

## Paralelni razvoj *HSPA* i *LTE* – fizički sloj

Dejan Drajić<sup>1</sup>, Igor Tomić<sup>2</sup>

**Sadržaj** – U ovome radu se ukratko prikazuju i komentarišu paralelni razvoj *HSPA* i *LTE* u okviru 3GPP obrađujući posebnu pažnju na fizički sloj.

**Ključne reči** – *HSPA*, *LTE*, fizički sloj

### I. UVOD

Mobilni sistemi treće generacije (3G), uz izvesno kašnjenje, pojavili su se na tržištu pre nekoliko godina i danas se koriste širom sveta [1,2]. Razvijen je i odgovarajući hardver za obradu signala u osnovnom opsegu [3]. U okviru UTRA (Universal Terrestrial Radio Access) sistema, jednog od dva standarda za 3G, koristi se širokopolasni pristup na bazi kodnog multipleksa (WCDMA – Wideband Code Division Multiplex Access) [4].

Kao logična posledica uspeha 3G sistema istraživanje “narednih” B3G (Beyond 3G) [1] sistema je postalo intenzivno. *HSPA* (High-Speed Packet Access) čiji je cilj da postigne znatno veće brzine pri prenosu podataka bio je takođe uključen u 3GPP (3G Partnership Project) [2,5]. *HSDPA* (D – Downlink) se odnosi na prenos u direktnom kanalu (ka mobilnom korisniku) a *HSUPA* (U – Uplink) na prenos u povratnom kanalu (ka baznoj stanici). U toku je rad na specifikacijama *HSPA-E* (*HSPA* Evolution). Poslednjih godina 3GPP je takođe počeo da radi na *LTE* (Long Term Evolution) mobilnih sistema sa ciljem da se dalje poveća spektralna efikasnost i smanji kašnjenje pri prenosu. Tokom 2010. pojavile su se i prve komercijalne *LTE* mreže, ali se masivnija izgradnja *LTE* mreža očekuje tokom 2011. i 2012. Dok je *HSPA* kompatibilan sa postojećim sistemima, dotle se takvi zahtevi ne postavljaju pred *LTE* i oba sistema se razvijaju paralelno. Prva razmušljanja o *LTE* su počela od 2004. da bi se, posle dužih proučavanja, specifikacije počele da pojavljuju od 2008. godine, paralelno sa *HSPA-E*.

U ovome radu će ukratko biti prikazan paralelni razvoj *HSPA* i *LTE* sistema [6], imajući posebno u vidu fizički sloj veze. Takođe, pažnja će posebno biti posvećena direktnom kanalu, imajući u vidu posebne (veće) zahteve u pogledu brzine rada.

### II. RAZVOJ MOBILNIH SISTEMA – PUT DO *LTE*

Izuzetan uspeh sistema druge generacije (2G) mobilne telefonije, u okviru kojih se još uvek korisniku nude nove usluge, ali gde se ipak polako dolazi u zasićenje, pokrenuo je pravu lavinu istraživanja na uvođenju sistema treće generacije (3G) mobilne telefonije. Postojeći sistemi druge generacije, kao što je, na primer, *GSM*, imaju rezervisan kanal za sve vreme trajanja veze, bez obzira na potreban protok, dok je očigledno ekonomičnije dodeljivati resurse prema potrebnim vrednostima protoka. Iako sistemi 2G

koriste digitalni prenos, oni su prvenstveno bili optimizovani za prenos govora. Ipak, i od samog početka, pri projektovanju vodilo se računa i o mogućnosti prenosa podataka. Međutim, početni protoci nisu bili veliki (do 9,6 kb/s). Potreba za većim protocima pojavila se sa brzim razvojem Interneta. Kao odgovor na takve zahteve pojavili su se najpre *HSCSD* (High Speed Circuit Switched Data) sa protokom od 38,4 kb/s i kasnije 57,8 kb/s, uz korišćenje postojeće *GSM* infrastrukture, tj. do četiri vremenska slota po jednom korisniku i minimalno podešavanje (modifikacija softvera) i *GPRS* (General Packet Radio Service) sa protokom do 160 kb/s, gde se takođe koristi postojeća *GSM* infrastruktura uz dodavanje mrežnih čvorova za komutaciju paketa i kombinovanje do 8 fizičkih kanala po korisniku. Na kraju, pojavio se i *EDGE* (Enhanced Data Rates for *GSM* Evolution) sa protokom do 384 kb/s, koji koristi iste razmake nosilaca kao i *GSM*, tako da postojeći ćelijski plan može ostati nepromenjen. Pri tome se uvodi spektralno efikasniji postupak modulacije (8PSK umesto *GMSK*) i kombinuju se svih 8 fizičkih kanala jednog nosioca (48 kb/s po jednom kanalu). Ipak, može se smatrati da je već *GPRS* korak ka 3G, dok *EDGE* obezbeđuje neke 3G servise u okviru *GSM* opsega. U trećoj generaciji postoje različiti tipovi servisa, kao što su prenos govora, prenos slike i prenos podataka. Ovo sa svoje strane ima za posledicu da različiti korisnici imaju različite zahteve vezane za performanse i to za *BER* – količnik grešaka po bitu i *FER* – količnik grešaka po ramu, kao i kašnjenje, tj. kvalitet usluge, a takođe i potrebu za različitim brzinama prenosa. To podrazumeva značajan stepen fleksibilnosti, u zavisnosti od zahtevanog servisa i odgovarajućeg kvaliteta, kao i mogućnost postizanja velikih protoka (globalno 384 kb/s, lokalno 2 Mb/s). Takođe postoji i asimetričnost, posebno u pogledu veličine protoka. Kapacitet direktnog kanala, tj. kanala od bazne stanice do mobilnog korisnika, je zbog ponuđenih servisa (Internet, multimedija itd.) po svemu sudeći ograničavajući faktor. S druge strane, mobilni terminal treba da bude što je moguće manje složen. Posebno treba imati u vidu da mobilnost prijemnika nije samo jedna dodatna opcija, ona postaje osnovni zahtev za mnoge servise.

Zahtevi za standardizacijom 3G su bili razmatrani od 1992. godine pod oznakom *IMT-2000*. Akronim *IMT* označava „International Mobile Telephony“, dok 2000 odgovara i korišćenom opsegu – 2000 MHz – i godini za koju se očekivalo da će se početi sa korišćenjem. *ITU* (International Telecommunication Union) je *IMT-2000* definisala kao otvoreni međunarodni standard za mobilni telekomunikacioni sistem velikog kapaciteta i velikog protoka, uključujući zemaljske i satelitske veze. Međutim, za 3G nije realizovan jedinstveni standard, već se pojavio skup – porodica standarda kao posledica napora da se uzmu u

<sup>1</sup> Member IEEE, Iritel A.D. Batajnički put 23, Beograd, Srbija  
(contact e-mail: [dejan.d.drajic@gmail.com](mailto:dejan.d.drajic@gmail.com))

<sup>2</sup> Ericsson d.o.o., Milentija Popovića 5a, 11070 N.Beograd, Srbija;  
(contact e-mail: [igor.tomic@ericsson.com](mailto:igor.tomic@ericsson.com))

obzir razlike u postojećim 2G standardima u svetu i kao pokušaj da se koordinira dalji razvoj zasnovan na tim standardima. Pored ostalog, koristi se i akronim UMTS (Universal Mobile Telecommunication Systems) da se označe 3G standardi za Evropu (postoji i UMTS Forum). Da bi se sve ovo harmonizovalo stvoren je 3GPP (3G Partnership Project) u kome su učestvovalе sve veće organizacije za standarde iz celoga sveta. Samo uvođenje je malo zakasnilo u odnosu na godinu 2000. U Evropi, Japanu i Koreji usvojen je kao standard WCDMA (Wideband Code-Division Multiple-Access) pristup, dok je u SAD usvojen nešto drugačiji standard, ali takođe zasnovan na CDMA pristupu.

U skupu specifikacija završenih 2002. označenim sa R5 (R – Release) od strane 3GPP uveden je HSDPA sa ciljem da se postignu maksimalne (vršne) brzine prenosa od više megabita u sekundi na direktnom linku, a sa R6 (2005.) HSUPA (često označavan i kao *Enhanced Uplink*), gde ova brzina iznosi nekoliko megabita u sekundi i na povratnom linku. Osim značajnog unapređenja maksimalne brzine prenosa podataka i kapaciteta sistema u poređenju sa WCDMA, HSDPA je doneo i veoma značajno unapređenje odziva mreže. To je postignuto spuštanjem mnogih funkcionalnosti iz kontrolera baznih stanica - RNC u samu baznu stanicu Node B. Ovo je prvi korak u tom smeru, isti trend će biti prisutan u daljem razvoju mobilnih komunikacija. Tako ćemo videti kasnije da u LTE kontroler baznih stanica uopšte ne postoji u arhitekturi mreže. U okviru R6 se takođe pojavila podrška za MBMS (Multimedia Broadcast Multicast Services) koja omogućava i „mobilnu“ TV [7]. Pored ostalog, ove performanse su omogućene i brzim hibridnim ARQ procedurama, adaptivnim izborom modulacija (do 16QAM) i kanalnog kodovanja i mogućim skraćanjem trajanja rama i na 2 ms.

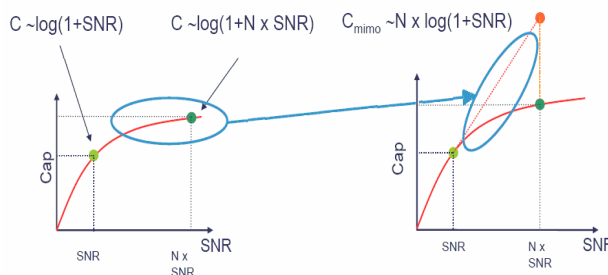
Kako odgovor na stalnu potrebu korisnika za sve većim brzinama prenosa podataka, mobilni telekomunikacioni sistemi su počeli da primenjuju višestruke antenske sisteme (MIMO – *Multiple Input Multiple Output*). Osvrnucemo se na kratko na Šenonovu formulu za maksimalni kapacitet kanala:

$$C = BW * \log_2(1 + SNR) \quad (1)$$

Gde je C kapacitet kanala, BW raspoloživ frekvencijski opseg, a SNR odnos signal-šum. Analizom Šenonove formule brzo dolazimo do zaključka da je za unapređenje kapaciteta kanala potrebno ili povećati raspoloživ frekvencijski opseg ili unaprediti odnos signal-šum. Takođe, primetićemo da je raspoloživ frekvencijski opseg limitiran, dok sa druge strane kapacitet kanala raste sa logaritmom odnosa signal-šum. Drugim rečima, ima smisla poboljšavati odnos signal-šum samo do određene granice, kada kriva polako ulazi u zasićenje i dalje poboljšanje ne donosi unapređenje kapaciteta. Primena višestrukih antenskih sistema nam pomaže u prevazilaženju ovog problema. Naime, primenom višestrukih antena moguće je ostvariti prostorno multipleksiranje, gde se ostvaruje nekoliko paralelnih tokova prenosa podataka (*data stream*) pri čemu svaki od tih kanala ima smanjen odnos signal šum proporcijalno ukupnom broju proporcijalnih kanala. Teorija kaže da višestruki antenski sistem MIMO  $m \times n$ , gde je  $m$  broj antena na predaji i  $n$  broj antena na prijemu, može ostvariti prostorno multipleksiranje, pri čemu je maksimalan broj paralelnih tokova prenosa podataka jednak manjem od ova dva broja -  $\min(m,n)$ . Ako sada uporedimo kapacitete

sistema, videćemo da je kapacitet klasičnog sistema:  $\log(1+N*SNR)$ , dok je kapacitet sistema sa prostornim multipleksiranjem uz primenu višestrukog antenskog MIMO sistema:  $Nx\log(1+SNR)$ .

Na slici 1. je prikazan upoređeni prikaz kapaciteta kanala sa i bez primene MIMO. Vidimo da primena višestrukih antenskih sistema značajno unapređuje kapacitet sistema.



Slika 1. Kapacitet sistema sa i bez primene MIMO tehnike

U okviru R7 (2007.) prvi put se koriste višeatenski sistemi i 64QAM modulacija. Na taj način je ostvarena preaktično udvostručena ne samo brzina rada, već i kapacitet ćelije [5]. R7 se često označava i sa HSPA+. HSPA arhitektura u R7 je slična onoj za LTE i omogućava lak prelaz sa HSPA na LTE. LTE je specificiran kao deo R8 [6], a sada se pojavio već i R9 (broj u ovim oznakama sada odgovara godini objavljivanja).

### III. ELEMENTI FIZIČKOG SLOJA LTE

Fizički sloj HSPA, a posebno kontrola grešaka i razlike u odnosu na „klasičan“ WCDMA sistem razmotreni su u jednom prethodnom radu [8]. U ovome odeljku će biti izloženi osnovni elementi vezani za LTE [6], a posebno imajući u vidu fizički sloj.

Sa R8 se uvode elementi LTE, a u R9 se već pojavljuje i akronim LTE-A (Advanced). Treba napomenuti da je HSPA razvijan tako da bude kompatibilan sa prethodnim sistemima (*backward compatible*), što se od LTE ne zahteva u odnosu na WCDMA i HSPA. U suštini cilj HSPA evolucije je da se približi karakteristikama LTE kada se koristi spektar širine 5MHz, ali da bude i kompatibilan. Dalje, da bi kod operatora mogli da koegzistiraju i HSPA i LTE, u okviru 3GPP započeo je rad i na SAE (System Architecture Evolution) koji treba da dovede do EPC (Evolved Packet Core), koju će moći da koriste oba sistema. Na taj način LTE će se moći primeniti i u manjim „ostrvima“ u početku. Dok je postojeća mreža razvijana najpre za GSM, a zatim za GPRS i WCDMA i zasniva se na komutaciji kola, SAE se fokusira na mreži za komutaciju paketa i očekuje se da će EPC biti mreža za sledeće deкаде.

Možda je ovo zgodno mesto da se citira sledeće gledište [9]: „Sledeće generacije mreža treba da omoguće IP bazirane servise (govor, video, multimedija, podaci...) za sve vrste korisničkih terminala dok se kreću između fiksnih (optika, DSL, kabl) i bežičnih tehnologija pristupa (baziranih na 3GPP, 3GPP2, IEEE), kao i roming između mreža različitih operatora. Korisnici očekuju od mreže da započne, održava i raskine sesiju dok se oni kreću ili su u romingu. Servisi koji se nude korisnicima treba da budu bazirani na funkcijama uslužne mreže (QoS, opseg itd.) dostupnosti i preferencijama korisnika. Mreža i korisnici moraju da budu zaštićeni kroz različite mehanizme autentifikacije, šifrovanja i druge

mehanizme sigurnosti na pristupnom, mrežnom i aplikacionom nivou. Mobilnost treba da se obezbedi kroz koordinisane mehanizme između linka, mreže i aplikacionog nivoa, koji odgovaraju korisnikovim očekivanjima performansi servisa koje će imati. Zahtevi vezani za radiotehnologiju uključuju poboljšane performanse i redukovane kompleksnosti sistema i uređaja. 3GPP R8 specificira arhitekturu koja treba da odgovori ovim zahtevima.“ Takođe se kaže i sledeće: „3GPP je završio R8 specifikaciju 3GPP evoluiranog paketskog sistema (EPS). Dve ključne stvari u 3GPP R8 SAE i LTE. Rad na standardizaciji ova dva koji je započeo 2005 doveo je do specificiranja EPC i nove radio pristupne mreže koja se naziva E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network). Završetak SAE/LTE R8 specifikacija predstavlja prekretnicu u razvoju standarda za mobilnu širokopojasnu industriju.“

Na dizajn LTE utiče WCDMA i HSPA rad u 3GPP (protokoli) i LTE uzima od njih šta je dobro, a popravlja one delove koje treba osavremeniti ili odbacuje one za kojima više nema potrebe (npr. podrška ISDN servisima). S druge strane, infrastruktura za HSPA već postoji u čvorovima mreže i posebno u baznim stanicama sa njihovim antenama i hardverom. Ova oprema opslužuje milione terminala različitih karakteristika i oni će morati da budu opsluživani od strane WCDMA operatora još mnogo godina. Suština HSPA je da se dodaju nove funkcionalnosti („features“) a da se mogu opsluživati i stariji terminali (ova uspešna strategija se sprovodi od 1990. kada se GSM-u dodavane nove osobine. 3GPP je takođe odlučio da jedan operator može da lako koegzistira između HSPA evolucije i LTE pomoću EPC. Ovo se radi u okviru SAE. Pošto je HSPA evolucija kompatibilna sa prethodnim sistemima i pošto će EPC podržavati i HSPA evoluciju i LTE, to omogućava primenu LTE u manjim „ostrvima“ unutar starih sistema. Dakle, operator najpre može da osavremeni svoju HSPA mrežu u HSPA-E, a zatim da dodaje LTE ćelije tamo gde nedostaje kapacitet ili gde želi da proba nove servise koje ne može da pruži HSPA-E.

Da bi se ispunili visoki zahtevi koje je pred sebe postavila LTE izabran je radio pristup drugačiji od onoga kod WCDMA. Za direktan kanal je usvojen OFDM (Orthogonal Frequency Multiple Access), a za povratni SC-FDMA (Single Carrier FDMA). OFDM nudi visok stepen robusnosti na frekvencijsku selektivnost kanala (koristi duge simbole i ciklični prefiks). Sem toga, OFDM omogućava pristup u frekvencijski domen dajući dodatni stepen slobode u odnosu na HSPA. On omogućava fleksibilnu alokaciju opsega, a omogućava i „broadcast/multicast“ prenos od više baznih stanica. U povratnom kanalu se koristi SC-FDMA koji omogućava korišćenje efikasnijeg pojačavača snage, što je veoma važno za mobilni terminal i o čemu će biti više reči kasnije.

Imajući u vidu da je koncept OFDMA potpuno različit od WCDMA, iznećemo još neke karakteristike ovoga koncepta. Ideja za ovakav pristup pojavila se pre više od 50 godina i primenjena je (delimično) u realizaciji sistema KINEPLEX [10] za „brzi“ (2400 b/s) prenos podataka po KT radio kanalu, izuzetno neugodnom medijumu za takve svrhe.

Zbog mnogo dužeg trajanja pojedinih simbola, ovakvim pristupom izbegava se interferencija simbola u kanalima izazvana varijacijama u kašnjenju (*delay spread*) radio kanala. Sledeći razlog za prihvatanje ovakvog sistema

prenosa (za daleko šire frekvencijske opsege) bio je inherentno povećanje otpornosti na frekvencijski selektivni fading i uskopojasne smetnje. Osnovna ideja je da se ukupni prenosni opseg podeli na niz *podopsega* odnosno da se uvede niz *podnosilaca* koji su međusobno ortogonalni. Budući da su podopsezi relativno uzani, to se selektivni fading, tamo gde postoji, manifestuje kao običan ravni fading i mnogo je lakša ekvalizacija kanala (ako se vrši) ili se jednostavno, ti kanali trenutno mogu adaptivno jače zaštitno kodovati, pa čak i privremeno „preskočiti“. U klasičnim FDMA (Frequency Division Multiple Access) sistemima, svaki kanal se odvajao od susednih „zaštitnim prostorom“ (*guard band*) za čime kod OFDM, zbog ortogonalnosti, nema potrebe i opsezi se preklapaju, redukujući tako potrebni opseg (pri istom informacionom protoku potreban opseg učestanosti je bar dva puta uži). Naravno, ovo podrazumeva korišćenje korelacionih prijemnika za svaki podkanal. Imajući u vidu probleme implementacije (KINEPLEX, pri tadašnjem stanju tehnologije, koristio je mehaničke filtre pri generisanju podopsega!) nije čudo što primena ovih sistema u početku nije bila velika. Prekretnicu predstavlja rad Vajnstajna i Eberta iz 1971. godine [11] gde su pokazali da se celokupna realizacija ovoga sistema može ostvariti praktično softverski koristeći Diskretnu Furijeovu transformaciju (DFT), što se kasnije svelo na korišćenje još efikasnije (ekvivalentne u pogledu rezultata) Brze Furijeove transformacije (FFT), za koju se pravi i odgovarajući hardver. Trebalo je još da prođe izvesno vreme da bi 1985. godine primena OFDM za mobilne radio veze bila predložena i detaljno analizirana [12]. Naravno da je dalji razvoj brzih mikroprocesora (koji je omogućavao sve veće brzine obrade signala) pomerao granicu primenljivosti softverske realizacije. Sve je ovo dovelo da se OFDM postupak već ugradi u evropske standarde sa *digitalnu audio difuziju* (DAB – *Digital Audio Broadcasting*) i *digitalnu video difuziju* (DVB – *Digital Video Broadcasting*) a takođe je bio primenjen u modemima za *brze pretplatničke linije* (HDSL – *High-Speed Digital Subscriber Lines*) označen akronimom DMT (Discrete Multitone).

Jedan od nedostataka OFDM je da ako se izgubi ortogonalnost među nosiocima, dolazi do interferencije između potkanala. Ovo se otklanja uvođenjem cikličnog prefiksa, tj. poslednji deo OFDM simbola se kopira i umeće na početak simbola. Drugi nedostatak je da trenutne amplitude OFDM signala imaju veliki dinamički opseg što zahteva linearne pojačavače ili dodatnu obradu signala pri modulaciji. Ovo ipak nije veliki problem u baznoj stanici.

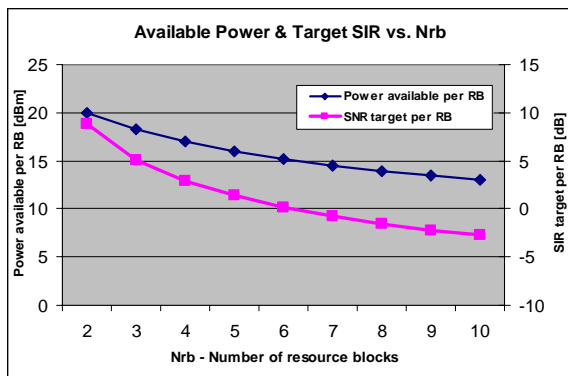
Radio ram od 10ms podeljen je na 10 podramova od po 1ms. Korak dalje, ovi podramovi su podeljeni na po dva „slot“ od po 0,5ms. Svaki od ovih poslednjih sadrži 7 ili 6 OFDM simbola (tj. u zavisnosti od toga da li se koristi „normalan“ ili „produžen“ ciklični prefiks). Produženi ciklični prefiks može biti potreban u slučaju težih uslova rada, ali je naročito koristan pri MBMS, da bi se „pokrila“ vremenska razlika u putanjama od različitih baznih stanica koje učestvuju u ovakvom radu. Naravno, zavisno od tipa modulacije, jedan OFDM simbol može da nosi više bita. Frekvencijski „razmak“ nosilaca je po 15 kHz. Minimalan broj podnosilaca koji se dodeljuje korisniku je 12 (odnosno opseg od  $12 \times 15 \text{ kHz} = 180 \text{ kHz}$ ). Tako, u jednom bloku (*resource block*) ima  $12 \times 6 = 72$  ili  $12 \times 7 = 84$  OFDM simbola. Naravno, pored korisničkih informacija, ovim signalima se prenose i druge informacije neophodne za funkcionisanje

sistema (npr. referentni simboli za procenu stanja potkanala, koji mogu da „skaču“ po potkanalima). Na taj način se odluke o korišćenju potkanala mogu da donose svake milisekunde.

Vremenski intervali su multipli intervala od  $T_s=1/30720000$ . Tako trajanju rama odgovara  $T_{\text{rama}}=307200 \times T_s$ . Učestanost odmeravanja je  $f_s=15000 \times N_{\text{FFT}}$ , gde je ovo poslednje označava veličinu bloka za FFT. Imajući u vidu napred definisano  $T_{\text{rama}}$ , ovome odgovara  $N_{\text{FFT}}=2048$ . Trajanje slota (0,5ms) je  $15360 \times T_s$ . Nosilac se sastoji od bilo kojeg broja izvornih blokova od 6 do preko 100, što odgovara opsegu od 1MHz do oko 20MHz. Uz razmak nosilaca od 15kHz, korisno vreme za simbol (bez prefiksa) je oko 66,7 mikrosekundi ( $2048 \times T_s$ ). Na taj način se u direktnom kanalu u predajniku (bazna stanica) vrši IFFT obrada da bi se zatim izvršila A/D konverzija i dobio signal za emitovanje. U mobilnom prijemniku se vrši odgovarajuća FFT obrada pri demodulaciji. Treba napomenuti da korišćenje IFFT i FFT nije neophodno i da se može raditi i „klasično“, tj. pomoću „običnih“ modulatora i demodulatora.

Primena OFDM u povratnom kanalu nije optimalna, na prvom mestu zbog osobine OFDM-a da amplitude signala imaju veliki dinamički opseg (visok PAPR-*Peak to Average Power Ratio*). Sa druge strane snaga predajnika u mobilnom terminalu je ograničena, a upravo povratni link je najčešće limitirajući faktor za pokrivanje. Takođe, OFDM zahteva i komplikovaniju obradu pre emitovanja u mobilnom terminalu. Zbog toga se u ovome kanalu koristi SC-FDMA, tj. jedan jedini nosilac. Da bi se kompenziralna frekvencijska selektivnost ovde se koristi ekvalizacija. Postoji ekvalizacija (po raznim kriterijumima) u vremenskom domenu, ali postoji i ekvalizacija u frekvencijskom domenu, ona se lakše računa za veliki broj odmeraka nego u vremenskom domenu. To znači da se u prijemniku (bazna stanica) uradi DFT, onda izvrši ekvalizacija i onda izvrši IDFT. I ovde se umeće ciklični prefiks imajući u vidu upravo pomenutu obradu.

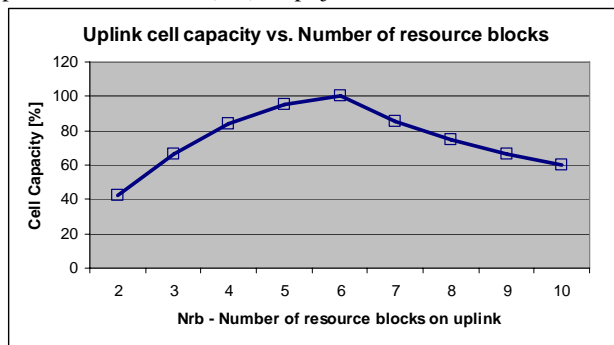
Interesantno je razmatranje optimalne dodele frekvencijskog opsega korisnicima na povratnom linku. Naime, pitanje je koliko blokova dodeliti korisniku (Nrb) kako bi se maksimizovao kapacitet ćelije. Ukupna raspoloživa snaga zračenja mobilne stanice je konstantna, i kako povećavamo broj raspoloživih blokova na povratnom linku, smanjuje se raspoloživa snaga zračenja po bloku. Sa druge strane ako pretpostavimo da korisnik zahteva određenu brzinu prenosa podataka na povratnom linku, dodela više resurnih blokova tom korisniku znači manji zahtev za bitskom brzinom po resursnom bloku je, pa se smanjuje i zahtevani SIR (*Signal to Interference Ratio*).



Slika 2. Promena raspoložive snage po bloku i zahtevanog odnosa SIR u zavisnosti od broja dodeljenih blokova - Nrb

Dakle ako korisniku dodelimo više blokova, imamo manje raspoložive snage po bloku ali i manji zahtevani odnos SIR. Sa druge strane, u slučaju manje dodeljenih resurnih blokova, veća je raspoloživa snaga po bloku, ali je i veći zahtevani odnos SIR. Na slici 2. je prikazana ova zavisnost, primer proračun je urađen za protok od 500kbps i mobilnu stanicu snage zračenja 23 dBm.

U SC-FDMA sistemu korisnici u okviru iste ćelije su ortogonalni (ne koriste isti deo frekvencijskog opsega), tako da celokupna interferencija zapravo dolazi od korisnika koji se nalaze u susjednim ćelijama. Količina interferencije pored geometrijskog faktora zavisi od verovatnoće da se isti blok koristi u susjednim ćelijama (koja raste sa rastom broja dodeljenih blokova-Nrb) i zahtevanog odnosa SIR (koji se smanjuje sa rastom broja dodeljenih blokova-Nrb). Kako količina interferencije utiče na kapacitet sistema, možemo odrediti optimalni SIR po resursnom bloku za koji se ostvaruje najbolji kapacitet ćelije. Na slici 3. je prikazana zavisnost kapaciteta ćelije od broja dodeljenih resurnih blokova, uz pretpostavku da je geometrijski faktor  $F=0.7$ , dozvoljen priraštaj šuma (*Noise raise*) u ćeliji 5dB, uz maksimalno iskorišćenje resurnih blokova od 90%, pri čemu pretpostavljamo da kontrola snage obezbeđuje isti SIR po resursnom bloku (RB) na prijemu za sve korisnike.



Slika 3. Kapacitet ćelije na povratnom linku u zavisnosti od broja dodeljenih blokova – Nrb

Vidimo da je optimalan broj resurnih blokova u ovom slučaju  $Nrb=6$ , čemu zapravo odgovara target  $SIR = 0$  dB po (slika 2.). Zaključujemo da se maksimalan kapacitet ostvaruje kada raspoređivač (*scheduler*) u saradnji sa kontrolom snage obezbeđuje da SIR po resursnom bloku približno približno 0 dB. Treba napomenuti da se na ovaj način maksimizira kapacitet na povratnom linku, ali ne i pokrivanje. Sa aspekta pokrivanja optimalno je da se korisniku dodeli što više resurnih blokova, u skladu sa Šenonomovom krivom koja je razmatrana u prethodnom poglavlju.

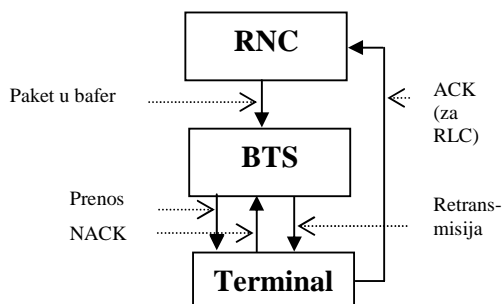
LTE podržava i FDD (Frequency Division Duplex) i TDD (Time Division Duplex). Spektralna fleksibilnost zahteva od LTE skalabilnost u frekvencijskom domenu i rad u različitim frekvencijskim opsezima. Upravo primena OFDM to i omogućava, obzirom da se raspoloživ frekvencijski spektar deli na više podkanala grupisanih u pomenute blokove (*Resource Block-RB*) širine svega 180 kHz. Na taj način LTE ne mora da koristi kontinualan spektar, dok podržava rad sa raspoloživim opsezima različite širine: 1,4; 2,5; 5; 10; 15 i 20 MHz. Imajući u vidu trenutnu iskorišćenost frekvencijskog spektra, i posebno situaciju da se raspoloživost spektra za LTE veoma razlikuje od države do države, fleksibilnost koju pruža LTE je od velikog značaja. Ona omogućava i postepenu migraciju drugih pristupnih

radio tehnologija ka LTE. Što se tiče broja antena (MIMO) za sada se razmatraju slučajevi do 4x4 antene. Prema 3GPP u okviru LTE treba da se obezbedi vršna brzina od 100Mb/s u direktnom kanalu i 50Mb/s u povratnom kanalu u opsegu širine 20MHz. Za uže opsege, ove brzine se skaliraju na odgovarajući način. Ovo odgovara spektralnim efikasnostima od 5b/s/Hz, odnosno 2,5b/s/Hz.

Takođe se i u direktnom i povratnom kanalu koristi hibridni ARQ i meko kombinovanje. Protokol je sličan onome u HSPA – „multiple parallel stop-and-wait“ hibridni ARQ.

#### IV. NEKE PARALELE WCDMA/HSPA I LTE

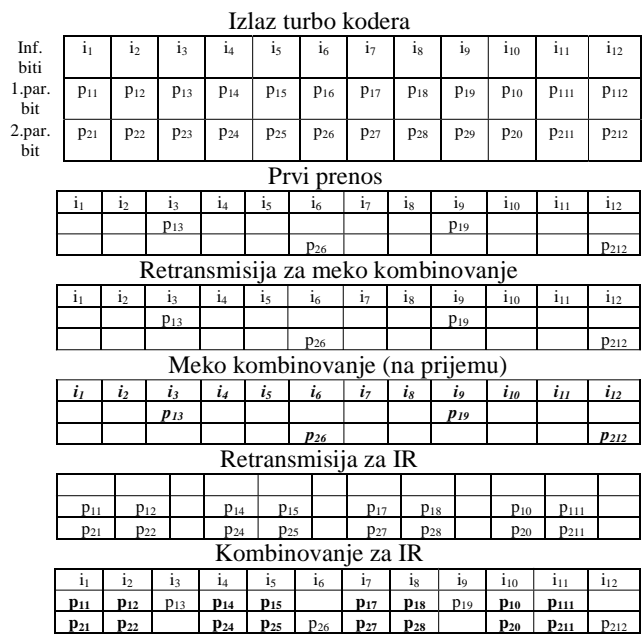
U okviru mobilnih sistema postoji osnovna – bazična (CN – Core Network) mreža i radio pristupna mreža (RAN – Radio Access Network). U okviru SAE razvijena je odgovarajuća sistemka arhitektura (tj. alokacija funkcija logičkim čvorovima i potrebni interfejsi između čvorova). U okviru specificiranja WCDMA/HSPA i LTE/SAE raspodeljene su funkcije između CN i RAN. U okviru WCDMA/HSPA između baznih stanica (NodeB) i CN postoji čvor RNC (Radio Network Controller) za koji je vezano više NodeB stanica, a RNC (ima ih više) mogu u okviru mreže da komuniciraju međusobno. 3GPP razmatra migraciju RAN arhitekture ka jednostavnijoj (*flat*) arhitekturi. Ovo je generalno moguće, ali HSPA-E treba da opslužuje i nasledene čvorove (RNC, NodeB). Za razliku od WCDMA/HSPA RAN, LTE RAN ima samo jedan jedini tip čvora – eNodeB (nema čvor ekvivalentan RNC). Dakle trend spuštanja funkcionalnosti iz RNC-a u baznu stanicu, koji je započeo u HSDPA sistemima) je doveden do kraja, tako da je RNC čvor nestao. Ovo je veoma bitno za dodatno unapređenje kašnjenja u LTE mreži, tako da je ciljna vrednost (<10ms) ostvarena. Čvor eNodeB dakle sada ima iste funkcije kao i NodeB i, dodatno, brine se o radio resursima u ćelijama, odlučuje o hendoveru i donosi i odgovarajuće odluke o upravljanju prenosom u direktnom i povratnom kanalu (*scheduling*). On obavlja i klasične funkcije fizičkog nivoa (kodovanje, dekodovanje, modulaciju, demodulaciju, interliving, deinterliving, itd.), kao i nadgledanje retransmisije. Pored veze sa CN, čvorovi eNodeB međusobno komuniciraju. Ovo je veoma bitno, pogotovo za uspešno koordinisanje raspoređivanja resurs u cilju izbegavanja interferencije.



Slika 4. Primenjena HARQ procedure kod WCDMA/HSPA

Ovde je pogodno da se prikaže kako se HARQ ostvaruje u okviru WCDMA/HSPA (slika 4). Iz bloka za kontrolu radio mreže (RNC) šalje se paket u bafer bazne stanice (BTS – Base Transceiver Station) koja dostavlja paket terminalu. Ako je paket stigao sa greškama posle NACK vrše se retransmisije bez učešća RNC, a po uspešnom prijemu šalje

se ACK u RNC. Ukoliko posle određenog broja retransmisija između BTS i terminala nema uspeha, retransmisija se sprovodi na višem nivou (RLC – *Radio Link Control*). Kod „običnog“ WCDMA se vršila samo ARQ procedura na RLC nivou. Ovde je uvedeno još jedno značajno poboljšanje u odnosu na tradicionalnu hibridnu ARQ proceduru. Naime, u slučaju neuspele detekcije terminal ne odbacuje postojeće „meke“ vrednosti dobijene tom prilikom, već ih čuva i kombinuje sa onima pristiglim u okviru sledeće (re)transmisije. Ovde su moguće dve varijante. U prvoj se uvek (prvo emitovanje i retransmisije) prenose isti biti (svi informacioni i neki kontrolni, dok ostali kontrolni mogu biti izostavljeni – „bušeni“ (*punctured*), na osnovu prethodnog „znanja“ o kvalitetu linka). U literaturi se ovo često naziva „meko kombinovanje“ (*soft combining*). Očigledno da ovom prilikom nema promene kodnog količnika (*rate matching*). Ustvari se on može i ovde menjati promenom modulacije. U drugoj varijanti – „povećane redundanse“ (IR – *Incremental Redundancy*), prenose se samo dodatni kontrolni biti izostavljeni u prvom prenosu (i pri ovome ne moraju se uvek preneti svi izostavljeni kontrolni biti). Svakako da se ovde vrši promena kodnog količnika, što bi se dodatno moglo kombinovati sa promenom modulacije. Naravno da mogućnost primene IR zavisi i od samog terminala, posebno veličine njegove memorije. Sve je ovo šematski ilustrovano na slici 5. Pretpostavljeno je da se koristi turbo kodovanje s količnikom 1/3. U slučaju mekog kombinovanja (sledeća tri reda slike) prenose se uvek isti biti i njihove (meke) vrednosti sabiraju s prispelim prethodnim vrednostima. U IR slučaju (poslednja dva reda) prethodno primljene vrednosti se pamte nepromenjene, a za dekodovanje se koriste i novoprispELE.



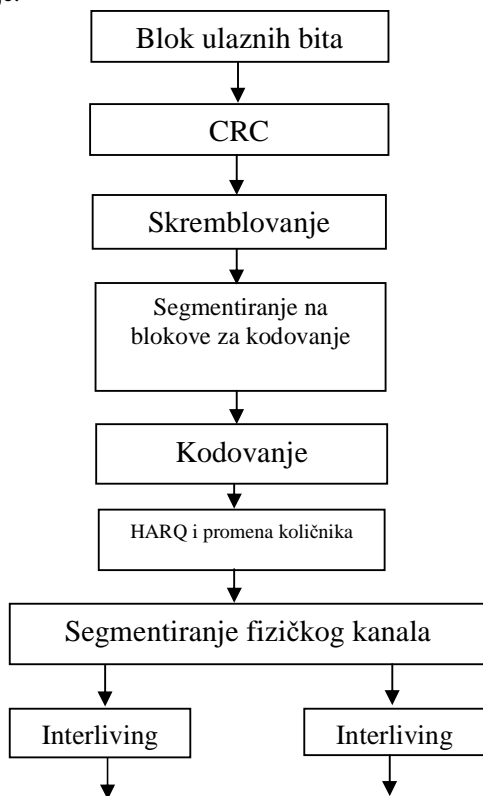
Slika 5. Ilustracija HARQ principa

Mogućnost korišćenja HSPA je samo opcija za terminale. Oni koji podržavaju ovu opciju podeljeni su u više kategorija. Zaključno sa R6 bilo je 12 različitih kategorija zavisno od broja ortogonalnih kanalnih kodova (5, 10 ili 15), broja kanalnih bita u toku TTI, načina sprovođenja ARQ procedure (meko kombinovanje ili IR) itd, što je rezultovalo u mogućim vršnim brzinama prenosa od 0,9 do 14,4 Mb/s. Sa R7 i R8 pojavile su se i kategorije 13-18, odnosno 19-24

koje uključuju 64QAM i MIMO (2x2) podižući dalje maksimalne vršne brzine do 42 Mbps. R8 ne predviđa istovremenu podršku za MIMO i više paralelnih HSDPA nosilaca, čime bi se dodatno vršna brzina unapredila na 84 Mbps, što će biti definisano narednim preporukama.

Na slici 6. je prikazan uprošćeno deo lanca vezan za fizički kanal u okviru HSDPA (tj. HS-DSCH (Downlink Shared CHannel)). Prikazan je lanac kada se koristi samo jedna antena. HSDPA-MIMO podržava prenos do dva odvojena niza (*stream*). Svaki niz se obrađuje na isti način na fizičkom nivou (kodovanje, širenje i modulacija) kao i kada postoji samo jedan niz (raniji HSDPA). Posle ovoga se rezultat mapira u dve predajne antene.

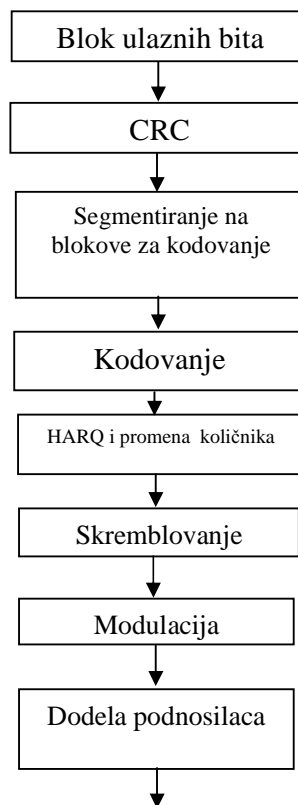
Ovde će biti prvenstveno ukazano na razlike u odnosu na WCDMA. Posle dodavanja CRC, što postoji i kod WCDMA, uvedeno je skremblovanje (ne postoji na ovom mestu u WCDMA). Ono se vrši da bi se izbegle sekvence bita koje se završavaju dužim nizovima nula ili jedinica, što može da oteža procenu nivoa snage. Segmentiranje na blokove za kodovanje i samo kodovanje su nepromenjeni. Primenjeni turbo koder detaljno je opisan u literaturi [13]. Međutim, izostavljena je mogućnost korišćenja konvolucionog koda i ostao je samo turbo koder identičan onome u WCDMA. Funkcija HARQ bloka je već objašnjena, tu se bušenjem može menjati kodni količnik. Segmentiranje fizičkog kanala je ostalo, kao i podela na nizove bita za modulisanje komponentata u fazi i kvadraturi uz korišćenje identičnih interlivera za obe komponente. Dalje se takođe (nije naznačeno na slici) bira i modulacija (QPSK, 16QAM). „Adaptacija linka“ se sastoji u tome da se izabere postupak modulacije i odgovarajući kodni količnik. Pri ovome se svakako menja i veličina (dužina) bloka koji se emituje.



Slika 6. Deo lanca vezan za fizički kanal (HSDPA)

Na slici 7. prikazan je uprošćeno deo lanca vezan za fizički kanal LTE. Ukoliko se koristi više antena (do četiri po specifikacijama) postoji odgovarajući broj ovakvih lanaca koji se stiču u bloku u kojem se vrši mapiranje na antene. Ovaj blok nije prikazan na slici. Po izvršenom mapiranju vrši se dodela podnosilaca u okviru svake antene.

CRC se dodaje na isti način kao i kod HSDPA. Turbo koder je isti kao i kod HSDPA, ali je izmenjen interni interliver. On je tako izabran da se dekodovanje može vršiti paralelno a da se pri tome ne menja sadržaj interliverove memorije pri pristupu, tj. njenom korišćenju [14]. Za velike brzine prenosa koje se javljaju u LTE ovakav tip interlivera može znatno da reducira kompleksnost turbo dekodera. HARQ je isti kao i kod HSDPA, ali se treba podsetiti da je funkcija RLC poverena eNodeB. Sada, za razliku od HSDPA, dolazi skremblovanje na nivou bita. Cilj ovoga postupka je da se u potpunosti iskoristi dobitak zaštitnog kodovanja. Da nema ovoga skremblovanja dekoader u mobilnom terminalu bi mogao, u principu, da bude podešen i na interferirajući signal, kao i na korisni signal. Ako se u susednim ćelijama primene različite skremblujuće sekvence, onda će se po deskremblovanju interferirajući signali učiniti slučajnim u odnosu na koristan signal. Treba zapaziti da se kod HSDPA skremblovanje primenjuje i na signale dobijene posle širenja na nivou čipa i da se pri tome koriste „kompleksni“ čipovi. U bloku „Modulacija“ se bira tip modulacije – QPSK, 16QAM, 64QAM – pri čemu svaki modulišući signal predstavlja 2, 4 ili 6 bita respektivno. Kao što je već napomenuto, u slučaju MIMO prenosa (više antena) postoji odgovarajući broj ovakvih lanaca koji ulaze u blok za mapiranje na antene (nije prikazan). U tome slučajuse može koristiti i „prostorno“ kodovanje. Posle ovoga bloka vrši se u okviru svake antene dodela podnosilaca.



Slika 7. Deo lanca vezan za fizički kanal (LTE)

## V. ZAKLJUČAK

U ovome radu je ukratko prikazan paralelni razvoj HSPA i LTE sistema, imajući posebno u vidu fizički sloj veze. Kada se krenulo sa razvojem LTE sistema, osnovni ciljevi su bili da se dalje poveća spektralna efikasnost i smanji kašnjenje pri prenosu. Dok je HSPA potpuno kompatibilan sa postojećim sistemima, takvi zahtevi nisu postavljeni pred LTE i oba sistema se razvijaju paralelno. Na dizajn LTE utiče WCDMA/HSPA i LTE uzima od njih šta je dobro, a popravljaju one delove koje treba osavremeniti ili odbacuje one za kojima više nema potrebe. S druge strane, infrastruktura za HSPA već postoji u čvorovima mreže i posebno u baznim stanicama sa njihovim antenama i hardverom. Ova oprema opslužuje milione terminala različitih karakteristika i oni će morati da budu opsluživani od strane WCDMA operatora još mnogo godina. Suština HSPA je da se dodaju nove funkcionalnosti (*features*) a da se mogu opsluživati i stariji terminali.

Što se tiče operatera, pred njima će se nalaziti važna odluka o daljem investiranju [15]. Da li da nastave investicije u 3G (ako su je već primenili) ili da odmah pređu na neizbežno – „all-IP data-optimized technology“. Ovo zavisi očigledno od toga šta operatori imaju. Za većinu 3GPP2 operatora LTE je logičan njihov izbor za 4G (Verizon Wireless, operator u SAD je recimo već u fazi puštanja komercijalne LTE mreže). Za 3G i HSPA-E operatore je drugačije. Oni sa HSPA imaju dilemu da primene HSPA-E kao međukorak ili odmah da idu na LTE. HSPA-E već pruža mogućnost maksimalnih brzina i do 82 Mbps, čime se potpuno približio LTE sistemu. Takođe, čini se da HSPA-E u ovom trenutku ne zaostaje ni u pogledu spektralne efikasnosti. Ono što je definitivno prednost LTE-a je izuzetno malo kašnjenje (<10ms), velika spektralna fleksibilnost i generalno niža cena po prenetom bitu. Što se tiče operatora koji su pratili 3GPP standard, u Evropi je Telia Sonera komercijalno pustila prvu LTE mrežu. Sa druge strane, u toku je instalacija brojnih probnih LTE sistema (*trial LTE system*) širom sveta. Prvi rezultati testiranja pokazuju izmerene vršne brzine prenosa podataka od 100Mbps uz primenu MIMO 2x2 i 20 MHz raspoloživog frekvencijskog opsega, dok je kašnjenje manje od 20 ms. Kada se okolne ćelije optereće sa 70% opterećenja, brzina se smanjuje na 70 Mbps. Treba napomenuti da su ovi testni sistemi još uvek siromašni funkcionalnostima, i da se tek očekuje veliko unapređenje performansi u vremenu koje predstoji.

LTE je svakako tehnologija budućnosti, dok za HSPA-E nije u ovom trenutku jasno koliko će se dalje razvijati i da li će biti samo međukorak. Niz velikih operatora koji su pratili razvoj mobilnih komunikacionih sistema predviđen standardom 3GPP (AT&T, T-Mobile, Vodafone, Telefonica, TIM, France Telekom, uz pomenutu Telia Soneru) se opredelio za LTE kao tehnologiju četvrte generacije. Sve češće se i operatori koji nisu sledili 3GPP (Bell, KDDI, China Telecom uz pomenuti Verizon Wireless) opredeljuju takođe za LTE [21]. Međutim, imajući u vidu tekuće stanje u svetu, kako u ovoj oblasti, tako i generalno, ne može se sa velikom sigurnošću prognozirati kojom će se brzinom, i na koji način, odigravati ova tranzicija.

- [1] K. Zheng, L. Huang, G. Li, H. Cao, W. Wang, and M. Dohler: "Beyond 3G Evolution", *IEEE Veh. Technol. Mag.*, Vol.3, No. 2, pp. 30-38, June 2008.
- [2] H. Holma, and A. Toskala, Eds.: *HSDPA/HSUPA for UMTS*, J. Wiley & Sons, West Sussex, 2006.
- [3] Y. Hawwar, E. Farag, S. Vanakayala, R. Pauls, X. Yang, S. Subramanian, P. Sadhanala, L. Yang, B. Wang, Z. Li, H. Chen, Z. Lu, D. Clark, T. Fosket, P. Mallela, M. Shelton, D. Laurens, T. Salaun, L. Gougeon, N. Aubourg, H. Morvan, N. Le Henaff, G. Prat, F. Charles, C. Creach, Y. Calvez, and P. Butel, "3G UMTS Wireless System Physical Layer: Baseband Processing Hardware Implementation Perspective", *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 44, No. 9, pp. 52-58, Sep. 2006.
- [4] H. Holma, and A. Toskala, Eds., *Wideband CDMA for UMTS*, John Wiley and Sons, New York, 2000.
- [5] H. Holma, A. Toskala, K. Ranta-aho, and J. Pirskanen: "High-speed Packet Access Evolution in 3GPP Release 7", *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 45, No. 12, pp.29-35, Dec. 2007.
- [6] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld, and P. Neming: *3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband*, Academic Press, Oxford 2007.
- [7] S. Parkvall, E. Englund, and M. Lundevall, J. Torsner: "Evolving 3G Mobile Systems: Broadband and Broadcast Services in WCDMA", *IEEE Comm. Mag.*, Vol. 44, No. 2. pp. 68-74, Feb. 2006.
- [8] D. Drajić: „Kontrola grešaka u HSPA prenosu“, *YUINFO2009* Kopaonik 8-11 mart 2009., 4 str.
- [9] K. Bogineni, R. Ludwig, P. Mongensen, V. Nandlall, V. Vucetic, B. Yi, and Z. Zvonar: „LTE Part I: Core Network (Guest Editorial)“, *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 47, No. 2, pp. 40-43, Feb. 2009.
- [10] R. R. Mosier, and R. G. Clabaugh, "Kineplex, a Bandwidth Efficient Binary Transmission System", *AIEE Trans.*, Vol.76 (1958), pp. 723-728
- [11] S. B. Weinstein, and P. M. Ebert, "Data Transmission by Frequency-Division Multiplexing Using the Discrete Fourier Transform", *IEEE Trans. Commun.*, Vol. COM-19 (1971), pp. 628-634
- [12] L. M. Cimini, Jr., "Analysis and Simulation of a Digital Mobile Channel Using Orthogonal Frequency Division Multiplexing", *IEEE Trans. Commun.*, Vol. COM-33 (1985), pp. 665-675
- [13] K. Gracie, and M. H. Hamon: "Turbo and Turbo-like Codes: Principles and Applications in Telecommunications", *Proc. IEEE*, Vol. 95, No. 6, pp.1228-1254, June 2007.
- [14] O. Takeshita: „On Maximum Contention-Free Interleavers and Permutation Polynomials Over Integer Rings“, *IEEE Trans. Information Theory*, Vol. 52 (2006), pp. 1249-1253
- [15] D. McQueen: „The Momentum behind LTE Adoption“, *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 47, No. 2, pp. 44-45, Feb. 2009.
- [16] R. Irmer, H.-P. Mayer, A. Weber, V. Braun, M. Schmidt, M. Ohm, N. Ahr, A. Zoch, C. Jandura, P. Marsch, and G. Fettweis: „Multisite Field Trial for LTE and Advanced Concepts“, pp. 92-98, *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 47, No. 2, pp. 92-98, Feb. 2009.
- [17] J. Gonzalez: „First Google's Android Phone Launched“, *IEEE Veh. Technol. Mag.*, Vol.3, No. 4, pp. 3-9,69, Dec. 2008.
- [18] J. Gonzalez: „Molecular Communications“, *IEEE Veh. Technol. Mag.*, Vol.3, No. 3, pp. 3-10, Sep. 2008.
- [19] J. Gonzalez: „Long-Term Evolution FDD and TDD Demonstration“, *IEEE Veh. Technol. Mag.*, Vol.3, No. 1, pp. 3-10, March 2008.
- [20] J. Gonzalez: „The European Union Backs the DVB-H Standard Long-Term Evolution FDD and TDD Demonstration“, *IEEE Veh. Technol. Mag.*, Vol.3, No. 2, pp. 3-8, June. 2008.
- [21] I. Tomić, and I. Simić: „3GPP LTE Long Term Evolution – sistem četvrte generacije“, *YUINFO2009* Kopaonik 8-11 mart 2009., 4 str.
- [22] S.Sessia, I.Toufik, M.Baker: „LTE – The UMTS Long Term Evolution, From Theory to Practice“, Wiley, 2009.

## ABSTRACT

In this paper the development of HSPA and LTE in 3GPP are shortly commented with the special attention to the physical layer.

### The Parallel Development of HSPA and LTE – Physical Layer

Dejan Drajić, Igor Tomić