

# Glava 6: WiFi i mobilne mreže

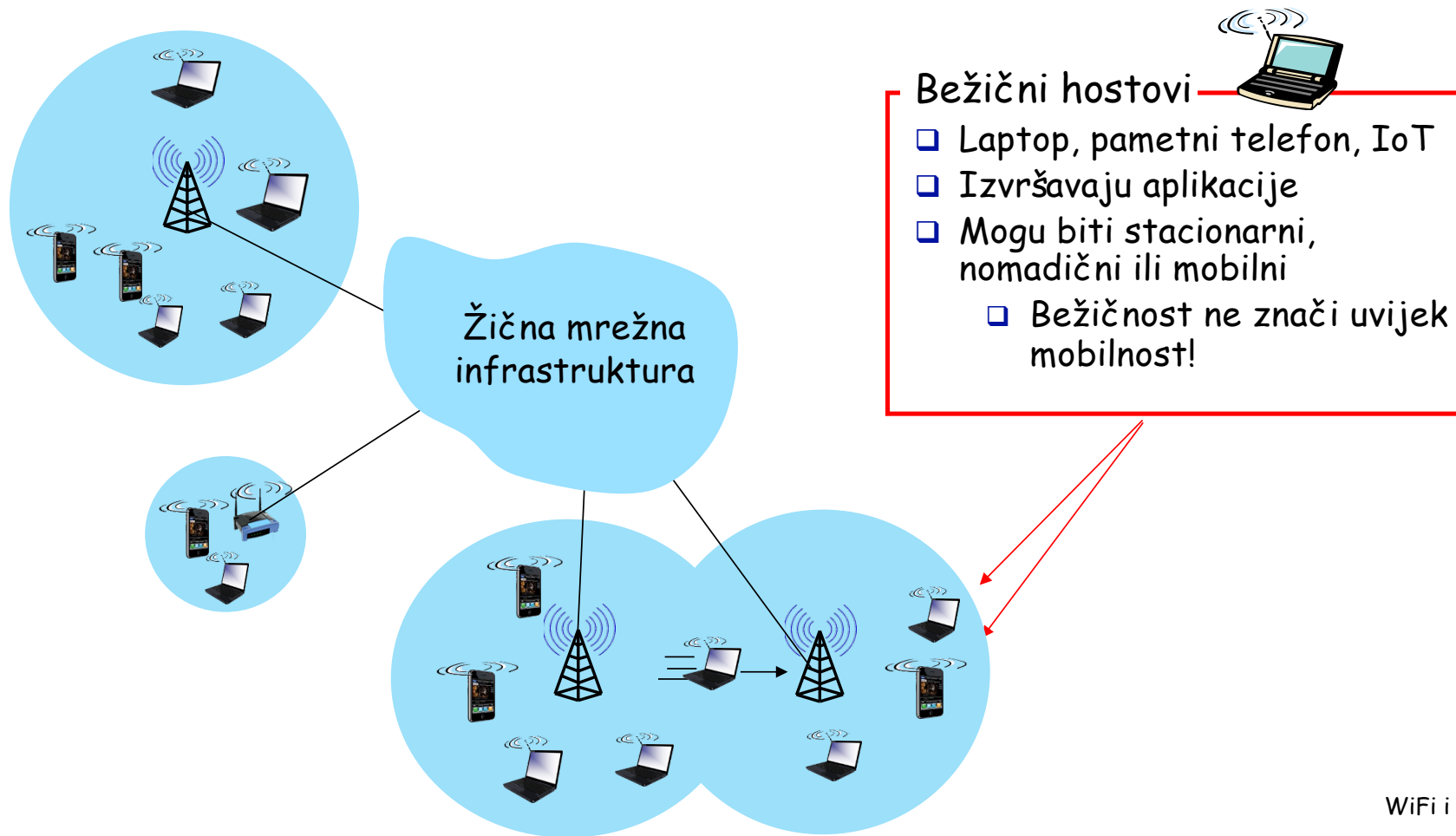
- Uvod
- Bežični linkovi i mreže
- WiFi
- Celularne mreže (4G i 5G)
- Mobilnost u računarskim mrežama

# WiFi i mobilne mreže

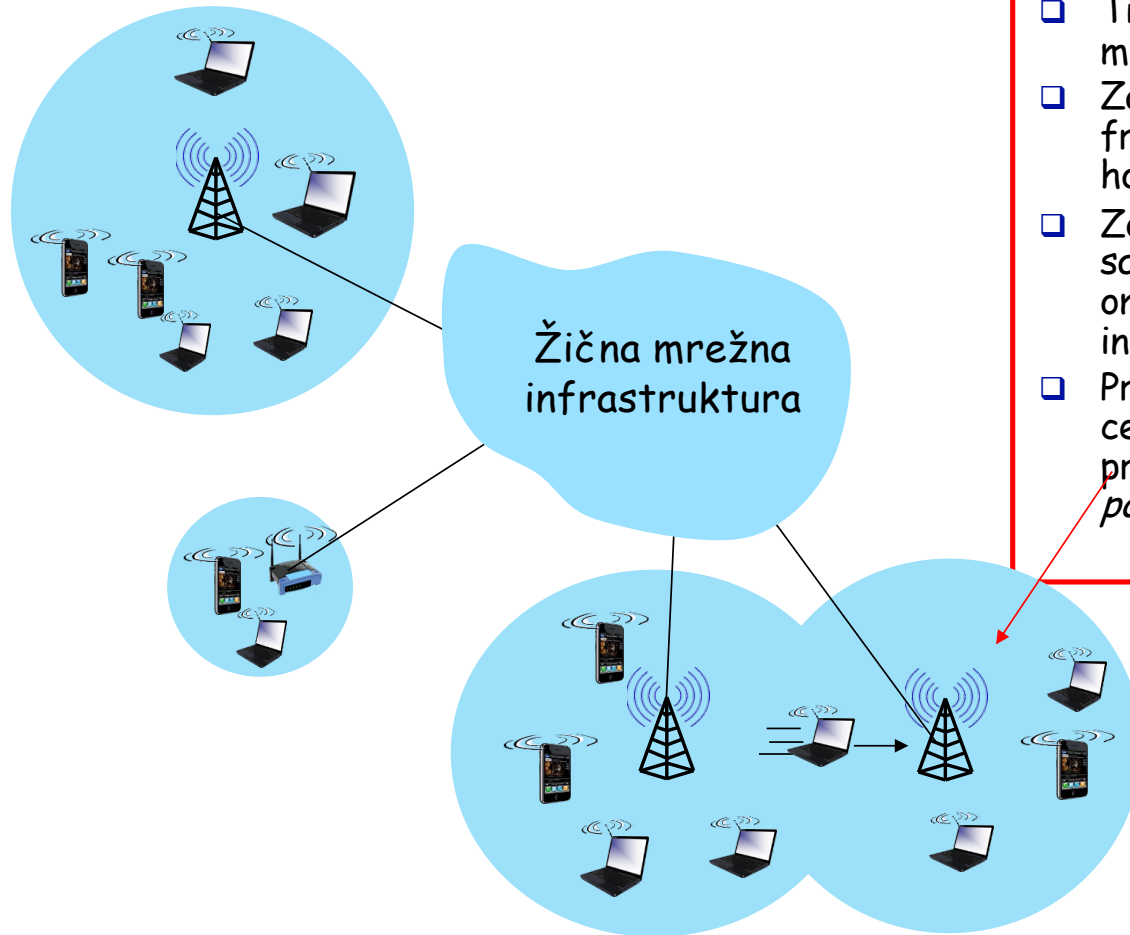
## Uvod:

- ❑ Zainteresovanost korisnika za pristup Internetu bilo gdje i bilo kada!
- ❑ Postići približne brzine prenosa i nivoe kašnjenja u bežičnom pristupu kao kod žičnog pristupa.
- ❑ Podržati što je veću moguću mobilnost uz veliku brzinu prenosa.
- ❑ Obzirom na veliku zainteresovanost tržišta primijeniti trenutno najmodernija i najbolja tehnološka rješenja.
- ❑ Deset puta više bežičnih telefonskih terminala nego žičnih telefonskih terminala
- ❑ 4G/5G bazirane na IP protokolu i SDN-u
- ❑ Dva ključna izazova
  - ❑ Komunikacija preko bežičnog kanala
  - ❑ Mobilnost korisnika

# Elementi bežične računarske mreže



# Elementi bežične računarske mreže

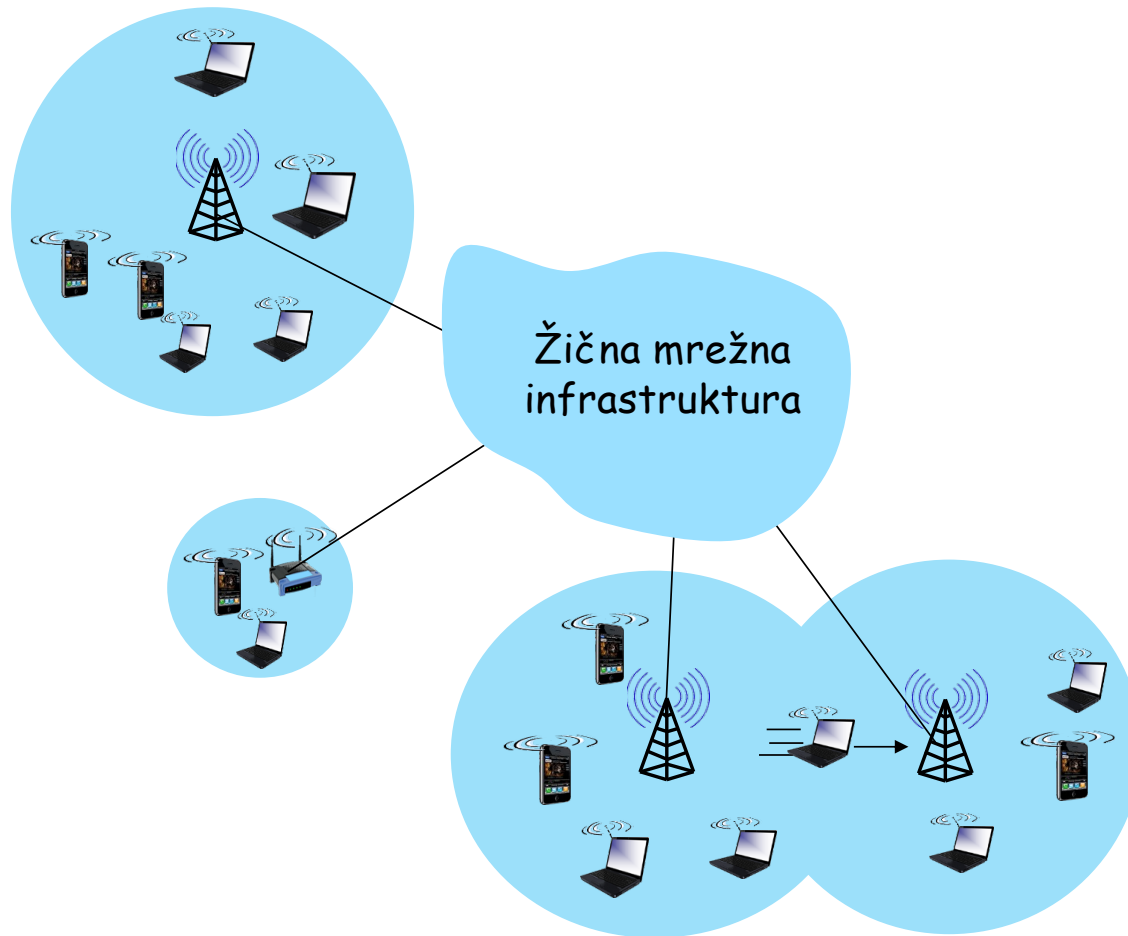


## Bazna stanica



- ❑ Tipično se povezuje na žičnu mrežnu okosnicu.
- ❑ Zadužena za slanje i prijem frejmova ka i od bežičnih hostova (funkcija releja).
- ❑ Zona pokrivanja je prostor sa nivoom signala koji omogućava uspješan prijem informacije.
- ❑ Primjeri: bazne stanice celularnih mreža, 802.11 pristupna tačka (*access point*).

# Elementi bežične računarske mreže

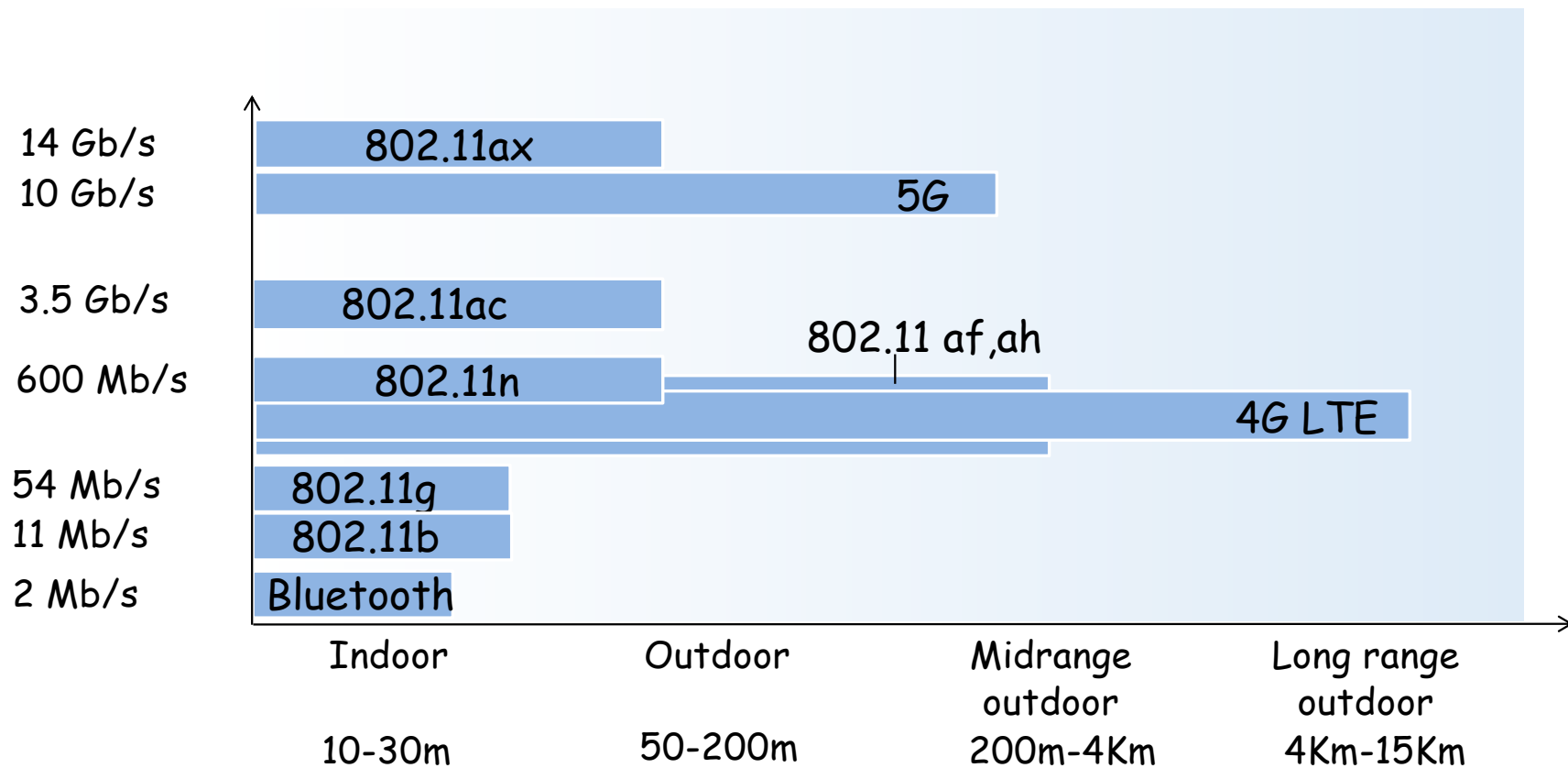


## Bežični link



- ❑ Vrsta prenosnog medijuma kojim se hostovi povezuju na pristupnu tačku.
- ❑ Može se koristiti i za linkove na okosnici.
- ❑ Više uređaja može istovremno zahtijevati zauzimanje bežičnog linka tako da je neophodan protokol kontrole višestrukog pristupa.
- ❑ Bežični linkovi se razlikuju prema:
  - ❑ Korišćenim opsezima
  - ❑ Modulacijama
  - ❑ Tehnikama kodiranja
  - ❑ Brzinama prenosa
  - ❑ Dometom...

# Karakteristike važnih bežičnih linkova



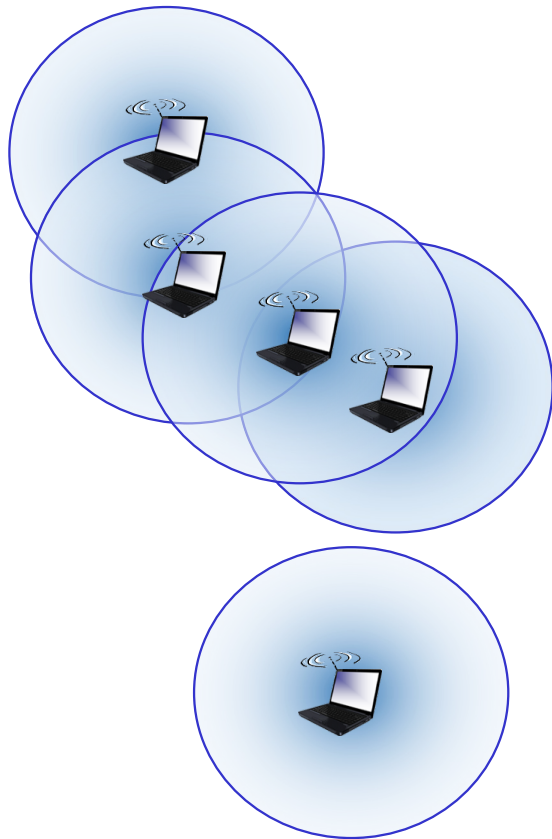
# Elementi bežične računarske mreže



## Infrastrukturni mod

- Bazna stanica povezuje bežične terminale na mrežnu okosnicu
- *Handoff (handover)*: mobilni terminal koji napušta zonu pokrivanja bazne stanice mora promijeniti baznu stanicu na koju je povezan bez prekida konekcije

# Elementi bežične računarske mreže



## Ad hoc mod

- Nema baznih stanica.
- Čvorišta mogu prenositi frejmove samo do drugih čvorišta koji su u zoni pokrivanja.
- Čvorišta se samoorganizuju u mrežu i rutiraju pakete između sebe.



# Elementi bežične računarske mreže

	jedan hop	multi hop
infrastrukturne (npr, AP)	host se povezuje na baznu stanicu (WiFi, celularnu) koja ga povezuje na Internet.	Host se često mora preko više čvorišta povezati na okosnicu ( <i>mesh</i> mreža).
bez infrastrukture	nema bazne stanice, (Bluetooth, ad hoc mreže)	Nekada mora da se poveže preko više čvorišta da bi dosegao željeni čvor (MANET, VANET,...).

# Karakteristike bežičnog linka (1)

Razlikuje se od žičnog linka ....

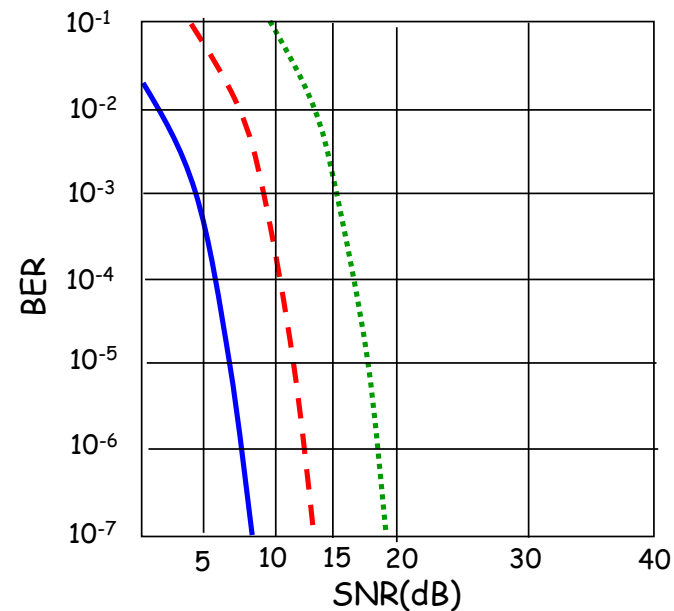
- ❑ Slabljenje nivoa signala: radio signal više slabi tokom prostiranja (gubitak uslijed propagacije).
- ❑ Interferencija sa drugim izvorima: frekvencije dijele bežični terminali između sebe ili sa drugim uređajima.
- ❑ *Multipath* propagacija: radio signal se reflektuje od zemlje i objekata tako da u istu tačku dolazi u različitim trenucima.

Projektovanje bežičnih linkova i zona pokrivanja je izuzetno komplikovano!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!



# Karakteristike bežičnog linka (2)

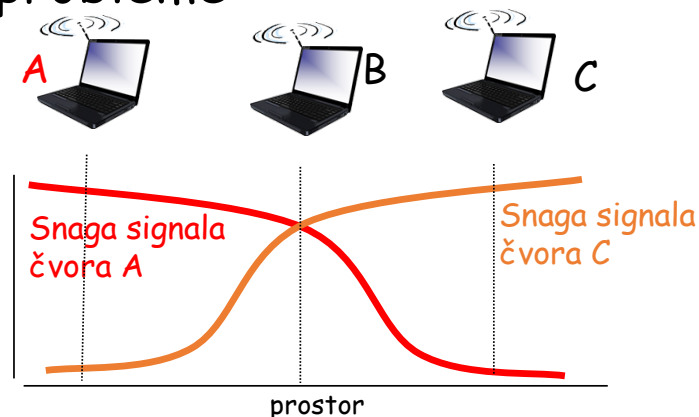
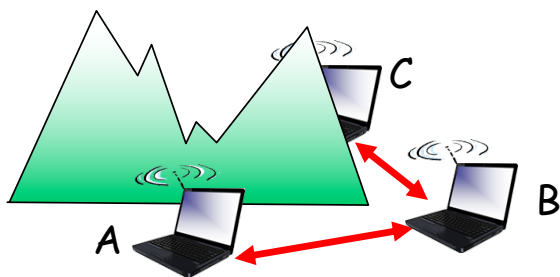
- Odnos signal šum (SNR: *signal-to-noise ratio*)
  - Odnos snage signala i snage šuma izražen u decibelima (dB)
  - veći SNR - lakše odvojiti poruku od šuma
- Vjerovatnoća greške po bitu (BER: *Bit Error Rate*)
  - manji BER - efikasniji prenos
- Kompromisi između SNR i BER !!!!
  - Za datu modulaciju: povećanje snage → povećanje SNR → smanjenje BER
  - Za dati SNR: izabrati modulacioni postupak koji zadovoljava zahtijevani BER, a koji daje najveću propusnost
  - SNR se može mijenjati zbog mobilnosti: dinamička adaptacija fizičkog nivoa (modulacione tehnike, brzina prenosa)



- ..... QAM256 (8 Mb/s)
- - - QAM16 (4 Mb/s)
- BPSK (1 Mb/s)

# Karakteristike bežičnog linka (3)

I pored primjene višestrukog pristupa, više bežičnih predajnika i prijemnika može izazivati dodatne probleme:



## Problem sakrivenog terminala

- ❑ B, A detektuju jedan drugog
- ❑ B, C detektuju jedan drugog
- ❑ A, C se ne detektuju što znači da A, C ne vode računa o interferenciji na mjestu B

## Slabljenje signala:

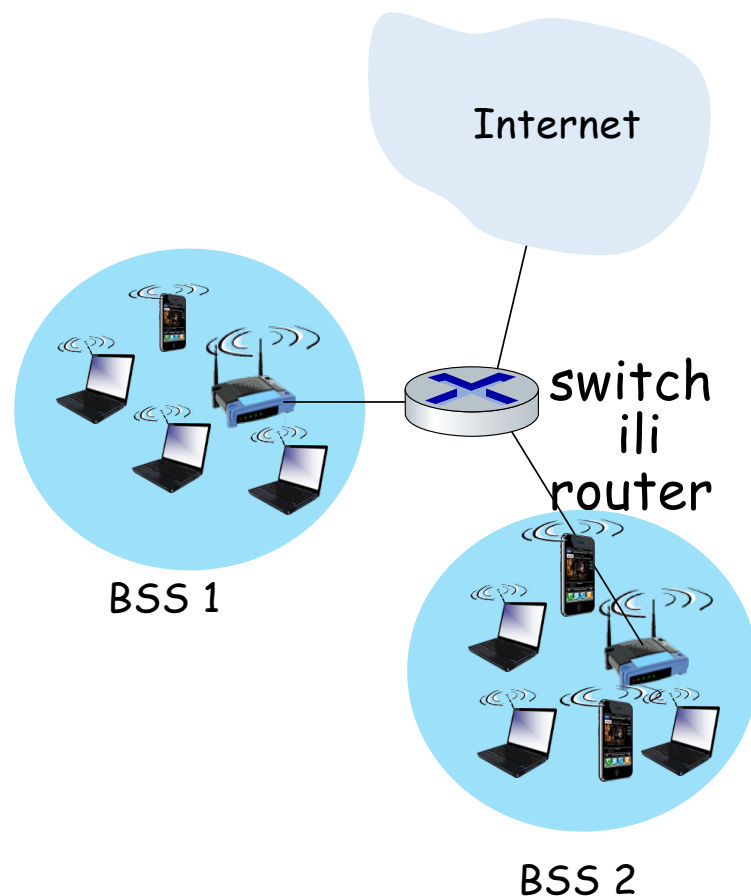
- ❑ B, A se detektuju
- ❑ B, C se detektuju
- ❑ A, C se ne detektuju i izazivaju interferenciju na mjestu B

# IEEE 802.11 WLAN

IEEE 802.11 standard	Godina	Maks. brzina	Domet	Frekvencija
802.11b	1999	11 Mb/s	30 m	2.4 GHz
802.11g	2003	54 Mb/s	30m	2.4 GHz
802.11n (WiFi 4)	2009	600 Mb/s	70m	2.4, 5 GHz
802.11ac (WiFi 5)	2013	3.47Gp/s	70m	5 GHz
802.11ax (WiFi 6)	2020 (exp.)	14 Gb/s	70m	2.4, 5 GHz
802.11af	2014	35 - 560 Mb/s	1 Km	Neiskorišćeni TV opsezi (54-790MHz)
802.11ah	2017	347Mb/s	1 Km	900 MHz

- ❑ koriste CSMA/CA za MAC, i podržavaju infrastrukturni i ad-hoc mod

# 802.11 LAN arhitektura



- Bežični host komunicira sa baznom stanicom
  - Bazna stanica = access point (AP)
- Basic Service Set (BSS) (ili "cell") u infrastrukturnom modu sadrži:
  - Bežične hostove
  - access point (AP)
- ad hoc mreža sadrži samo hostove

# 802.11: kanali, dodjela kanala

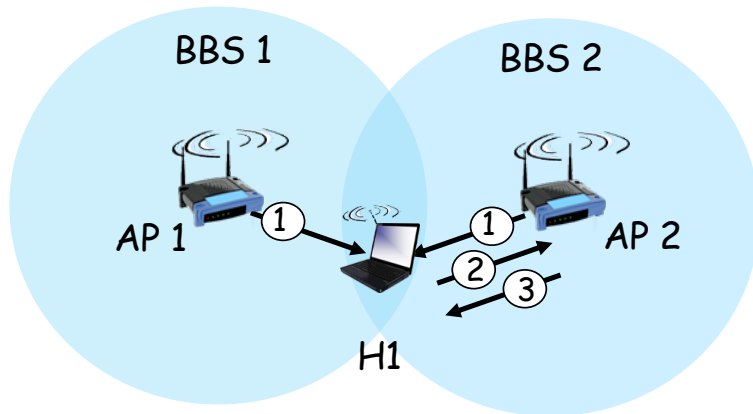
- ❑ Spektar se dijeli na kanale različitih frekvencija.
  - ❑ Administrator AP bira frekvenciju za AP.
  - ❑ Moguća interferencija: može biti izabran identičan kanal na susjednoj AP!
- ❑ Host se mora pridružiti AP.
  - ❑ Skenira kanale, osluškuje *beacon* frejmove koji sadrže ime AP (SSID) i MAC adrese AP.
  - ❑ Bira AP kojemu će se pridružiti.
  - ❑ Obavlja autentifikaciju.
  - ❑ Šalje DHCP zahtjev kako bi dobio IP adresu.



BSS

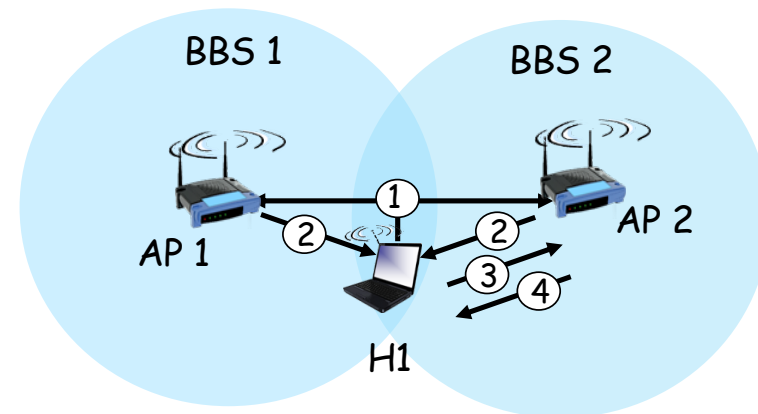
WiFi i mobilne mreže 6-15

# 802.11: pasivno/aktivno skeniranje



## Pasivno skeniranje:

- (1) AP šalje *beacon* frejmove
- (2) Host šalje *Association Request* frejm izabranom AP.
- (3) AP šalje *Association Response* frejm odgovarajućem hostu.



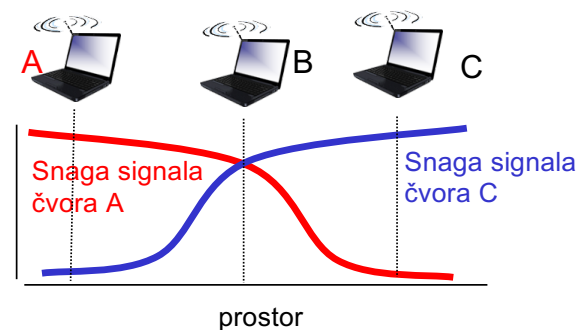
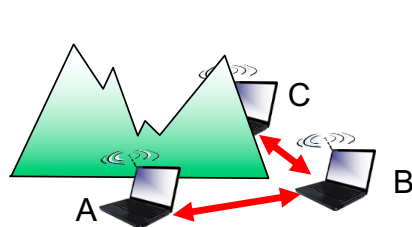
## Aktivno skeniranje:

- (1) Host šalje *Probe Request* frejm svim AP u čijem je dometu signala.
- (2) AP šalju *Probes response* frejm.
- (3) Host šalje izabranom AP *Association Request* frejm.
- (4) Izabrani AP šalje *Association Response* frejm hostu.



# IEEE 802.11: višestruki pristup

- ❑ *Avoid collisions* - izbjegavanje kolizije koja nastaje kada 2 i više čvorišta emituju.
- ❑ 802.11: CSMA - osluškivanje prije slanja
  - ❑ Nema kolizije sa komunikacijom koja je u toku.
- ❑ 802.11: *nema detekcije kolizije!*
  - ❑ Teško je detektovati koliziju prilikom emitovanja zbog:
    - ❑ niskog nivoa prijemnog signala,
    - ❑ sakrivenog terminala.
  - ❑ Cilj je pokušati izbjeći koliziju (*avoid collisions*) CSMA/C(ollision)A(avoidance)



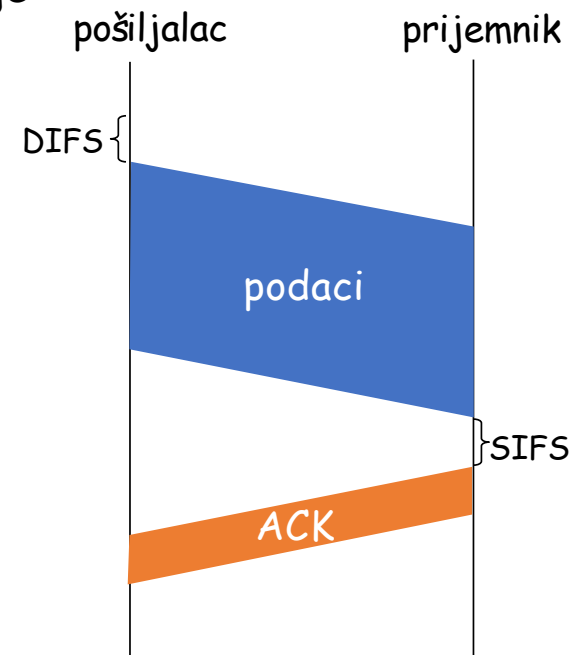
# IEEE 802.11 MAC Protokol: CSMA/CA

## 802.11 pošiljalac

1. ako pošiljalac detektuje slobodan kanal tokom trajanja intervala **DIFS** (*Distributed Interframe Space*) tada se šalje cijeli frejm (nema detekcije kolizije)
2. ako se tokom DIFS detektuje zauzeti kanal tada se
  - Izračunava slučajno *backoff* vrijeme tajmera.
  - Dok je kanal zauzet tajmer se zaustavlja.
  - Nakon oslobađanja kanala timer odbrojava.
  - Kada istekne tajmer, ako je kanal slobodan počinje slanje frejma.
  - Ako nakon slanja nema potvrde *ACK*, povećava se slučajni *backoff* interval, i ponavlja se korak 2.

## 802.11 prijemnik

- Ako je primljeni frejm ispravan
  - šalje *ACK* poslije isteka **SIFS** (*Short Interframe Space*).
  - ACK* je potreban zbog problema skriveni terminal.
- Ako primljeni frejm nije ispravan prijemnik odbacuje frejm.



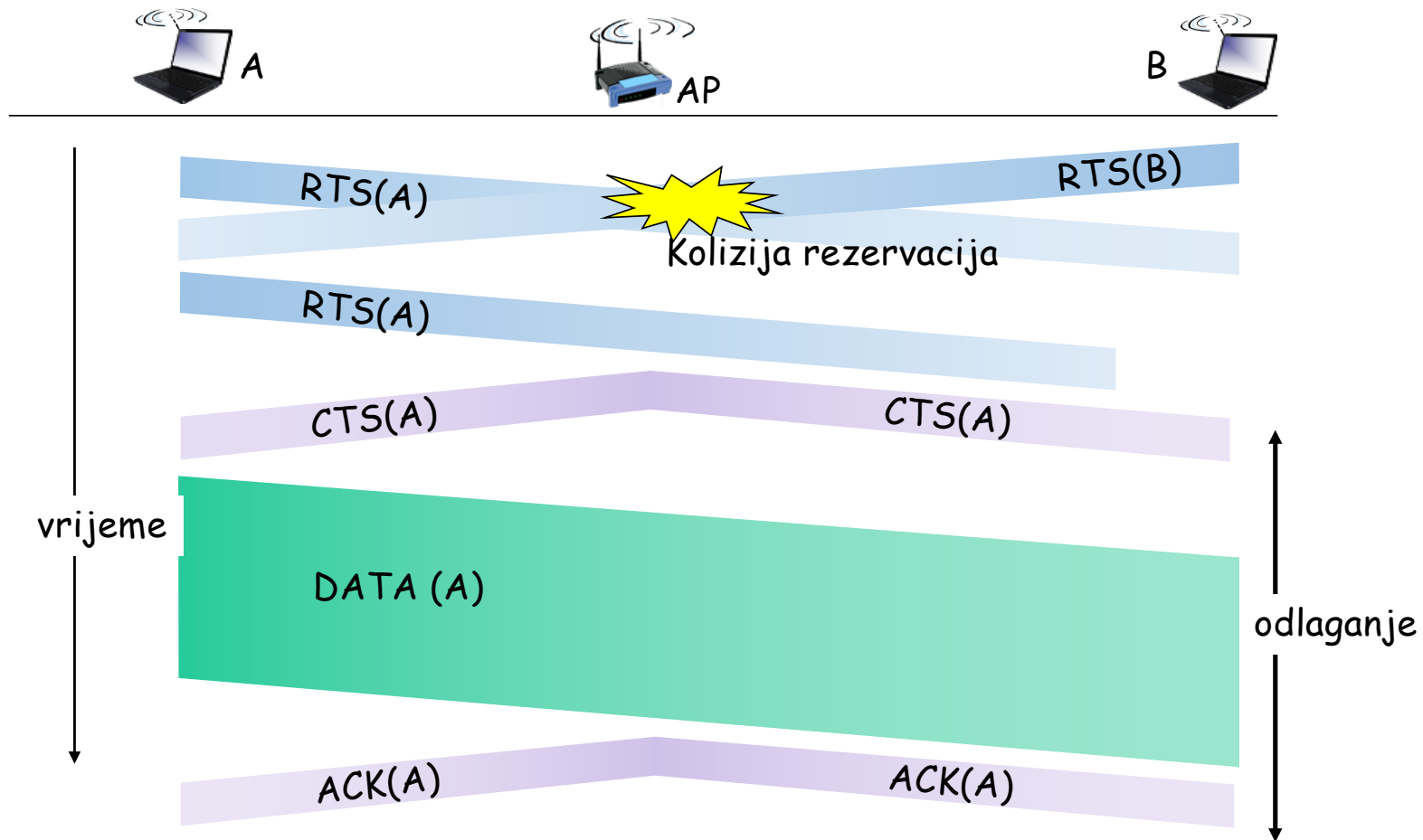
# Izbjegavanje kolizije (više)

*IDEJA!* dozvoliti korisniku da “rezerviše” kanal duže nego što mu je potrebno za slanje jednog frejma: izbjeći kolizije za velike frejmove

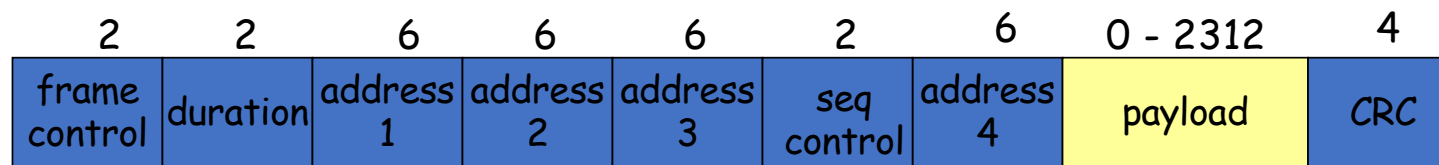
- ❑ Pošiljalac prvo šalje mali *request-to-send* (RTS) frejm pristupnoj tački korišćenjem CSMA.
  - ❑ RTS frejmovi mogu zapasti u koliziju sa drugim frejmovima (što nije veliki problem jer su kratki).
- ❑ Pristupna tačka šalje svima *clear-to-send* (CTS) frejm kao odgovor na RTS frejmove.
- ❑ CTS frejm primaju sva čvorišta ali ga koristi samo onaj pošiljalac kojemu je namijenjen.
  - ❑ Pošiljalac počinje slanje frejma sa podacima.
  - ❑ Druge stanice ne šalju.

Korišćenjem malih rezervacionih frejmova  
izbjegava se kolizija velikih frejmova !

# Izbjegavanje kolizije: razmjena RTS-CTS



# 802.11 frejm: adresiranje



**Adresa 1:** MAC adresa bežičnog hosta ili AP kojem je namijenjen frejm

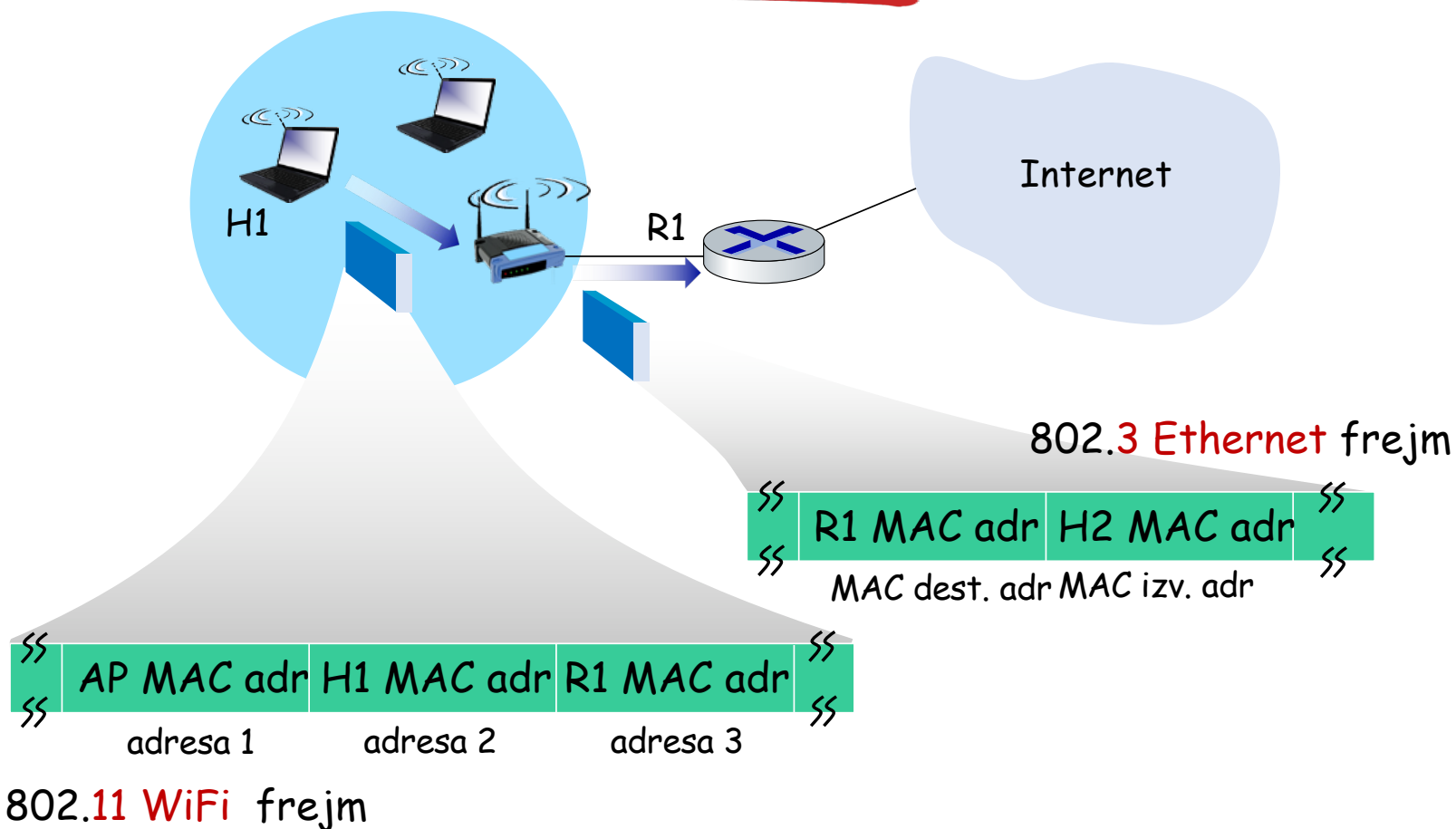
**Adresa 2:** MAC adresa bežičnog hosta ili AP koji šalje frejm

**Adresa 3:** MAC adresa interfejsa uređaja okosnice na koji je AP povezan

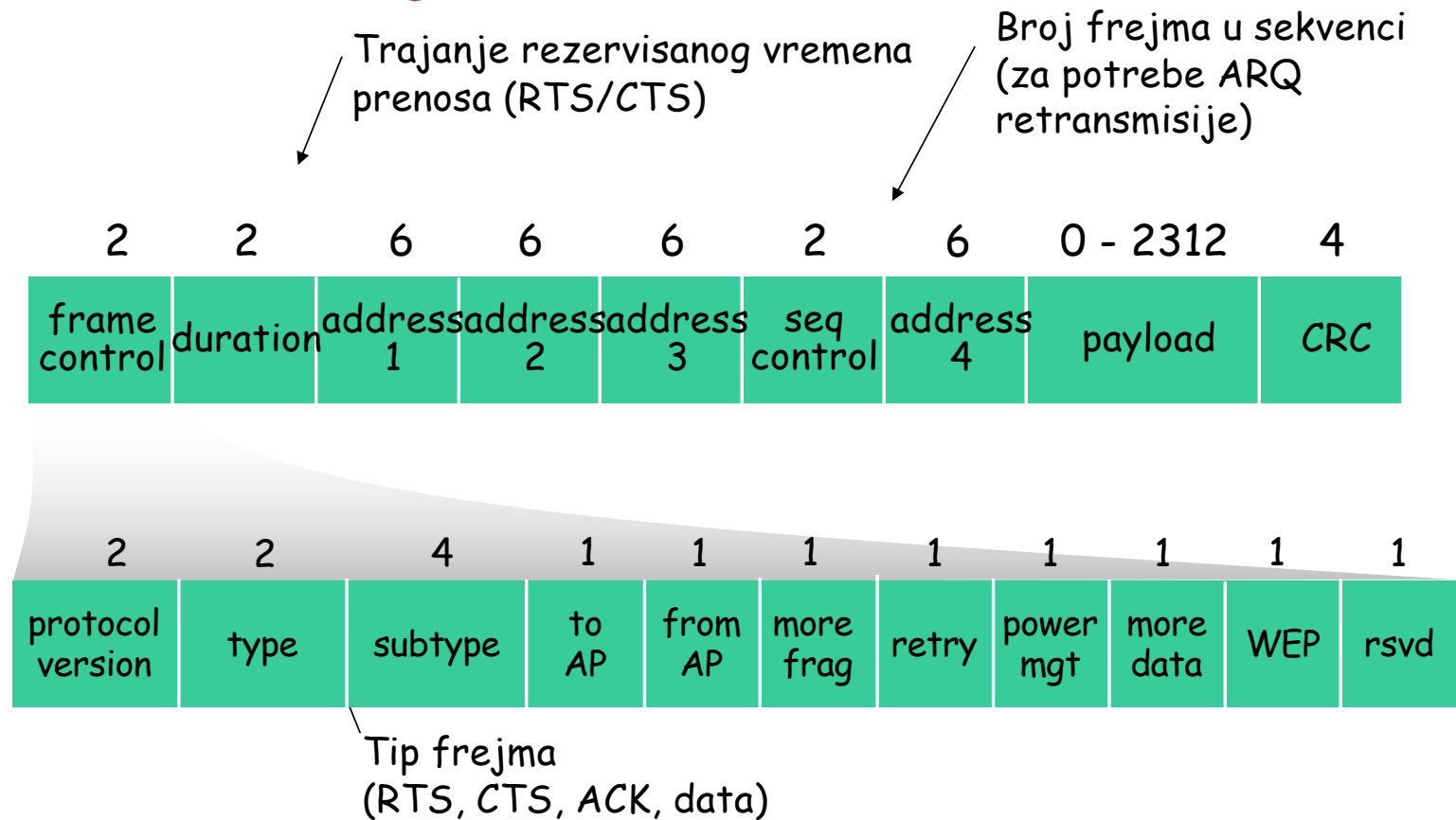
**Adresa 4:** samo se koristi u ad hoc modu

Payload je najčešće 1500B. Sadrži IP datagram ili ARP paket.

# 802.11 frejm: adresiranje



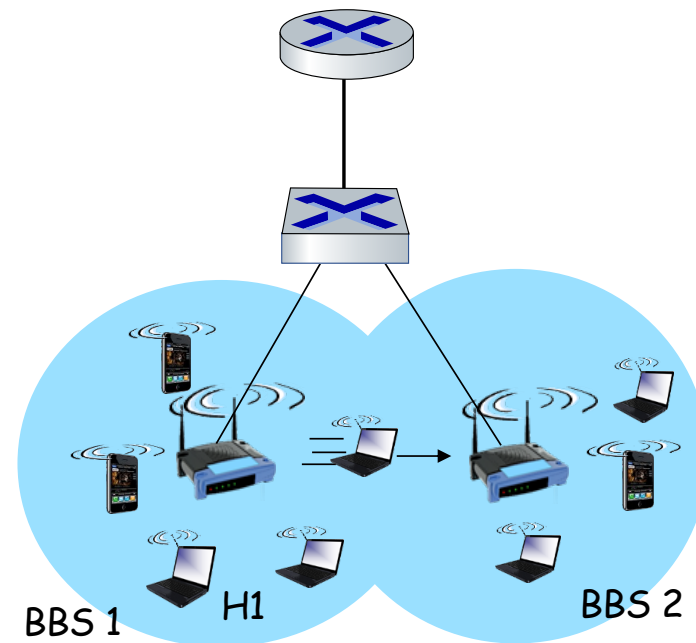
# 802.11 frejm



# 802.11: mobilnost unutar iste mreže

---

- ❑ Ukoliko H1 prelaskom iz zone pokrivanja jedne AP u zonu drugog AP ostaje u istoj IP mreži IP adresa može ostati ista.
- ❑ U suprotnom H1 mora dobiti novu IP adresu.
- ❑ LAN switch metodom self-learning otkriva prelazak H1 na novi AP i ažurira svoju tabelu prosleđivanja na nivou linka.

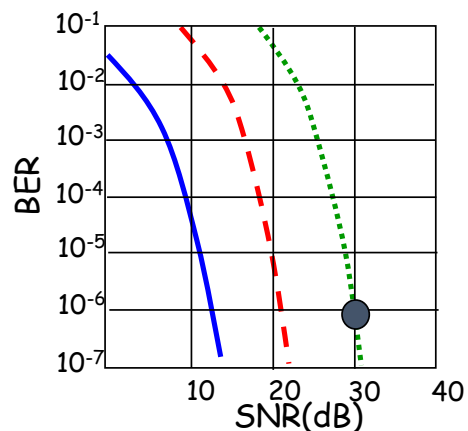




# 802.11: napredne mogućnosti

## Adaptacija brzina

- AP i host dinamički mijenjaju brzinu prenosa (promjenom vrste modulacije na fizičkom nivou)
- Kako se host pomjera, SNR se mijenja



- ..... QAM256 (8 Mb/s)
- - - QAM16 (4 Mb/s)
- BPSK (1 Mb/s)
- Tačka funkcionisanja

1. SNR opada, BER raste dok se host udaljava od AP.

2. Kada BER postane previsok, odnosno SNR nedovoljan, stanice prelaze na novu modulacionu tehniku što znači nižu brzinu prenosa ali i na niži BER.

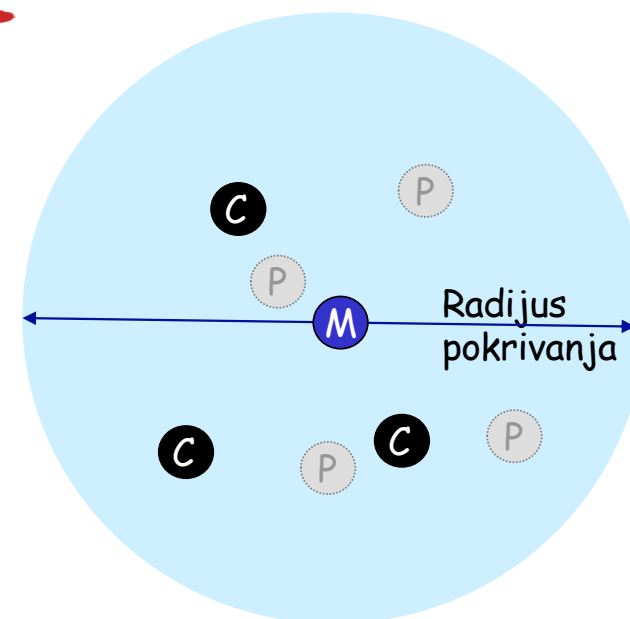
# 802.11: napredne mogućnosti

## Power Management

- Host obavještava AP: “Idem da spavam do sledećeg beacon frejma”
  - AP zna da ne treba da šalje frejmove ovom hostu.
  - Host se “budi” prije sledećeg beacon frejma (100ms sna) pri čemu buđenje traje 250ms.
- *beacon* frejm: sadrži listu hostova za koje AP posjeduje frejmove
  - Host ostaje “budan” ako u *beacon* frejmu uoči svoju MAC adresu, dok u suprotnom ponovo „ide na spavanje” do narednog beacon frejma.

# Personal area networks: Bluetooth

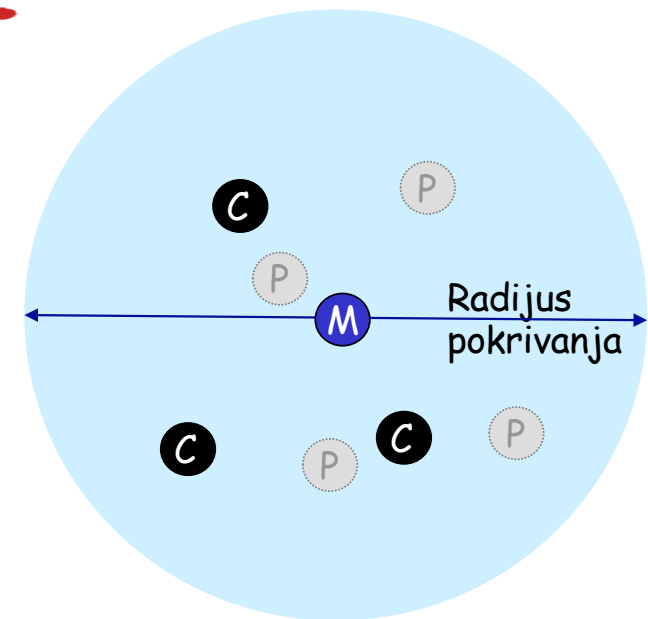
- ❑ Prečnik manji od 10 m.
- ❑ Zamjena za kablove(miš, tastatura, slušalice,...).
- ❑ Ad hoc: nema infrastrukture
- ❑ 2.4-2.5 GHz ISM radio opseg, do 3 Mb/s
- ❑ Master kontroler / klijentski uređaj:
  - ❑ master proziva klijente, dodjeljuje grantove klijentima koji ih koriste za slanje



- Ⓜ master uređaj
- ⓐ klijent uređaj
- Ⓟ Inaktivan uređaj

# Personal area networks: Bluetooth

- ❑ TDM, slot trajanja 625  $\mu$ s.
- ❑ FDM: pošiljalac koristi 79 kanala u pouzdanom, pseudo slučajnom redosledu slot-to-slot (prošireni spektar)
  - ❑ Drugi uređaji van piconet mreže samo interferiraju u istim slotovima.
- ❑ **parked mode: klijent** može "da ide da spava" (park) i kasnije da se "probudi" (čuva bateriju)
- ❑ **bootstrapping**: čvorišta se samoorganizuju u piconet (*plug and play*)



- Ⓜ master uređaj
- ⓐ klijent uređaj
- Ⓟ Inaktivan uređaj

# 4G/5G celularne mreže

- Tehnologije WAN mreža za mobilni Internet
- Masovno se implementiraju i koriste:
  - Više mobilnih širokopolasnih pristupnih uređaja nego žičnih širokopolasnih pristupnih uređaja (odnos 5:1 u 2019)!
  - 4G dostupnost: 97% u Južnoj Koreji (90% u SAD)
- Brzine prenosa od nekoliko stotina Mb/s.
- Tehnički standardi: *3rd Generation Partnership Project (3GPP)*
  - [www.3gpp.org](http://www.3gpp.org)
  - 4G: *Long-Term Evolution (LTE)* standard

# 4G/5G celularne mreže

## Sličnost sa žičnim Internetom

- ❑ Razlikuju se pristupa mreža i jezgro.
- ❑ Globalna celularna mreža: mreža svih mreža.
- ❑ Široka primjena protokola: HTTP, DNS, TCP, UDP, IP, NAT, razdvajanje kontrolne ravni i ravni podataka, SDN, Ethernet, tunelovanje,...
- ❑ Povezivanje na žični Internet.

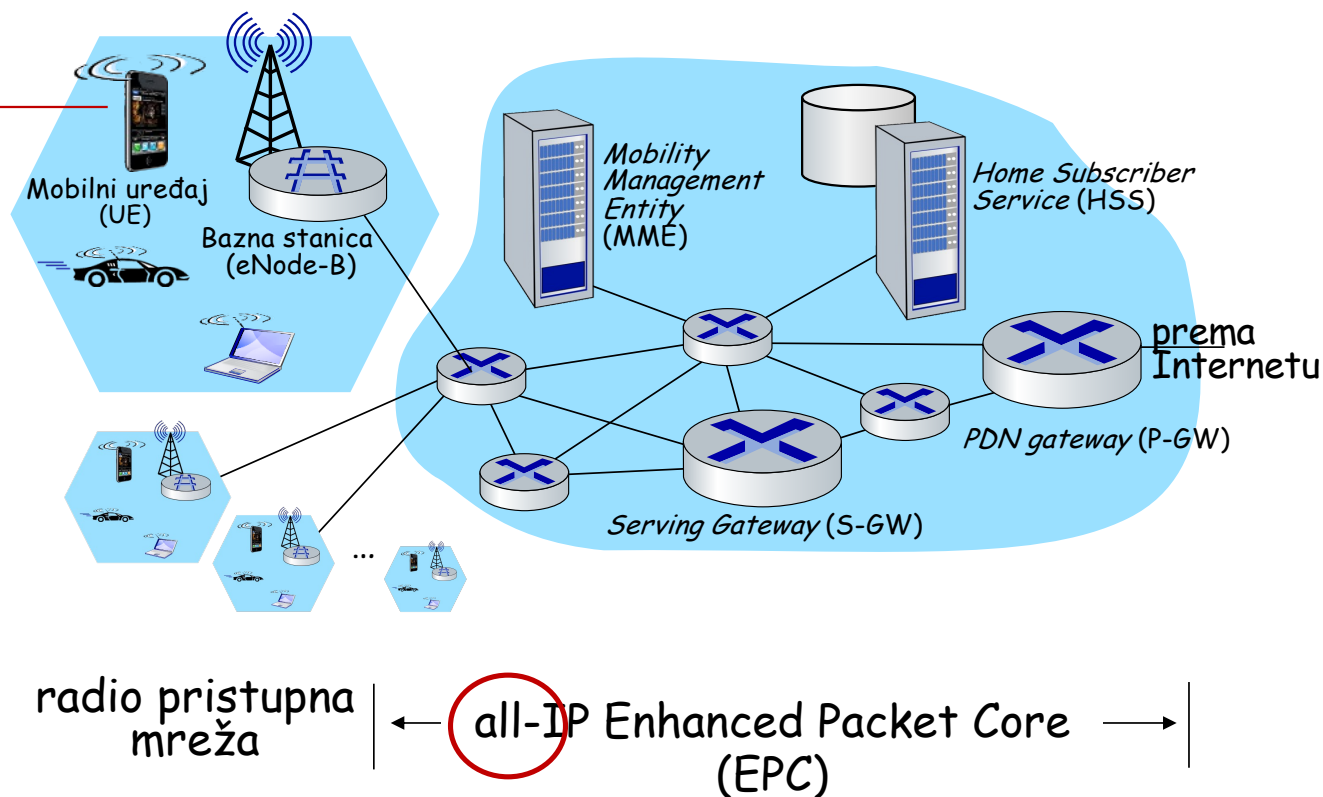
## Razlike u odnosu na žični Internet

- ❑ Različiti bežični nivo linka.
- ❑ Mobilnost izuzetnog kvaliteta.
- ❑ Identitet korisnika (SIM kartica).
- ❑ Biznis model: korisnici se pretplaćuju kod celularnog operatora
  - ❑ Postojanje "kućne" mreže i mreže u kojoj koirsnih gostuje korišćenjem roaminga.
  - ❑ Globalni pristup sa infrastrukturom sa autentifikaciju i povezivanje na različite operatore.

# Elementi 4G LTE arhitekture

## Mobilni uređaj:

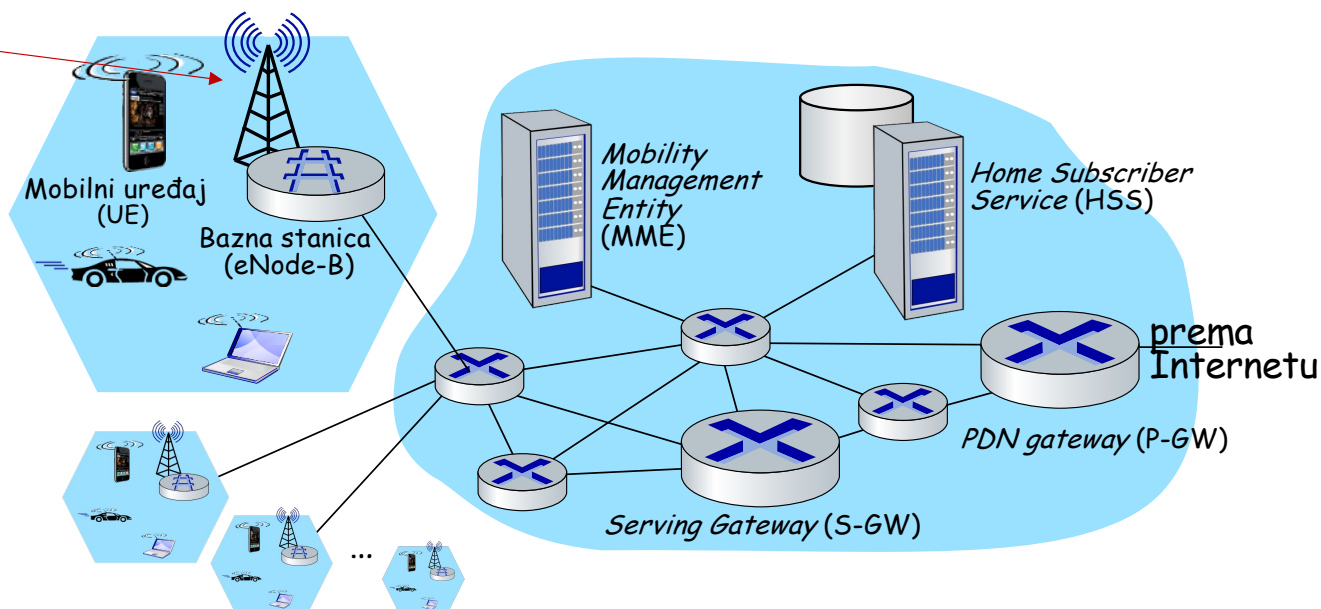
- ❑ Pametni telefon, tablet, laptop, IoT, ... sa 4G LTE radio
- ❑ 64-bitni *International Mobile Subscriber Identity (IMSI)*, smješten na SIM (Subscriber Identity Module) karticu
- ❑ LTE žargon: *User Equipment (UE)*



# Elementi 4G LTE arhitekture

## Bazna stanica:

- ❑ Ivica operatorove mreže.
- ❑ Upravlja radio resursim i mobilnim uređajima u svojoj zoni pokrivanja ("ćelija").
- ❑ Koordinira autentifikaciju uređaja sa drugim mrežnim elementima.
- ❑ Slična WiFi AP ali:
  - ❑ Aktivno učestvuje u korisnikovoj mobilnosti
  - ❑ Koordinira sa susjednim baznim stanicama korišćenje radio resursa
- ❑ LTE žargon: eNode-B

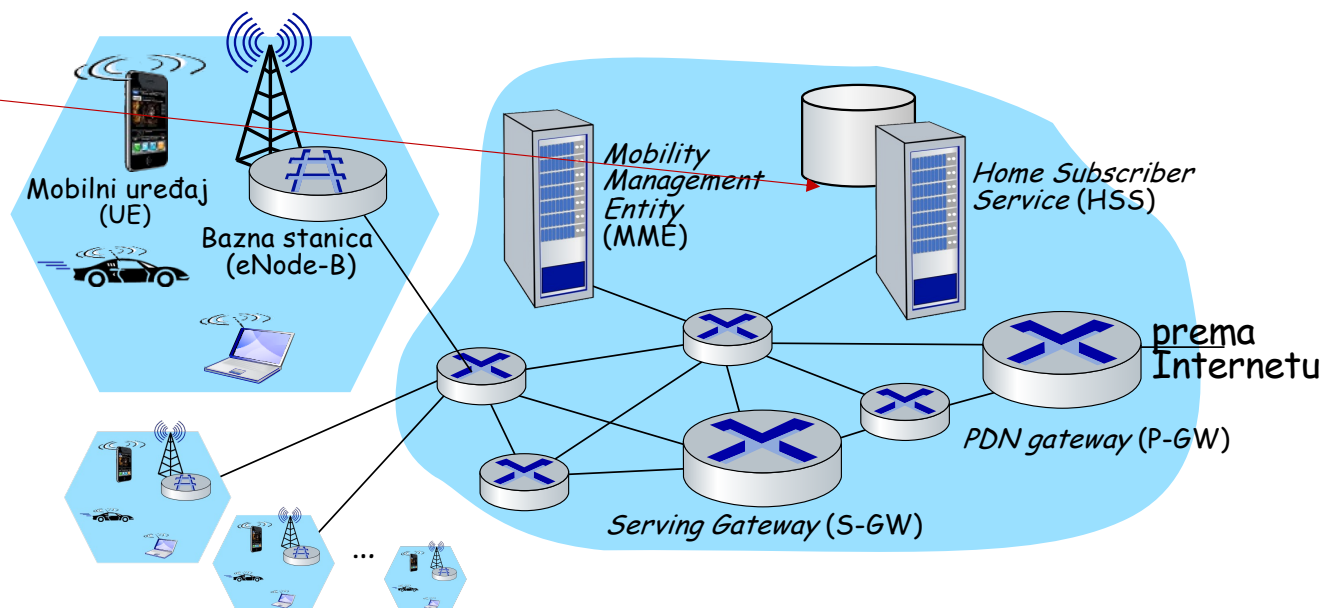




# Elementi 4G LTE arhitekture

## Home Subscriber Service

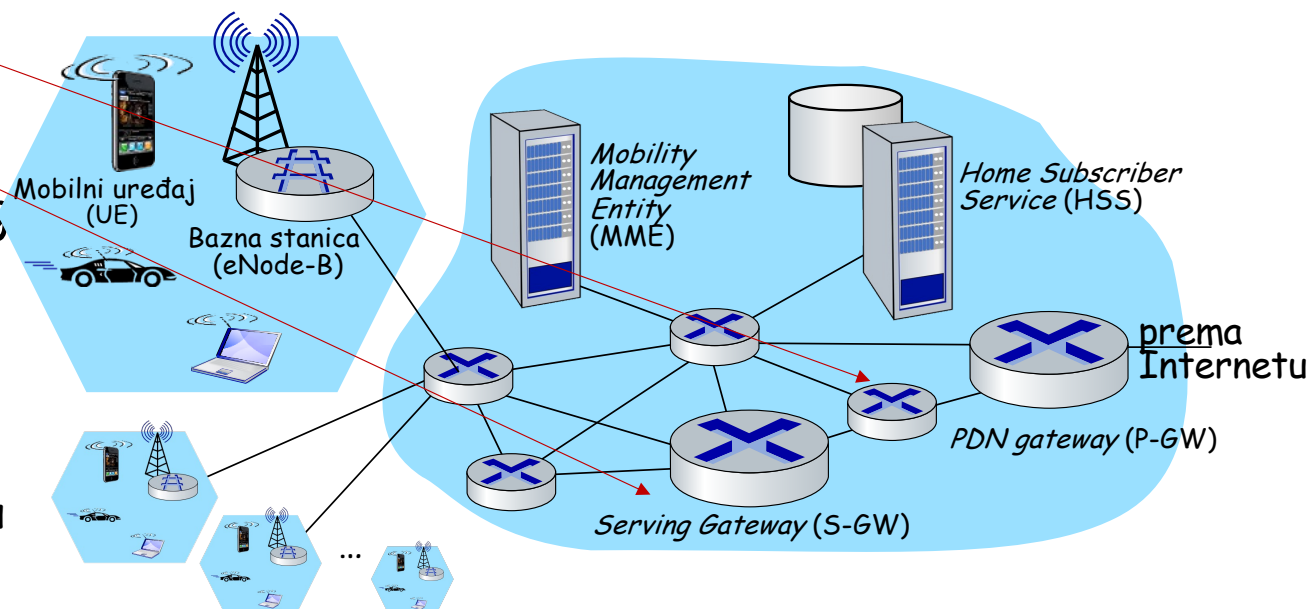
- Sadrži informacije o korisnicima kojim je njegova "kućna mreža"
- Saraduje sa MME u autentifikaciji uređaja



# Elementi 4G LTE arhitekture

## *Serving Gateway (S-GW), PDN Gateway (P-GW)*

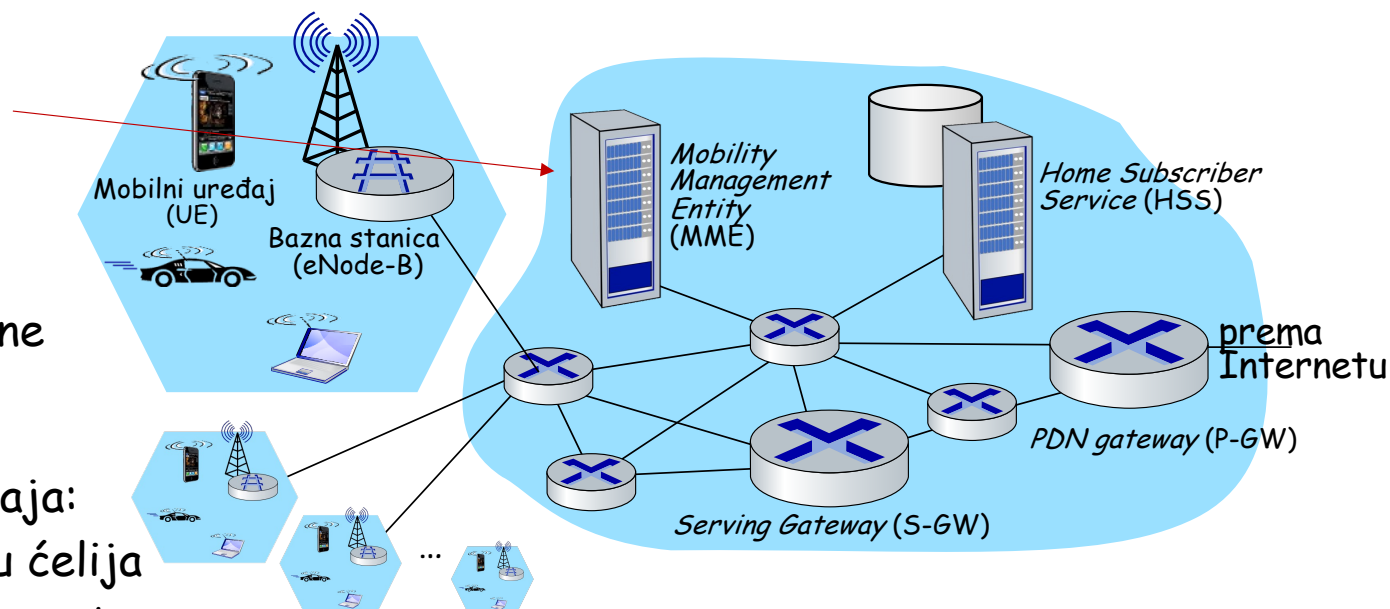
- ❑ Nalaze se na putu od mobilnog terminala do-od Interneta
- ❑ P-GW
  - ❑ gateway prema mobilnoj celularnoj mreži
  - ❑ Sličana Internet gateway ruteru
  - ❑ omogućava NAT servise
- ❑ Drugi ruteri:
  - ❑ Intenzivno korišćenje tunelovanja



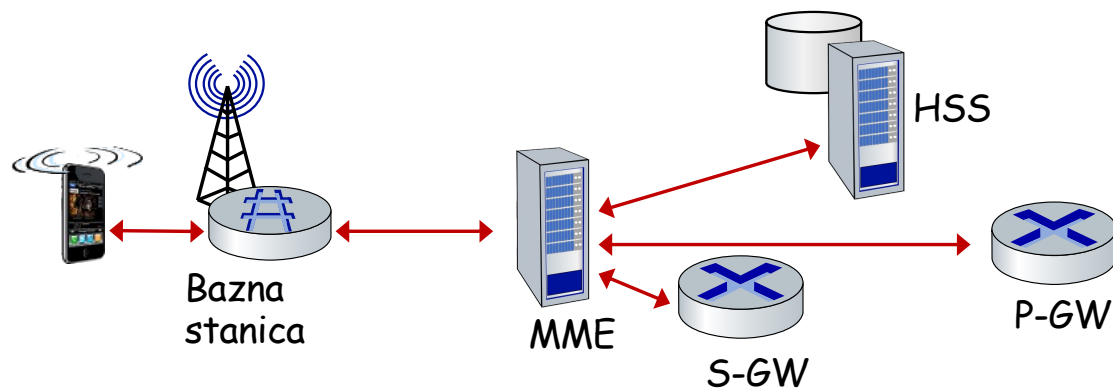
# Elementi 4G LTE arhitekture

## Mobility Management Entity

- ❑ Autentifikacija (uređaj-mreža, mreža-uređaj) u koordinaciji sa HSS-om kućne mreže.
- ❑ Menadžment mobilnog uređaja:
  - ❑ Handover uređaja između ćelija
  - ❑ praćenje/paging lokacije uređaja
- ❑ Uspostavljanje puta (tunela) od mobilnog uređaja do P-GW

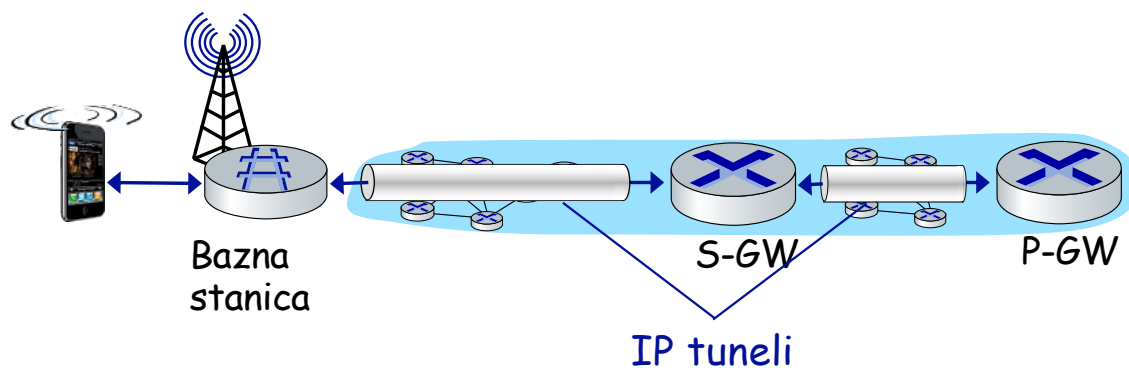


# LTE: odvojenost kontrolne ravni i ravni podataka



## Kontrolna ravan

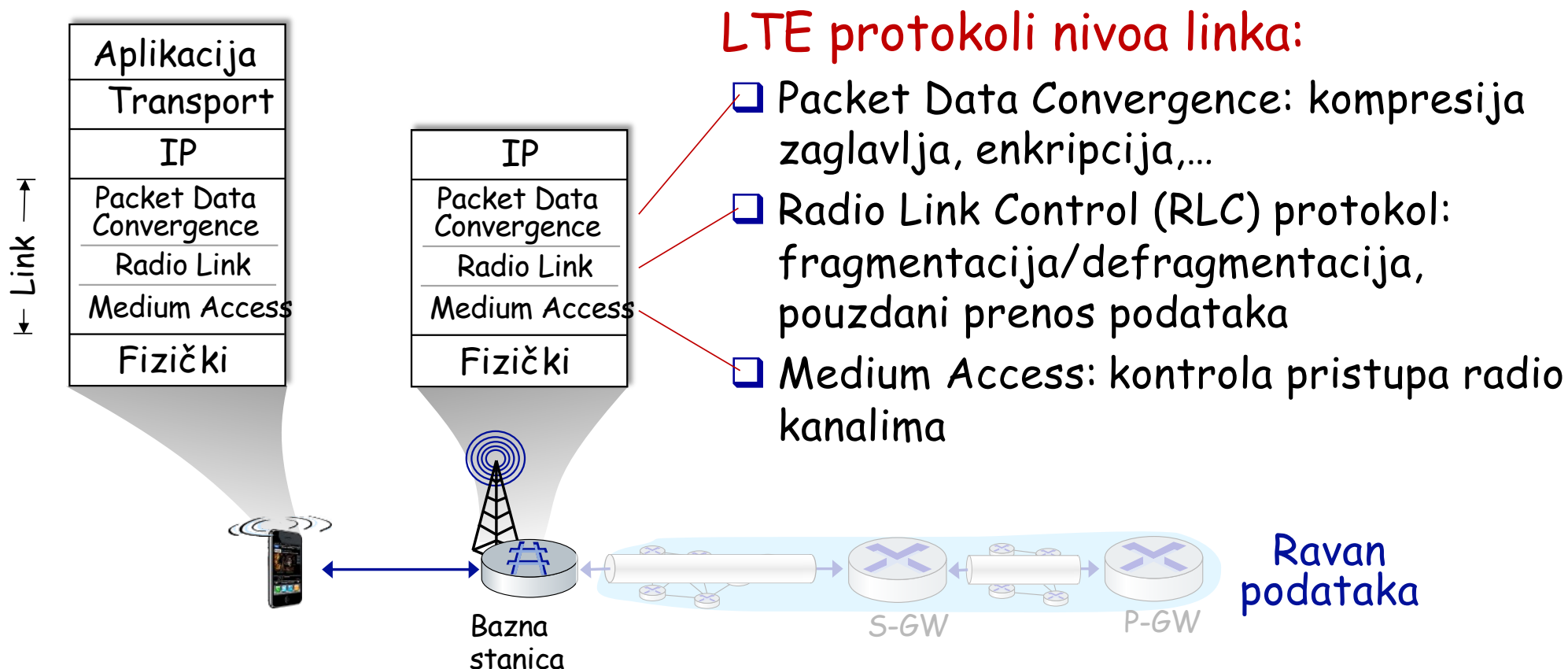
- Novi protokoli za menadžment mobilnosti, zaštitu, autentifikaciju,...



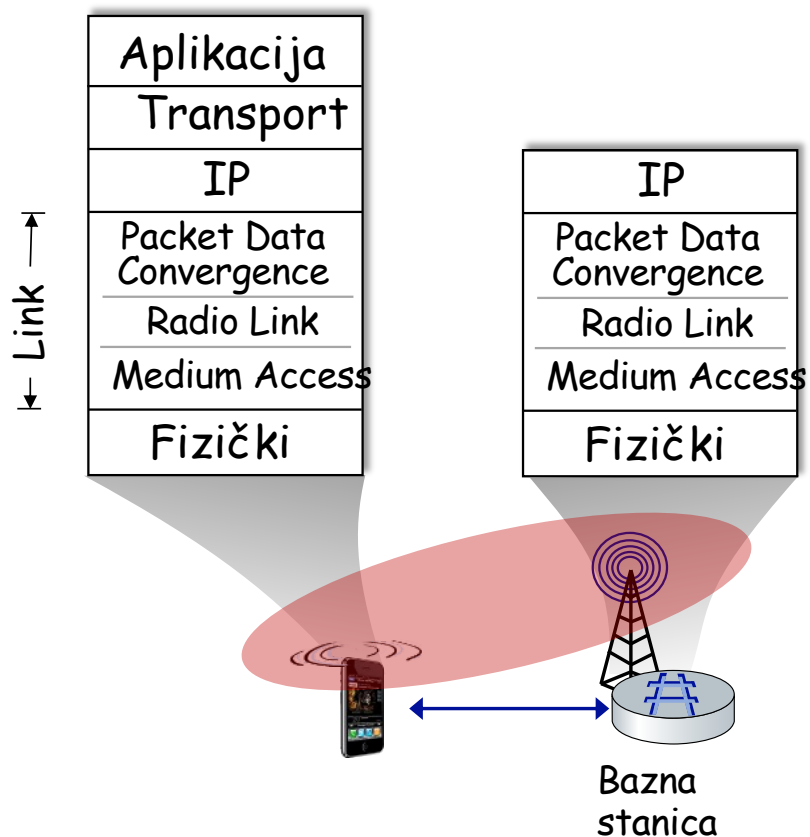
## Ravan podataka

- Novi protokoli na nivoima linka i fizičkom nivou
- Intenzivno korišćenje tunelovanja u cilju obezbjeđivanja mobilnosti

# LTE protokoli ravni podataka: prvi hop



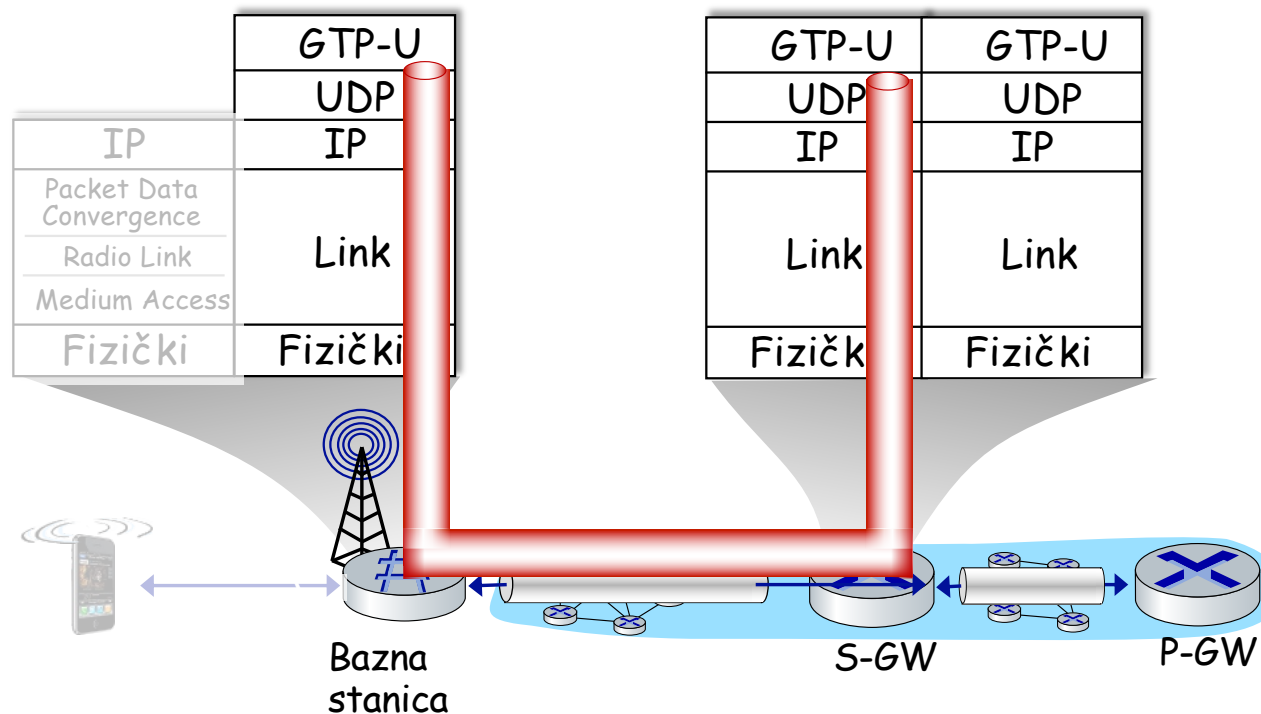
# LTE protokoli ravni podataka: prvi hop



## LTE radio pristupna mreža:

- **downstream kanal:** FDM, TDM unutar frekvencijskog kanala (OFDM - *orthogonal frequency division multiplexing*)
- "orthogonal": minimalna interferencija između kanala
- **upstream:** FDM, TDM sličan OFDM
- Svakom aktivnom mobilnom terminal se alocira dva ili više 0.5 ms vremenskih slotova na 12 frekvencija
- scheduling algoritam nije standardizovan i zavisi od proizvođača opreme i operatora
- Moguće brzine prenosa su od nekoliko stotina Mb/s po korisničkom uređaju

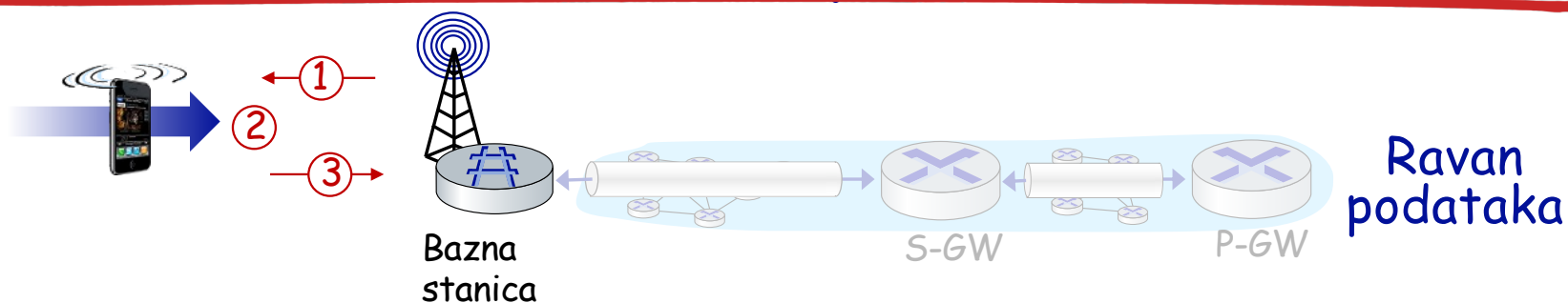
# LTE protokoli ravni podataka: *packet core*



## Tunelovanje:

- ❑ Mobilni uređaj enkapsulira datagram korišćenjem GPRS Tunneling Protocol (GTP), i šalje unutar UDP datagram prema S-GW
- ❑ S-GW re-tuneluje datagrame prema P-GW
- ❑ Podržavanje mobilnosti: samo se mijenjaju krajnje tačke tunela kada se mobilni korisnik kreće

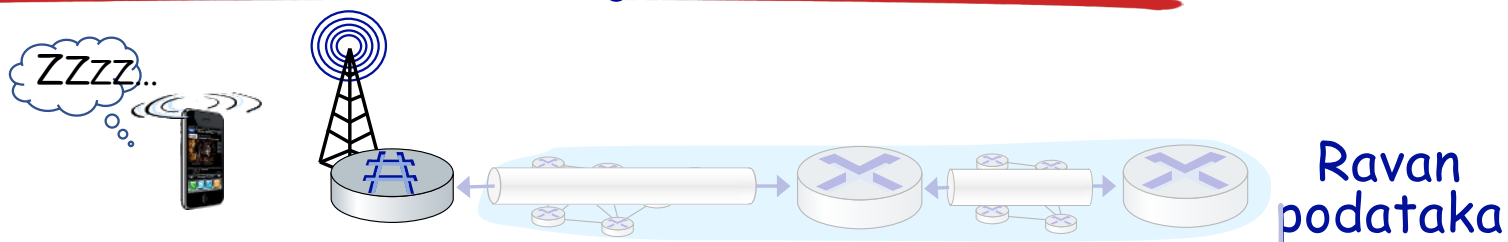
# LTE ravan podataka: povezivanje na BS



- ① BS broadcastuje primarni sinhro signal svakih 5 ms na svim frekvencijama
  - ❑ BS više različitih operatora mogu broadcastovati sinhro signale
- ② Mobilni terminal pronalazi primarni sinhro signal, zatim locira drugi sinhro signal na toj frekvenciji.
  - ❑ Mobilni pronalazi informacije koje broadcastuje BS: opseg kanala, konfiguracije; informacije o operatoru
  - ❑ Mobilni može prikupiti informacije od više baznih stanica različitih celularnih mreža
- ③ Mobilni bira BS na koji će se povezati (npr., svog operatora)
- ④ Više koraka je potrebno za autentifikaciju, uspostavljanje stanja i ravni podataka.



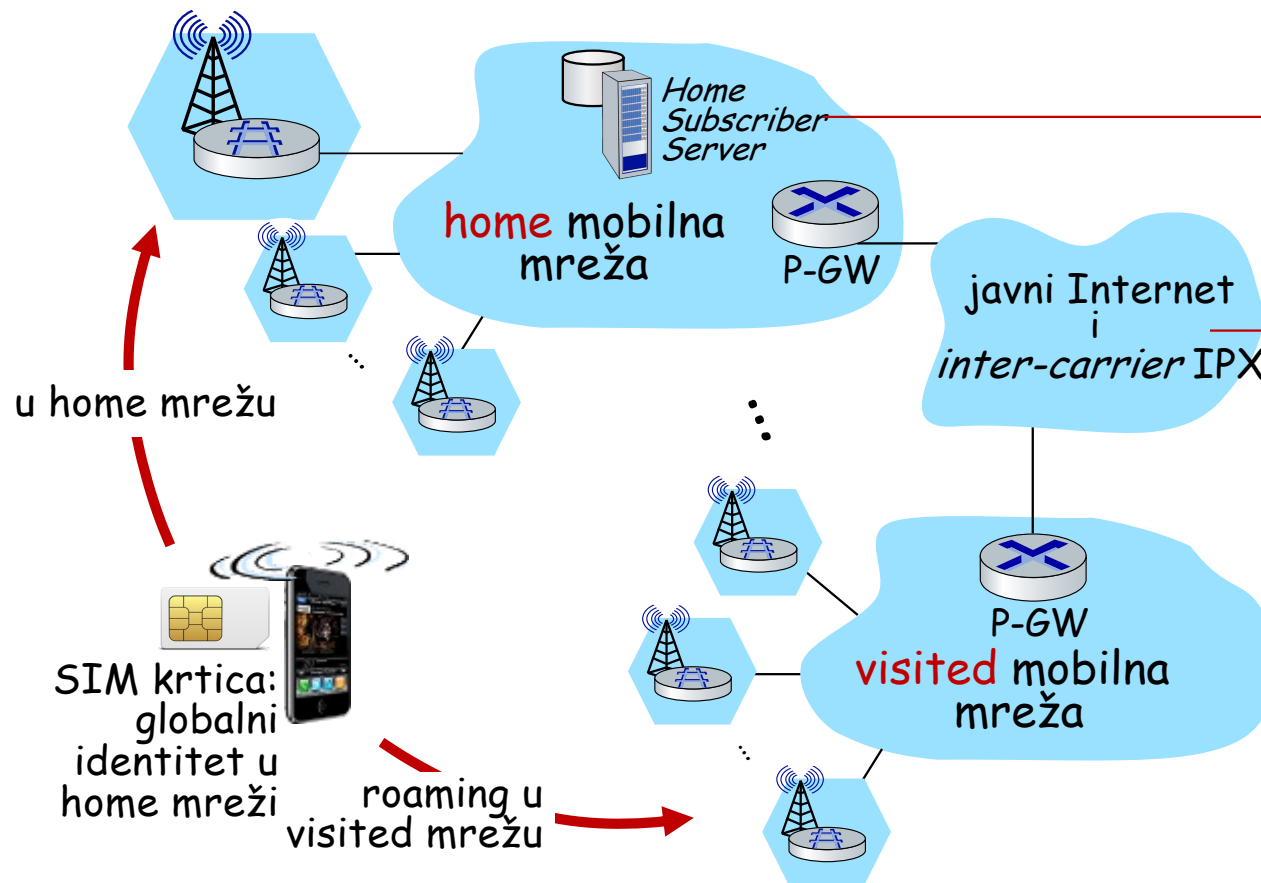
# LTE mobilni uređaji: sleep mod



Kako kod WiFi, Bluetooth: LTE mobilni terminal može otići u "sleep" mod kako bi smanjio potrošnju baterije:

- *light sleep*: poslije nekoliko stotina ms neaktivnosti
  - Periodično se budi svakih nekoliko stotina ms da provjeri downstream komunikaciju
- *deep sleep*: poslije 5-10s neaktivnosti of
  - Mobilni može napustiti ćeliju tokom deep sleep-a što podrazumijeva ponovno povezivanje na BS.

# Globalna celularna mreža: mreža IP mreža



## HSS home mreže:

- Informacije o identitetu i servisima, dok je u home mreži i roaming-u

## all IP:

- Operatori se međusobno povezuju
- 2G, 3G: nisu svi IP pa imaju drugačija rješenja

# 5G

- ❑ **Cilj:** Povećanje brzine deset puta, smanjenje kašnjenja deset puta, sto puta povećanje kapaciteta u odnosu na 4G
- ❑ **5G NR (*new radio*):**
  - ❑ Dva frekvijska opsega: FR1 (450 MHz-6 GHz) i FR2 (24 GHz-52 GHz): milimetarske frekvencije
  - ❑ Nije kompatibilan sa 4G
  - ❑ MIMO: više direktivnih antena
- ❑ **Milimetarske frekvencije:** veće brzine prenosa na manjim daljinama
  - ❑ Piko ćelije prečnika 10-100 m
  - ❑ Potreba za masovnom i prostorno gustom implementacijom baznih stanica

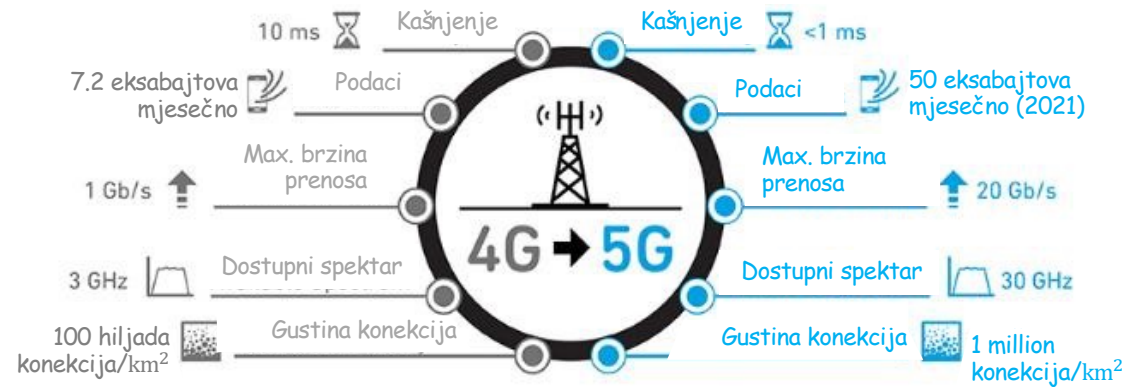
# 5G

- ❑ Među trendovima koji motivišu razvoj 5G tehnologija posebno se ističu:
  - ❑ Drastičan porast mobilnog saobraćaja.
    - ❑ CISCO predviđa da će se ukupni mobilni saobraćaj povećati oko 7 puta u periodu od 2017. do 2022. godine.
  - ❑ Usvajanje IoT rešenja u različitim granama industrije.
    - ❑ Predviđanja su da će broj povezanih IoT uređaja do 2023. godine iznositi 31.4 milijardi.
  - ❑ Kontinuitet pojavljivanja novih servisa
    - ❑ npr. 3D video visoke rezolucije, proširena realnost, mobilni Cloud, aplikacije za taktilni Internet.
- ❑ Navedeni trendovi nameću veliki broj izazova na koje je neophodno odgovoriti povećanjem kapaciteta mreže, poboljšanjem energetske efikasnosti i iskorišćenosti spektra, kao i skalabilnijim metodama upravljanja mrežnim resursima.

# 5G - Tehnički zahtjevi

- ❑ Ultra velike brzine prenosa i ultra malo kašnjenje
  - ❑ Maksimalna brzina prenosa (u idealnim uslovima): 10-20 Gb/s
  - ❑ Kašnjenje <1ms
  - ❑ Očekivana propusnost na nivou jednog korisnika u urbanim/polu-urbanim zonama 100Mb/s.
- ❑ Masovna konektivnost
  - ❑ Podrška za 10 puta veći broj uređaja u odnosu na 4G mreže.
- ❑ Fleksibilna i inteligentna mreža
  - ❑ Softverski-definisana mrežna arhitektura, mogućnost analize podataka u realnom vremenu i pružanje personalizovanih i inteligentnih servisa
- ❑ Pouzdan rad
  - ❑ Obezbijediti dostupnost i pouzdanost mreže na nivou od 99%, kao i mogućnost automatske rekonfiguracije u slučaju kvara.
- ❑ Energetski i ekonomski isplativa infrastruktura
  - ❑ 5G sistemi bi trebalo da budu 50-100 puta energetski efikasniji od LTE sistema, i ekonomičniji u pogledu potrebnih ulaganja u infrastrukturu

# Poređenje 4G i 5G standarda

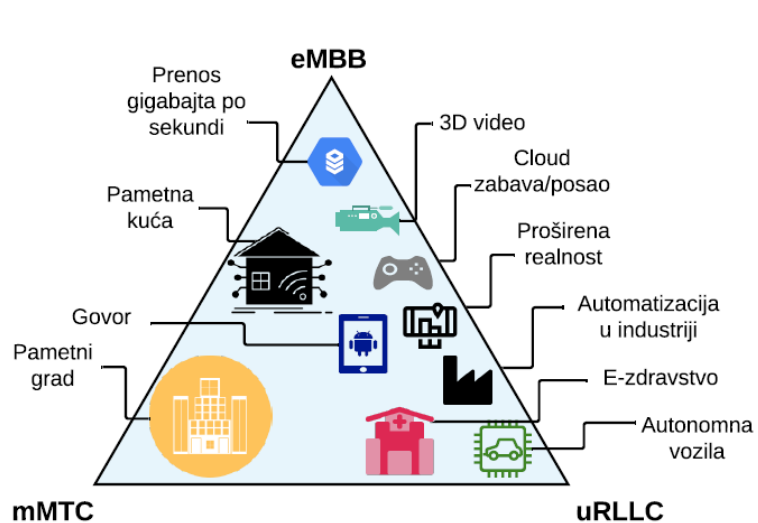


Indikator	IMT-2020	IMT-Advanced
Maksimalna brzina prenosa ( <i>Gbps</i> )	20	1
Kapacitet po jedinici površine ( <i>Mbps/m<sup>2</sup></i> )	10	0.1
Gustina konekcija ( <i>br. uređaja lkm<sup>2</sup></i> )	10 <sup>6</sup>	10 <sup>5</sup>
Kašnjenje ( <i>ms</i> )	1	10
Mobilnost ( <i>km/h</i> )	500	350
Propusnost ( <i>Mbps</i> )	100-1000	10
Spektralna efikasnost	3x	1x
Energetska efikasnost	100x	1x

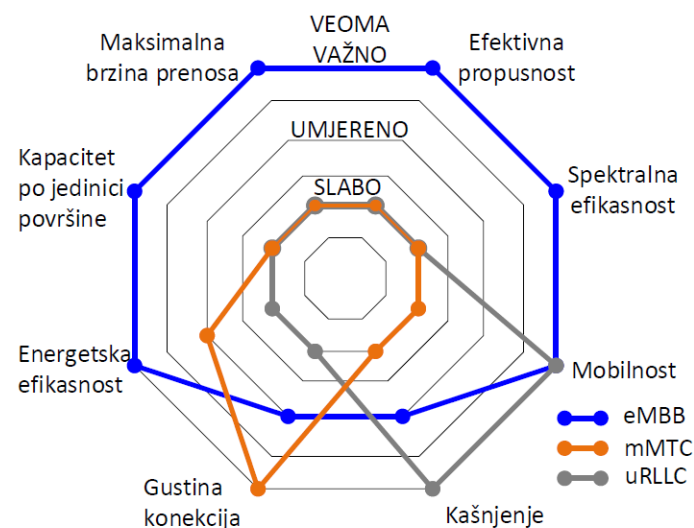
# 5G servisi

- Pобољшanje mobilne širokopoјasne mreže (*eMBB - Enhanced Mobile Broadband*)
  - eMBB ima za cilj da zadovolji potrebe ljudi za digitalnim načinom života, i fokusira se na aplikacije koje imaju stoge zahtjeve za propusnim opsegom, kao što su ultra HD video, virtuelna i proširena stvarnost.
- Ultra pouzdana komunikacija malog kašnjenja (*uRLLC - Ultra Reliable Low Latency Communication*)
  - Cilj uRLLC servisne grupe je da podrži digitalnu transformaciju industrije. Fokusira se na servise osjetljive na kašnjenje, kao što su bezbjednost u asistiranim i autonomnim vozilima, monitoring i upravljanje u realnom vremenu, udaljene medicinske intervencije itd. Današnje mreže ne podržavaju ove servise.
- Masovne mašinske komunikacije (*mMTC - Massive Machine Type Communications*).
  - Mašinske komunikacije se odnose na uređaje koji komuniciraju bez ljudske intervencije. Teži da ispuni zahtjeve IoT aplikacija koje periodično prikupljaju manje količine podataka iz baterijski napajanih senzorskih mreža, i obrađuju ih sa ciljem unaprijeđenja nekog proizvodnog procesa ili kvaliteta života.

# 5G servisi



5G servisne grupe



Značaj različitih indikatora performansi za različite klase servisa



# 5G New Radio (NR)

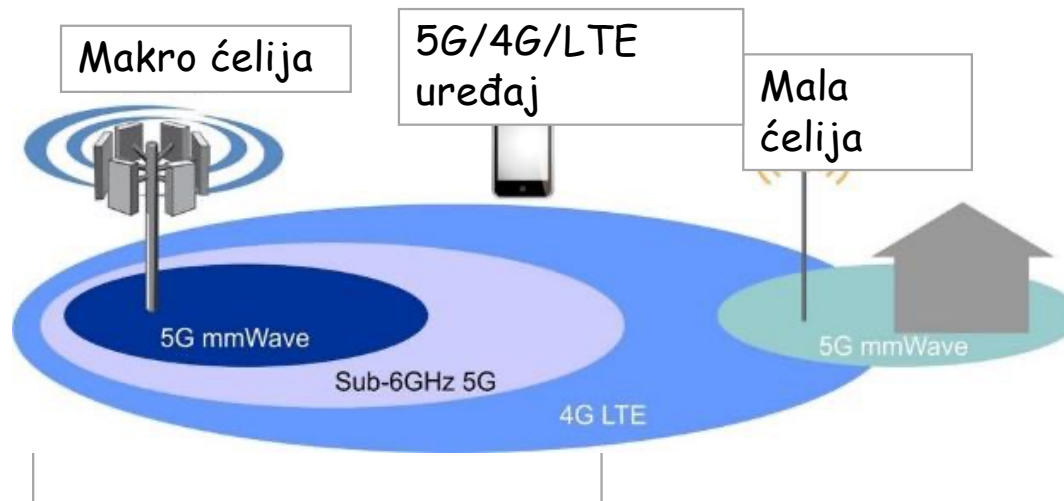
- 3GPP standardi
- Prva verzija standarda poznata je kao Release 15
- Tehnologije:
  - Milimetarski talasi
  - CP-OFDM
  - Nova struktura frejma
  - Masivni MIMO
  - Beamforming
  - ...

# 5G NR - Spektar

- Koristi se spektar na nižim (*low band*), srednjim (*mid band*) i visokim (*high band*) učestanostima
- Release 15 pokriva učestanosti od ispod 1GHz pa do 52.6 GHz
- Predviđeno korišćenje **milimetarskih talasa** (>24GHz)
- Visokofrekvencijski dio spektra (>6GHz) dostupan je na više opsega koji variraju po regionima
- Mnogi opsezi još uvijek nijesu dostupni zbog servisa koje je potrebno ukinuti
- Slabljenje u slobodnom prostoru proporcionalno je kvadratu učestanosti i kvadratu rastojanja
  - 88 dB slabljenje na 30 GHz, za rastojanje od 20 m
  - radijus mmWave ćelije oko 100m

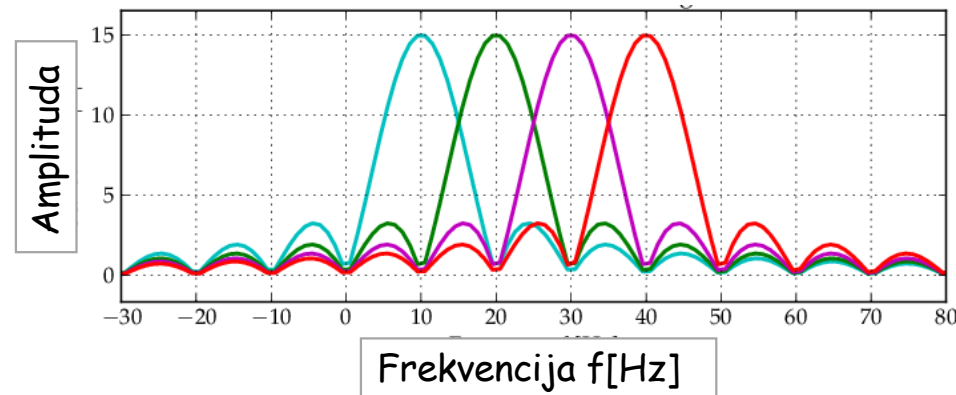
# 5G NR - Spektar

- *Low-band* opseg (<1GHz) koristi se za pokrivanje većih ruralnih, polu-urbanih i urbanih zona, kao i za pružanje podrške za IoT.
  - Veliki domet, male brzine prenosa.
- *Mid-band* opseg (2-6 GHz) nudi kompromis između pokrivenosti i brzine prenosa.
- *High-band* opseg (24-52.6GHz) nudi veoma velike brzine prenosa uz mali domet.



# 5G NR - Multipleksiranje

- Tehnike multipleksiranja bazirane na OFDM-u

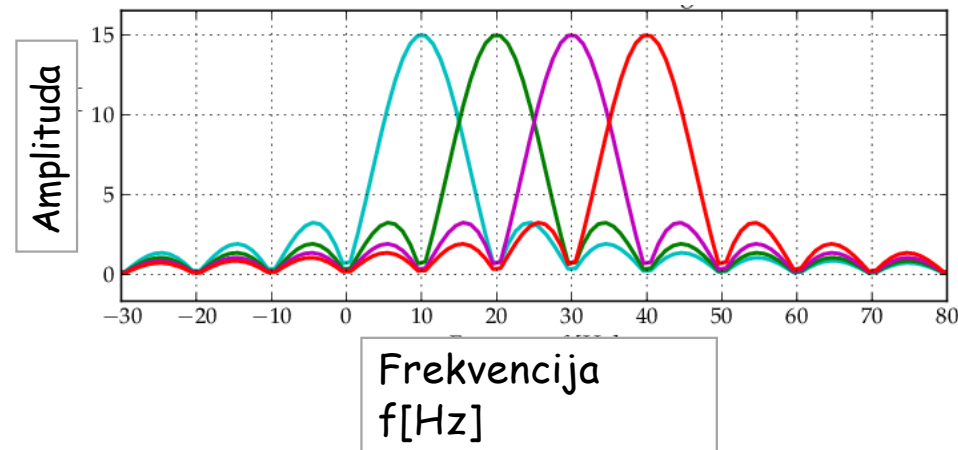


- Nove tehnike:

- *Cyclic Prefix - OFDM (CP-OFDM)*
- *Spectrum Filtered OFDM (f-OFDM)*
- *Filtered Bank Multicarrier (FBMC)*
- *Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA)*
- *Pattern Division Multiple Access (PDMA)*
- *Low Density Spreading (LDS)*
- *Sparse Code Multiple Access (SCMA)*
- *Interleave-Division Multiple Access (IDMA)*

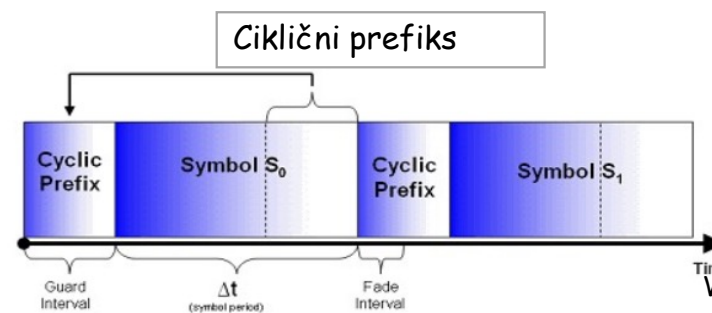
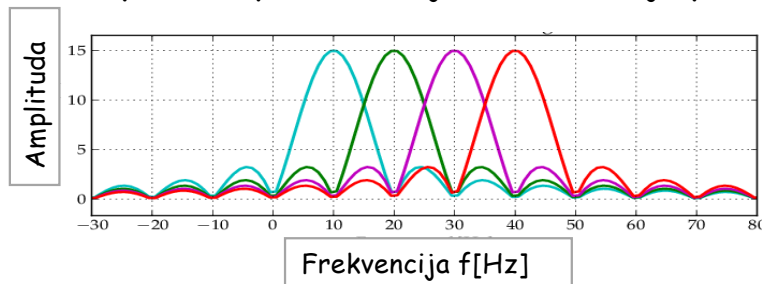
# OFDM - podsjećanje

- ❑ Podaci su modulirani setom ortogonalnih nosilaca.
- ❑ Tok podataka se dijeli u N paralelnih tokova kako bi se redukovao protok podataka, a svaki od tih manjih protoka se prenosi preko sopstvenog podnosioca.
- ❑ Nosioci su međusobno ortogonalni tako što je između njih biran odgovarajući frekvencijski razmak - maksimum signala svakog od podnosioca odgovara nulama svih ostalih signala
- ❑ Dozvoljeno spektralno preklapanje među nosiocima, jer će ortogonalnost obezbijediti da prijemnik bude u mogućnosti da razdvoji OFDM podnosiocice.



# OFDM - podsjećanje

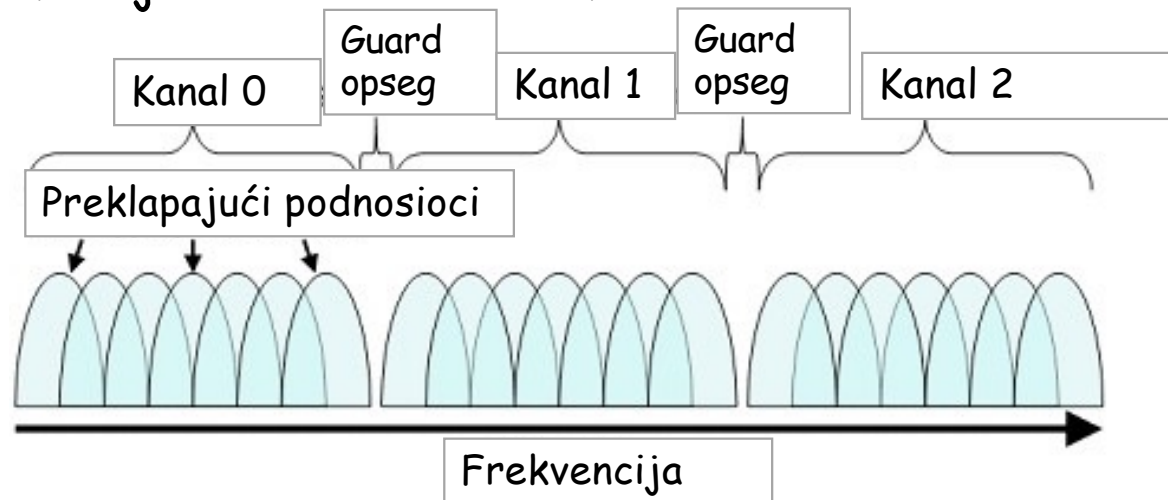
- ❑ Ukoliko kanal nije idealan dolazi do intersimbolske interferencije.
- ❑ Podgodno je posmatrati OFDM signal u obliku okvira (frejmova) podataka, tako da se može smatrati da će kanal produkovati ISI u okviru frejma, a takođe i IFI (inter-frame interferencija) među susjednim frejmovima
- ❑ Uvođenje zaštitnog intervala dužine  $L$  između dva susjedna frejma omogućava "apsorbiciju" kašnjenja u kanalu, a time se uklanja IFI.
  - ❑ Ovo se može ostvariti ubacivanjem  $L$  vodećih nula u svaki okvir na predaji i njihovim uklanjanjem na prijemu.
  - ❑ Kako bi se takođe uklonila ISI iz okvira, bolje je koristiti ciklični prefiks umjesto zaštitnog intervala koji se sastoji od svih nula. U ovom slučaju, posle uklanjanja prefiksa na prijemu, dobija se ciklična konvolucija prenošenog okvira podataka i kanala.
  - ❑ Ciklični prefiks podrazumijeva dodavanje prefiksa simbolu koji je jednak njegovom kraju.



# 5G NR - Multipleksiranje

Identifikovani nedostaci OFDM-a:

- ❑ Potrebni zaštitni intervali između različitih frekvencijskih kanala (eng. guard bands)
- ❑ Na čitavom frekvenijskom opsegu koristi se isti razmak između podnosilaca
- ❑ Veličina simbola i cikličnog prefiksa je konstantna
- ❑ Svi korisnici moraju biti striktno vremenski sinhronizovani na uplink-u



# 5G NR - Multipleksiranje

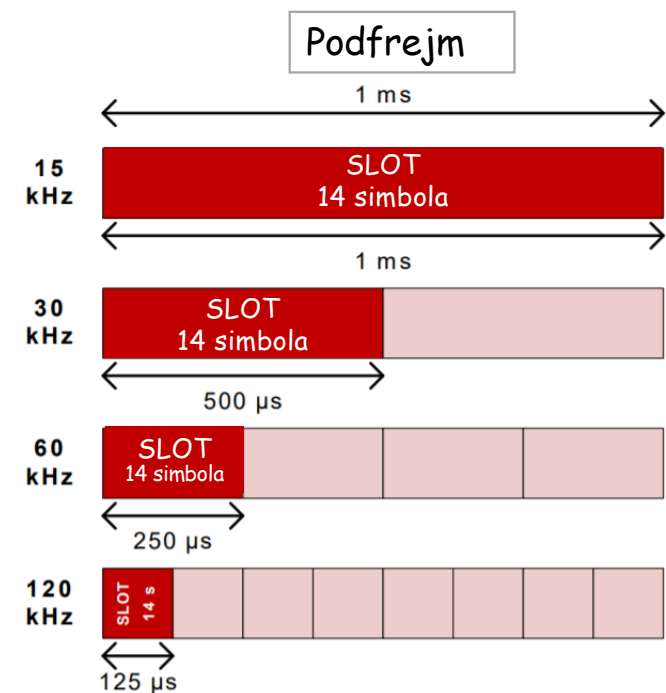
## CP-OFDM

- Sličan LTE OFDM-u
- Dok LTE koristi fiksni razmak između podnosilaca (15kHz), kod CP-OFDM-a je razmak između podnosilaca promjenljiv (15kHz, 30kHz, 60kHz, 120kHz itd.)
- Moguće različite dužine cikličnog prefiksa
- Različiti OFDM parametri mogu da se koriste za različite aplikacije
- Korisnici u različitim podopsezima ne moraju biti vremenski sinhronizovani
- Manje bočne latice
- Veća spektralna efikasnost



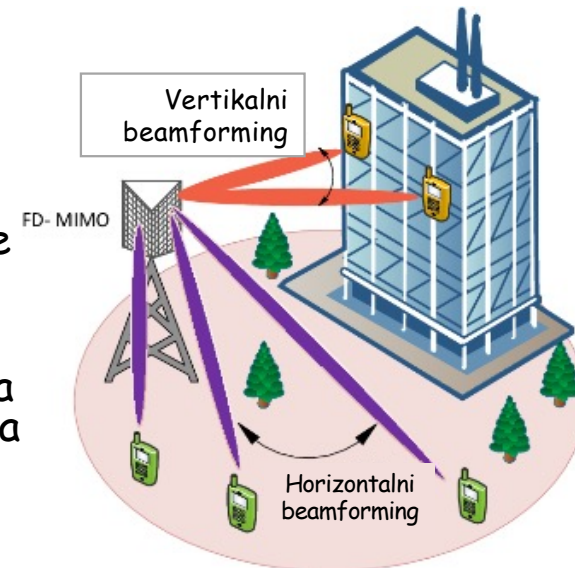
# 5G NR - Struktura frejma

- ❑ Trajanje frejma 10ms
- ❑ Podfrejm trajanja 1ms (kompatibilnost sa LTE)
- ❑ Slotovi za planirani prenos (*scheduled communication*)
  - ❑ 14 OFDM simbola po slotu
  - ❑ Trajanje slota varira sa razmakom između podnosioca
  - ❑ Moguća agregacija slotova za potrebe masivnijih prenosa podataka
- ❑ Mini-slot za neplaniranu komunikaciju
  - ❑ 2, 4 ili 7 OFDM simbola
  - ❑ URLLC aplikacije



# 5G NR - Beamforming i Masivni MIMO

- ❑ Naprednije beamforming tehnike u odnosu na LTE
- ❑ Visoko usmjereno zračenje u prostoru
- ❑ LTE koristi beamforming samo za prenos podataka
- ❑ 5G NR koristi beamforming i za kontrolnu signalizaciju
- ❑ Na višim učestanostima koristi se za prošireno pokrivanje fokusiranjem energije
- ❑ Na nižim i srednjim učestanostima, gdje slabljenje nije toliki problem, beamforming je ključni dio MIMO sistema koji značajno povećavaju kapacitet mreže
- ❑ 5G NR podržava distribuirani MIMO koji omogućava da korisnik prima različite dijelove jednog toka podataka sa više različitih antena
- ❑ Masivni MIMO - znatno veći broj antenskih elemenata na baznim stanicama (manje dimenzije antena koje emituju na visokim učestanostima)

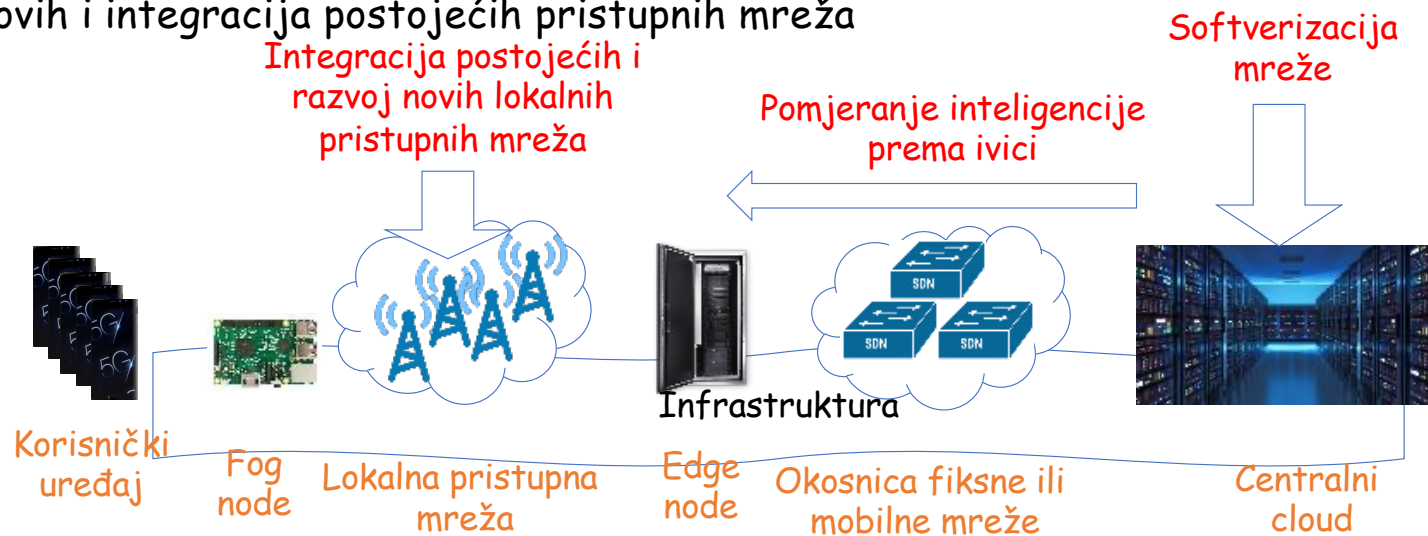


# 5G infrastruktura

## SDN/NFV

5G je sveobuhvatni softverski sistem koji koristi sve raspoložive resurse

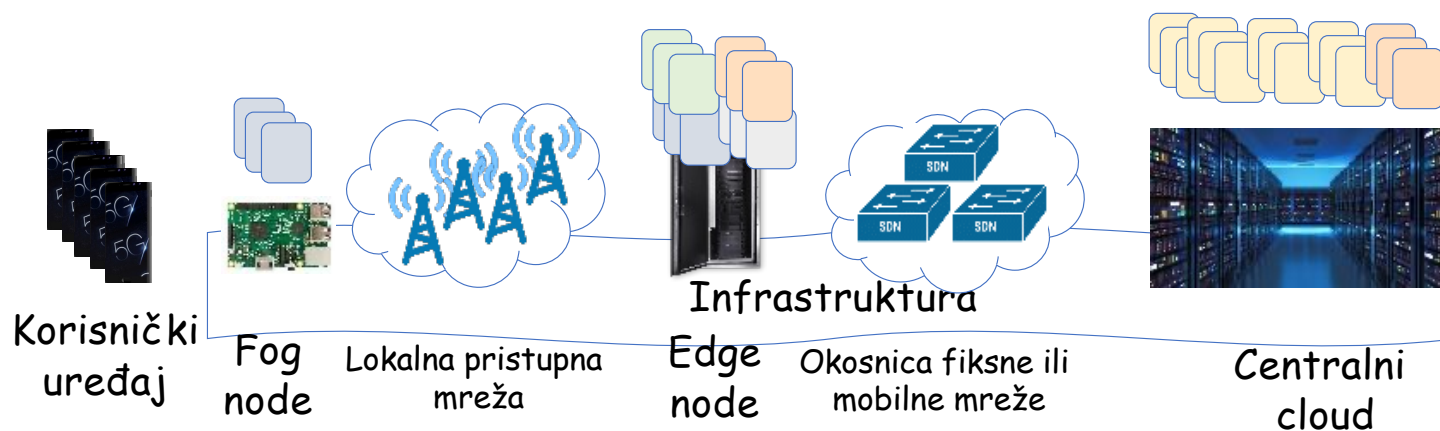
- Mrežne funkcije su realizovane u softveru (konvergencija sa IT)
  - Fleksibilnija softverski definisana mrežna infrastruktura
  - Paralelni razvoj više specijalizovanih mreža
- Mrežne funkcije će biti instalirane i na uređajima ivice mreže
- Razvoj novih i integracija postojećih pristupnih mreža



# 5G infrastruktura

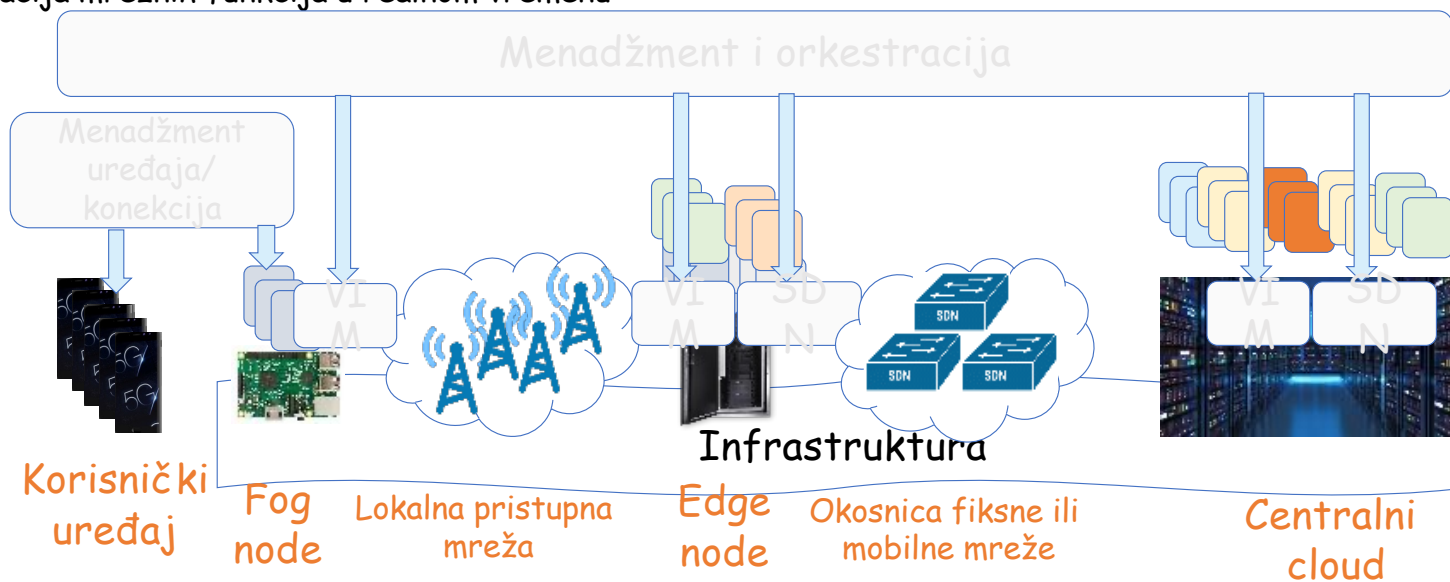
## Prednosti:

- Softverske mrežne funkcije iz infrastrukture izvlače najbolje
- Komunikaciona infrastruktura se može prilagoditi potrebama
- Mrežne funkcije (servisi, pouzdanost, zaštita) mogu biti implementirane bilo gdje
- Ista tehnologija se koristi za različite primjene



# 5G infrastruktura

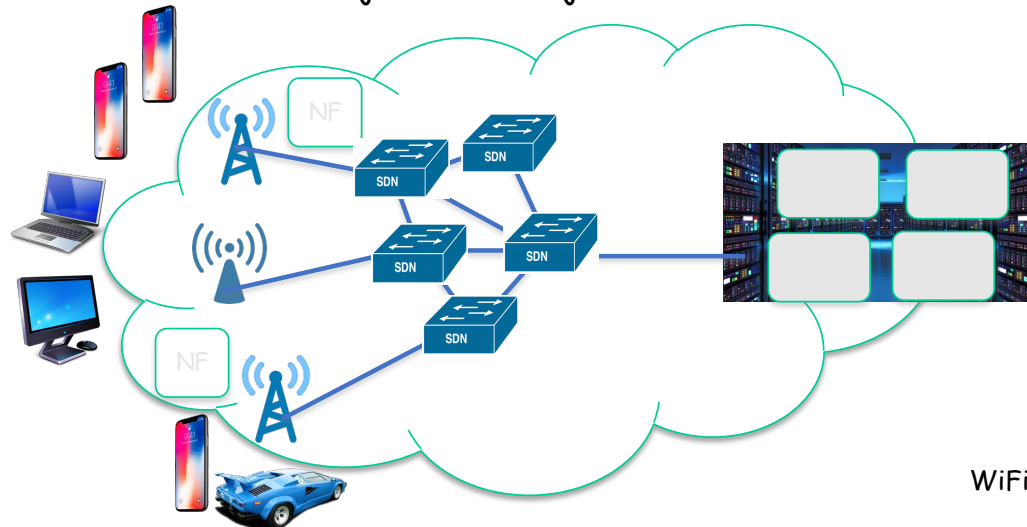
- ❑ Izmještanje mrežnih funkcija sa mrežnog sistemskog nivoa na uređaj/fog, edge, centralni cloud
- ❑ Poboljšanje performansi (balansiranje opterećenja i veća pouzdanost)
- ❑ Slajsovanje mreže - virtuelna mreža za svaki servis
- ❑ Otpornost komunikacije od kraja do kraja
- ❑ Zaštita na infrastrukturnom nivou
- ❑ Siguran i pouzdan menadžment konekcije
- ❑ Orkestracija mrežnih funkcija u realnom vremenu



# 5G mreža

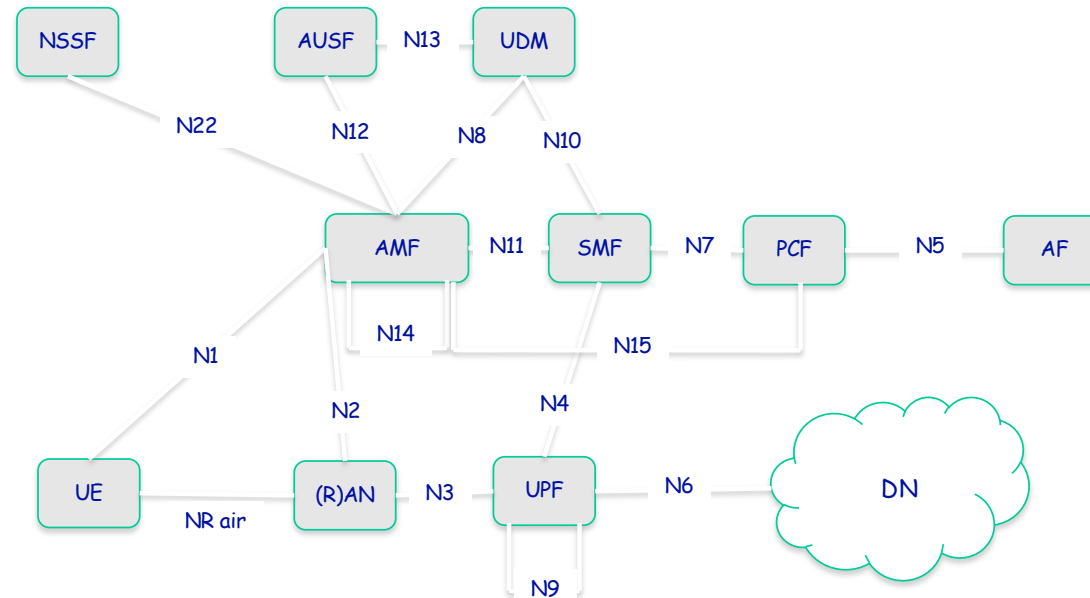
## NFV/SDN middleware

- ❑ Distribuirana heterogena infrastruktura
  - ❑ Fizičke komponente
  - ❑ Heterogeni data centri
  - ❑ Povezane mreže (pristupne, okosnice, kompanijske, ...)
- ❑ Generičke mrežne funkcije implementirane u softveru koji se izvršava na virtuelnim mašinama (vEPC, vVPN, vNAT, vIMS, ...)
- ❑ Middleware funkcionalnosti:
  - ❑ Razumijevanje zahtjeva servisa i njihova transformacija u parametre mreže
  - ❑ Dijeljenje zajedničkih resursa (računari, storage i mreža) između više servisa
  - ❑ Garantovanje SLA od kraja do kraja uslovima dinamičkih izmjena saobraćaja i mreže



# 5G jezgro mreže

3GPP TS 23.501

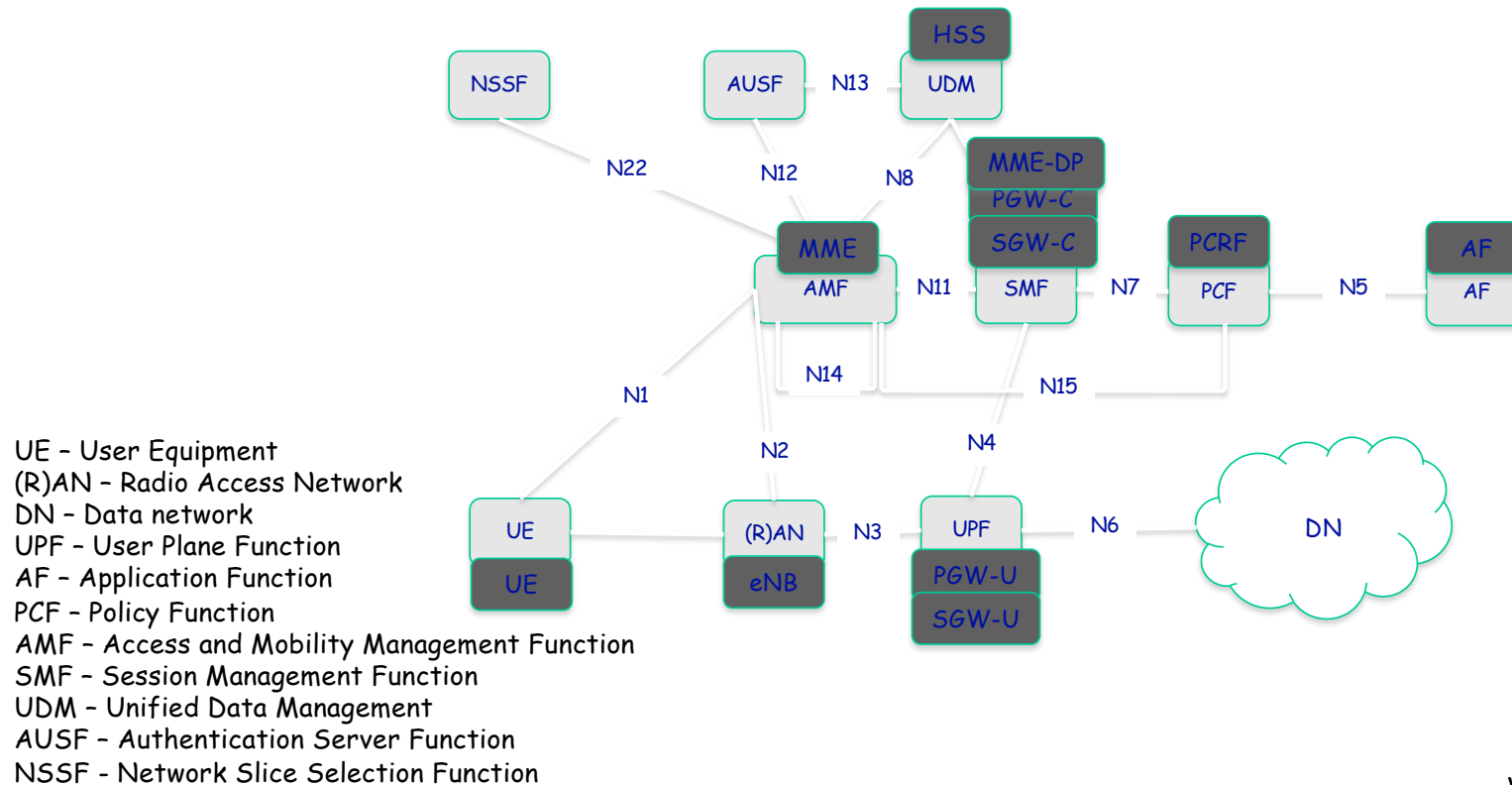


UE - User Equipment  
(R)AN - Radio Access Network  
DN - Data network  
UPF - User Plane Function  
AMF - Access and Mobility Management Function  
SMF - Session Management Function  
PCF - Policy Function  
UDM - Unified Data Management  
AUSF - Authentication Server Function  
NSSF - Network Slice Selection Function  
AF - Application Function

# 5G jezgro mreže

Poređenje sa 3GPP EPC (4G jezgrom mreže)

5G predstavlja evoluciju postojeće mreže prema sofverskoj mreži

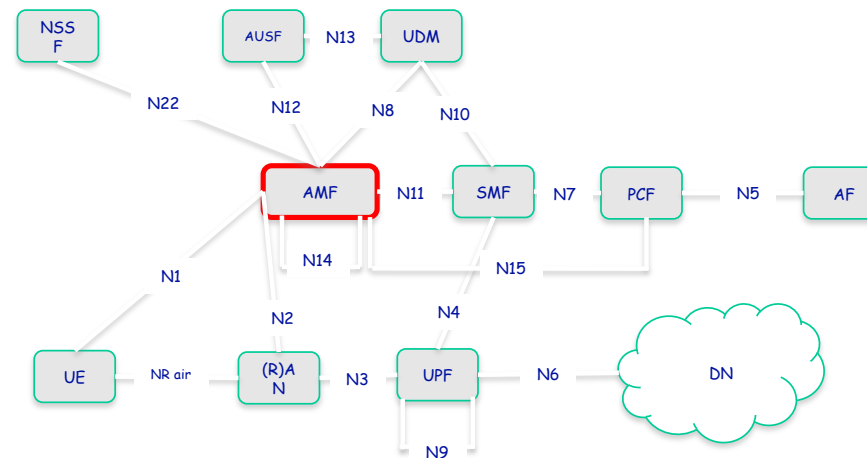




# 5G jezgro mreže

*Access and Mobility Management Function (AMF) je ključni kontrolni entitet*

- ❑ Terminacija RAN i NAS interfejsa
- ❑ Menadžment registracije
- ❑ Menadžment konekcije
- ❑ Menadžment mobilnosti
- ❑ Menadžment dostupnosti
- ❑ Transport SM poruka prema SMF
- ❑ Autentikacija pristupa
- ❑ Autorizacija pristupa
- ❑ Prenos SMS poruka
- ❑ Security anchor funkcija
- ❑ Menadžment konteksta zaštite
- ❑ Zakonsko presrijetanje poziva

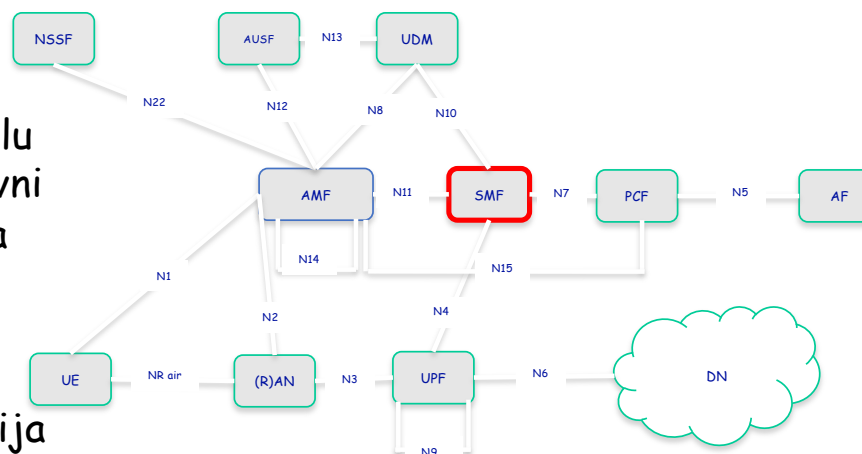


UE - User Equipment  
(R)AN - Radio Access Network  
DN - Data network  
UPF - User Plane Function  
AF - Application Function  
PCF - Policy Function  
AMF - Access and Mobility Management Function  
SMF - Session Management Function  
UDM - Unified Data Management  
AUSF - Authentication Server Function  
NSSF - Network Slice Selection Function

# 5G jezgro mreže

Session Management Function (SMF) predstavlja odvojene funkcije za sesije

- ❑ Menadžment sesije (uspostavljanje, modifikacija, raskidanje i nadzor)
- ❑ Dodjela IP adrese korisničkom terminalu
- ❑ Izbor i kontrola funkcija korisničke ravni
- ❑ Konfiguracija upravljanja saobraćaja na UPF
- ❑ Terminacija interfejsa prema PCF
- ❑ Terminacija SM dijela NAS poruka
- ❑ Inicijator AN specifičnih SM informacija
- ❑ Downlink data notifikacija



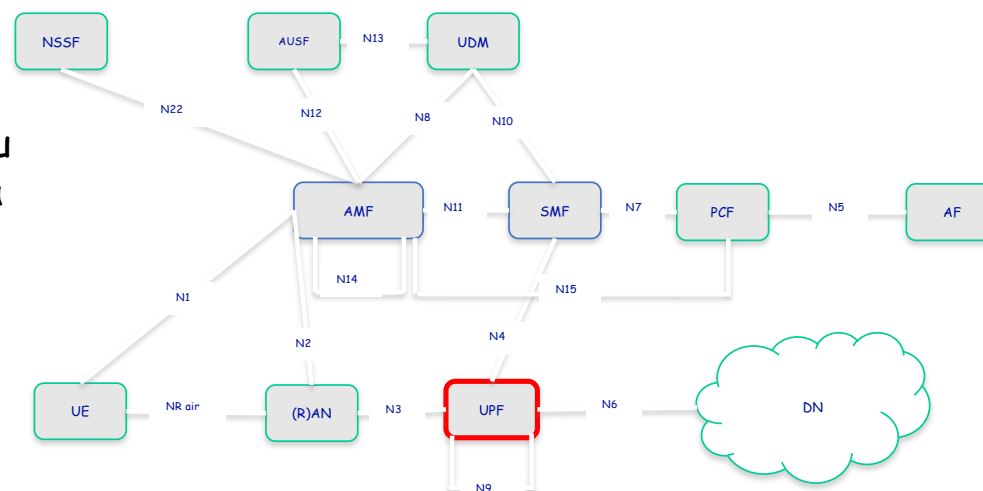
UE - User Equipment  
(R)AN - Radio Access Network  
DN - Data network  
UPF - User Plane Function  
AF - Application Function  
PCF - Policy Function  
AMF - Access and Mobility Management Function  
SMF - Session Management Function  
UDM - Unified Data Management  
AUSF - Authentication Server Function  
NSSF - Network Slice Selection Function

WiFi i mobilne mreže 6-66

# 5G jezgro mreže

User Plane Function (UPF) sadrži funkcije korisničke ravni

- Rutiranje i prosleđivanje paketa
- Zakonsko presrijetanje poziva
- Izvještavanje o korisničkom saobraćaju
- Inspekcija paketa i sprovođenje pravila politika korisničke ravni
- Podrška QoS
- Markiranje paketa
- Baferovanje paketa na downlinku
- Verifikacija uplink saobraćaja
- Uplink klasifikator prema DN
- ...



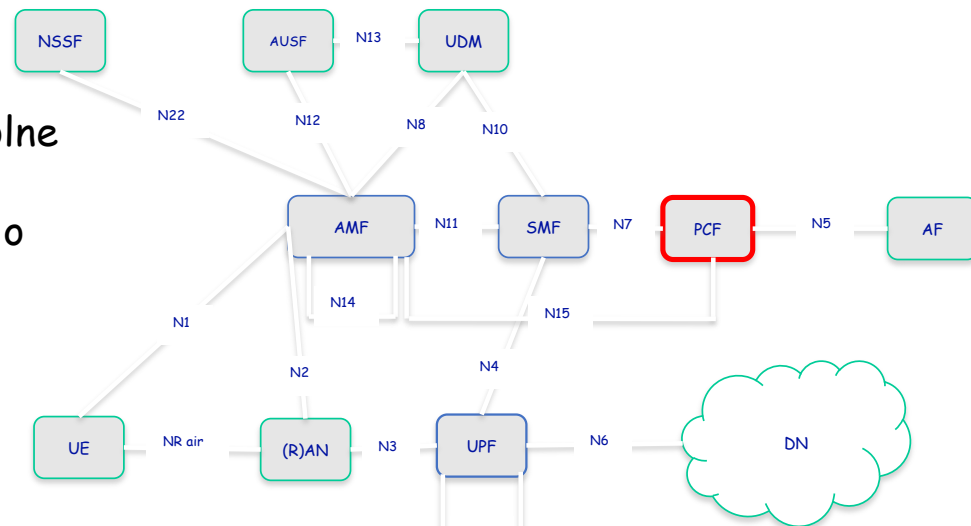
UE - User Equipment  
(R)AN - Radio Access Network  
DN - Data network  
UPF - User Plane Function  
AF - Application Function  
PCF - Policy Function  
AMF - Access and Mobility Management Function  
SMF - Session Management Function  
UDM - Unified Data Management  
AUSF - Authentication Server Function  
NSSF - Network Slice Selection Function

WiFi i mobilne mreže 6-67

# 5G jezgro mreže

Policy Function (PCF) sadrži funkcije bazirane na administrativnoj politici

- ❑ Podržava unificirani okvir za praćenje ponašanja mreže
- ❑ Obezbeđuje pravila za funkcije kontrolne ravni
- ❑ Implementira front end za informaciju o pretplatnikovom pristupu koja je relevantna za donošenje odluka u UDM



UE - User Equipment

(R)AN - Radio Access Network

DN - Data network

UPF - User Plane Function

AF - Application Function

PCF - Policy Function

AMF - Access and Mobility Management Function

SMF - Session Management Function

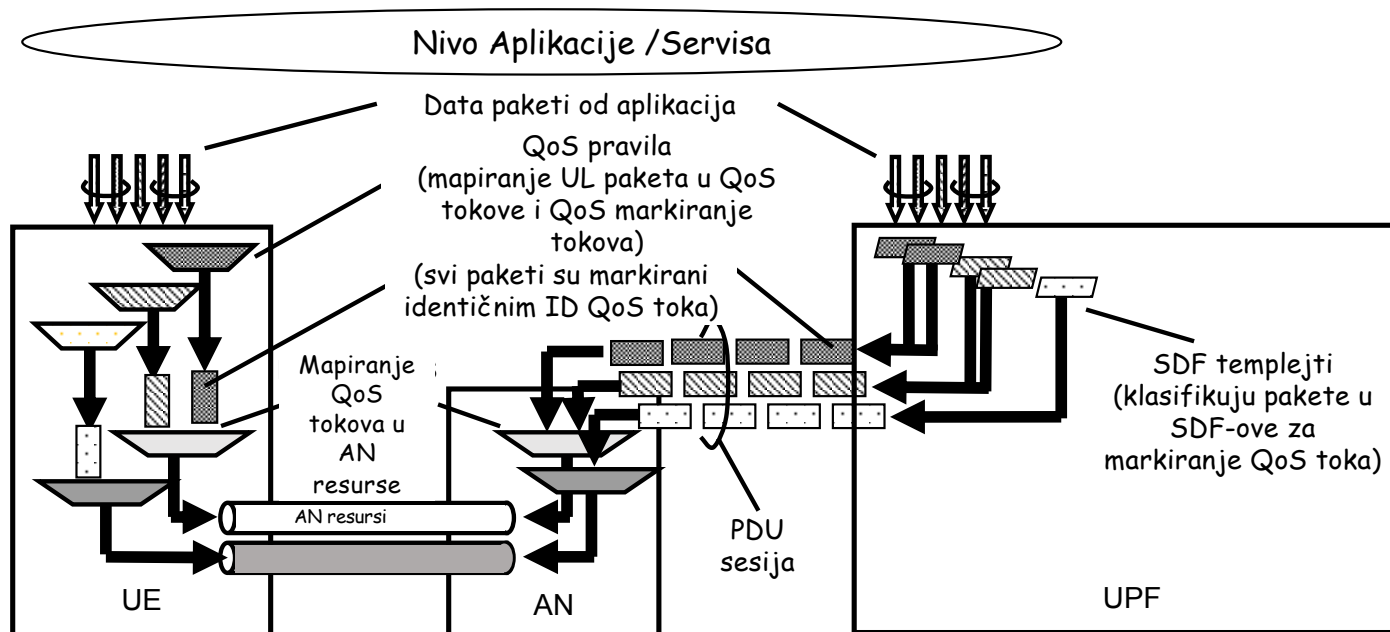
UDM - Unified Data Management

AUSF - Authentication Server Function

NSSF - Network Slice Selection Function

# 5G jezgro mreže

## QoS principi

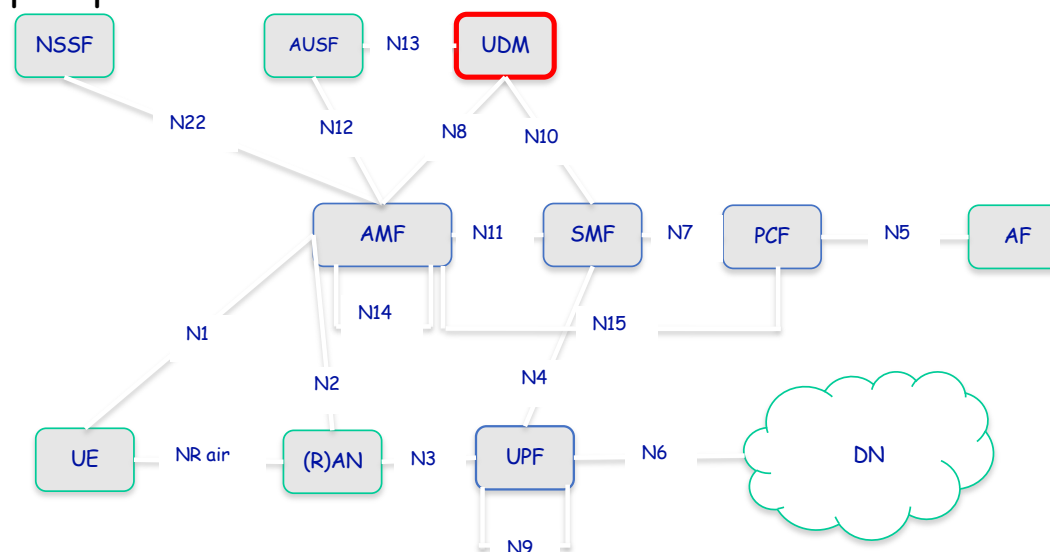


SDF - Service Data Flow  
PDU - Protocol Data Unit

# 5G jezgro mreže

Unified Data Management (UDM) sadrži pretplatničku bazu

- ❑ Front End (obrada kredencijala, menadžment lokacije, menadžment pretplate,...)
- ❑ Repozitorijum korisničkih podataka sadrži podatke potrebne za UDM-FE i PCF profile
- ❑ Autentifikacija obrade kredencijala
- ❑ Identifikacija korisnika
- ❑ Autorizacija pristupa
- ❑ Menadžment registracije/mobilnosti
- ❑ Menadžment pretplate



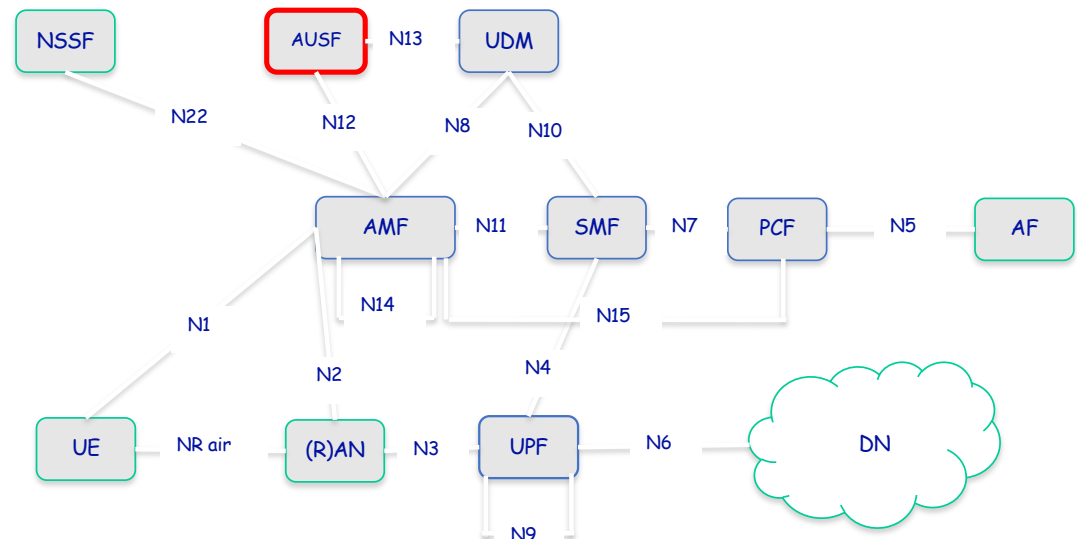
UE - User Equipment  
(R)AN - Radio Access Network  
DN - Data network  
UPF - User Plane Function  
AF - Application Function  
PCF - Policy Function  
AMF - Access and Mobility Management Function  
SMF - Session Management Function  
UDM - Unified Data Management  
AUSF - Authentication Server Function  
NSSF - Network Slice Selection Function

WiFi i mobilne mreže 6-70

# 5G jezgro mreže

## Authentication Server Function (AUSF)

- Front-end za UDM kako bi odradio odgovarajuću autentifikaciju
- Definisani od SA3 u 3GPP



UE - User Equipment  
(R)AN - Radio Access Network  
DN - Data network  
UPF - User Plane Function  
AF - Application Function  
PCF - Policy Function  
AMF - Access and Mobility Management Function  
SMF - Session Management Function  
UDM - Unified Data Management  
AUSF - Authentication Server Function  
NSSF - Network Slice Selection Function

WiFi i mobilne mreže 6-71

# 5G jezgro mreže

## Servisno bazirana arhitektura

### Network Exposure Function (NEF)

- ❑ Omogućava umrežavanje sa funkcionalnostima treće strane
- ❑ "Otvora" servise 3GPP mrežne funkcije trećoj strani
- ❑ Prevođenje informacija koje se razmjenjuju između AF i internih mrežnih funkcija
- ❑ Služi kao storage za informacije

### NF Repository Function (NRF)

- ❑ Služi kao network discovery funkcija za dinamičku mrežnu infrastrukturu
- ❑ Podržava *service discovery* funkciju
- ❑ Nadzire informacije o dostupnim NF instancama i njihovim podržanim servisima



# Šta je mobilnost?

Vrste mobilnosti, iz ugla mreže:

Nema mobilnosti

Velika mobilnost



Uređaju prelaze iz mreže umrežu uz gašenje uređaja

Uređaj se kreće unutar zone pokrivanja AP jednog operatora

Uređaj se kreće iz zone pokrivanja jedne u zonu pokrivanja druge AP jednog operatora

Ovo je zanimljivo

Uređaj se kreće iz mreže u mrežu uz neprekidnost konekcije

# Pristupi mobilnosti

## Neka to mreža (ruteri) odrade:

- ❑ Ruteri oglašavaju dobro poznato ime, IP adresu ili identifikator ćelije posjetioca razmjenom tabela rutiranja
- ❑ Internet rutiranje to već radi jer tabela rutiranja identifikuju gje se mobilni terminal nalazi na bazi najdužeg mrežnog prefiksa!

# Pristupi mobilnosti

Neka to mreža (ruteri) odrade:

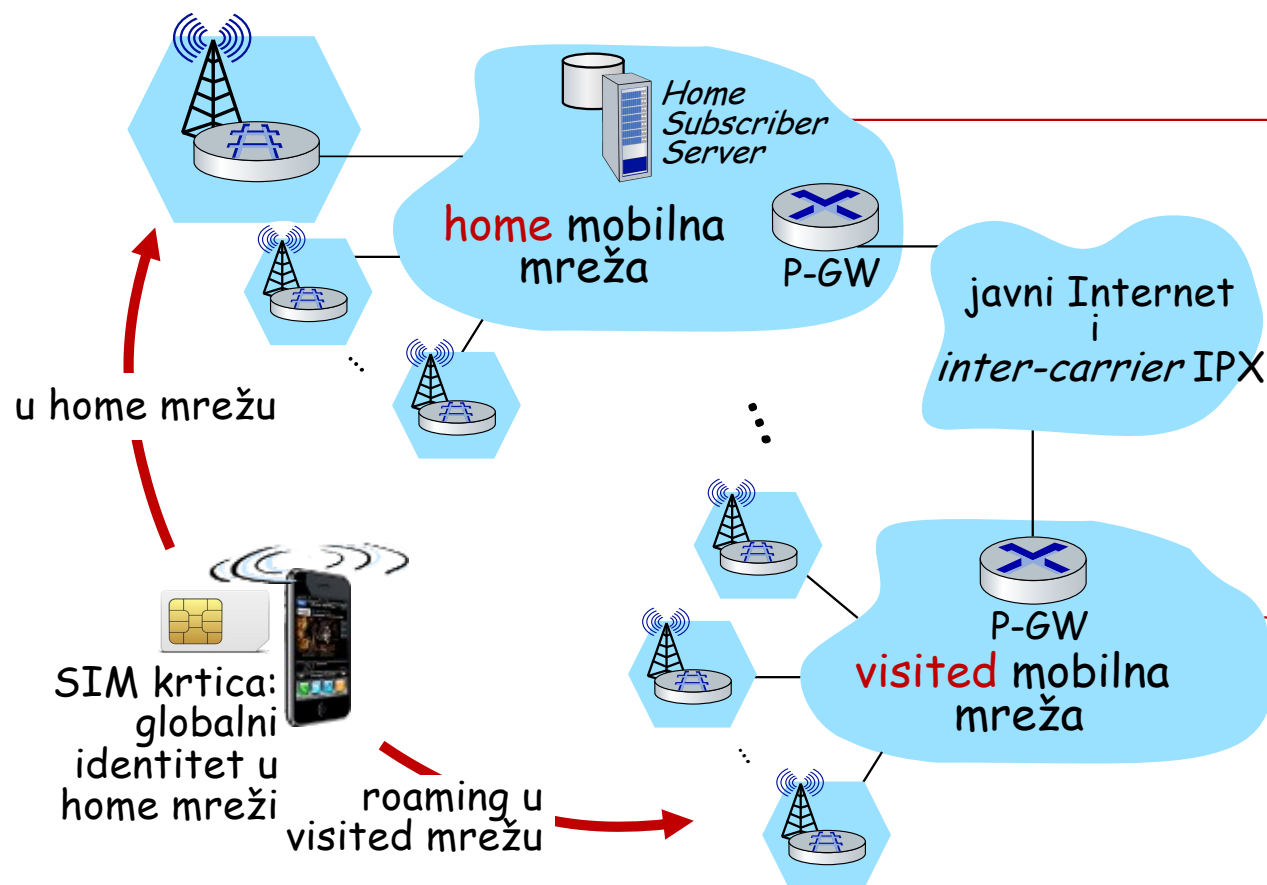
- ❑ Ruteri oglašavaju dobro ime, IP adresu ili identifikator ćelije prilikom izmjene tabele rutiranja
- ❑ Internet rutiranje također koristi tabele rutiranja identifikuju gde se mobilni terminal nalazi na bazi najdužeg mrežnog prefiksa!

Nije skalabilno za milijarde mobilnih

**Neka krajnji uređaji to urade:** funkcionalnost na "ivici mreže"

- **indirektno rutiranje:** komunikacija od izvorišta do mobilnog se odvija preko kućne mreže, a zatim prosleđuje udaljenom mobilnom terminalu
- **direktno rutiranje:** izvorište dobija stvarnu adresu mobilnog uređaja i šalje mu podatke direktno

# Home mreža, visited mreža: 4G/5G



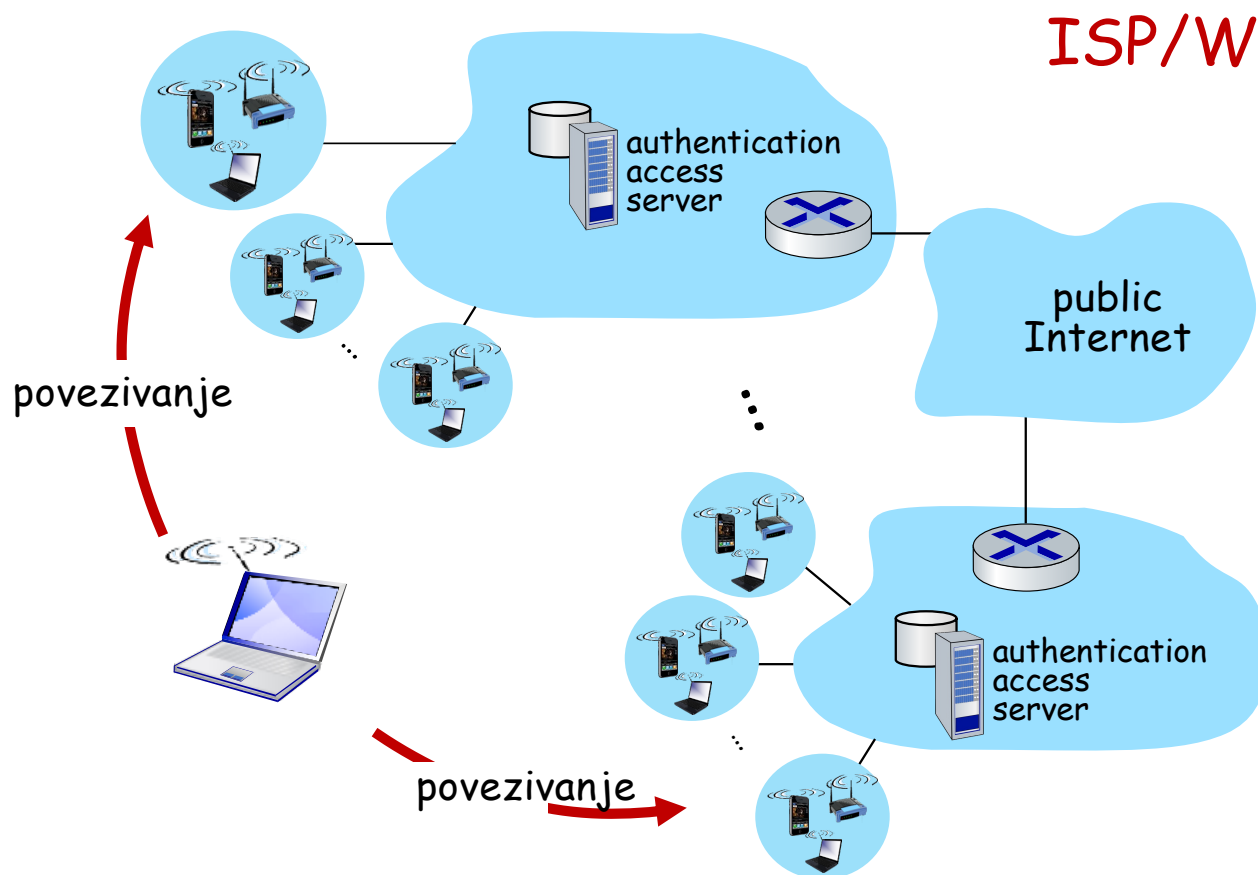
## home mreža:

- Ugovoreni servis sa operatorom
- HSS home mreže sadrži informacije o identitetu i servisima

## visited mreža:

- Bilo koja mreža različita od home mreže
- Ugovor o romingu sa drugom mrežom kojom se reguliše povezivanje gostujućeg mobilnog

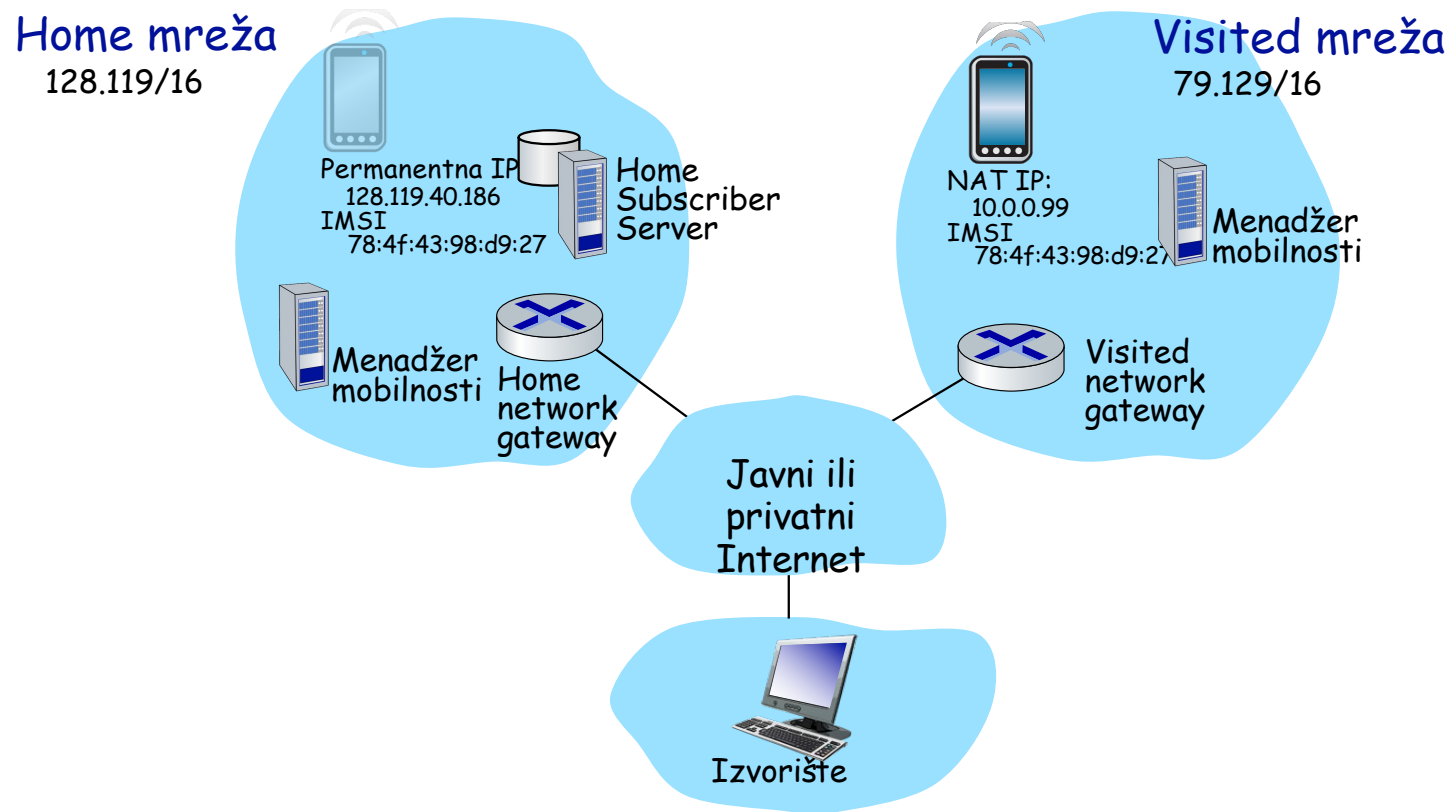
# Home mreža, visited mreža: ISP/WiFi



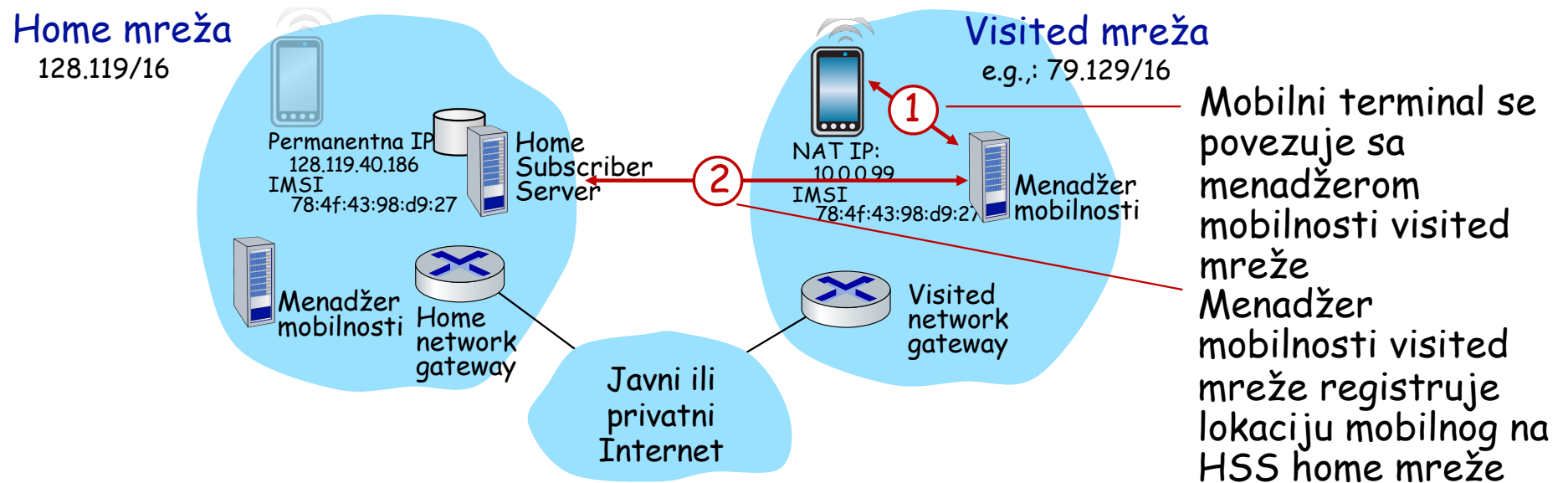
## ISP/WiFi: nema "home" mreže

- ❑ Kredencijali dobijeni od ISP (korisničko ime, lozinka, ) se smještaju na uređaju
- ❑ ISP- ovi mogu imati nacionalni ili međunarodni značaj
- ❑ Različite mreže imaju različite kredencijale
  - ❑ Postoje izuzeci (eduroam)
  - ❑ Postoje arhitekture milnosti (mobile IP) slične 4G mobilnosti, ali se ne koriste

# Home mreža, visited mreža: generički slučaj



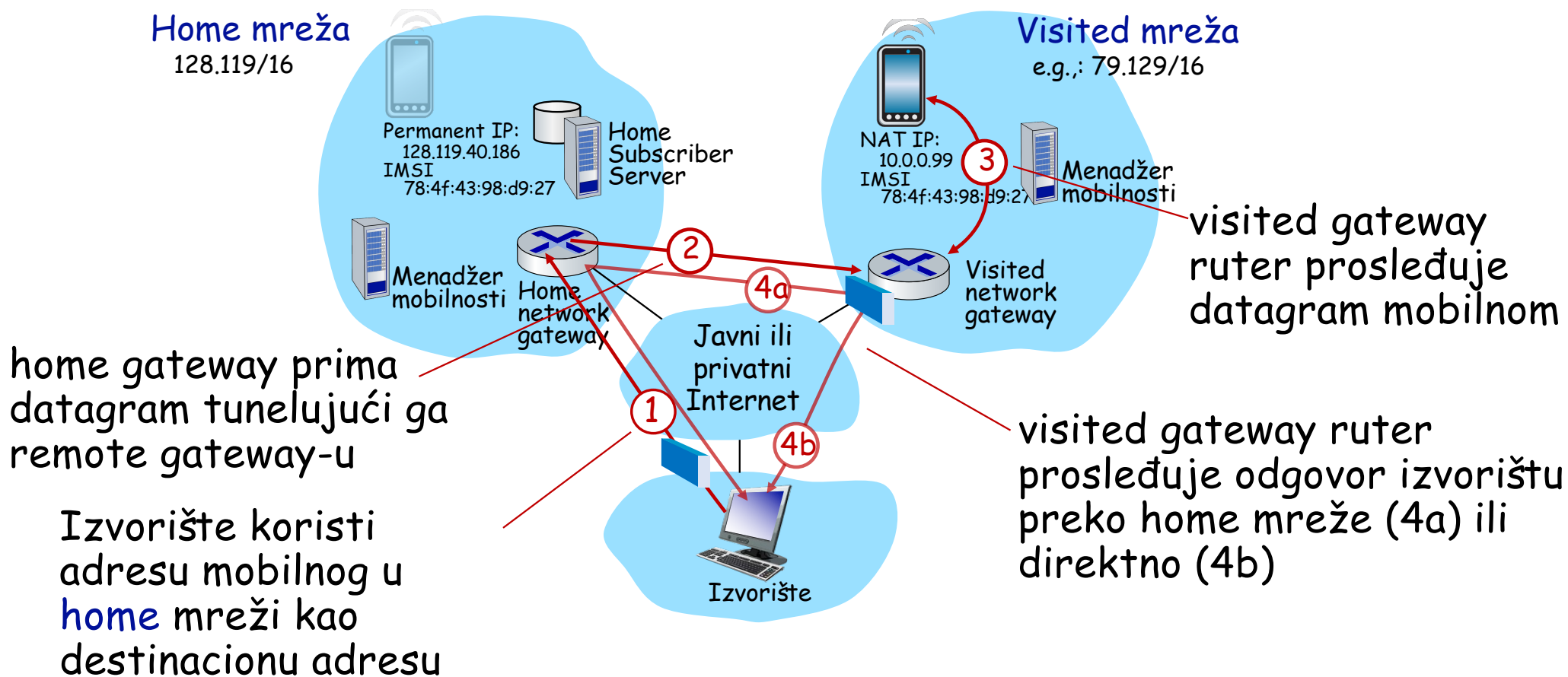
# Registracija: home mreža treba da zna gdje je mobilni!



## Rezultat:

- ❑ Menadžer mobilnosti visited mreže dobija relevantne informacije o mobilnom i njegovim servisima
- ❑ HSS home mreže saznaje lokaciju mobilnog terminala

# Mobilnost sa indirektnim rutiranjem

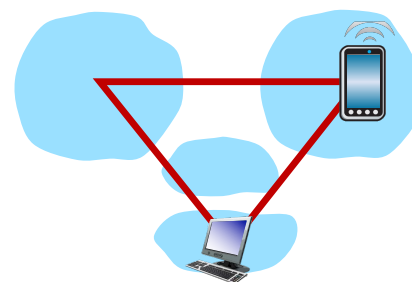




# Mobilnost sa indirektnim rutiranjem

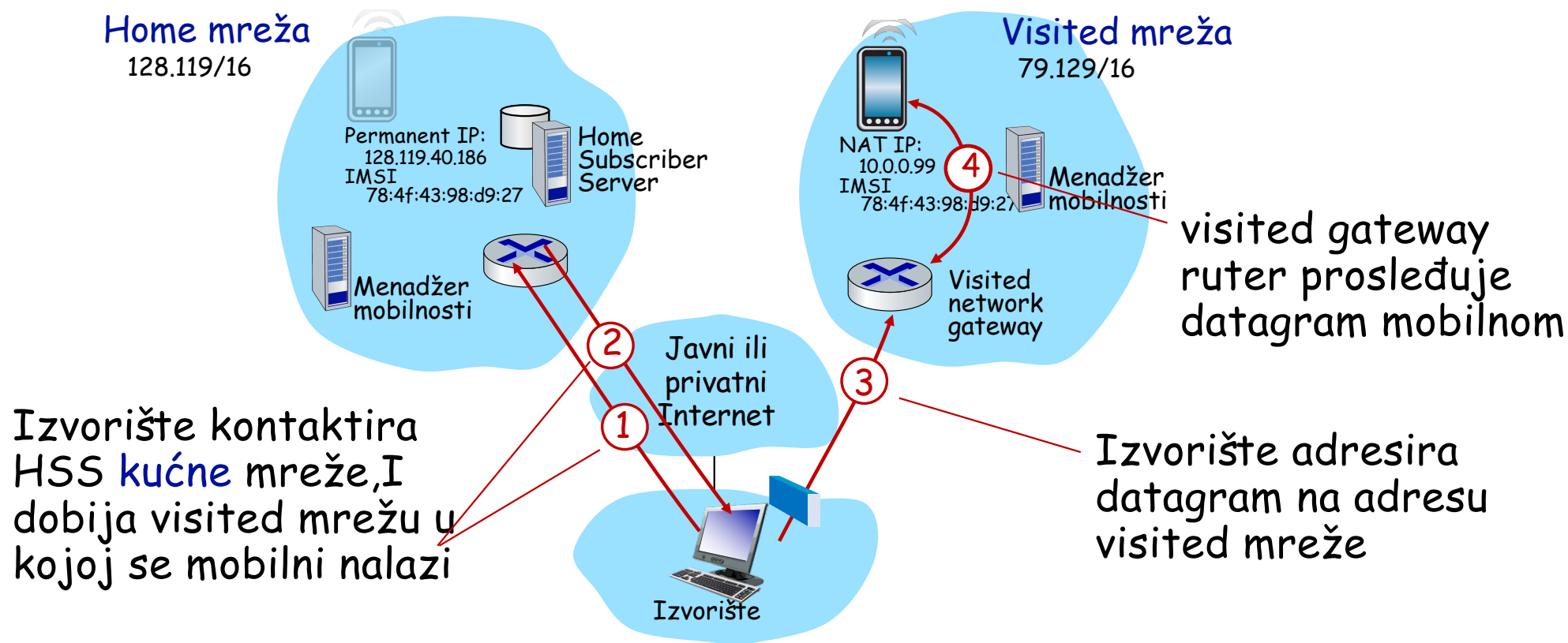
Rutiranje u trouglu:

- ❑ nije efikasno ako su izvorište i mobilni u istoj mreži



- ❑ mobilni se kreće kroz visited mreže: transparentno izvorištu!
  - ❑ Registruje se u visited mreži
  - ❑ Nova visited mreža kontaktira HSS home mreže
  - ❑ Datagrami se prosleđuju od home mreže prema mobilnom u novoj mreži
  - ❑ aktivne (npr. TCP) konekcije između izvorišta i mobilnog se mogu nadzirati!

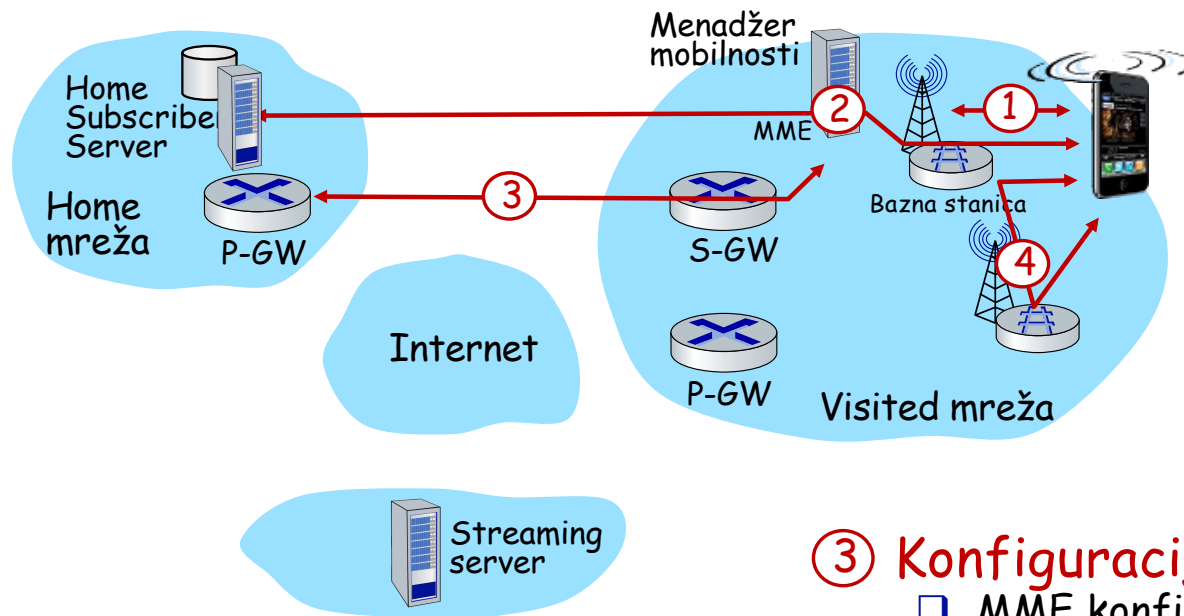
# Mobilnost sa direktnim rutiranjem



# Mobilnost sa direktnim rutiranjem

- ❑ Prevazilazi problem neefikasnosti rutiranja u trouglu
- ❑ **Netransparentna izvorištu:** izvorište mora dobiti adresu od home agenta
- ❑ Šta ako mobilni promijeni visited mrežu?
  - ❑ Može biti riješeno ali uz dodatnu kompleksnost

# Mobilnost u 4G mrežama



## ① Povezivanje na baznu stanicu:

- Ranije objašnjeno
- Mobilni se korišćenjem IMSI identifikuje i pruža info o home mreži

## ② Konfiguracija kontrolne ravni:

- MME, HSS home mreže uspostavljaju stanje kontrolne ravni - mobilni je u visited mreži

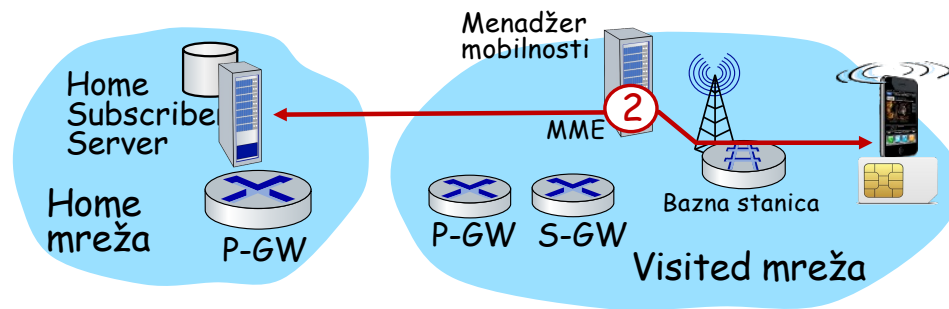
## ③ Konfiguracija ravni podataka:

- MME konfigurira tunele prosleđivanja za mobilni
- visited, home mreža uspostavljaju tunele od P-GW home mreže do mobilnog

## ④ Mobilni handover:

- Mobilni uređaj mijenja svoju tačku povezivanja u visited mreži

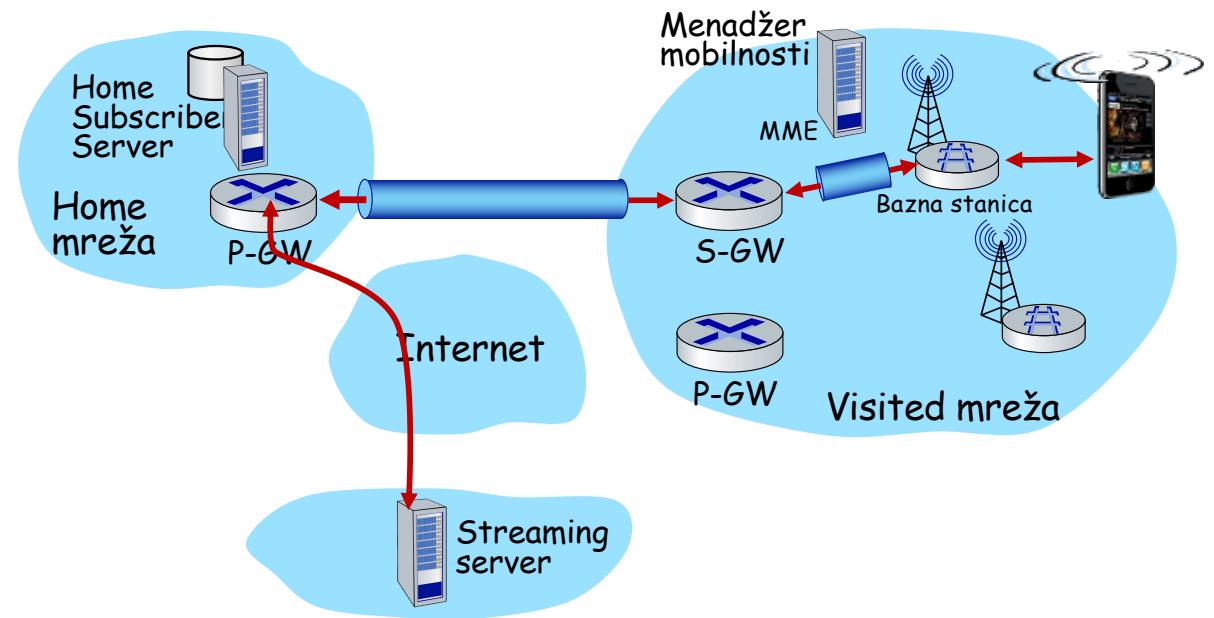
# Konfiguriranje elemenata LTE kontrolne ravni



- ❑ Mobilni komunicira sa lokalnim MME preko BS kanala kontrolne ravni
- ❑ MME koristi IMSI mobilnog da kontaktira HSS home mreže mobilnog
  - ❑ dobija autentifikaciju, enkripciju, informacije o mrežnom servisu
  - ❑ HSS home mreže saznaje u kojoj se mreži mobilni nalazi
- ❑ BS i mobilni biraju parametre za BS-mobilni radio kanal ravni podataka

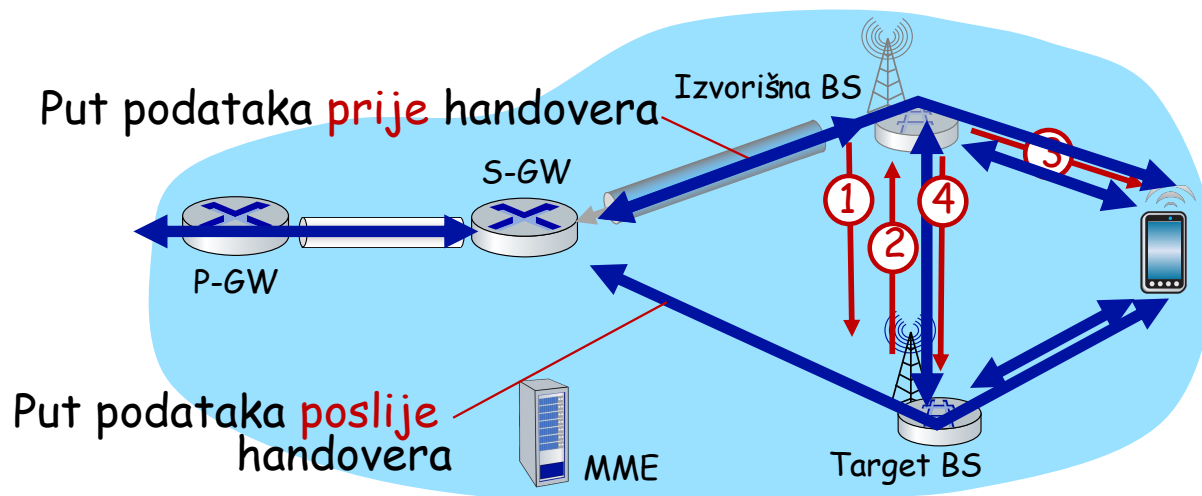
# Konfigurisanje tunela ravni podatka za mobilni

- **Tunel od S-GW do BS:**  
kada mobilni mijenja baznu stanicu smo treba promijeniti adresu krajnje tačke tunela
- **Tunel od S-GW do P-GW home mreže:**  
implementacija indirektnog rutiranja



- **Tunelovanje preko GTP (GPRS tunneling protocol):** datagram mobilnog za streaming server se korišćenjem GTP enkapsulira u UDP datagram

# Handover između BS-ova u istoj celularnoj mreži



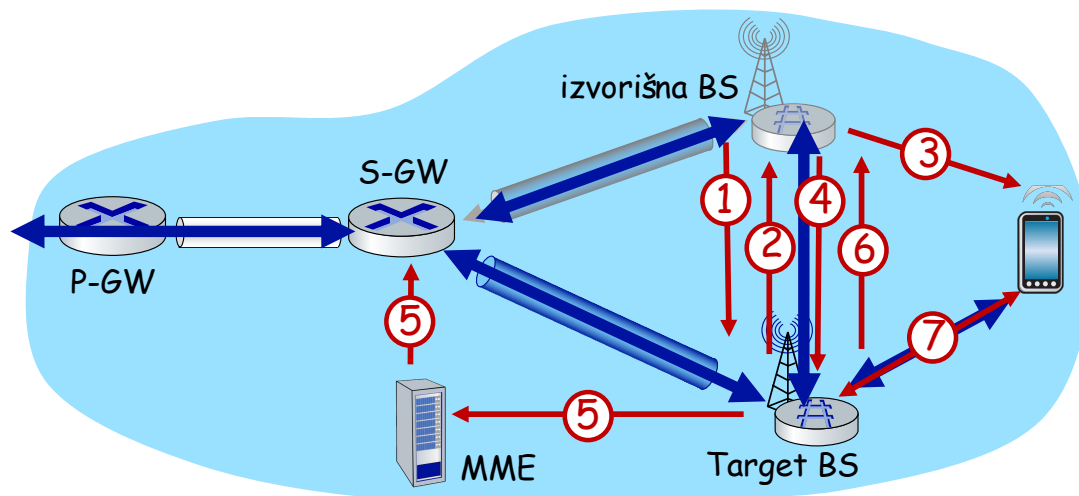
① Izvorišni BS bira target BS, šalje Handover Request poruku target BS-u

② Target BS realocira radio vremenske slotove, odgovara sa HR ACK sa info za mobilni

③ Izvorišna BS informiše mobilni o novom BS  
☐ Mobilni može slati preko novog BS - handover je završen za mobilni

④ izvorišni BS zaustavlja slanje datagrama do mobilnog, prosleđujući ih prema novoj BS (koja ih prosleđuje prema mobilnom preko radio kanala)

# Handover između BS-ova u istoj celularnoj mreži



- ⑤ target BS informiše MME da je nova BS za mobilni
- MME daje instrukciju S-GW da krajnju tačku tunela postavi na target BS

- ⑥ target BS potvrđuje izvorišnoj BS: handover završne, izvorišna BS oslobađa resurse
- ⑦ Datagrami mobilnog se prenose preko novog tunela od target BS do S-GW



# Mobile IP

- ❑ mobile IP arhitektura je standardizovana prije 20 godina [RFC 5944]
  - ❑ mnogo prije pametnih telefona, podrške 4G za Internet protokole
  - ❑ nije doživjela veliku primjenu
  - ❑ WiFi za Internet, i 2G/3G telefoni za govor su bili tada sasvim dovoljni
- ❑ mobile IP arhitektura:
  - ❑ indirektno rutiranje do čvora (preko home mreže) korišćenjem tunela
  - ❑ mobile IP home agent: kombinuje uloge 4G HSS i home P-GW
  - ❑ mobile IP foreign agent: kombinuje uloge 4G MME i S-GW
  - ❑ protokoli za pronalaženje agenta u visited mreži, registracija lokacije visited mreže u home mreži preko ICMP protokola

# Bežičnost, mobilnost: uticaj na više protokole

- ❑ uticaj treba da bude minimalan
  - ❑ best effort model servisa se ne mijenja
  - ❑ TCP i UDP funkcionišu preko bežičnih i mobilnih mreža
- ❑ ... ali iz ugla performansi:
  - ❑ gubici/kašnjenja paketa se povećavaju (gubitak paketa, kašnjenje zbog retransmisija na radio linkum gubici uslijed handovera)
  - ❑ TCP posmatra gubitke kao zagušenje, smanjujući brzinu slanja
  - ❑ kašnjenje negativno utiče na saobraćaj u realnom vremenu
  - ❑ kapacitet je ograničeni resurs za bežične linkove