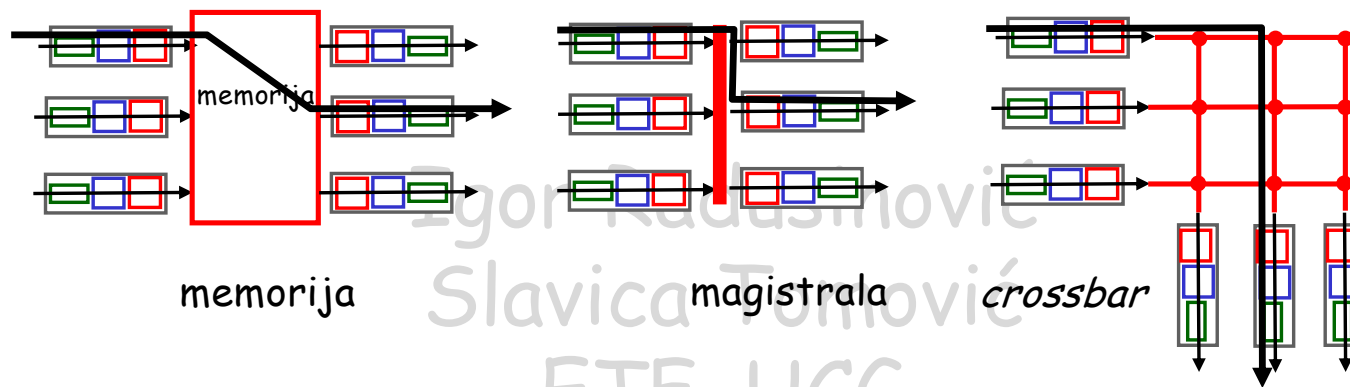
Koji interfejs?

Komutacioni uređaji

- Prenose pakete sa ulaznog porta na izlazni port
- **Brzina komutacije:** brzina kojom se paketi prosleđuju
 - Najčešće nekoliko puta veća od brzina na linkovima
 - Ako ima N ulaza poželjno je da bude N puta brža od portova



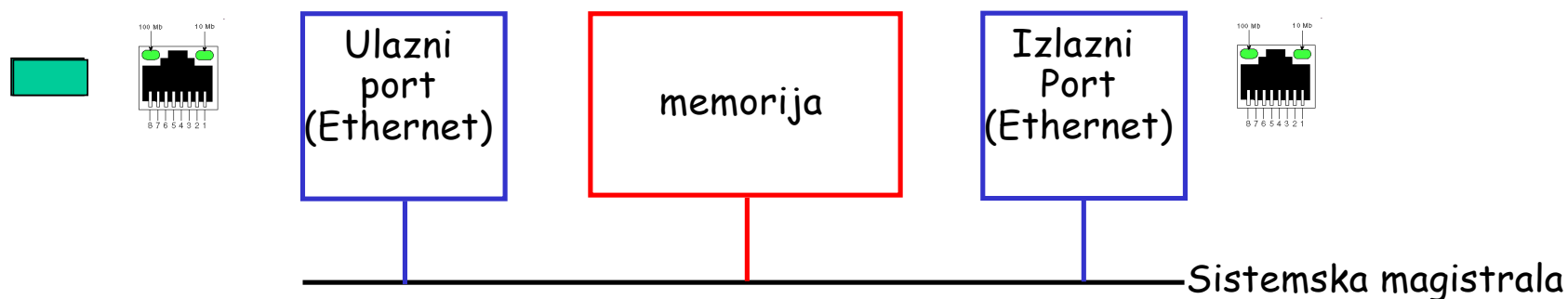
Tri tipa komutacionih uređaja



Komutacija preko zajedničke memorije

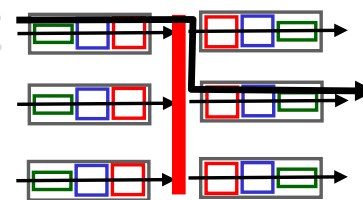
Prva generacija rutera:

- ❑ tradicionalni računari sa komutacijom pod direktnom kontrolom CPU
- ❑ paketi se smještaju u memoriju sistema
- ❑ brzina ograničena brzinom memorije (svaki datagram se mora dva puta prenijeti preko magistrale)
- ❑ Cisco Catalyst *switch* serije 8500 (specifično rješenje)



Komutacija preko zajedničke magistrale

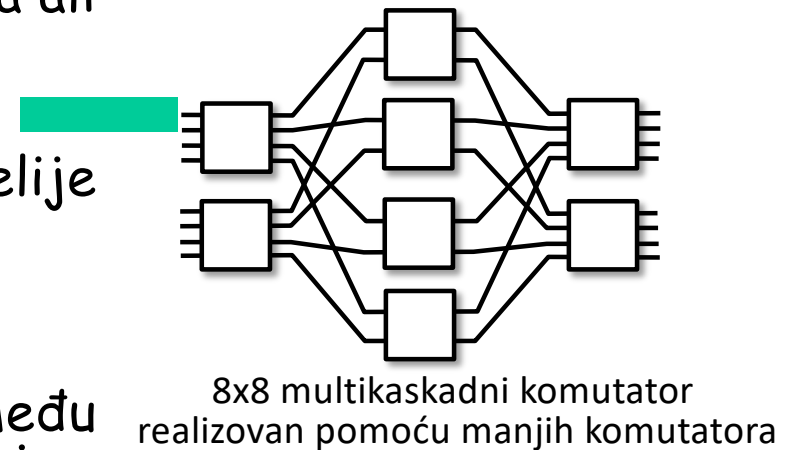
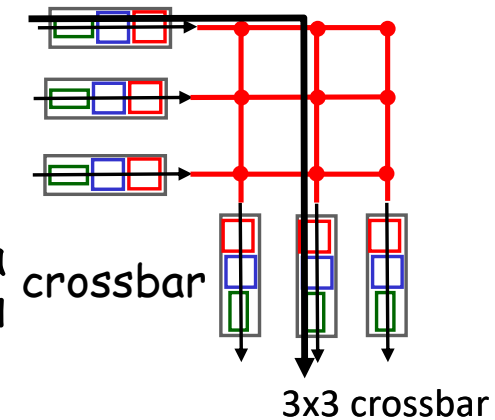
- Datagram se sa memorije ulaznog porta do memorije izlaznog porta prenosi preko zajedničke magistrale bez učešća procesora
- **Kolizija na magistrali:** brzina komutacije je ograničena kapacitetom magistrale
- Cisco 5600:
 - 32 Gb/s magistrala,
 - pristupni i kompanijski ruteri (neregionalne ili na okosnici)



magistrala

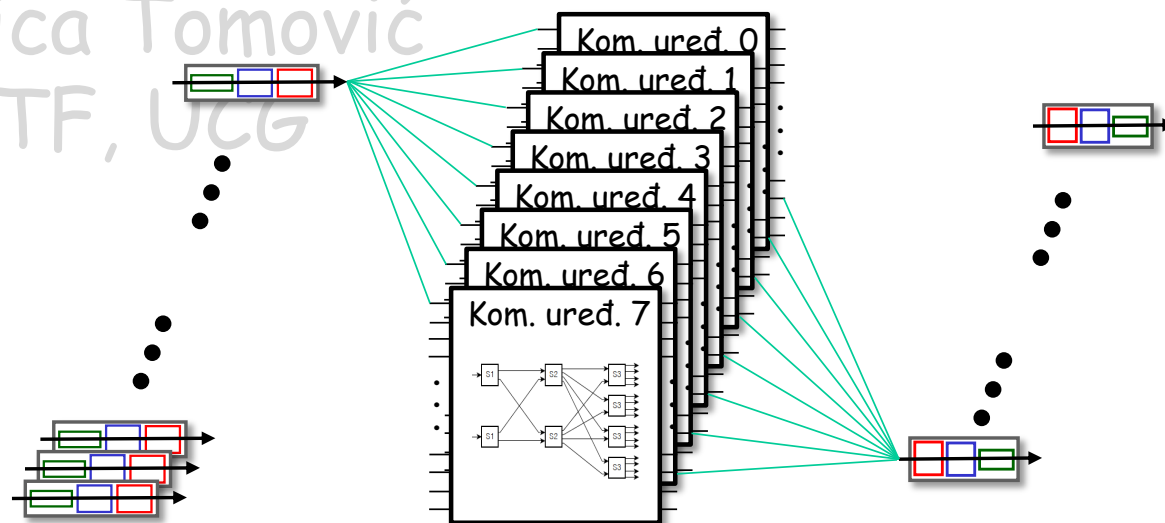
Prostorni komutatori

- ❑ Komutacione strukture su inicijalno razvijene za povezivanje procesora u multiprocesorsku aritekturu
- ❑ Prevazilazi ograničenja kapaciteta magistrale
- ❑ Nudi više puteva između skupa ulaza i skupa izlaza ali po jedan put između bilo kojeg para ulaz izlaz
- ❑ Crossbar topologija
- ❑ Napredan dizajn: fragmentacija datagrama u ćelije fiksne dužine, komutiranje ćelija kroz uređaj.
- ❑ Cisco 12000:
 - komutira do 60Gb/s kroz komutacionu matricu
- ❑ Višekaskadna rješenja nude više puteva između jednog ulaza i jednog izlaza Banyan, Clos, paralelni...
- ❑ Komutiraju pakete fiksne dužine

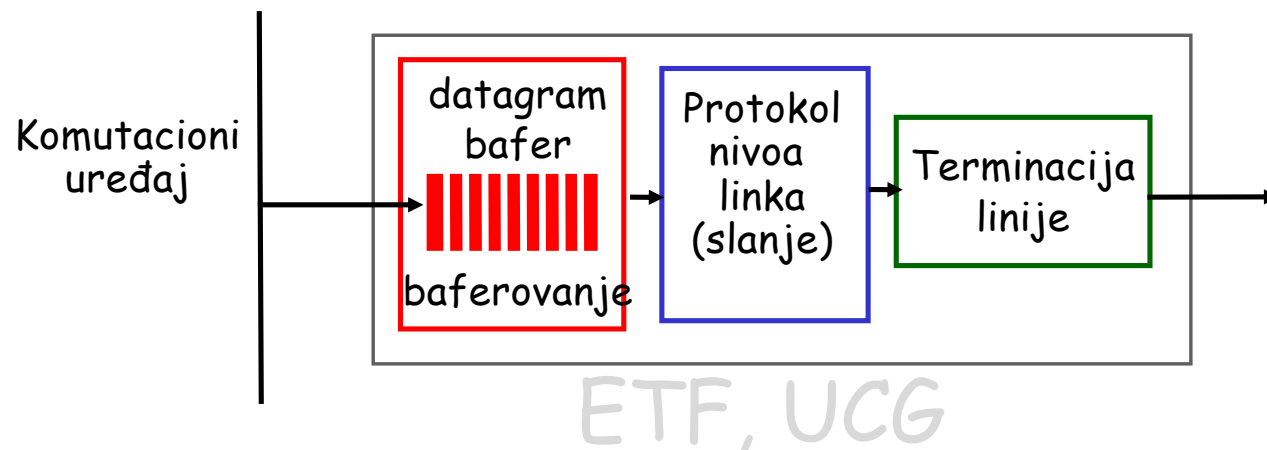


Prostorni komutatori

- Postavljanje komutatora u paraleli:
 - ubrzanje, paralelizam,..
- Cisco CRS ruter:
 - Osnovna jedinica: 8 komutaciomih ravni
 - Svaka ravan: trokaskadna topologija
 - Do 100Tb/s komutacioni kapacitet



Izlazni portovi



- *Baferovanje* se zahtijeva kada datagrami stižu iz uređaja većom brzinom nego što je brzina prenosa datagrama
- *Disciplina raspoređivanja (Scheduling)* bira za prenos datagrame u redovima čekanja

Veličina bafera?

- RFC 3439 (*rule of thumb*) pravilo: srednja veličina bafera je jednaka “prosječno” RTT (npr. 250ms) pomnoženo sa kapacitetom linka C
 - npr., $C = 10\text{Gb/s}$ link: 298MB
- Neke preporuke ukazuju da su moguće i manje memorije: za N tokova, potrebna veličina bafera je

$$\frac{\text{RTT} \cdot C}{\sqrt{N}}$$

Nivo mreže

Ispitna pitanja

1. Objasniti ključne funkcije mrežnog nivoa
2. Nacrtati IPv4 datagram i objasniti funkcije njegovih ključnih polja
3. Objasniti i na konkretnom primjeru ilustrovati funkcionisanje DHCP protokola
4. Objasniti i na konkretnom primjeru ilustrovati funkcionisanje NAT-a
5. Nacrtati IPv6 datagram i objasniti funkcije njegovih ključnih polja
6. Dijkstra algoritam
7. Belman Fordov algoritam
8. OSPF
9. BGP
10. Ruter

Igor Radušinović
Slavica Tomović
ETF, UCG