

9. LTE (Long Term Evolution)

Prof.dr Igor Radusinović

igorr@ucg.ac.me

dr Slavica Tomović

slavicat@ucg.ac.me

1

LTE

- Celularne mreže
- Celularne tehnologije
- Karakteristike LTE tehnologije
- LTE Advanced (LTE-A)
- LTE Advanced Pro

2

LTE

Celularne mreže

- ❑ Ciljevi mobilne mreže su pružanje globalnog mobilnog pristupa i dobar kvalitet prenosa podataka, govora, audio i video sadržaja.
- ❑ Mobilna mreža je bazirana na nepouzdanom medijumu za prenos na kome je prisutno slabljenje signala, refleksija, difrakcija,...
- ❑ Nedostatak pouzdanosti dodatno pogoršava mobilnost korisnika.
- ❑ Korisnički terminali imaju vrlo ograničenu emisionu snagu.
- ❑ Korisnici zahtijevaju kvalitetan servis koji se mora održavati dok su u pokretu gdje god se nalazili.

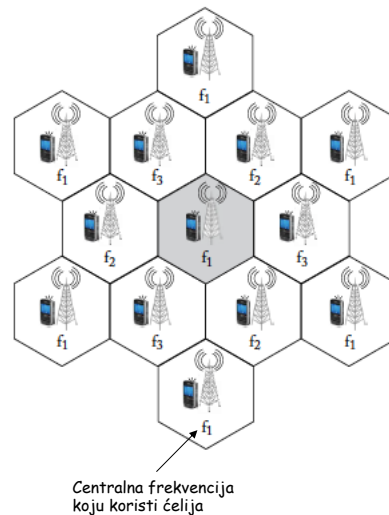
Telekomunikacione mreže 9-3

3

LTE

Celularne mreže

- ❑ Ključna osobina dizajna mobilne mreže je podjela geografskog područja na ćelije.
- ❑ Korisnici u ćelijama komuniciraju sa baznom stanicom (BS).
- ❑ Susjedne ćelije koriste različite frekvencije zbog ograničavanja smetnji.
- ❑ Smetnje se smanjuju prilagođavanjem emisione snage udaljenosti između korisničkih uređaja i BS.
- ❑ U novije vrijeme susjedne ćelije mogu koristiti istu frekvenciju korišćenjem novih tehnika smanjenja smetnji.
- ❑ Za ostvarivanje pouzdane usluge, za razliku od WiFi-a, mobilna mreža funkcioniše u licenciranim frekvencijskim opsezima.
- ❑ Prenos podataka između korisničkih uređaja i BS je strogo regulisan od strane BS-a kako bi se izbjegla kolizija i ispunili zahtjevi za performanse aktivnih konekcija.
- ❑ BS je povezana na jezgro mreže koju čine čvorovi čiji je zadatak rutiranje saobraćaja od i prema Internetu/drugim telekomunikacionim mrežama.
- ❑ Pored BS u ćelularnoj mreži postoje i druga čvorovišta zadužena za funkcije uspostavljanja i održavanje korisničkih veza.



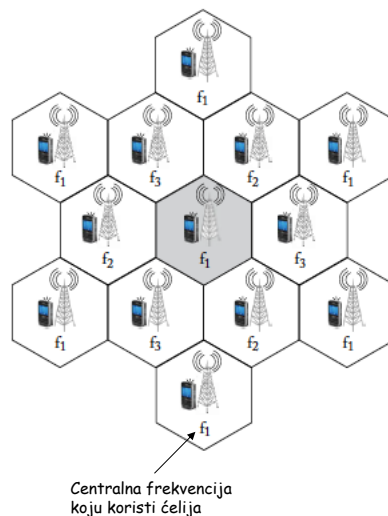
Telekomunikacione mreže 9-4

4

LTE

Celularne mreže

- Da bi se povezao na mrežu, korisnički uređaj osluškuj signale sa BS-a.
- Bira BS čiji je signal detektovao kao najjačiji.
- Svaka BS određuje periodične vremenske slotove tokom kojih novi korisnici mogu poslati svoje zahtjeve za povezivanje.
- Korisnički uređaj šalje odabranom BS zahtjev za povezivanje tokom jednog od ovih vremenskih slotova.
- Ako zahtjev ne zapadne u koliziju sa zahtjevima drugih korisnika i ako postoje raspoloživi resursi, BS utvrđuje odgovarajuće vremenske slotove i frekvencije za komunikaciju s korisničkim uređajem.



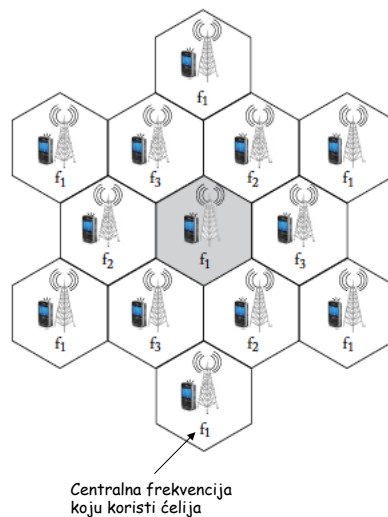
Telekomunikacione mreže 9-5

5

LTE

Celularne mreže

- Svaki korisnički uređaj je dodijeljen čvorištu koje igra ulogu "matičnog registra" i vodi evidenciju o njegovoj lokaciji.
- Korisnički uređaj periodično šalje signal koji prima BS na koju je povezan, a zatim BS šalje poruku "matičnom registru" da bi se ažurirala lokacija korisničkog terminala.
- Da bi kontaktirala korisnički terminal, mreža provjerava u "matičnom registru" njegovu lokaciju, odnosno BS na koju je povezan, a zatim informacije namijenjene korisniku usmjerava na tu BS.
- Kada se korisnik kreće iz jedne u drugu ćeliju, nova BS preuzima komunikaciju u procesu koji se naziva *handover*.
- Korisnički terminal periodično izvještava mrežu o jačini signala iz okolnih BS-a na osnovu čega mu mreža pomaže da odradi eventualni *handover* na novu BS.



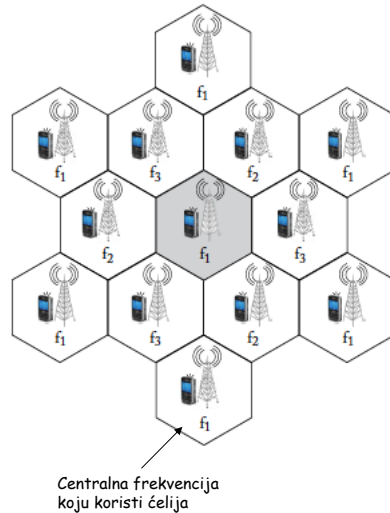
Telekomunikacione mreže 9-6

6

LTE

Celularne mreže

- ❑ BS prenosi podatke brzinom koja je određena odabranim modulacionim postupkom.
- ❑ Ovu brzinu dijele svi aktivni korisnici u ćeliji.
- ❑ Broj aktivnih korisnika u ćeliji je ograničen brzinom prenosa BS podijeljenom sa brzinom prenosa pojedinačnog korisnika.
- ❑ Zona pokrivanja ćelije bi trebala biti približno obrnuto proporcionalna gustini aktivnih korisnika.
- ❑ U praksi, pošto modulacija može zavistiti od kvaliteta korisničke veze, precizno dijeljenje je mnogo složenije!
- ❑ Ćelije su manje u gusto naseljenom gradskom području nego u rijetko naseljenom ruralnom području.
- ❑ Radijus ćelije se kreće obično od 1km do 20 km.
- ❑ Treba imati na umu da kada su ćelije manje, handoveri su češći.
- ❑ U celularnim mrežama korišćena emisiona snaga je relativno mala.
- ❑ LTE korisnički uređaj koristi maksimalnu emisiju snagu od oko 0.2W, dok je maksimalna emisiona snaga LTE BS koja radi na kanalu širine 10 MHz oko 40 W.
- ❑ Veće ćelije zahtijevaju relativno veću emisiju snagu ka i od korisničkih uređaja.



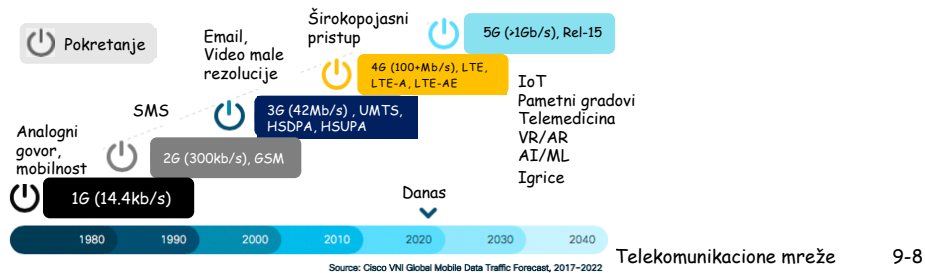
Telekomunikacione mreže 9-7

7

LTE

Celularne tehnologije

- ❑ LTE je specifična implementacija mobilne mreže.
- ❑ Standardizovao je 3GPP (3rd Generation Partnership Project).
- ❑ Ključni elementi evolucije mobilnih mreža su:
 - migracija sa komutacije kola na komutaciju paketa
 - podržavanje mobilnosti korisnika
 - prenos multicasta,
 - povećanje brzine prenosa,
 -



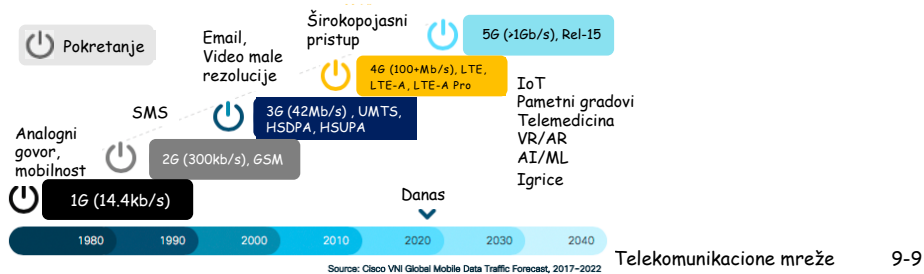
Telekomunikacione mreže 9-8

8

LTE

Celularne tehnologije

- Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) je specificiran Rel-99
- UMTS je namijenjan za mobilne podatke i mobilne govorne usluge.
- UMTS prenosi govor koristeći komutaciju kola, a podatke prenosi korišćenjem komutaciju paketa.
- High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) je definisan u Rel-5, povećava brzinu prenosa i smanjuje kašnjenja na downlinku
- High Speed Uplink Packet Access (HSUPA) je specificiran u Rel-6, poboljšava performanse uplinka, uvodi VoIP (Voice over Internet Protocol) pomoću svoje QoS (Quality of Service) podrške za servise u realnom vremenu i Multimedia Broadcast and Multicast Service (MBMS) za point-to-point komunikaciju.

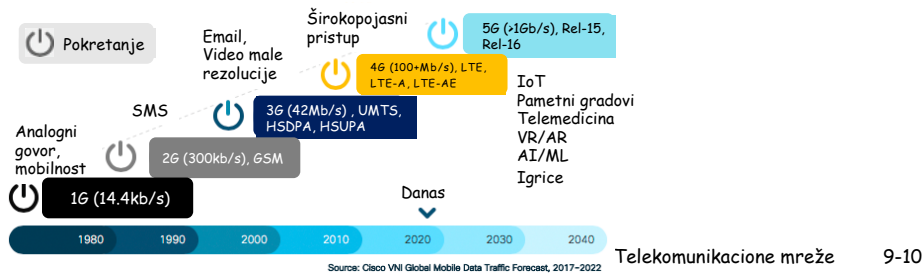


9

LTE

Celularne tehnologije

- LTE je uveden Rel-8 specifikacijom
- Njegova ključna osobina je da na fizičkom nivou koristi *Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access (OFDMA)*
- Brži i pouzdaniji LTE Advanced specificiran u Rel-10 (MIMO, 100MHz opseg,...), Rel-11(HetNet, CoMP, ...) i Rel 12(256-QAM za HetNet..)
- Rel-13 i Rel-14 sadrže specifikaciju LTE Advanced Pro (najbrži LTE, 3Gb/s, 256-QAM, Massive MIMO, LTE-Unlicensed i LTE IoT)
- Rel-15 specificira 5G tehnologiju
- Rel 16 je posvećen "5G faza 2" tehnologiji
- Rel 17 tek treba da definiše osnovne karakteristike "beyond 5G" mreže



10

LTE

Karakteristike LTE tehnologije

- ❑ Međunarodna unija za telekomunikacije (ITU) je 2008. definisala zahtjeve za radio pristupnu tehnologiju četvrte generacije (4G).
- ❑ Između ostalog mobilni i stacionarni korisnički uređaji trebaju da imaju maksimalne brzine prenosa od 100Mb/s odnosno 1Gb/s, respektivno.
- ❑ Osnovna verzija LTE obično se naziva a 3.9G ili pre-4G tehnologija jer ne zadovoljava sve pomenute zahtjeve.
- ❑ Razvoj LTE-a definiše skup zahtjeva koji specificiraju brzinu prenosa na downlinku od 100Mb/s (za kanal širine 20MHz) i kašnjenje u radio dijelu mreža manje od 5ms
- ❑ Bazne stanice čine *Radio Access Network* (RAN)
- ❑ Podržava brzu mobilnost i ima visoke performanse pristupne mreže
- ❑ Širina kanala kod LTE je od 1,4-20 MHz.
- ❑ LTE podržava dvije tehnike za *uplink/downlink* prenos i višestruki pristup
 - *Frequency Division Duplex* (FDD)
 - *Time Division Duplex* (TDD).
- ❑ Odluka o korišćenju FDD ili TDD zavisi od dostupnosti spektra telekomunikacionom operatoru.

Telekomunikacione mreže 9-11

11

LTE

Karakteristike LTE tehnologije

- ❑ LTE koristi "*openloop*" i "*closedloop*" algoritme kontrole snage na uplinku radi smanjenja inter-ćelijske interferencije i produženja vijeka trajanja baterije na korisničkim uređajima.
 - Kod "*openloop*" kontrole snage, korisnički uređaj procjenjuje slabljenje downlink pilot signala poznate snage i podešava svoju emisionu snagu pretpostavljajući sličan gubitak uslijed propagacije po uplinku.
 - Kod "*closedloop*" kontrole snage, BS izričito upućuje korisnički uređaj da li da poveća ili smanji emisionu snagu na osnovu jačine primljenog signala.
- ❑ Standardi ne specificiraju korišćenje bilo kojeg algoritma kontrole snage i ova odluka je ostavljena operatoru.
- ❑ Kako bi maksimalno povećao ukupnu brzinu pouzdanog prenosu podataka koju nudi, LTE koristi sljedeće tehnike:
 - *Adaptive Modulation and Coding* (AMC),
 - *Hybrid-Automatic Repeat request* (H-ARQ)
 - MIMO.

Telekomunikacione mreže 9-12

12

LTE

Karakteristike LTE tehnologije

AMC

- ❑ dinamički prilagođava modulaciju i kodiranje koje uređaj koristi na uplinku i downlinku na bazi stanja kanala koje je dobijeno povratnom informacijom.
- ❑ Kako su veće greške moguće za modulacije koje nude veće brzine prenosa AMC koriste takve modulacije samo pri dobrim uslovima u kanalu.

LTE

Karakteristike LTE tehnologije

- ❑ Nivo linka je podijeljen na dva podnivoa:
 - *Radio Link Control (RLC)* podnivo
 - *Medium Access Control (MAC)* podnivo
- ❑ U RLC podnivou, LTE ima ARQ mehanizam baziran na detekciji greške, potvrđama, timerima i retransmisijama.
- ❑ Pored toga, za brži prenos ispravnih podataka LTE koristi i H-ARQ na MAC podnivou.
- ❑ H-ARQ je kombinacija ARQ-a, Forward Error Corection (FEC) i Soft Combining-a.
- ❑ Pomoću H-ARQ LTE omogućava brzu indikacija pozitivne ili negativne potvrde poslatih podataka.
- ❑ Kad je potrebna jedna ili više retransmisija, H-ARQ baferuje sve prethodno primljene verzije paketa, kombinuje ih s najnovijom verzijom, a zatim pokušava ispravno dekodirati prenesene podatke (*Soft Combining*) pomoću *Incremental Redundancy (IR)* tehnike.

LTE

Karakteristike LTE tehnologije

- ❑ IR želi prenijeti više FEC redundantnih podataka samo ako se zahtijevaju dodatne retransmisije.
- ❑ Budući da FEC predstavlja kontrolne bite i smanjuje efikasnost prenosa, IR pokušava smanjiti prenos FEC bita tako što se oni prenose samo po potrebi.
- ❑ IR unaprijed priprema mali broj Redundancy Versions (RV) za svaki blok podataka i nakon slanja prvog RV, sljedeći RV se šalje samo ako prijemnik naznači da ne može dekodirati podatke iz prethodnih RV-a.
- ❑ Takav postupak prenos FEC-a je moguć upotrebom turbo kodova.
- ❑ Na primjer, prva RV može sadržati podatke, polje za detekciju grške i mali podskup kompletnog FEC polja, dok sljedeći RV može sadržati dodatne nove podskupove kompletnog FEC polja.
- ❑ U adaptivnoj verziji H-ARQ, zavisno od stanja kanala, pošiljalac može prilagoditi svakom pokušaju neku karakteristiku prenosa poput podnosilaca koji se koriste za prenos, poslati RV, modulaciju i kodiranje.
- ❑ Ako H-ARQ ne može pravilno dekodirati prenesene podatke u ograničenom broju retransmisija, onda obični ARQ preuzima odgovornost za pouzdani prenos podataka.

Telekomunikacione mreže 9-15

15

LTE

Karakteristike LTE tehnologije

- ❑ Kao što je slučaj s novijim verzijama WiFi (npr. IEEE 802.11n), LTE podržava MIMO
- ❑ Kod MIMO algoritam na predajniku određuje koje podatke svaka od njegovih antena šalje.
- ❑ Na primjer, sve antene mogu prenijeti kopiju istih podataka radi redundantnosti u cilju poboljšanja pouzdanosti. To se naziva *transmit diversity* i koristi se kad su uslovi na kanalu loši.
- ❑ Druga je mogućnost da svaka antena šalje različite podatke radi postizanja veće brzine prenosa podataka. To je *prostorno multipleksiranje* i koristi se kada su uslovi kanala povoljni.
- ❑ Na prijemniku se koriste drugi algoritam za kombinovanje signala sa različitih prijemnih antena.

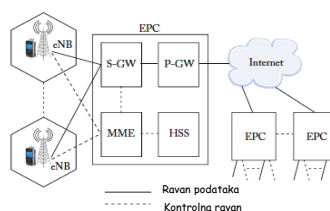
Telekomunikacione mreže 9-16

16

LTE

Karakteristike LTE tehnologije

- ❑ BS LTE mreže je Evolved Node B (eNB),
- ❑ eNB se povezuju na žično IP jezgro *Evolved Packet Core* (EPC)
- ❑ Kontrolna ravan prenosi kontrolne podatke
- ❑ Ravan podataka prenosi korisničke podatke
- ❑ Ravan podataka je povezana na Internet i druge telekomunikacione mreže
- ❑ EPC sadrži sledeća čvorišta
 - *Mobile Management Entity* (MME),
 - *Home Subscriber Server* (HSS),
 - *Serving Gateway* (S-GW),
 - *Packet Data Network Gateway* (P-GW)
 - ...



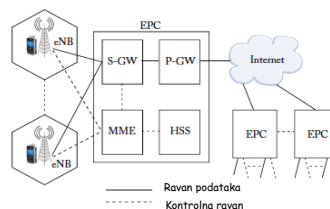
Telekomunikacione mreže 9-17

17

LTE

Karakteristike LTE tehnologije

- ❑ S-GW preko P-GW prenosi uplink i downlink saobraćaj ka i od javnog ili privatnog Interneta.
- ❑ S-GW obezbeđuje i razmjenu podataka između eNB-ova istog operatora.
- ❑ MME je posvećen funkcijama kontrolne ravni (provjera identiteta korisnika prilikom uspostavljanja veze, izbor S-GW, pruža pomoć pri primopredaji, praćenje i pozivanje korisničkih uređaja u mirovanju i obavlja sigurnosnu kontrolu).
- ❑ MME od HSS-a dobija informacije o pretplatničkom statusu korisnika
- ❑ Kada je korisnik van svoje mreže, mreža kojoj pristupa kontaktira njegov matični HSS radi provjere autentičnosti i dobijanja odgovarajućih informacija o korisniku.
- ❑ HSS igra ulogu "matičnog registra".



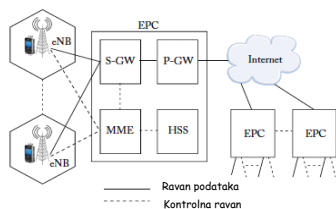
Telekomunikacione mreže 9-18

18

LTE

Karakteristike LTE tehnologije

- Handover unutar jedne LTE mreže se obavlja gotovo autonomno između eNB-ova uz minimalno uključivanje MME i S-GW.
- Na bazi izvještaja korisničkog uređaja o kvalitetu kanala sa okolnih eNB-ova, eNB na koji je korisnički uređaj povezan donosi odluku i bira eNB na koji će se nakon handovera korisnički uređaj povezati ukoliko je to potrebno
- Nakon toga, eNB na koji je povezan korisnički uređaj rezerviše radio resurse na novom eNB, koordinira handover sa njim i korisničkim uređajem, kao i proslijeđuje korisničke downlink podatke na novi eNB dok se ne uspostavi novi put od S-GW do novog eNB-a.
- Nakon uspostavljanja komunikacije sa korisničkim uređajem novi eNB obavještava MME o handover-u kako bi počeo sa prijemom korisnikovih downlink podataka direktno od S-GW.
- LTE obavlja i druge složenije oblike handovera:
 - između dvije LTE mreže,
 - između LTE mreže i mreže sa nekom drugom tehnologijom radio pristupa (na primjer LTE-3G handover).



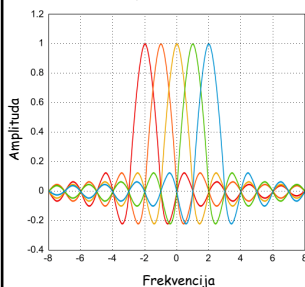
Telekomunikacione mreže 9-19

19

LTE

Karakteristike LTE tehnologije

- koristi *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) modulaciju.
- OFDM ima visoku efikasnost iskorišćenja spektra.
- OFDM može prenositi podatke velikom brzinom za određenu širinu spektra tako što različite podatke prenosi paralelno na velikom broju usko postavljenih različitih podnosioca
- Interferencija se izbjegava tako što je maksimalna snaga na frekvenciji na kojoj su ostali podnosioci najmanji
- Ovo se postiže ako je rastojanje između maksimuma jednako recipročnoj vrijednosti trajanja simbola
- Robustnost na *multipath* smetnje (prijemnik dobije superpoziciju više verzija signala koje se prenose različitim putanjama) i intersimbolsku interferenciju dobija se korišćenjem *cyclic prefix*-a koji se dodaje na kraju simbola



Telekomunikacione mreže 9-20

20

LTE

Karakteristike LTE tehnologije

- ❑ LTE koristi OFDMA kao tehniku višestrukog pristupa za downlinku, a Single Carrier FDMA (SC-FDMA) na uplinku.
- ❑ Budući da OFDMA moduliše svakog podnosioca pojedinačnim simbolom podataka, zavisno o simbolima koji se prenose emisiona snaga može imati velike varijacije. Visoke vrijednosti Peak-to-Average Power Ratio (PAPR) imaju za posledicu nižu efikasnost pojačavača snage što je nepoželjno za korisničke uređaje koji imaju ograničenu snagu.
- ❑ SC-FDMA rješava ovaj problem umetanjem faze prethodne obrade koja izvodi *Discrete Fourier Transformation* (DFT) prije modulacije podnosioca.
- ❑ DFT proizvodi linearne kombinacije simbola ulaznih podataka i na taj način smanjuje varijacije njihovih amplituda.
- ❑ Izlaz iz DFT-a se koristi za modulisanje podnosilaca.
- ❑ Prisutnost DFT-a na predajniku zahtijeva *Inverse DFT* (IDFT) na prijemniku
- ❑ Pošto DFT-a na predajniku širi informacije za dati simbol podataka preko više podnosilaca, *channel equalization* je potrebna na prijemniku radi oporavka od bilo kojeg frekvencijskog selektivnog fadinga.
- ❑ LTE to obavlja digitalno na prijemniku množenjem primljenog signala na svakom podnosiocu sa odgovarajućim kompleksnim brojem prije (ili zajedno sa) IDFT obradom.
- ❑ Uprkos prednostima nižeg PAPR-a, SC-FDMA se ne smatra prikladnim za downlink jer bi korisničke uređaje učinio složenijim zahtijevajući implementaciju *channel equalization*.
- ❑ Naziv SC-FDMA koristi se za isticanje činjenice da, zbog prisustva DFT-a, ova tehnika dijeli neke od ključnih karakteristika modulacionih šema sa jednim nosiocem.
- ❑ U literaturi se SC-FDMA naziva i DFT-Spread FDMA.

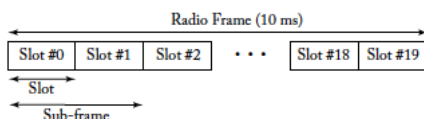
Telekomunikacione mreže 9-21

21

LTE

Karakteristike LTE tehnologije

- ❑ Struktura okvira (frame) je ista za downlink i uplink
- ❑ Jedan radio okvir trajanja 10 ms podijeljen je na 10 podokvira trajanja po 1 ms.
- ❑ ENB raspoređuje (schedule) downlink i uplink saobraćaj po podokvirima (sub-frame).
- ❑ Zbog toga se podokvir naziva Transmission Time Interval (TTI).
- ❑ Podokvir je dalje podijeljen na dva slota trajanja 0,5 ms.
- ❑ Svaki slot sadrži 7 modulisanih simbola.
- ❑ Slotovi na 12 uzastopnih podnosilaca čine najmanju jedinicu raspodjele korisniku koja se zove blok resursa.



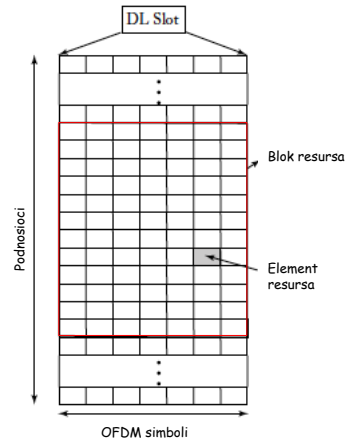
Telekomunikacione mreže 9-22

22

LTE

Karakteristike LTE tehnologije

- ❑ blok resursa downlink veze se može prikazati dvodimenzionalnom mrežom gdje su trajanja simbola prikazana u vodoravno, dok su podnosioci prikazani vertikalno.
- ❑ Blok resursa se sastoji od po 7 simbola (ili jednog slota) na 12 podnosilaca.
- ❑ Blok resursa uplinka se definiše na sličan način
- ❑ Pored Blokova resursa koji se dodjeljuju korisniku, LTE definiše i određeni broj kontrolnih kanala za različite funkcije koje se odnose na upravljanje vezama i administraciju sistema.



Telekomunikacione mreže 9-23

23

LTE

Karakteristike LTE tehnologije

- ❑ Saobraćaj različitih aplikacija može imati vrlo različite zahtjeve za performansama.
- ❑ Već je rečeno da govorne i *streaming* video komunikacije ne podnose veliko kašnjenje, ali tolerišu određeni gubitak paketa, što je potpuno suprotno od zahtjeva koje postavlja prenos podataka.
- ❑ Veoma je važno da celularna mreža pruži razumne garancije performansi
- ❑ Kada se korisnik poveže na LTE mrežu, automatski se uspostavlja *default bearer* za prenos podataka njegovih različitih tokova LTE mrežom u skladu sa njegovim korisničkim ugovorom
- ❑ Za podatke koji zahtijevaju poseban tretman uspostavljaju se *dedicated bearer-i*
- ❑ Svaki bearer je identifikovan kao *Guaranteed Bit Rate (GBR)* ili *non-GBR bearer*

Telekomunikacione mreže 9-24

24

LTE

Karakteristike LTE tehnologije

- ❑ Saobraćajni tok se mapira na jedan bearer na bazi pet podataka (izvorišna/odredišna IP adresa, izvorišni/odredišni broj porta i transportni protokol).
- ❑ LTE pruža QoS podršku baziranu na klasama dodjeljivanjem Quality Class Identifier (QCI) svakom bearer-u.
- ❑ QCI određuje tretman paketa na svakom čvorištu (težinski faktori, treshold-i upravljanja redom čekanja,...).
- ❑ LTE pokušava pružiti doslijedan QoS tretman preko bežičnog linka, ali i preko ostalih dijelova LTE mreže.
- ❑ Standardizovane QoS karakteristike (npr. da li je bearer GBR ili ne-GBR, prihvatljivi nivoi kašnjenja i vjerovatnoće gubitka paketa, itd.) pridružene su svakom QCI.
- ❑ Dok QCI određuje tretman u korisničkoj ravni, *Allocation and Retention Priority* (ARP) definiše tretman u kontrolnoj ravni radi prihvatanja ili zadržavanja bearer-a u situacijama poput gubitka veze koji mogu zahtijevati odbacivanje nekih uspostavljenih bearer-a.

Telekomunikacione mreže 9-25

25

LTE

Karakteristike LTE tehnologije

- ❑ Scheduler na eNB određuje korisničke uređaje koji mogu primati i slati podatke, i pruža mogućnosti diferencijacije među različitim operatorima i proizvođačima opreme.
- ❑ Postoje posebni scheduleri za uplink i downlink
- ❑ Uplink scheduler oglašava dodjele za uplink saobraćaj na temelju njihovih zahtjeva za performansama i zahtjeva na čekanju
- ❑ Downlink scheduler raspoređuje downlink saobraćaj na bazi zahtijevanih performansi i podataka raspoloživih za slanje sa eNB.
- ❑ Ovi scheduleri su obično veoma složeni jer pokušavaju postići optimalno korišćenje resursa mreže uz istovremeno zadovoljavanje mnogih ograničenja (npr. zahtjev za raspoređivanje saobraćaja na susjednim učestanostima ili slotovima, zahtjevi pravovremenosti mnogih administrativnih i kontrolnih saobraćajnih tokova, rokove za dodjele retransmitovanom saobraćaju,...)

Telekomunikacione mreže 9-26

26

LTE

Karakteristike LTE tehnologije

- Za različite klase servisa, scheduleri obično koriste neku varijantu Weighted Fair Queueing (WFQ) algoritma.
- Za raspoređivanje unutar određene klase koristi se *Proportionally Fair Scheduler* (PFS).
- PFS se često koristi kao referentni scheduler za poređenje sa drugim schedulerima.
- Neka n uređaja koje poslužuje jedna eNB preuzimaju velike količine podataka i podaci za svaki uređaj su uvijek dostupni na eNB-u za downlink scheduling.
- PFS algoritam je specijalni slučaj algoritma koji uređaju dodjeljuje nivo prioriteta proporcionalan odnosu

$$\frac{T_i^a(t)}{R_i^b(t)}$$

- T_i predstavlja trenutnu propusnost koju uređaj i može postići s obzirom na njegovo trenutno radio okruženje
- R_i predstavlja trenutnu estimaciju srednje propusnosti mreže koju dobija uređaj i
- a i b su parametri scheduler-a.

Telekomunikacione mreže 9-27

27

LTE

Karakteristike LTE tehnologije

- Srednja propusnost za svaki uređaj estimira se korišćenjem *exponential smoothing* algoritma na bazi prethodne estimacije i nedavno ostvarene trenutne propusnosti.
- Uređaj sa najvišim prioriteto pri svakom scheduling ciklusu dobija prvi priliku da šalje.
- Ako je $a=0$ i $b=1$, scheduler pokušava izjednačiti srednju propusnost svih uređaja bez obzira na trenutno stanje njihovog radio kanala i može se smatrati verzijom Round Robin algoritma. Ako uređaj ima najveći $\frac{1}{R_i(t)}$ onda se on prvi poslužuje što dovodi do povećanja $R_i(t)$, odnosno smanjenja njegovih prioriteta
- Ako je $a=1$ i $b=0$, scheduler pokušava maksimizovati trenutnu propusnost mreže bez uzimanja u obzir bilo kakve fer raspodjele resursa u pogledu prosječne propusnosti uređaja.

Telekomunikacione mreže 9-28

28

LTE

Karakteristike LTE tehnologije

- Sa $a=1$ i $b=1$, što je primijenjeno kod PFS-a, scheduler pokušava uspostaviti ravnotežu između ova dva ekstremna zahtjeva.
- Algoritam zasnovan na prioritizaciji prema vrijednosti $\frac{T_i(t)}{R_i(t)}$ svakog uređaja predstavlja rješenje maksimizacije sume logaritamskih iskorišćenja uređaja.
- Iskorišćenje uređaja se definiše kao $\log(\bar{R}_i)$ gdje je \bar{R}_i srednja propusnost mreže u ravnoteži za uređaj i
- Može se pokazati da se optimalna raspodjela resursa mreže dobija kada za svaki uređaj odnos $\frac{T_i(t)}{R_i(t)}$ konvergira istoj vrijednosti.

LTE

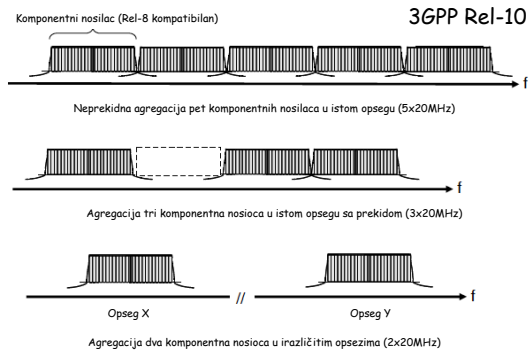
LTE Advanced

- Kao što je već rečeno LTE Advanced, kao unaprijeđena verzija LTE, je počeo postepeno da se uvodi počev od 3GPP-a Release 10 pa sve do Release-12.
- Između ostalog korisniku se nudi brzina od 1Gb/s
- LTE-Advanced je odobren kao 4G tehnologija od strane ITU-a 2012. godine.
- Ključna unapređenja koja donosi LTE Advanced su:
 - Agregacija nosilaca
 - Unaprijeđeni MIMO
 - *Relay Node*
 - *Coordinated Multi Point Operation (COMP)*

LTE

LTE Advanced

- Agregacija nosilaca omogućava operatru da ponudi širi kanal svojim klijentima, ako ima licencu za više od jednog kanala na određenoj lokaciji.
- Svaki nosilac koji se koristi za agregaciju se naziva komponentnim nosiocem, a može imati širinu kanala od 1,4, 3, 5, 10 ili 20 MHz.
- Do pet komponentnih nosilaca se može kombinovati tako da se ponudi širi kanal do 100 MHz, pri čemu se agregacija nosilaca obavlja nezavisno za uplink i downlink.
- Komponentni nosioci ne moraju biti na bliskim učestanostima, čak mogu biti u različitim opsezima.
- Budući da komponentni nosioci mogu imati različito pokrivanje zbog različitih propagacionih karakteristika, obično komponentni nosilac sa većim pokrivanjem se označava je kao primarni nosilac a dodatni nosioci kao sekundarni komponentni nosioci ili se ne koriste na određenoj lokaciji.
- Primarni komponentni nosilac je odgovoran za održavanje radio veže sa korisničkim uređajem.



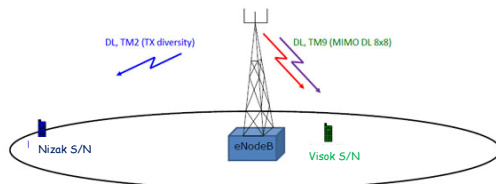
Telekomunikacione mreže 9-31

31

LTE

LTE Advanced

- LTE nudi podršku za 2x2 MIMO (po dvije predajne i dvije prijemne antene) za uplink i downlink pravci uzlazne i silazne veze u LTE.
- LTE-Advanced podržava do 8x8 MIMO za downlink komunikacija downlink veze i do 4x4 MIMO za uplink.
- Zbog promjena na radio kanalu, eNB kontroliše ključne komunikacione parametre, poput:
 - broja upotrijebljenih antena za prijem i slanje,
 - MIMO (*transmit diversity* ili prostorno multipleksiranje)
 - Broj nezavisnih tokova podataka koji koristi prostorno multipleksiranje
 - Šema pre-procesiranje podataka
- Različite kombinacije ovih parametara su standardizovane definisanjem različitih *Transmission modes* (TM).
- LTE-Advanced je dodao nove TM-ove u skupu TM-ova koji podržava LTE.



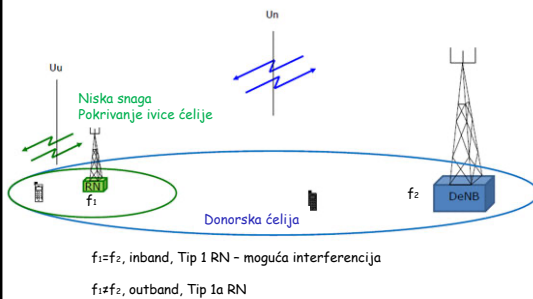
Telekomunikacione mreže 9-32

32

LTE

LTE Advanced

- Relay Node je eNB male snage koji je povezan s običnim eNB preko radio interfejsa.
- Obični eNB u ovom slučaju naziva se Donor eNB (DeNB).
- Dok je DeNB obično povezan na EPC pomoću optičkog vlakna, RN koristi samo radio interfejs i na korisničkoj i na mrežnoj strani.
- RN-ovi pomažu u proširenju pokrivenosti LTE mreže kao i poboljšanju performansi blizu ivica ćelije.
- Radio resursi DeNB-a se dijele korisnicima koji su direktno povezani na njega ali i na korisnike pridruženih RN-ova.
- Frekvencijski spektar koji koristi RN i njegov DeNB može biti isti ili različiti.
- U prvom slučaju RN se naziva inband RN.
- U inband scenariju, planeri mreže moraju uzeti u obzir mogućnost većeg nivoa interferencije prilikom određivanja optimalnog smještaja RN-a, a takođe razmotriti opciju vremenskog multipleksiranja frekvencijskih resursa DeNB i pripadajućih RN-ova.



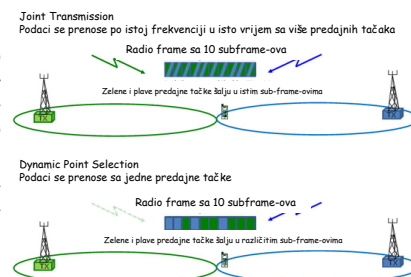
Telekomunikacione mreže 9-33

33

LTE

LTE Advanced

- CoMP je uveden u Rel-11
- Namijenjen je poboljšanju performansi na ivicama ćelija.
- Korisnički uređaj može biti istovremeno povezan sa više od jednim parom predajnih/prijemnih tačaka, pri čemu je svaki par predajnih/prijemnih tačaka zajednički smješten na predajnim/prijemnim antenama eNB-a za downlink i uplink.
- Različiti parovi predajnih/prijemnih tačaka koje koristi CoMP za datu vezu mogu biti na različitim eNB-ovima.
- Za downlink CoMP mogu se podaci prenositi bilo na svim ili samo na jednoj od predajnih tačaka prenosa.
- U prvom slučaju se mogu koristiti
 - Joint Transmission (korisnički uređaj istovremeno prima podatke sa svih uključenih predajnih tačaka u svakom sub-frame)
 - Dynamic Point Selection (korisnički uređaj prima podatke samo od jedne uključene predajne tačke u određenom sub-frame izabrane na bazi stanja radio kanala)



Telekomunikacione mreže 9-34

34

LTE

LTE Advanced

- Ako su podaci koji se prenose dostupni na samo jednoj od tačaka koje su uključene, koordinirano raspoređivanje se koristi za određivanje tačke slanja koja će se koristiti za određeni segment podataka.
- Da li su downlink podaci dostupni samo jednom ili na svim uključenim tačkama prenosa ima značajan uticaj na obim EPC saobraćaja.
- Za uplink CoMP signal korisničkog uređaja se prima na više prijemnih tačaka i zatim kombinuje za obradu.
- Korisnički uređaj ne mora biti svjestan prisustva uplink CoMP.
- Joint Reception je moguć za uplink CoMP, gdje se kopije signala korisničkog uređaja primljene na svim uključenim prijemnim tačkama preko svakog podokvira koriste za zajedničku obradu.
- Jasno, da bi uplink i downlink CoMP radili ispravno, koordinacija između predajnih/prijemnih tačaka je potrebna za odgovarajuće raspoređivanje i/ili obradu.

Telekomunikacione mreže 9-35

35

LTE

LTE Advanced Pro

- Unaprijeđena verzija LTE Advanced, uvedena dokumentima Release 13 i Release 14 (3GPP).
- Korisniku se nudi brzina od 3Gb/s
- Kašnjenje u radio dijelu mreže je manje od 2ms što je važno za „*mission critical*” primjene
- Kompatibilan je sa LTE i LTE-Advanced korisničkim uređajima
- LTE Advanced Pro je odobren kao 4.9G tehnologija od strane ITU-a 2015. godine i biće integrisan u 5G mrežu
- Ključna unapređenja koja donosi LTE Advanced Pro su:
 - Korišćenje nelicenciranog opsega
 - Poboljšanje agregacije nosilaca
 - Poboljšanja za MTC (*Machine Type Communications*)
 - Poboljšanja za D2D
 - Elevacioni beamforming i višedimenzioni MIMO
 - Poboljšanje multi-user komunikacije
 - Indoor pozicioniranje
 - Jednoćelijski point-to-multipoint

Telekomunikacione mreže 9-36

36