

Kontrolna ravnina. MPLS, GMPLS

Fotoničke telekomunikacijske mreže (2016./2017.)

Ognjen Dobrijević

- ♦ Kontrolna ravnina u komunikacijskoj mreži
- ♦ Tehnologija *Multiprotocol Label Switching* (MPLS)
- ♦ Tehnologija *Generalized MPLS* (GMPLS)
- ♦ (Koncept *Software-defined Networking*, SDN)

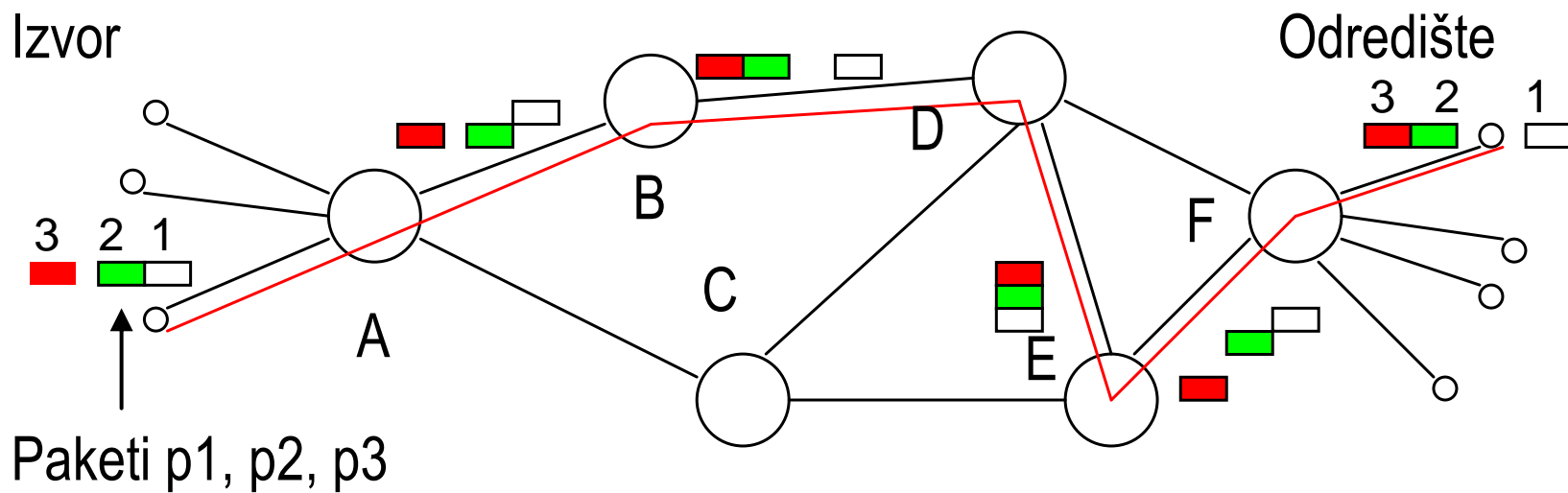
- ◆ Mreže s komutacijom kanala (engl. *circuit switched network*, CSN)
 - put određenog kapaciteta kroz mrežu između izvora i odredišta zauzet cijelo vrijeme trajanja komunikacije
 - **prednost**: prikladnost za kontinuirani protok informacija u stvarnom vremenu (održati vremenske uvjete komuniciranja)
 - **nedostatak**: neučinkovitost - dodijeljeni kapacitet se zauzima (i naplaćuje) neovisno o tome da li se i koliko informacije prenosi

- ◆ Mreže s komutacijom paketa (engl. *packet switched network*, PSN)
 - informacija se dijeli na blokove kojima se dodaje zaglavlje s adresom (na temelju koje ih se usmjerava) i drugom upravljačkom informacijom
 - **prednost**: mrežni resursi se zauzimaju samo tijekom prijenosa paketa, a broj i veličina paketa može se prilagoditi količini informacije
 - **nedostatak**: teže održati vremenske uvjete komuniciranja (kašnjenje i promjena kašnjenja)

- ♦ Datagramski (paket = datagram)
 - Svaki paket prosljeđuje se zasebno kroz mrežu, pri čemu se može dogoditi da paketi prolaze različitim putovima
 - Temelj rada današnjeg Interneta

- ♦ Virtualnim kanalom (engl. *virtual circuit*, VC)
 - Najprije se određuje put kojim će se paketi prenositi kroz mrežu, a zatim se svi paketi prosljeđuju tim istim putem

Virtualni kanal



Preuzeto iz: *Komunikacijske mreže, „Uvod u komunikacijske mreže i osnove arhitekture mreža”*

Usporedba: datagram - virtualni kanal

Značajka	Datagram	Virtualni kanal
Uspostava veze	Nije potrebno	Potrebno
Adresiranje	Svaki paket mora sadržavati potpunu adresnu informaciju (mrežne adrese izvora i odredišta)	Svaki paket sadrži samo kratku oznaku virtualnog kanala
Informacija o stanju uspostavljenih veza	Mrežni čvorovi ne pohranjuju podatke o uspostavljenim vezama	Svakom virtualnom kanalu odgovara jedan unos u tablici prosljeđivanja mrežnog čvora
Usmjeravanje	Svaki paket usmjerava se neovisno o drugim paketima	Put se odabire prilikom uspostave veze, nakon toga svi paketi idu tim putem
Utjecaj kvara na mrežnom čvoru	Gubitak samo onih paketa koji su trenutno u obradi	Prekid svih uspostavljenih virtualnih kanala
Upravljanje zagušenjem / Kvaliteta usluge	Složena izvedba	Jednostavna izvedba, ako se potrebni resursi mogu unaprijed pridjeliti virtualnom kanalu

♦ **Usmjeravanje** (engl. *routing*)

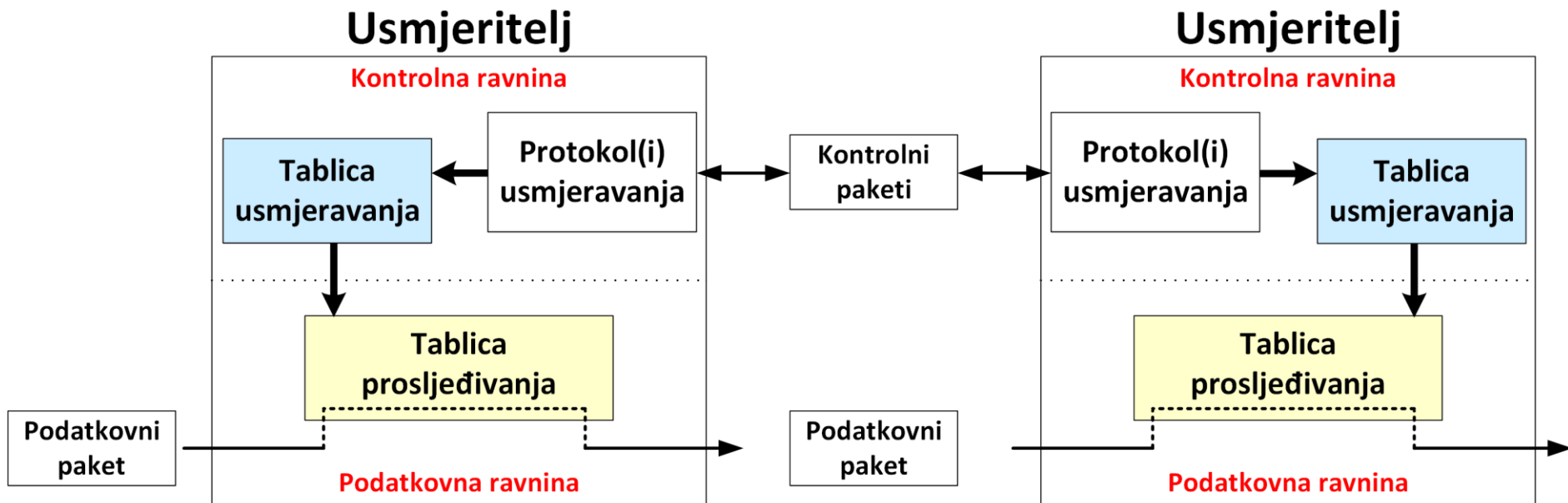
- Određivanje puta kroz mrežu kojim će paket proći od izvora do odredišta
 - Put računaju algoritmi usmjeravanja (engl. *routing algorithm*)
- Mrežni čvorovi (usmjeritelji) razmjenjuju informacije potrebne za izračun puta
- Svaki usmjeritelj stvara *tablicu prosljeđivanja*

♦ **Prosljeđivanje** (engl. *forwarding*)

- Na temelju vlastite tablice prosljeđivanja svaki usmjeritelj donosi odluku: na koje svoje odlazno sučelje poslati paket

- ◆ Podjela s obzirom na obuhvaćene funkcije
- ◆ Podatkovna ravnina (engl. *data plane*, DP)
 - Funkcije: **prosljeđivanje** paketa, međupohrana paketa (engl. *buffering*), raspoređivanje paketa (engl. *scheduling*)
- ◆ **Kontrolna ravnina** (engl. *control plane*, CP)
 - Funkcije: **usmjeravanje**, signalizacija (engl. *signaling*)
- ◆ Upravljačka ravnina (engl. *management plane*, MP)
 - Funkcije: analiza, konfiguracija uređaja

Kontrolna i podatkovna ravni. u komuni. mreži



- ♦ Podatkovna ravnina
 - HTTP, SMTP, IMAP, POP, *Real-time Transport Protocol* (RTP), itd.
- ♦ Kontrolna ravnina
 - Preslikavanje identifikatora: ARP, DNS, itd.
 - Konfiguracija: DHCP, itd.
 - Signalizacija: *Real Time Streaming Protocol* (RTSP), *Session Initiation Protocol* (SIP), itd.
 - **Usmjeravanje**: *Border Gateway Protocol* (BGP), *Open Shortest Path First* (OSPF), *Routing Information Protocol* (RIP), itd.
- ♦ Upravljačka ravnina
 - *Simple Network Management Protocol* (SNMP), itd.

- ♦ Određivanje puta od izvorišnog do odredišnog čvora, izravno ili preko niza usmjeritelja i podmreža
 - Prosljeđivanje se zasniva na odredišnoj IP-adresi

- ♦ Područje usmjeravanja
 - usmjeravanje unutar autonomnog sustava
 - usmjeravanje između autonomnih sustava

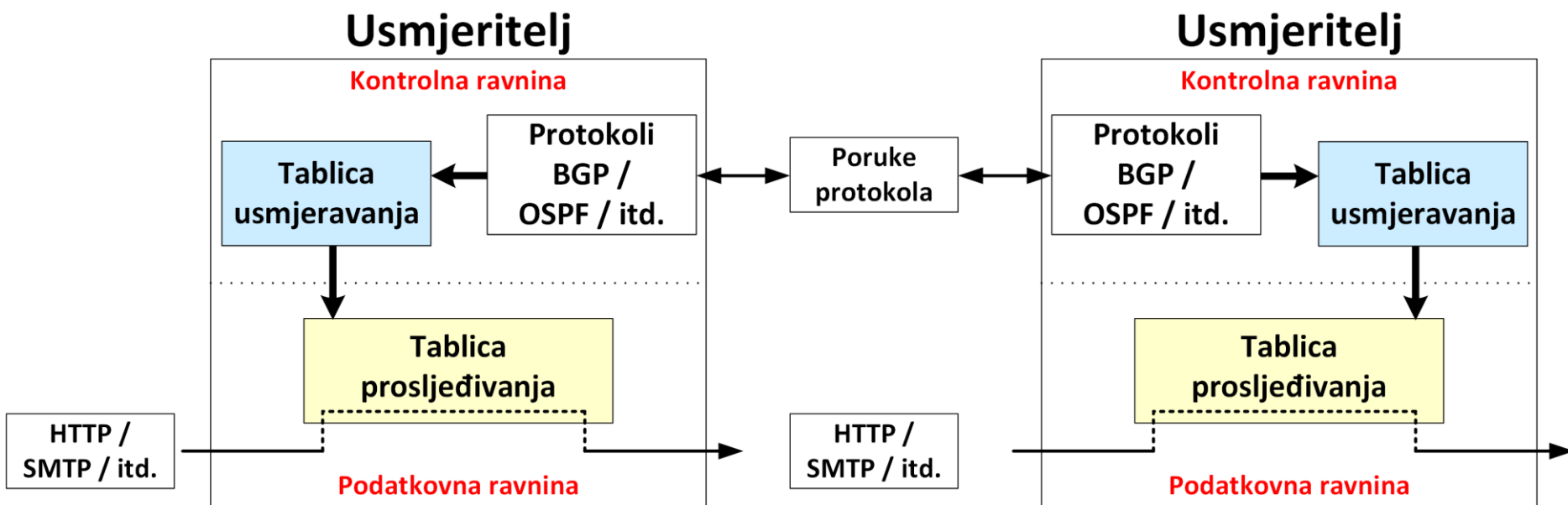
- ♦ Protokoli usmjeravanja obuhvaćaju strategiju usmjeravanja i izvedbu algoritama usmjeravanja
- ♦ Svaki usmjeritelj održava vlastitu tablicu usmjeravanja:
 - pohranjuje popis izravno spojenih mreža
 - putem poruka protokola usmjeravanja razmjenjuje informacije s drugim usmjeriteljima (odredišta za koja oni znaju put)
- ♦ Svaki usmjeritelj ažurira tablicu usmjeravanja na temelju:
 - informacija o vlastitim mrežnim sučeljima
 - znanja sakupljenog razmjennom informacija s drugim usmjeriteljima

- ◆ Usmjeravanje unutar autonomnih sustava
 - Protokoli klase IGP (*Interior Gateway Protocol*)
 - Različite izvedbe: OSPF, RIP, *Intermediate System to Intermediate System* (IS-IS), itd.
- ◆ RIP verzije 2 (RIPv2), IETF RFC 2453
 - Zasniva se na (dinamičkom) algoritmu vektora udaljenosti (Bellman-Fordov algoritam)
 - Metrika („cijena puta”): broj skokova
- ◆ OSPF verzije 2 (OSPFv2), IETF RFC 2328
 - Zasniva se na (dinamičkom) algoritmu stanja poveznice (uz primjenu Dijkstrinog algoritma)
 - Metrika: „udaljenost” usmjeritelja (u vidu *round-trip time*, RTT), širina pojasa poveznice, itd.

- ♦ Usmjeravanje između autonomnih sustava
 - Protokoli klase EGP (*Exterior Gateway Protocol*)
 - U praksi samo jedna izvedba, BGP

- ♦ BGP verzije 4 (BGPv4), IETF RFC 4271
 - Algoritam vektora staza (engl. *vector path*)
 - Sličan algoritmu vektora udaljenosti, ali u obzir uzima *staze* kao niz autonomnih sustava na putu do odredišta

Kontrolna i podatkovna ravnina u IP-mrežama



Protokol RIPv2: osnovni princip rada (1)

- ♦ Kao metriku koristi broj skokova (engl. *hop count*)
 - Najveći dopušteni broj skokova je 15
 - Broj 16 predstavlja nedostupne IP-mreže („beskonačna metrika”)
- ♦ Usmjeritelji periodički šalju poruke svakih 30 sekundi
 - Poruke sadrže sve poznate rute
- ♦ Poruke se šalju svim („susjednim”) usmjeriteljima korištenjem višeodredišnog razašiljanja (engl. *multicast*)
 - Koriste odredišnu IP adresa 224.0.0.9

Protokol RIPv2: osnovni princip rada (2)

- ♦ Usmjeritelj uspoređuje podatke iz poruka s tablicom usmjeravanja te ju ažurira kad je to potrebno
 - Odabir rute s manjim brojem skokova
- ♦ Ako usmjeritelj ne primi novu poruku od „susjednog” usmjeritelja unutar 180 s od zadnjeg primitka poruke,
 - pretpostavlja se da je taj usmjeritelj nedostupan,
 - metrika pripadajuće rute postavlja se na vrijednost 16, a
 - nakon dodatnih 60 sekundi se briše iz tablice usmjeravanja
- ♦ Nedostaci:
 - Ograničenost na mreže manjeg dosega (max. metrika je 16)
 - Relativno sporo se prilagođava promjenama u mreži (npr. ispad usmjeritelja)

Protokol OSPF: osnovni princip rada (1)

- ♦ Kao metriku može koristiti različite parametre
 - Podrazumijevano: širina pojasa poveznice
- ♦ Usmjeritelji koriste protokol *hello* radi otkrivanja i održavanja liste dostupnih susjednih usmjeritelja
 - Poruke *hello* se šalju periodički, svakih 10 sekundi
 - Primitak poruke je indikacija da je susjedni usmjeritelj dostupan
 - Ako poruka ne stigne unutar 40 sekundi, pretpostavlja se da je susjedni usmjeritelj nedostupan

Protokol OSPF: osnovni princip rada (2)

- ♦ Usmjeritelji razmjenjuju topološke podatke, koje svaki od njih pohranjuje u svoju bazu podataka
 - Ti podaci uključuju popis svih usmjeritelja u mreži i njihovih sučelja, svih poveznica između usmjeritelja i svih IP-mreža spojenih na usmjeritelje
- ♦ Usmjeritelji prvo izgrađuju svoje topološke baze podataka i te podatke onda međusobno razmjenjuju (kako bi svi imali jednak „pogled” na mrežu)
- ♦ Nakon toga, svaki usmjeritelj računa najbolju rutu do svake IP-mreže
- ♦ Nedostaci: veća složenost u odnosu na RIP

Ograničenja klasičnog IP-usmjeravanja (1)

♦ Brzina rada usmjeritelja

- Prosljeđivanje datagrama se obavlja na temelju određene IP-adrese
- U tablici prosljeđivanja se nastoji pronaći zapis koji se poklapa u najvećem broju bitova s prefiksom određene IP-adrese datagrama

	Destination address	Next hop	Outgoing interface
	10.0.0.0/8	R1	eth0
	128.143.0.0/16	R2	eth1
	128.143.64.0/20	R3	eth2
128.143.71.21 →	128.143.71.0/24	R4	eth3
	128.143.71.55/32	R3	eth2
	default	R5	eth4

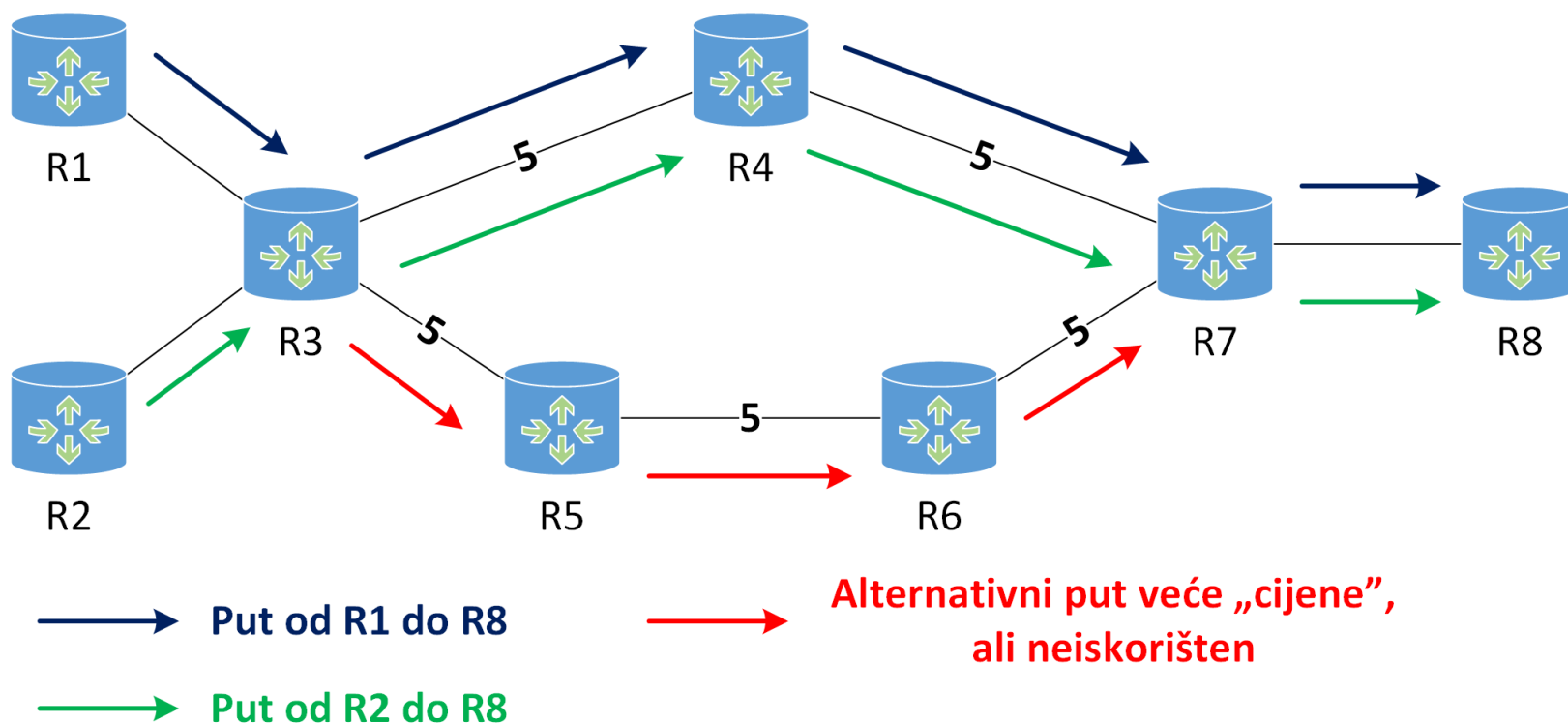
„Najduže” preklapanje za adresu 128.143.71.21 iznosi 24 bita sa zapisom 128.143.71.0/24

- ◆ Brzina rada mreže
 - Prosljeđivanje se provodi u svakom usmjeritelju na putu prema odredištu
 - Svaki usmjeritelj neovisno donosi odluku o prosljeđivanju

- ◆ Kvaliteta usluge (engl. *quality of service*, QoS)
 - Ne postoji podrška koja bi osigurala zahtjeve višemedijskih aplikacija: audio/video konferencije, video strujanje, umrežene višekorisničke igre, itd.
 - Zahtjevi tih aplikacija: dostatna propusnost mreže, ograničene vrijednosti kašnjenja, kolebanja kašnjenja i vjerojatnosti gubitaka paketa, itd.

Ograničenja klasičnog IP-usmjeravanja (3)

- ◆ Prilagodljivost usmjeravanja
 - Uvijek se odabire put najmanje „cijene”

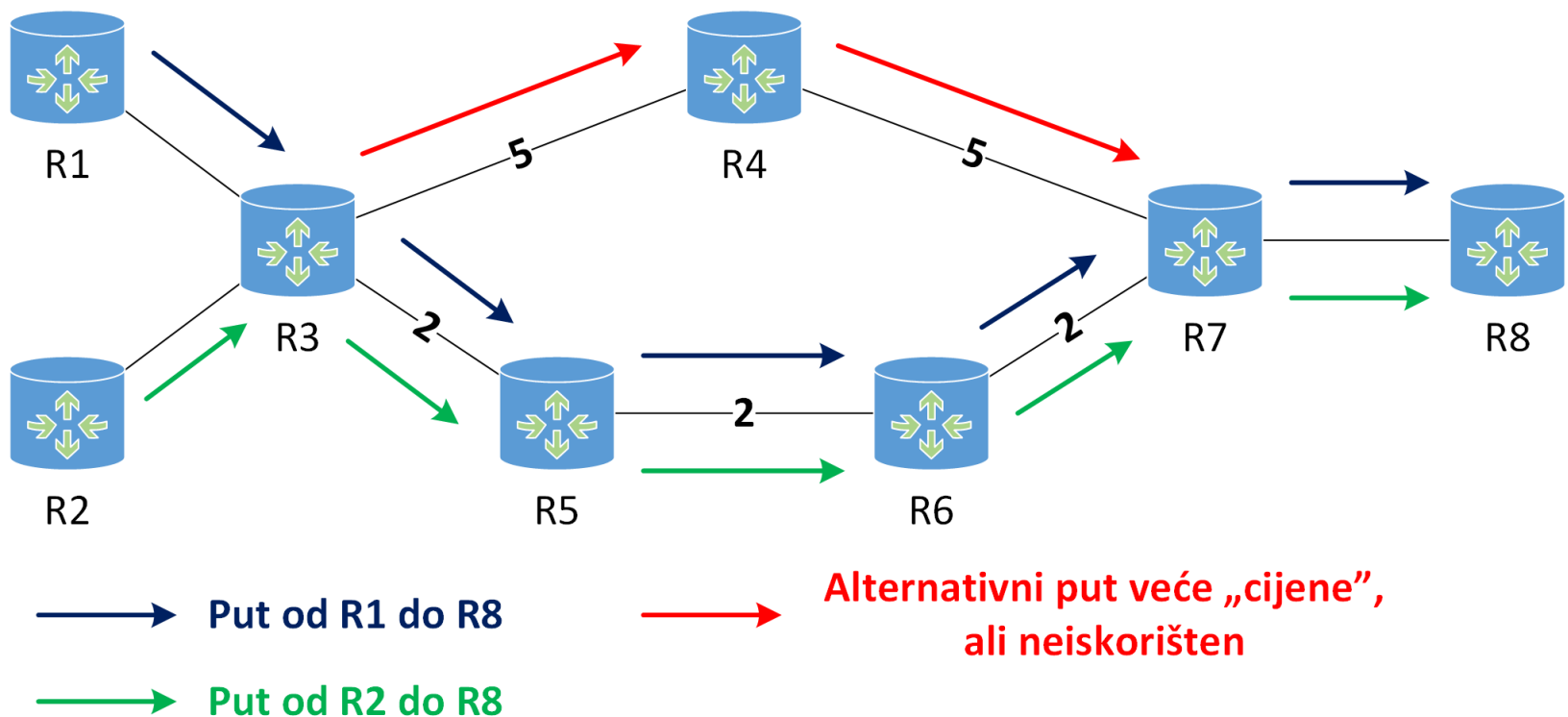


Primjer iz: A. Jukan, W. Bziuk, *Communication Networks, „Fundamentals of Broadband Networks (MPLS GMPLS)”*

Ograničenja klasičnog IP-usmjeravanja (4)

♦ Prilagodljivost usmjeravanja

- Put najmanje „cijene” se odabire i nakon prilagodbe iznosa parametara

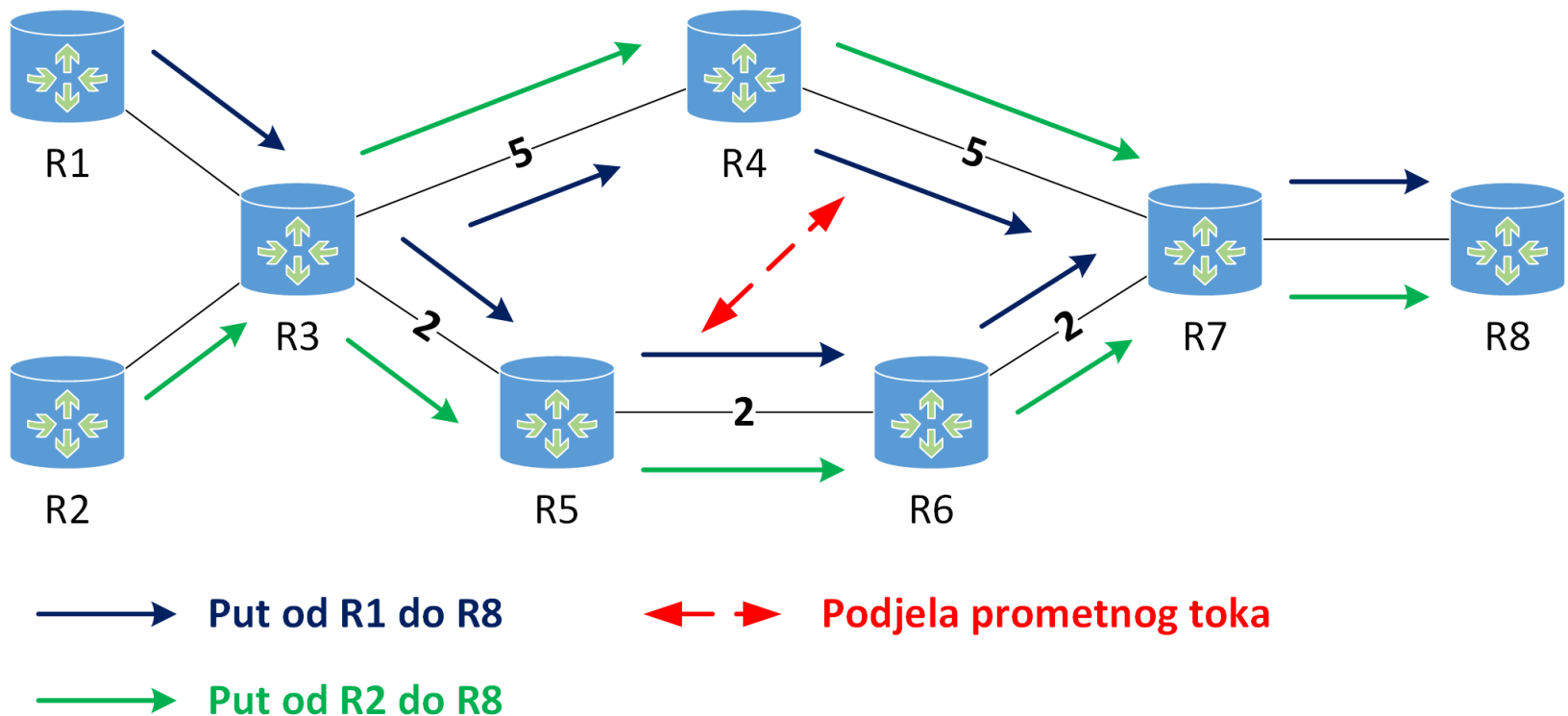


Primjer iz: A. Jukan, W. Bziuk, *Communication Networks, „Fundamentals of Broadband Networks (MPLS GMPLS)”*

Ograničenja klasičnog IP-usmjeravanja (5)

♦ Prilagodljivost usmjeravanja

- Prometni tok nije moguće podijeliti i proslijediti po različitim putevima u mreži

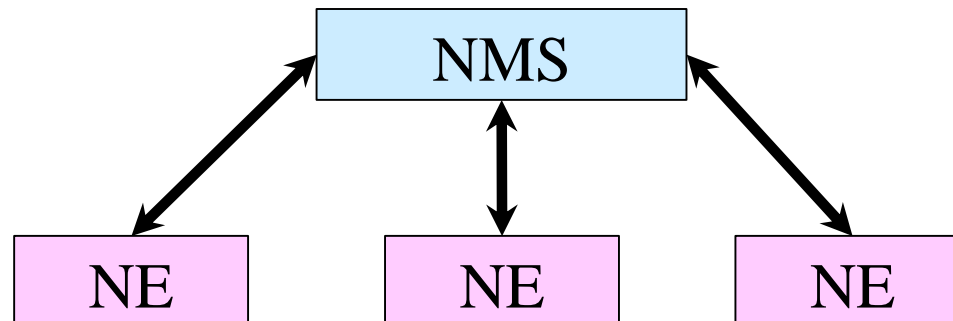


Primjer iz: A. Jukan, W. Bziuk, *Communication Networks, „Fundamentals of Broadband Networks (MPLS GMPLS)”*

- ♦ Prosljeđivanje najkraćim putem može dovesti do sljedećih problema:
 - prometni tokovi različitih izvorišta, koji koriste iste poveznice u mreži, mogu dovesti do pojave zagušenja
 - istovremeno, drugi („dulji”) putevi mogu biti neiskorišteni
- ♦ Prometno inženjerstvo (engl. *traffic engineering*, TE)
 - Odnosi se na različite aspekte ocjenjivanja i optimizacije performansi produkcijskih IP-mreža
 - Obuhvaća različite metode mjerenja, klasifikacije i oblikovanja IP-prometa te njegovog upravljanja
 - Fokus na iskorištavanje propusnosti svih poveznica mreže i raspodjelu prometnog opterećenja

- ♦ Klasično IP-usmjeravanje obuhvaća primitivan oblik TE-a: primjer protokol OSPF
 - Usmjeritelji dinamički mijenjaju put do određenog odredišta kako bi uravnotežili opterećenje mreže
 - Ali, sav promet između istog izvorišta i odredišta slijedi isti put kroz mrežu, bez podrške za QoS
- ♦ IP mreže izvedene tehnologijom WDM
 - TE: efikasna upotreba svih mrežnih resursa
 - TE na fizičkom (WDM-) sloju: (re)konfiguracija virtualne topologije
 - Različiti aspekti TE-a na mrežnom (IP-) sloju izvedeni tehnologijom MPLS-a

- ♦ Sustav upravljanja mrežom (engl. *Network Management System*, NMS)
 - Skup sustava i aplikacija koje omogućavaju nadzor i kontrolu rada mrežnih elemenata (engl. *network element*, NE)
- ♦ IP mreže izvedene tehnologijom WDM
 - NE: npr. IP-usmjeritelj, podesivi valni usmjeritelj (OXC)
 - NMS: npr. zadavanje virtualne topologije (prometne matrice IP-sloja) za konfiguraciju WDM NE-ova



- ♦ Kontrolna ravnina u komunikacijskoj mreži
- ♦ Tehnologija *Multiprotocol Label Switching* (MPLS)
- ♦ Tehnologija *Generalized MPLS* (GMPLS)
- ♦ (Koncept *Software-defined Networking*, SDN)

- ♦ Nastala kao pokušaj da se uklone ograničenja klasičnog IP-usmjeravanja
 - Objediniti najbolje funkcijske aspekte iz CSN- i PSN-domena

- ♦ Osnovna ideja: omogućiti uspostavu virtualnih kanala kroz IP-mrežu
 - Obavljati prosljeđivanje prometa na temelju oznake VC-a, umjesto odredišne IP-adrese

- ♦ Standardizacija kroz tijelo IETF (započeta još 1997.)
 - IETF RFC 3031, „Multiprotocol Label Switching Architecture”
 - IETF RFC 3032, „MPLS Label Stack Encoding”
 - itd.

- ♦ Dizajnirana tako da se može:
 - izvesti u različitim vrstama CSN- i PSN-mreža, odnosno
 - kombinirati s različitim protokolima (IP, PPP, Ethernet, itd.)

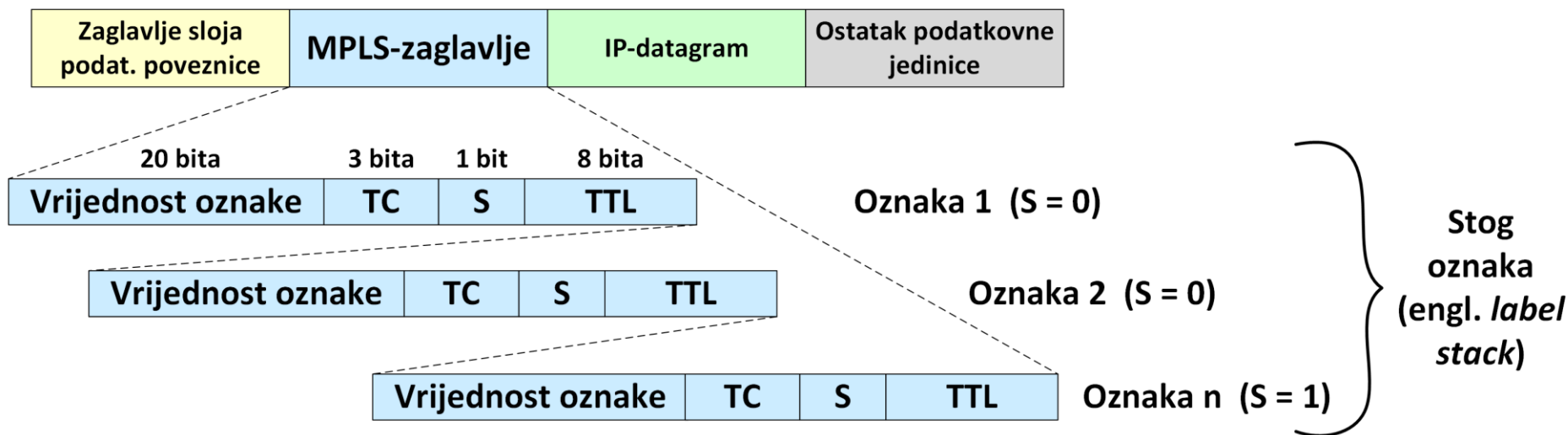
- ♦ Prema svojim funkcijama, MPLS je smješten „između” sloja podatkovne poveznice i mrežnog sloja modela OSI
 - Tehnologija „sloja 2,5”

- ♦ Pruža podršku za QoS, prometno inženjerstvo, itd.

- ◆ Prosljeđivanje datagrama se obavlja na temelju kratkih, fiksno zadanih oznaka (engl. *label*)
 - Oznake se postavljaju kad datagrami ulaze u mrežu/dio mreže s podrškom za MPLS
 - Oznaka vezana uz jedinstveni tok datagrama između izvorišta i odredišta
- ◆ Mrežni čvorovi s podrškom za MPLS prosljeđuju datagrame prema vrijednostima njihovih oznaka
 - Ne koristi se odredišna IP-adresa iz zaglavlja datagrama
- ◆ Potrebno omogućiti dijeljenje oznaka između MPLS mrežnih čvorova
 - Uvesti nove protokole ili proširiti postojeće

Osnovni koncepti MPLS-a: zaglavlje

- ♦ MPLS-zaglavlje se dodaje između zaglavlja sloja podatkovne poveznice i mrežnog sloja



TC (polje *traffic class*): npr. za definiciju QoS klasa

S (zastavica *bottom of stack*): ako je $S = 1$, trenutna oznaka je zadnja u stogu

TTL (polje *time-to-live*): vrijednost TTL-a (kao i u IP-zaglavlju)

Osnovni koncepti MPLS-a: arhitektura (1)

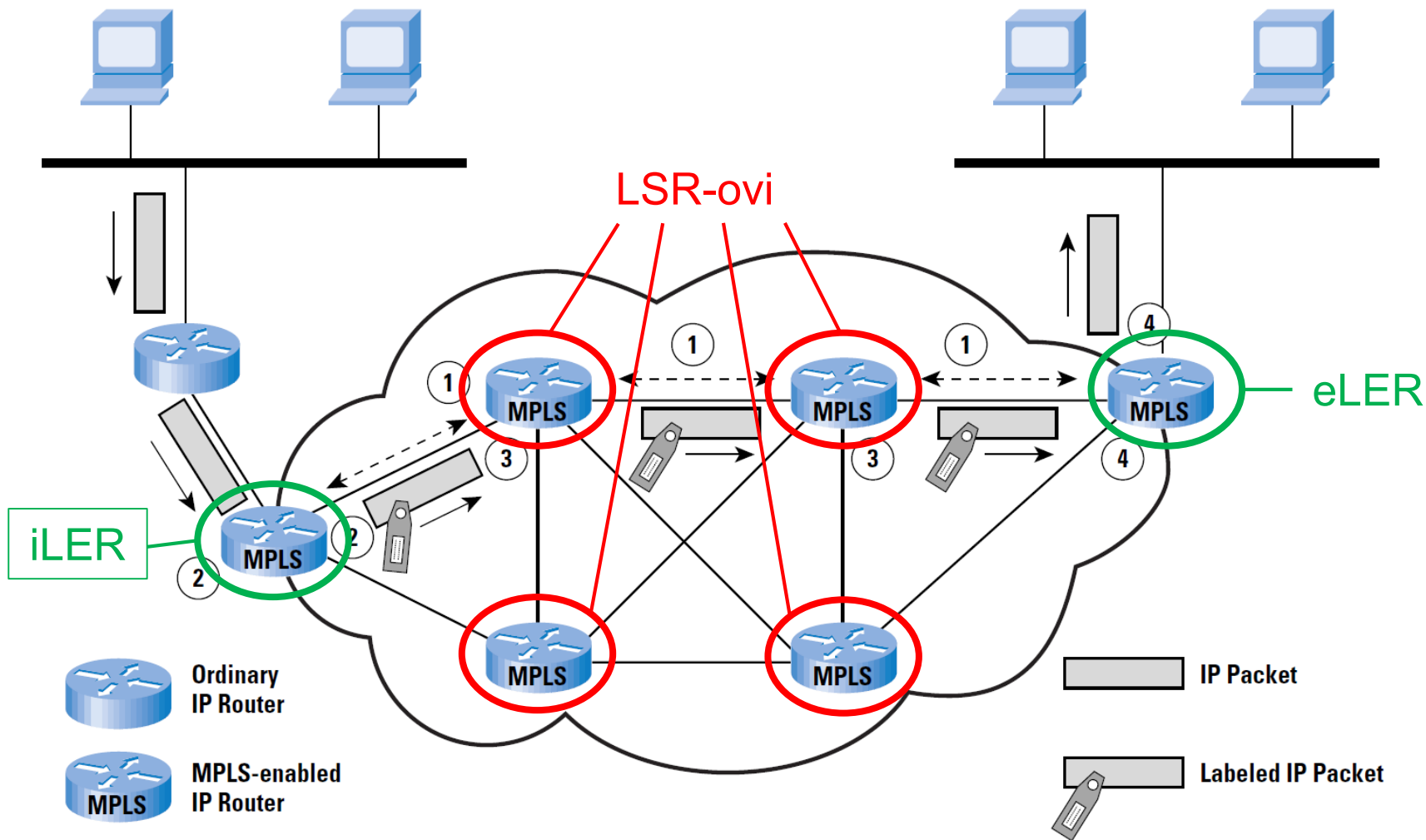
- ♦ MPLS-mreža sastoji se od skupa mrežnih čvorova, koji se nazivaju usmjeritelji prosljeđivanja oznakom (engl. *label-switched router*, LSR)
 - Usmjeritelji koji mogu prosljeđivati datagrame na temelju oznaka u MPLS-zaglavlju
- ♦ LSR-ovi na „krajevima” MPLS-mreže nazivaju se rubni LSR-ovi (engl. *edge LSR*, E-LSR ili engl. *label edge router*, LER)
- ♦ LER-ovi se dijele na 2 podvrste:
 - ulazni LER (engl. *ingress LER*, iLER)
 - izlazni LER (engl. *egress LER*, eLER)

- ♦ Ulazni LER (iLER)
 - Predstavlja „ulaz” u MPLS-mrežu
 - Dodaje MPLS-zaglavlje datagramima koji ulaze u MPLS-mrežu

- ♦ Izlazni LER (eLER)
 - Predstavlja „izlaz” iz MPLS-mreže
 - Uklanja MPLS-zaglavlje datagramima koji izlaze iz MPLS-mreže

- ♦ LSR-ovi na krajevima mreže, u pravilu, objedinjuju funkcije iLER-a i eLER-a

Osnovni koncepti MPLS-a: arhitektura (3)



Slika preuzeta iz: W. Stallings, „MPLS”, The IP Journal

- ◆ Datagrami se u mreži klasificiraju u klase ekvivalentnog prosljeđivanja (engl. *forwarding equivalence class*, FEC)
 - FEC je grupa datagrama koji se prosljeđuju istim putem i na isti način (npr. uz istu klasu QoS-a)
 - Datagrami poslani između istih krajnjih LER-ova mogu pripadati različitim FEC-ovima
 - Različiti parametri se mogu koristiti kako bi se odredio kojem FEC-u pripada pojedini datagram:
 - izvorišna ili odredišna IP-adresa, izvorišna ili odredišna vrata (engl. *port*), polje identifikacije IP-datagrama, itd.
- ◆ Prosljeđivanje datagrama obuhvaća:
 - pridruživanje datagrama određenom FEC-u
 - utvrđivanje koji je mrežni čvor „sljedeći skok” za svaki FEC

- ♦ IP u svakom usmjeritelju:
 - iznova pridružuje datagram određenom FEC-u
 - utvrđuje koji je mrežni čvor „sljedeći skok” za taj FEC
- ♦ MPLS na ulazu mreže:
 - pridružuje datagram određenom FEC-u
 - dodjeljuje oznaku datagramu na temelju FEC-a kojem pripada
- ♦ U samoj mreži, MPLS:
 - ne obavlja ponovno pridruživanje datagrama FEC-u, već se prosljeđivanje obavlja isključivo na temelju vrijednosti oznake
 - koristi tablicu prosljeđivanja koja „preslikava” vrijednosti oznaka na adresu „sljedećeg skoka” (mrežnog čvora)

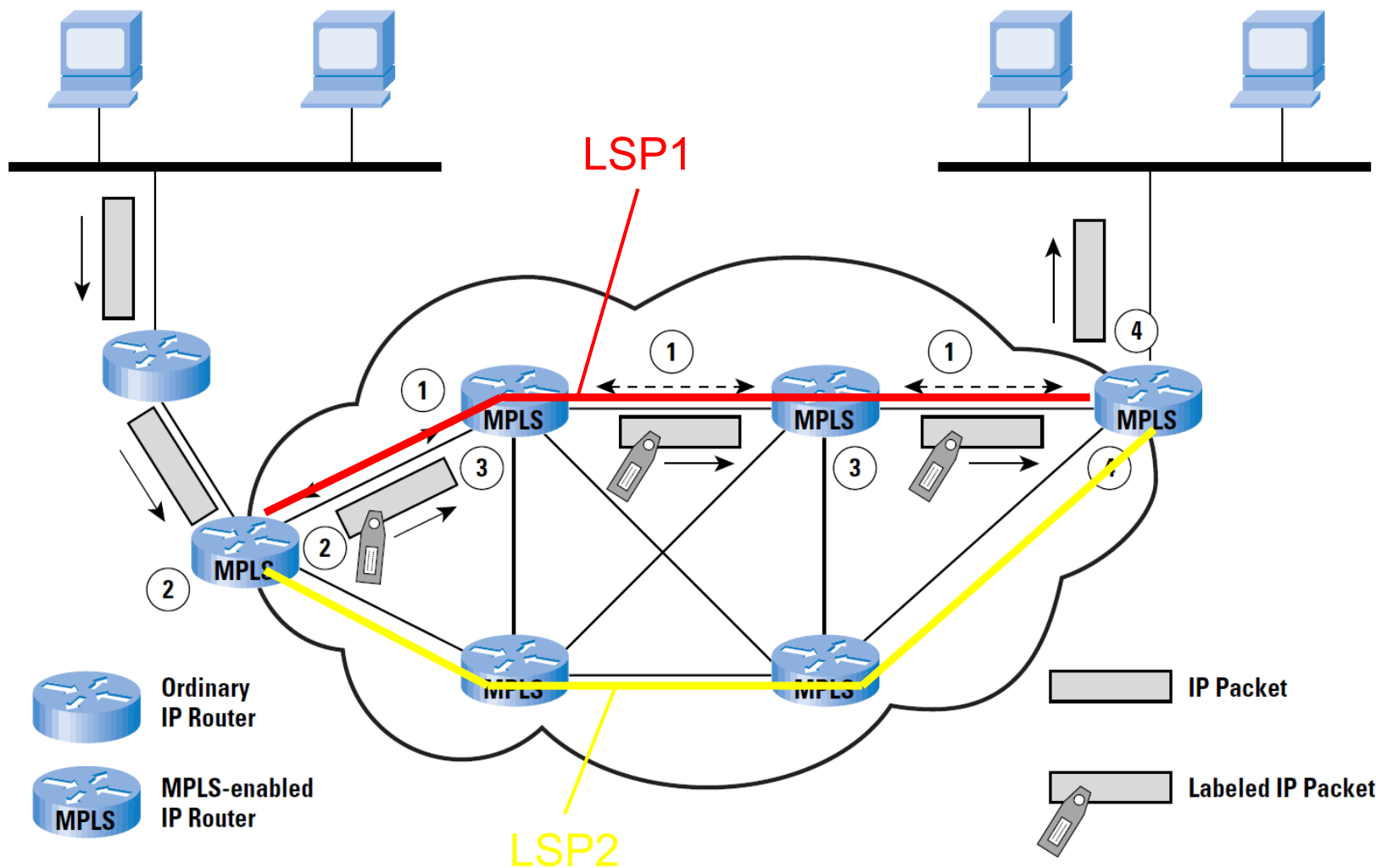
Osnovni koncepti MPLS-a: put prosljeđivanja

- ♦ Jednosmjerni virtualni kanal kroz MPLS-mrežu definira se za tok datagrama određen jedinstvenim FEC-om
 - MPLS je tehnologija zasnovana na komutaciji kanala

- ♦ VC se u terminologiji MPLS-a naziva put prosljeđivanja oznakom (engl. *label-switched path*, LSP)
 - Svi datagrami pridruženi određenom FEC-u bit će poslani po LSP-u koji odgovara tom FEC-u

- ♦ LSP za pojedini FEC može se odabrati na 2 načina:
 - usmjeravanjem „skok-po-skok” (engl. *hop-by-hop routing*, HbHR)
 - izričitim usmjeravanjem (engl. *explicit routing*, ER)
- ♦ Usmjeravanje „skok-po-skok”
 - Svaki LSR neovisno o drugim mrežnim čvorovima odabire „sljedeći skok” za svaki FEC
 - Koriste se klasični IGP-protokoli (npr. OSPF)
- ♦ Izričito usmjeravanje
 - Pojedini LER odabire neke ili sve LSR-ove za LSP
 - Bolje karakteristike u odnosu na HbHR (npr. omogućuje prometno inženjerstvo)

Princip rada MPLS-a: ilustracija



Slika preuzeta iz: W. Stallings, „MPLS”, The IP Journal

(1) Uspostava LSP-a za pojedini FEC, zajedno s definicijom potrebnih QoS-parametara

(a) LSR-ovi koriste jedan od IGP-protokola (npr. OSPF) kako bi razmijenili informacije o dostupnosti odredišnih mreža

(b) Odabiru se oznake i rute koje će LSR-ovi koristiti prilikom prosljeđivanja datagrama određenog FEC-a = definicija tablice prosljeđivanja:

- „ručno” zadavanje oznaka i ruta (od strane administratora mreže), ili
- dogovor oko oznaka i ruta putem protokola, npr. LDP (*Label Distribution Protocol*), koji koriste LSR-ovi

(2) Datagram ulazi u MPLS-mrežu te ga se pridružuje određenom FEC-u

(a) iLER obrađuje datagram kako bi utvrdio kakvu klasu QoS-a zahtijeva datagram, odnosno kojem ga FEC-u pridružiti

(b') Ako za potrebni FEC nije određen LSP, iLER ga prvo mora dogovoriti s ostalim LSR-ovima

(b'') iLER pridružuje datagram određenom FEC-u, odnosno LSP-u, te mu dodaje odgovarajuće MPLS-zaglavlje s oznakom

(c) iLER prosljeđuje datagram

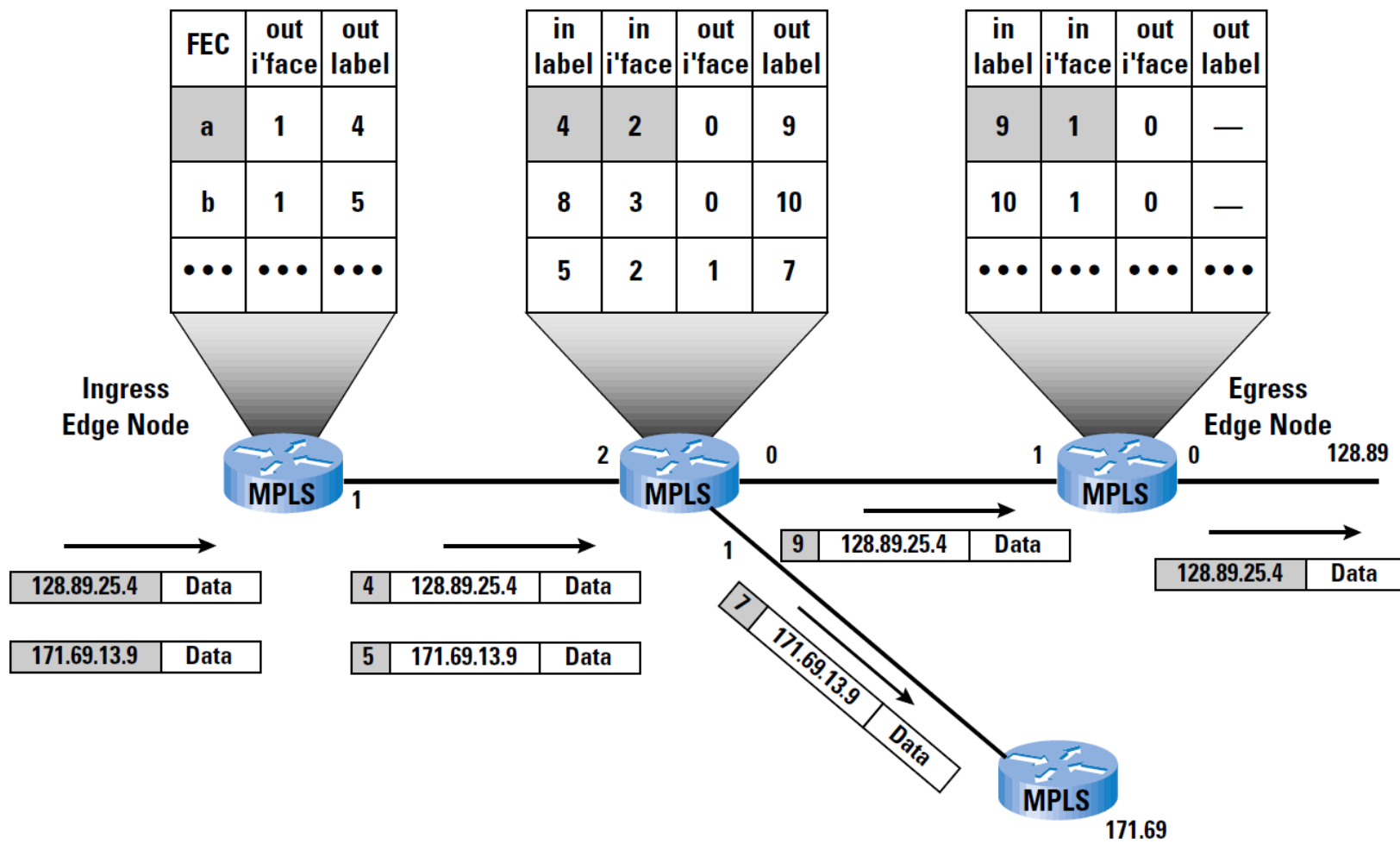
(3) U MPLS-mreži, svaki LSR koji primi datagram s oznakom:

- (a) ukloni postojeću oznaku i doda novu oznaku koja odgovara odlaznom sučelju LSR-a prema sljedećem čvoru

- (b) proslijedi datagram sljedećem LSR-u koji je dio LSP-a

(4) Datagram izlazi iz MPLS-mreže, eLER uklanja MPLS-zaglavlje, pročita IP-zaglavlje datagrama te ga proslijeđuje konačnom odredištu

Primjer MPLS-prosljeđivanja (1)

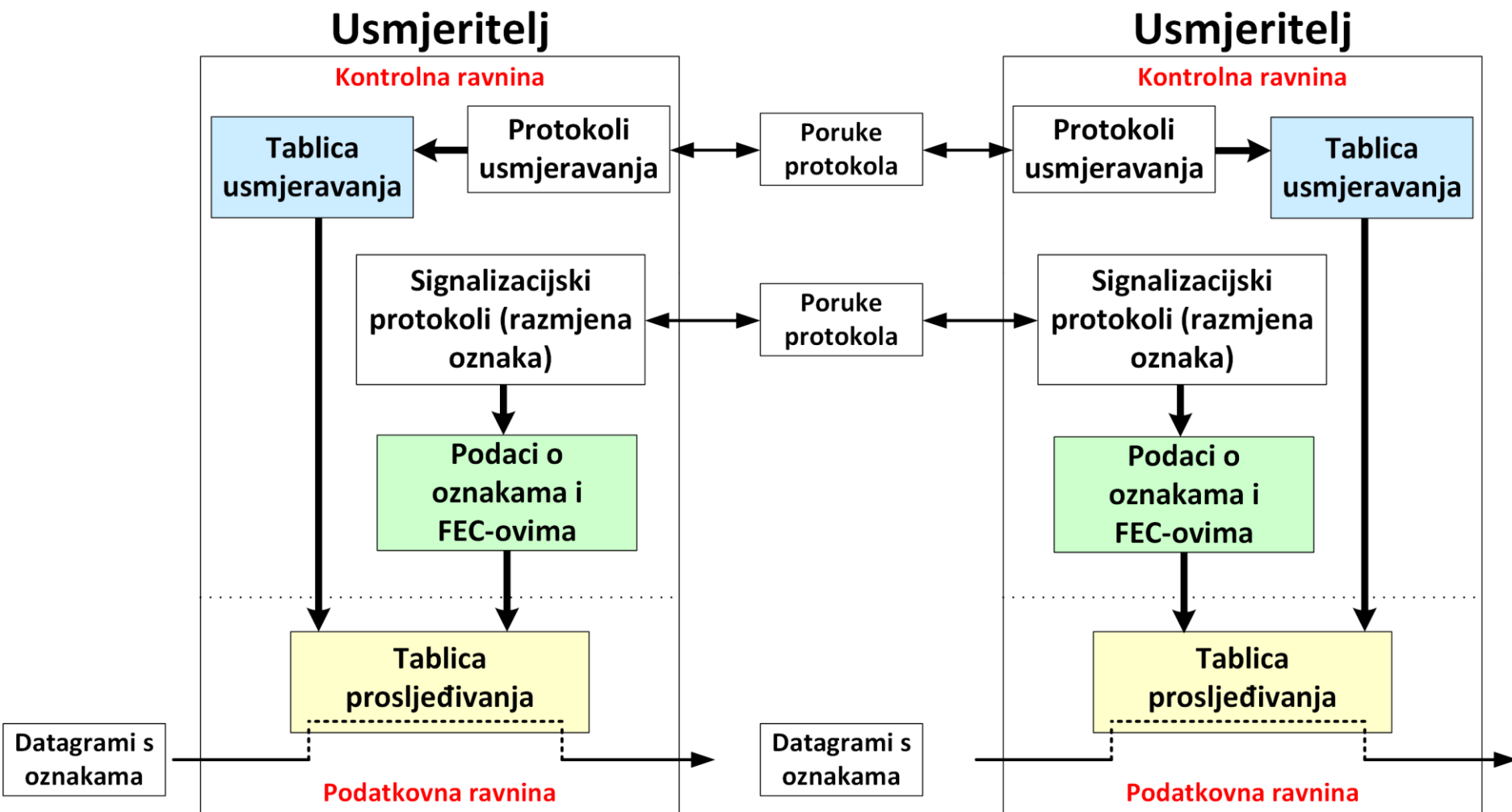


Slika preuzeta iz: W. Stallings, „MPLS”, The IP Journal

Primjer MPLS-prosljeđivanja (2)

- ♦ Svaki LSR održava tablicu prosljeđivanja s podacima o svim LSP-ovima koji su uspostavljeni kroz njega
- ♦ Nakon primitka datagrama s MPLS-zaglavljem, LSR pretražuje tablicu kako bi pronašao adresu „sljedećeg skoka”
- ♦ LSR potom uklanja postojeću oznaku i dodaje novu oznaku koja odgovara njegovom odlaznom sučelju prema sljedećem čvoru
 - Radi skalabilnosti, vrijednosti oznake su jedinstvene samo na lokalnoj razini (iste se vrijednosti, u pravilu, mogu koristiti na različitim LSR-ovima koji nisu susjedi)

Ravnine u MPLS-mreži



- ◆ Definiraju se novi (signalizacijski) protokoli, ili proširenja onih u širokoj upotrebi, za razmjenu oznaka i uspostavu LSP-ova

- ◆ Svaki LSR na putu prosljeđivanja mora:
 - dodijeliti oznaku LSP-u kojom će se identificirati dolazni datagrami koji su pridruženi odgovarajućem FEC-u
 - obavijestiti sve susjedne LSR-ove, smještene „uzvodno”, koji će slati datagrame za odgovarajući FEC o vrijednosti oznake koja je dodijeljena za taj FEC
 - odrediti „sljedeći skok” za dani LSP i saznati vrijednost oznake koju je sljedeći čvor („nizvodno”) dodijelio odgovarajućem FEC-u

- ♦ Oznake se mogu:
 - zadati „ručno” (od strane administratora mreže)
 - razmijeniti nekim od protokola za razmjenu protokola

- ♦ Za razmjenu oznaka mogu se koristiti različiti protokoli:
 - protokol LDP (*Label Distribution Protocol*), IETF RFC 5036
 - protokol CR-LDP (*Constraint-Based LDP*), IETF RFC 3212
 - protokol RSVP (*Resource ReSerVation Protocol*), IETF RFC 2205
 - proširenje protokola BGP, IETF RFC 3107
 - itd.

- ♦ Kontrolna ravnina u komunikacijskoj mreži
- ♦ Tehnologija *Multiprotocol Label Switching* (MPLS)
- ♦ Tehnologija *Generalized MPLS* (GMPLS)
- ♦ (Koncept *Software-defined Networking*, SDN)

- ♦ Potreba za izvedbom kontrolne ravnine u podesivim valnim usmjeriteljima (OXC)
 - Sličnost između valnih duljina i LSP-ova → primjeniti MPLS-koncepte i u optičkim mrežama

- ♦ Proširiti primjenu MPLS-a i na druge vrste transportnih mreža → poopćeni MPLS (GMPLS)
 - Uz PSN-mreže, omogućiti i primjenu na druge vrste komutacije, npr., komutaciju valnih duljina
 - Omogućiti interoperabilnost različitih vrsta transportnih mreža i uređaja (npr. IP-usmjeritelji i OXC-ovi)

- ♦ GMPLS je *de-facto* izvedba kontrolne ravnine u WDM-mrežama s komutacijom valnih duljina

- ♦ Standardizacija kroz tijelo IETF
 - IETF RFC 3945, „Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture”
 - IETF RFC 3630, „Traffic Engineering (TE) Extensions to OSPF Version 2”
 - IETF RFC 3209, „RSVP-TE: Extensions to RSVP for LSP Tunnels”
 - IETF RFC 4204, „Link Management Protocol (LMP)”
 - itd.

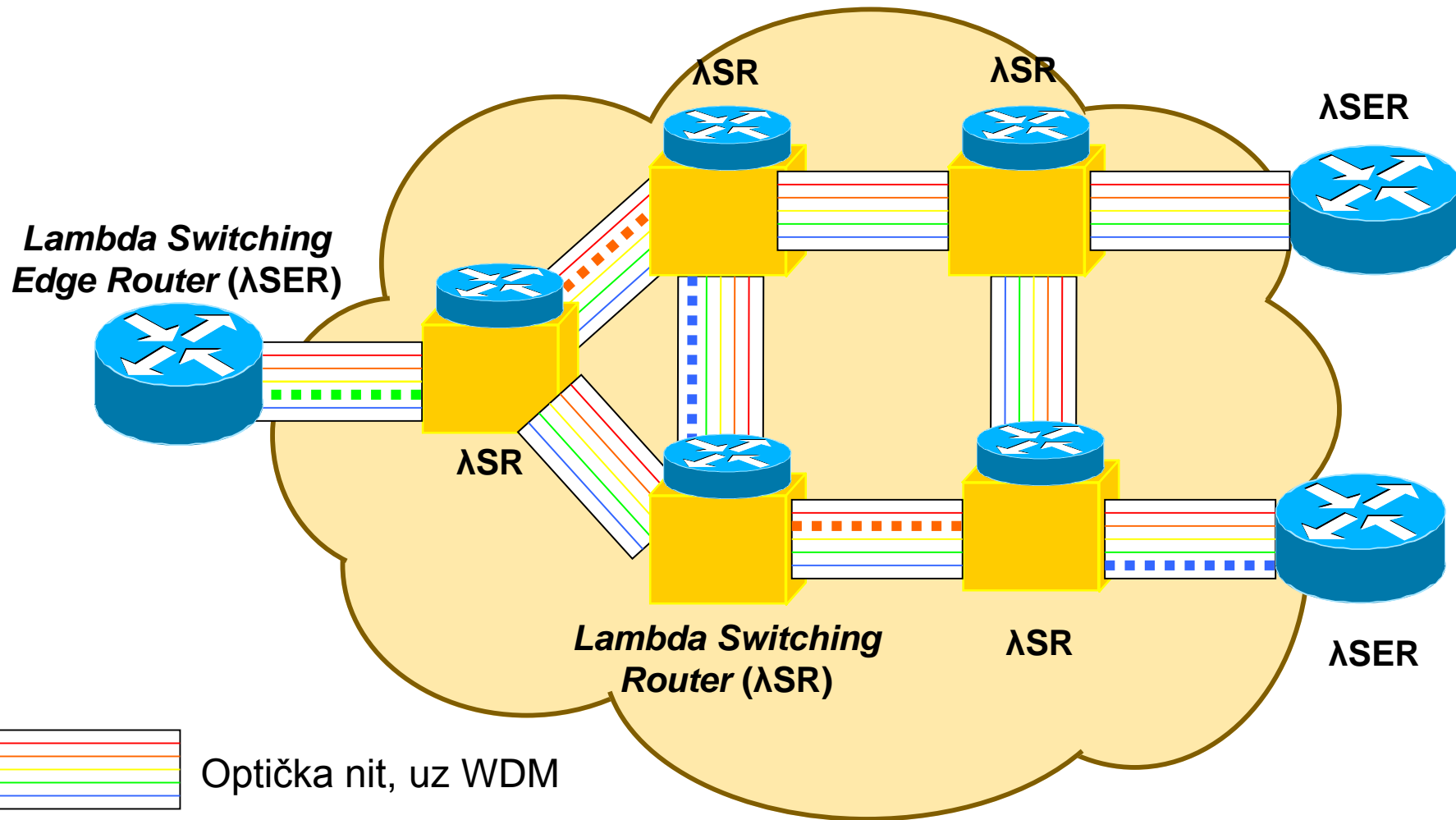
♦ LSR/OXC

- Prosljeđivanje u podatkovnoj ravnini zasnovano na odgovarajućoj tablici
 - LSR: (ulazno sučelje, ulazna oznaka) → (izlazno sučelje, izlazna oznaka)
 - OXC: (ulazno sučelje, ulazna valna duljina) → (izlazno sučelje, izlazna valna duljina)
- Prosljeđivanje neovisno o sadržaju (teretu) komutirane jedinice podataka
 - LSR prosljeđuje jedinice podataka na temelju oznake, a OXC na temelju valne duljine

♦ LSP/svjetlosni put

- jednosmjerni konstrukt
- ista oznaka/valna duljina ne može biti korištena na istom sučelju višestruko

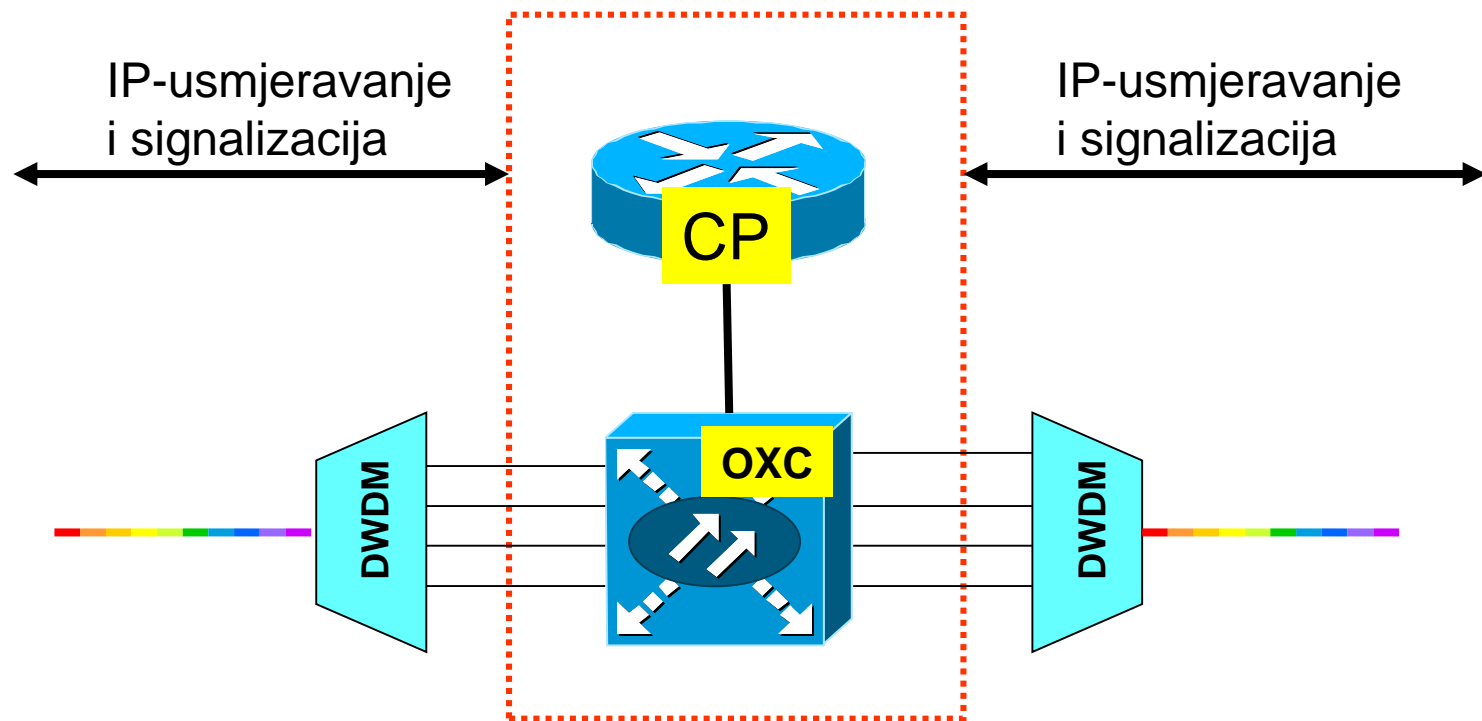
- ♦ Svaki OXC se može smatrati ekvivalentom LSR-a
- ♦ Svjetlosni putevi se mogu smatrati ekvivalentima LSP-ova
- ♦ Valne duljine i sučelja OXC-a se mogu smatrati ekvivalentima oznaka i sučelja LSR-ova
- ♦ Uspostava optičkog kanala je slična prometnom inženjerstvu MPLS-a korištenjem izričitog usmjeravanja (ER)



Preuzeto iz: P. Castoldi, *Optical Core Networks*, „ASON, ASTN and GMPLS basics”

Ravnine u GMPLS-mreži (1)

- ♦ Arhitektura usmjeritelja prosljeđivanja valnom duljinom (engl. *lambda-switching router*, λ SR)



Preuzeto iz: P. Castoldi, *Optical Core Networks*, „ASON, ASTN and GMPLS basics”

- ♦ Poopćenje prema usmjeritelju prosljeđivanja optičkom oznakom (engl. *optical LSR*, OLSR)
 - OLSR = CP (usmjeravanje zasnovano na valnim duljinama) + OXC
 - Koristi kontrolnu ravninu zasnovanu na protokolu IP (i MPLS)
 - Provodi prosljeđivanje na razini optičkih niti i na razini valnih duljina

- ♦ MPLS proširen kako bi uzeo u obzir i druge vrste LSR-ova koji odluke o prosljeđivanju ne zasnivaju na datagramima
 - Odluke na temelju, npr., valnih duljina ili oznaka fizičkih priključaka
- ♦ Pojam LSP-a je također poopćen
 - Primjer: LSP koji podržava prosljeđivanje na temelju valnih duljina (engl. *lambda switch capable LSP*)
 - Poopćeni LSP (engl. *generalized LSP*) je dvosmjernan put prosljeđivanja
 - LSP mora biti definiran između dva LSR-a iste vrste
- ♦ Potreba za uvođenjem poopćenih oznaka

- ♦ GMPLS se zasniva na poopćenim oznakama (engl. *generalized label*, GL)
- ♦ GL može predstavljati:
 - klasičnu MPLS-oznaku
 - jednu valnu duljinu u optičkoj niti
 - jednu optičku nit u kabelu
 - itd.
- ♦ Različiti formati GL-a, ovisno o vrsti oznake

- ◆ Obuhvaća tri različite klase protokola:
 - Protokoli usmjeravanja
 - Razmjena informacija o topologiji i odredišnim mrežama
 - Primjeri: proširenje protokola OSPF za TE (OSPF-TE) i BGP
 - Signalizacijski protokoli
 - Kontrola uspostave LSP-ova
 - Primjer: CR-LDP
 - Protokoli upravljanja poveznicom (engl. *link management protocol*, LMP)

Protokolni složaj GMPLS-a: usmjeravanje

- ♦ Koriste se protokoli zasnovani na stanju poveznice radi izvještavanja o statusu, karakteristikama i ograničenjima poveznica, odnosno topologiji mreže
- ♦ Za odabir puta se može koristiti izričito usmjeravanje (ER) ili sam protokol usmjeravanja
 - Odabir i zaštitnih puteva (engl. *back-up path*)
- ♦ Najčešće se u mrežama izvodi OSPF-TE, IETF RFC 3630

Protokolni složaj GMPLS-a: signalizacija

- ♦ Proširenje signalizacijskih protokola u odnosu na MPLS radi uspostave poopćenih LSP-ova
 - Zahtjev za novom poopćenom oznakom
 - Razmjena poopćenih oznaka
 - Signalizacija za uspostavu primarnih i zaštitnih puteva

- ♦ Najčešće se u mrežama izvodi RSVP-TE, IETF RFC 3209

- ♦ Protokol upravljanja poveznicom (engl. *link management protocol*, LMP)
- ♦ Novi protokol kako bi se osigurao ispravan rad CP-a i DP-a između dva susjedna mrežna čvora
 - Uspostava kontrolne veze između čvorova
 - Dogovor oko parametara poveznice
 - Provjera postojanja fizičke povezivosti na razini DP-a između čvorova
- ♦ Neovisan o tehnologiji izvedbe poveznice

- ♦ Kontrolna ravnina u komunikacijskoj mreži
- ♦ Tehnologija *Multiprotocol Label Switching* (MPLS)
- ♦ Tehnologija *Generalized MPLS* (GMPLS)
- ♦ (Koncept *Software-defined Networking*, SDN)

- ♦ Tradicionalne IP-mreže teške i složene za upravljanje
- ♦ Primjer: primjena nove politike usmjeravanja
 - Potrebno zasebno podesiti svaki mrežni uređaj
 - Često se za to koriste naredbe specifične pojedinom proizvođaču opreme
- ♦ Primjer: prilagodba ispadima uređaja i promjenama prometnog opterećenja
 - Mehanizmi automatske rekonfiguracije i prilagodbe mreže gotovo da i ne postoje u primjeni

- ♦ Tradicionalne IP mreže su *vertikalno integrirane*
- ♦ CP i DP objedinjene u mrežnim uređajima
 - CP - skup funkcija vezanih uz odlučivanje o putevima prosljeđivanja paketa
 - DP - skup funkcija vezanih uz samo prosljeđivanje paketa (na temelju odluka CP-a)
- ♦ Smanjena fleksibilnost i otežana evolucija mrežne infrastrukture
 - Primjer: prijelaz s protokola IPv4 na protokol IPv6

- ♦ Programski upravljana mreža (engl. *software-defined network*, SDN)
 - Programski upravljano umrežavanje (engl. *software-defined networking*)
- ♦ Paradigma umrežavanja koja definira drugačiju arhitekturu komunikacijske mreže
- ♦ Nastala kao odgovor na izazove tradicionalnih komuni. mreža (npr. Internet)
 - Olakšati upravljanje komunikacijskom mrežom i njezinu kontinuiranu evoluciju

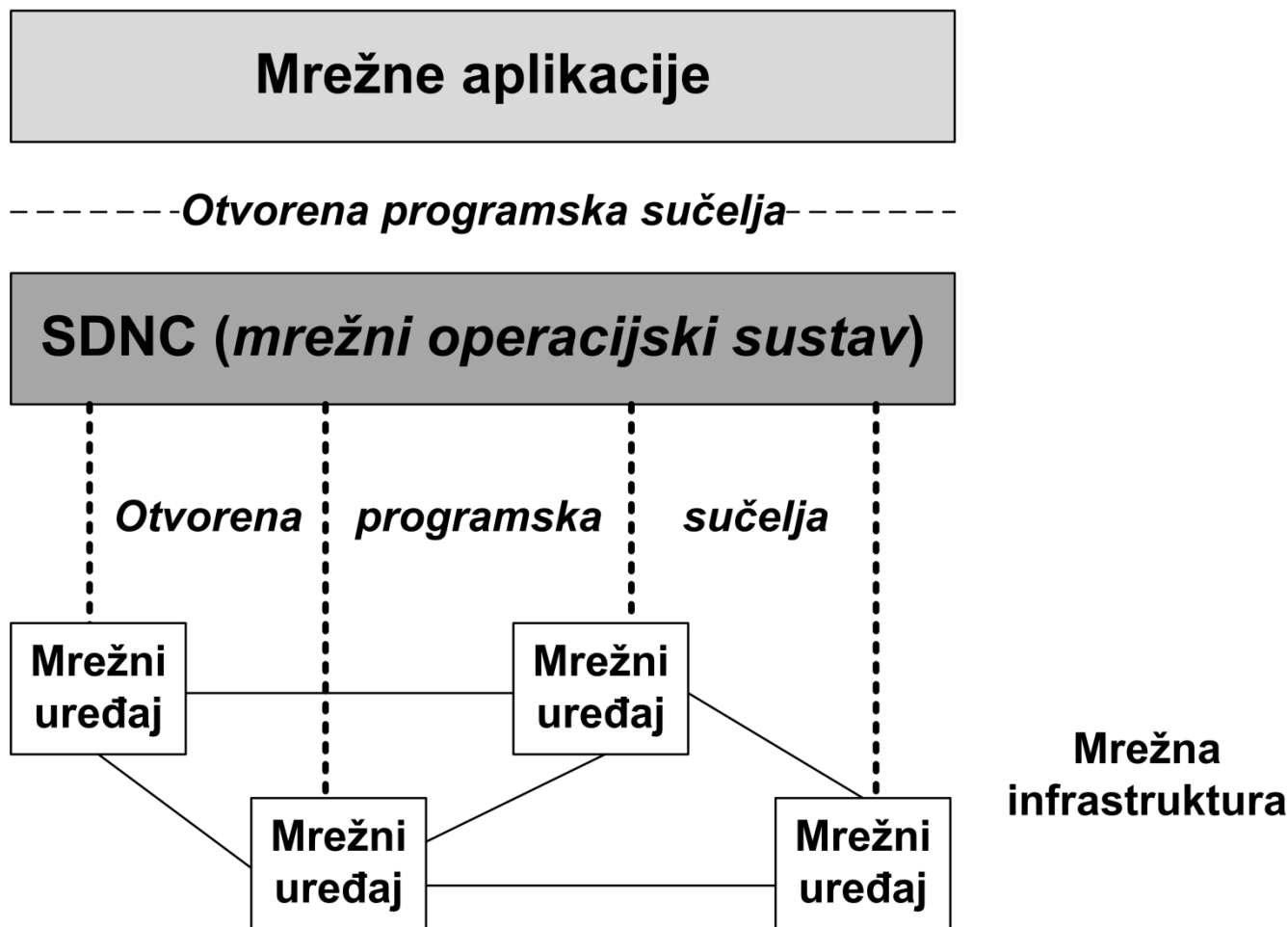
- ♦ Izdvojiti funkcije CP-a iz mrežnih uređaja u *logički centraliziran* upravljački uređaj
 - Upravljački uređaj (engl. *SDN controller*, SDNC) se smatra *mrežnim operacijskim sustavom*
 - Logička ne pretpostavlja i fizičku centraliziranost SDNC-a
 - U mreži može postojati više (fizičkih ili virtualnih) instanci SDNC-a = raspodijeljena izvedba kontrolne ravnine

- ♦ Mrežni uređaji zadržavaju samo funkcije podatkovne ravnine
 - Jednostavniji mrežni elementi (NE) za prosljeđivanje paketa
 - Odluke o načinu prosljeđivanja donosi SDNC

- ♦ Razdvajanje ravnina iziskuje dobro-definirano programsko sučelje između mrežnih elemenata i upravljačkog uređaja
 - Pomoću takvog sučelja SDNC ostvaruje izravnu kontrolu nad stanjem NE-ova
 - Jedno od takvih sučelja je ono zasnovano na specifikaciji OpenFlow

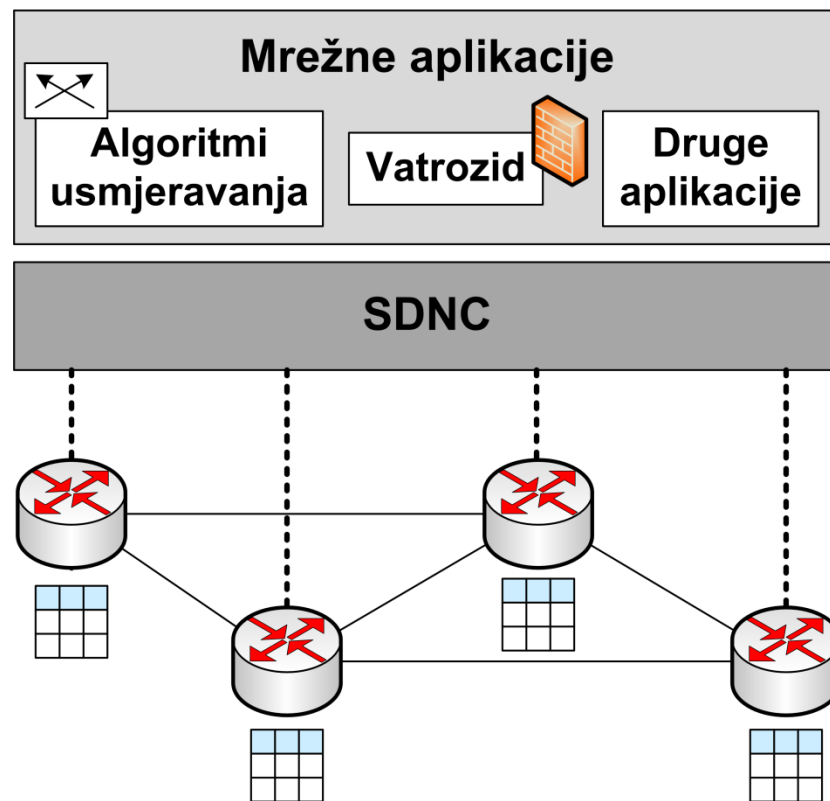
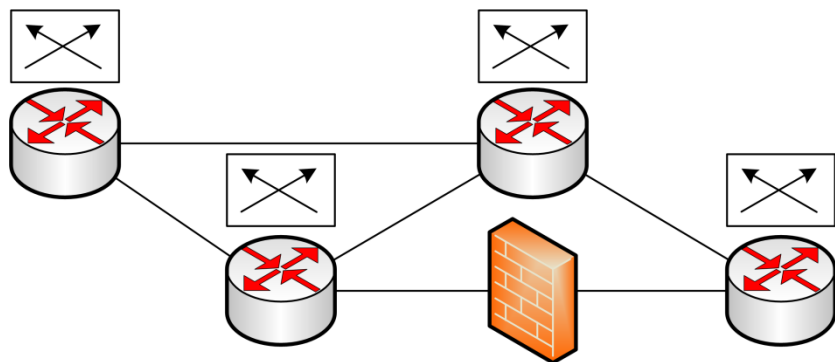
- ♦ Ovakvo razdvajanje funkcija donosi potrebnu fleksibilnost i olakšava tehnološku evoluciju
 - Izazovi upravljanja komunikacijskom mrežom podijeljeni između prilagodljivih entiteta

Pojednostavljeni pogled na SDN

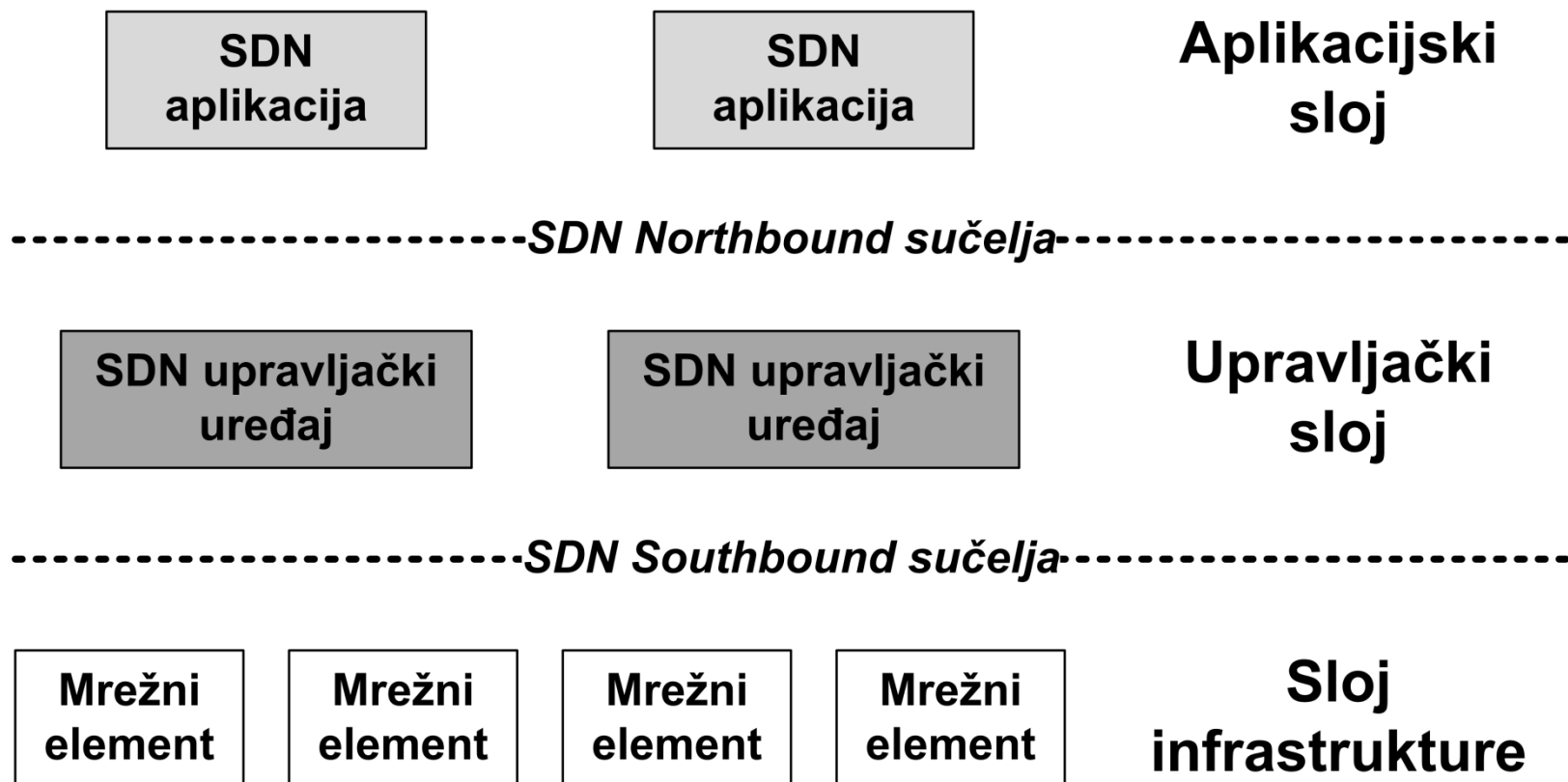


- ◆ Danas se koriste različite definicije pojma SDN
 - Općenito: “sve što uključuje programsku podršku je SDN”
- ◆ Pojam SDN se odnosi na arhitekturu mreže u kojoj:
 - su razdvojene kontrolna i podatkovna ravnina
 - se proslijeđivanje paketa zasniva na proširivom skupu parametara za opis tokova paketa
 - tok može biti određen različitim vrijednostima iz zaglavlja paketa (a ne samo, npr., izvorišnom i odredišnom IP-adresom)
 - je kontrolna logika premještena na zaseban entitet, SDNC
 - SDNC pruža apstraktan pogled na mrežu i njezino stanje
 - je ona “programirljiva” od strane aplikacija
 - prilagodljiva kontrola mrežnih usluga (npr., usmjeravanje)

Ilustracija prednosti SDN-a



- ♦ Prema organizaciji *Open Networking Foundation* (ONF)



- ◆ Sloj infrastrukture (engl. *infrastructure layer*)
 - Obuhvaća mrežne elemente (NE-ove), koji omogućavaju (žičanu ili bežičnu) povezanost između krajnjih računala
 - NE-ovi mogu biti izvedeni sklopovski ili programski
 - NE-ovi podržavaju osnovni skup elementarnih operacija nad paketima (npr. *proslijedi paket SDNC-u* ili *odbaci paket*)
 - Podržane vrste operacija ovise o izvedbi *Southbound* sučelja

- ◆ Upravljački sloj (engl. *control layer*)
 - Obuhvaća upravljačke uređaje (SDNC-ove), koji brinu o konfiguraciji mreže (“kontrolna logika”)
 - SDNC prati stanje mreže, odlučuje o načinu prosljeđivanja paketa te *programira* pripadajuća pravila prosljeđivanja u NE-ovima
 - “Programiranje” se obavlja kroz *Southbound* sučelje

- ♦ *Southbound* sučelja
 - Određuju način “međudjelovanja” između SDNC-ova i NE-ova
 - Propisuju osnovni skup operacija nad paketima koje NE-ovi provode
 - Definiraju i komunikacijski protokol između SDNC-ova i NE-ova

- ♦ Aplikacijski sloj (engl. *application layer*)
 - Obuhvaća izvedbe različitih mrežnih aplikacija i usluga (npr. usmjeravanje, usklađivanje prometnog opterećenja, vatrozid)

- ♦ *Northbound* sučelja
 - Izlažu ih SDNC-ovi kako bi omogućili aplikacijama specifikaciju zahtjeva (npr. na performanse mreže)
 - Apstrahiraju detalje izvedbe *Southbound* sučelja i sloja infrastrukture (odnosno mrežnih resursa koje ona nudi)