

**mr.sci. Mirza Hamza, dipl.ing.el.**  
**Asistent Elektrotehničkog fakulteta u Sarajevu**  
Malta 23, 71000 Sarajevo  
Kanton Sarajevo, Bosna i Hercegovina  
Mob.: 061/201-672  
e-mail: mhamza@etf.unsa.ba

**NASTAVNONAUCNOM VIJEĆU**  
**ELEKTROTEHNIČKOG FAKULTETA U SARAJEVU**  
putem Odsjeka za telekomunikacije

**PREDMET: Prijava prijedloga teme za izradu doktorske disertacije**

Molim da, u skladu sa Pravilnikom o postupku podnošenja i prihvatanja teme dokorskog rada na Elektrotehničkom fakultetu, Univerziteta u Sarajevu, razmotrite moj prijedlog teme za doktorsku disertaciju, pod radnim naslovom:

***“Prilog višeslojnom modeliranju i predikciji performansi realnih vremenski disperzivnih radiokanala sistema četvrte generacije“***

***“Contribution to cross-layer modelling and performance prediction of realistic time-dispersive wireless channels of the 4<sup>th</sup> generation systems“***

Predložena tema je koncipirana na osnovu rezultata mog dosadašnjeg istraživačkog rada, fokusiranog na oblasti modeliranja radio kanala, predajnika i prijemnika, te odražava moja interesovanja u daljem naučno-istraživačkom radu. Obrazloženje teme je detaljno dato u prilogu.

Ovu temu prijavljujem nakon konsultacija s prof.dr.sci. Vladimirom Lipovcem, dipl.ing.el., koji je, kao potencijalni mentor, dao saglasnost za prijavu navedene teme.

Uz prijavu prilažem:

1. obrazloženje predložene teme doktorske disertacije,
2. biografiju,
3. ovjerenu kopiju diplome o završenom elektrotehničkom fakultetu,
4. ovjerenu kopiju uvjerenja o stečenom naučnom stepenu magistra elektrotehničkih nauka,
5. popis i primjerke objavljenih radova,
6. ovjerenu izjavu da postupak sticanja akademskog stepena doktora nauka nije pokrenuta ni u jednoj drugoj ustanovi ,
7. tri primjerka CD zapisa sa priložima i priloženim radovima.
8. potvrdu o uplati.

Sarajevo, 30.09.2011.godine

Podnosilac prijave:

mr.sci. Mirza Hamza, dipl.el.ing.

# OBRAZLOŽENJE PREDLOŽENE TEME DOKTORSKE DISERTACIJE

## Naslov teme:

***“Prilog višeslojnom modeliranju i predikciji performansi realnih vremenski disperzivnih radiokanala sistema četvrte generacije“***

***“Contribution to cross-layer modelling and performance prediction of realistic time-dispersive wireless channels of the 4<sup>th</sup> generation systems“***

## 1. Tip istraživanja

Doktorska disertacija će se temeljiti na istraživanju vršnih performansi prijenosa radiokomunikacijskim sistemima četvrte generacije, koji koriste višestruke podnosioce i višestruke predajne i prijemne antene. Istraživanje će biti zasnovano na analitičkom modeliranju višeslojne performanse sistema kao teorijskoj osnovi, te validaciji i verifikaciji teorijski dobivenih rezultata programskim simulacijama i djelomično (u mjeri koju odredi raspoloživost opreme) eksperimentalno - u kontrolisanom (laboratorijskom) okruženju i/ili na odgovarajućem realnom sistemu u eksploataciji.

## 2. Stanje u industriji kao ambijent i pokazatelj praktičnog značaja istraživanja

Standardizacijska evolucija radiokomunikacijskih sistema treće generacije (3G) u četvrtu (4G), ima za cilj definisati radijsku mrežu koja omogućuje veću vršnu brzinu prijenosa (veću od 100 Mb/s i 50 Mb/s, u silaznoj (*downlink*) i uzlaznoj vezi (*uplink*), respektivno), i ukupni kapacitet sistema, poboljšati spektralnu efikasnost i performanse na rubovima ćelija, te kraće vrijeme obrade na upravljačkoj i korisničkoj ravni primijenjenih protokola. S tim u vezi, evolucijom *Universal Mobile Telecommunication System (UMTS)* u *all-IP* paketsku širokopojasnu mrežu, u ovoj oblasti relevantna međunarodno standardizacijska organizacija *Third Generation Partnership Project (3GPP)*, počevši od 2004. godine, razvija *Long-Term Evolution (LTE)* standarde novog radijskog interfejsa visokih performansi za mobilne komunikacijske sisteme, koji trebaju zadovoljiti velike zahtjeve telekomunikacijske industrije barem u narednoj dekadi, ili duže (a kakve *International Telecommunication Union (ITU)* artikulira u svojim preporukama *IMT-Advanced requirements for a true 4G technology*, što opet 3GPP adresira razvojem svoga naprednog standarda *LTE-Advanced*, počevši od svoje inačice *Release 10*). Na taj način, sada već u fazi probnih, kao i prvih komercijalnih instalacija, LTE je na dobrom putu da postane prvi jedinstveni globalni standard za celularne komunikacije, koga prihvaćaju jednako GSM i CDMA (na kojoj je baziran UMTS) mrežni operatori i koji omogućuje koegzistenciju s postojećim sistemima u eksploataciji, uključujući 3GPP HSPA, W-CDMA UMTS, kao i GSM/GPRS/EDGE, a razvijaju se i preporuke za tzv. 3GPP *Evolved Packet Core (EPC)* mrežu za podršku interdomenskih handovera između sistema komutacije krugova i komutacije paketa. Isto tako, široko prihvaćeni širokopojasni radijski pristupni standard WiFi se inkorporira u LTE kao način za rasterećenje od pretežno podatkovnog prometa, što bi mobilnim korisnicima omogućilo tzv. neosjetni prijelaz između ovih sistema. (Konceptualno LTE-u sličan standard za širokopojasni radijski pristup, četvrte generacije, je Mobile WiMAX™, premda različitih formata okvira protokola, frekvencijskih rastojanja podnosilaca, kao i opsega kanala.)

Da bi se gore navedena poboljšanja realizirala, LTE standard se temelji na visoko fleksibilnim i dinamičnim radijskim tehnologijama i protokolima, gdje su upravljačke poruke u skladu s osobinama radijskog signala. Za razliku od UMTS sistema, koji koristi tehnologiju višestrukog širokopojasnog pristupa s kodnom raspodjelom (W-CDMA), LTE podršku radu na visokim brzinama prijenosa (do čak 326.4 Mbps u silaznom linku, primjenom višestrukih antenskih sistema) i u različitim fleksibilno dodijeljenim skalabilnim modulacijskim postupcima (QPSK, 16QAM i 64QAM silazno, a BPSK, QPSK, 8PSK i 16QAM uzlazno), širinama frekvencijskih opsega (od 1.4 do 20 MHz uzlazno i silazno), ostvaruje višestrukim pristupom pomoću frekvencijske raspodjele na bazi međusobno ortogonalnih podnosilaca - *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA)* u silaznoj vezi, gdje se sveukupni tok podataka razdvaja u nekoliko tokova nižih brzina, koji se potom prenose na pojedinim podnosiocima, dok se u uzlaznoj vezi koristi postupak višestrukog pristupa raspodjelom frekvencija na jednom nosiocu - *Single Carrier FDMA (SC-FDMA)*, što osigurava manji odnos vršne i srednje snage signala, a time i duži vijek baterije mobilnih uređaja, kao i maksimalnu prostornu pokrivenost signalom.

Osiguranjem ortogonalnosti frekvencija unutar ćelije, izbjegava se intra-ćelijska interferencija, a u većini slučajeva, razdvajanje korisnika vrši se u vremenskoj domeni, dok se sporopromjenjiva automatska regulacije izlazne snage primjenjuje za kompenzaciju gubitaka propagacije i slabljenja uslijed zasjenjenja (*shadowing*), a zbog ortogonalnosti nema potrebe za brzom kontrolom snage. Interferencija usljed višeputanskog *multipath* rasprostiranja rješava se u baznoj stanici, umetanjem tzv. cikličkog prefiksa u predajni signal. Parametri prijenosa, kodiranje i modulacija, slični su onima kod prijenosa u silaznoj vezi. Slično kao kod WCDMA/HSDPA sistema, promjene u radijskom kanalu u vremenskoj domeni adresiraju se prilagodljivošću veze i raspoređivanjem prometa (*scheduling*), ovisno o stanju kanala, čime se značajno povećava spektralna efikasnost. Korak dalje je prilagođenje parametara i u frekvencijskoj domeni, tim važnije kako se zahtijevana širina propusnog opsega povećava, u čemu OFDM tehnike mogu ostvariti velike dobitke u performansama sistema, kada *čvor-B* vrši rezervaciju vremensko-frekvencijskih resursa u silaznoj vezi prema pojedinom korisniku, te dinamički bira odgovarajuću brzinu prijenosa, mijenjanjem nivoa izlazne snage, omjera kanalnog kodiranja, kao i modulacijske sheme.

S ciljem povećanja kapaciteta, pouzdanosti, pokrivenosti signalom, te smanjenju broja grešaka pri prijenosu (premda na račun kompleksnosti predajnika i prijemnika), dupleksni (vremenski-bazirani i frekvencijski-neupareni - TDD, ili frekvencijski-bazirani i upareni - FDD) LTE sistem podržava i jednokorisničke i višekorisničke višestruke antenske sisteme Multiple Input/Multiple Output (MIMO), čiji terminal razdvaja tokove podataka temeljem karakteristika kanala, kao i znanja o kodnoj shemi koju je koristila bazna stanica. MIMO tehnike primarno se primjenjuju u silaznoj vezi, uglavnom u situacijama gdje vremenska disperzija i omjer snaga signala i šuma (SNR) imaju visoke vrijednosti (npr. kod malih ćelija ili sistema unutar zgrada - indoor). Maksimalni predviđeni 4 x 4 MIMO sistem osigurava gotovo 10 puta više korisnika po ćeliji u odnosu na W-CDMA tehnologiju, s minimalnim vremenom obrade - latencijom malih IP paketa ispod 5 ms!

Tri ključna stuba LTE silaznog linka (*downlink - DL*) su: OFDMA i MIMO, s gledišta fizičkog sloja LTE protokolskog *stacka*, te protokoli za automatsku retransmisiju pogrešnih blokova podataka (*Hybrid Automatic Repeat Request- HARQ*), koji sloju linka omogućuju pouzdan prijenos podataka. Ovdje kombinacija i sinergija MIMO-OFDM omogućuje brzu adaptaciju formata signala zahtjevu korisnika za propusnim opsegom i uslovima kanala,

odnosno poboljšanu spektralnu efikasnost u opsegu od radijskih lokalnih mreža (WLAN) do širokopojasnog pristupa, respektivno, a HARQ omogućuje optimizaciju sveukupne performanse sistema kada je interferencija usljed velikog broja korisnika ograničavajući faktor ukupnog kapaciteta.

Efektan i efikasan zajednički rad ova 3 osnovna gradivna elementa pri praktičnoj implementaciji LTE standarda nije lako ostvariti zbog broja i složenosti različitih formata signala, a da se ne govori o nužnom osiguravanju interoperabilnosti uređaja baznih stanica i mobilnih uređaja različitih proizvođača kakvi se koriste u stvarnim mrežama. S tim u vezi je važno sprovesti njihovo iscrpno testiranje usklađenosti sa standardima (*conformance testing*), a koje pored navedenih mrežnih elemenata, uključuje i ispitivanje performansi upravljanja radijskim resursima. Budući da složeni i fleksibilni LTE radijski interfejs podržava različite tipove modulacija, frekvencijske opsege, dodjele resursa i mobilnosti, broj mogućih testnih konfiguracijskih scenarija može biti vrlo velik, pa je 3GPP identificirao takve kombinacije parametara koje predstavljaju najteže operativne uslove, pa npr. ako ispitivani uređaj prođe neke testove, može se pretpostaviti da će zadovoljavajuće raditi i za manje izazovne scenarije. No, premda je lista testova usklađenosti veoma duga, u praksi mogu biti od interesa i druge vrste testova, kakvo je npr. istraživanje margina performansi, budući da testovi usklađenosti daju samo binarne rezultate („prošao“/“nije prošao“), ne dajući indicaciju npr. koliko blizu je neki proizvod konkretnoj graničnoj vrijednosti. S druge strane, proizvođački testovi usklađenosti obično verificiraju da LTE transportni mehanizmi mogu osigurati prijenos servisa između krajnjih korisnika, tako da se aplikacije viših slojeva moraju dodatno ispitati, što provode mrežni operatori, testiranjem prihvatljivosti usluge od strane korisnika.

S druge strane, premda ovakav klasični, telekomunikacijskom industrijom diktirani scenarij, gdje teorijske analize uglavnom prethode laboratorijskom razvoju (ili ga barem prate), a svakako testiranju usklađenosti odgovarajućih proizvoda (da i ne govorimo o njihovoj implementaciji u operatorske mreže), kod uvođenja novih tehnologija u mobilne radiokomunikacijske sisteme, usljed neviđenih marketinških pritisaka, ovaj proces često zna biti nepotpun, pa čak i djelomično inverzan, kada detaljnija teorijska analiza nekih važnih aspekata – recimo performansi – zna biti nedovršena, jer su novi sistemi jednostavno rečeno „prerano“ ušli u proizvodnju i eksploataciju.

Da uvijek vrijedi stara izreka: *Historia magistra vitae est*, ilustrativan primjer (a i relevantan za predmetno istraživanje), bio je s implementacijom standarda mobilnih radiokomunikacijskih sistema DECT (*Digital Enhanced Cordless Telecommunications*) [1], čije su prvobitne specifikacije objavljene ranih devedesetih, a koji je inicijalno bio predviđen kao ekonomični radijski pristupni sistem, gotovo ekskluzivno za aplikacije gdje se radiosignal prostire po zatvorenom, relativno malom prostoru (*indoor*), pa je vremenska disperzija vrlo mala. Da bi se smanjili troškovi implementacije, nije bila predviđena upotreba ekvalizatora, niti zaštitno kodiranje, pa je bio tražen odnos snaga signala i šuma (*SNR*) od minimalno 30 dB. Međutim, kada je, u svojoj zreloj fazi implementacije, DECT postao ozbiljnim kandidatom tehnologije za privatne poslovne mreže, te bežične pristupne mreže javnim telekomunikacijskim uslugama i PCS (*Personal Communications System*) sisteme, prema do tada općeprihvaćenom analitičkom modelu, predikcija performanse bila je, kako se kasnije pokazalo, previše pesimistična, pa je predstavljala inhibirajući faktor za spomenute nove DECT aplikacije, jer je implicirala da tada već implementirani DECT sistemi neće uvijek raditi sa zadovoljavajućom performansom niti u standardnoj *indoor* sredini, a kamoli za *outdoor* aplikacije, kakva je npr. radijska "pretplatnička petlja". Međutim, rezultati Monte Carlo simulacija kao i praktičnih mjerenja, pokazali su da je rezidualni intenzitet grešaka bio

značajno manjih vrijednosti od očekivanih po do tada općeprihvaćenom analitičkom modelu, pa je to, pored drugih nedostataka (do tada smatrane adekvatnom) analitičke predikcije maksimalne performanse prijenosa u DECT okruženju, bilo motiv za *naknadno* provedena opširna teorijska i praktična istraživanja performansi ovakvih sistema, u različitim uslovima kakvi su se, u međuvremenu, pojavili u praksi, ili ranije nisu bili adekvatno istraživački adresirani.

### 3. Motivacija za istraživanje prijenosa OFDM signala realnim disperzivnim kanalom

Konkretno, u navedenom slučaju je već spomenuta praksa lansiranja u eksploataciju novih mobilnih radiokomunikacijskih sistema, gotovo čim mrežni elementi prođu osnovne funkcionalne testove, u konačnici dovela do redefiniranja predmetnog standarda. (U novije vrijeme, ovakvih primjera „prerane“ implementacije ima i u drugim industrijama, recimo u automobilskoj, gdje se događaju do skoro nezamislivi propusti, čak i od strane vrhunskih proizvođača.)

Iz gore navedenog preglednog praktičnog stanja u vezi s pokrenutom migracijom radiokomunikacijske industrije prema četvrtoj generaciji, usprkos fantastičnom i gotovo nezabilježnom opusu naučnih i stručnih radova koji su obradili mnoge relevantne aspekte, ipak je realno pretpostaviti da još postoji prostor, a time i realni motivi za daljnja detaljnija istraživanja nekih problema, od kojih su modeliranje i predikcija performansi, koji su u fokusu ovih istraživanja, samo jedan segment.

Uostalom, prostor za istraživanje sistema s više nosilaca (da ne govorimo još i o više antena) čini se da doista vjerno opisuje jedan podnaslov iz [2]: „Tamo gdje se susreću Fourier i Shannon“, što u svakome inženjeru telekomunikacija budi profesionalnu znatiželju.

U usporedbi s CDMA tehnologijom, prednosti OFDM sistema uključuju korištenje brze Fourierove transformacije (FFT) za modulaciju i detekciju, praktično bez povećanja kompleksnosti predajnika i prijamnika (kao i raspoloživim aplikacijski specifičnim integriranim krugovima (ASIC)), te, kako je već rečeno, dobru spektralnu efikasnost, a od posebnog značaja je njihova otpornost na frekvencijski selektivno slabljenje signala - *fading*, odnosno višeputanski (*multipath*) prijem, koja proizilazi iz njihove inherentne osobine da frekvencijski selektivni kanal „podijele“ na veliki broj podkanala s ravnim *fadingom*. Dalje, budući da je, u odnosu na CDMA, OFDM signal lakše razloživ u frekvencijskoj domeni, jednostavnija je ekvalizacija, a OFDM sistemi prirodno su kompatibilniji s MIMO tehnikama, te konačno, imaju jednostavnije prekodiranje kojim se signal usklađuje s karakteristikama *multipath* radiokanala. (Uz korištenje diferencijalnog kodiranja, izostaje potreba za procjenom karakteristika kanala.)

#### 3.1. Nesavršenosti OFDM-MIMO sistema pri prijenosu realnim kanalom

Međutim, u realnim uslovima, OFDM ima i neke evidentne nedostatke, koji, premda uglavnom već istraženi, ipak, kako je već rečeno u prethodnom poglavlju ostavljaju prostor za (ako ne više, onda nadopunu ili barem verifikaciju ranijih) istraživanja.

Prvo, ortogonalnost između podnosilaca ne može se održati kada OFDM sistem radi po vremenski disperzivnom kanalu [3]. Zbog toga je uvedeno praktično produžavanje trajanja simbola tako što se, prije predaje, svakom simbolu dodaje tzv. ciklički prefiks (CP), koji je, u stvari, kopija kraja simbola, ubačena na početak. Kako CP zapravo pretvara linearnu konvoluciju predanog simbola i impulsnog odziva kanala, u cikličnu, ortogonalnost podnosilaca se može očuvati i u uvjetima vremenske disperzije kanala, sve dok je CP

dovoljno duži od impulsnog odziva [4]. Pomoću inverzne brze Fourierove transformacije, prijemnik može potpuno detektirati poslani signal, uz pretpostavku da je srednjekvadratno širenje (*delay spread*) snagom-ponderiranog profila kašnjenja (*power-delay profile*) u radijskom kanalu, kraće od dužine dodanog CP, koji efikasno kompenzira varijacije kašnjenja i gotovo potpuno eliminira interferenciju simbola. Dodavanjem CP se izbjegava i pojava međusobne interferencije podnosioca (*intercarrier interference – ICI*) [5], budući da kada bi se ovaj prostor ostavio nepopunjenim uvođenjem „prazne“ zaštitne zone (*guard time*) između simbola, kašnjenje ne bi više bilo jednako cijelom broju perioda nosioca (pa se pri integriranju ne bi poništavao utjecaj ostalih podkanala i sistem bi prestao biti ortogonalan) [3]. Na taj način, uzorkovanjem primljenog signala u optimalnom trenutku, prijemnik može odstraniti intersimbolsku interferenciju (ISI) usljed *multipath* vremenske disperzije radiokanala, a istovremeno, u frekvencijskom domenu, izbjegne međusobnu interferenciju podnosilaca (*intercarrier interference - ICI*). Cijena za ovo uvođenje redundance je, svakako, smanjenje efikasnosti korištenja snage predajnika.

U skladu sa smanjenjem vremena obrade okvira kod LTE standarda, ciklički prefiks, trajanja do 4,69  $\mu$ s smatra se dovoljno dugim u odnosu na *delay spread* za većinu scenarija pojedinačne predaje okvira (*unicast*), jer okviru dodaje samo jednostavnu nadogradnju zaglavlja. Smanjenjem broja OFDM simbola unutar podokvira, moguće je produženje cikličkog prefiksa na 16.7 ms, za vrlo velike ćelije, promjera većeg od 120 km, a koje imaju veliku vremensku disperziju. Usluge neusmjerenog odašiljanja (*broadcast*) šalju istovjetnu informaciju iz višestrukih (sinhronizovanih) osnovnih stanica te će se također okoristiti produženim cikličkim prefiksom kod rješavanja nesinhronizovanosti, pri čemu korisnički terminal primljeni signal s više osnovnih stanica, vidi kao *multipath* propagaciju koju iskorištava OFDMA prijemnik. Međutim, premali CP implicira da se dio vremenski disperznog impulsnog odziva kanala nalazi izvan CP prozora, što dovodi do postupne degradacije ortogonalnosti i gubitka kružne konvolucije. S obzirom da npr. LTE specificira 3 vrijednosti za CP, u skladu sa očekivanim vrijednostima disperzije u pojedinim propagacijskim uslovima, adekvatna procjena kanala svakako igra ključnu ulogu u ovom izboru.

Isto tako, u realnim uvjetima, OFDM je osjetljiv i na relativno male međusobne razlike frekvencija podnosilaca (*carrier frequency offset - CFO*) između lokalnih oscilatora predajnika i prijemnika i fazni šum, kao i na Dopplerov pomak frekvencija, koji uzrokuje ICI, na koga je tolerancija određena koherentnim frekvencijskim opsegom (a 3GPP je kategorizira kao nisku, srednju i visoku, s vrijednostima od 5, 70 i 300 Hz, respektivno, gdje izbor ovisi ne samo o ciljanom mobilnom korisniku (pješač, automobil), već i o tipu terena, odnosno odabranoj CP vrijednosti). Da se osigura dobra performansa OFDM sistema, CFO se mora tačno procijeniti i kompenzirati. Procjena CFO u uplinku OFDM-MIMO sistema može se temeljiti na konvencionalnoj metodi maksimalne vjerodostojnosti čija kompleksnost raste eksponencijalno s brojem korisnika, te ostavlja neotklonjivu grešku procjene [6,7]. S tim u vezi, različite druge metode procjene su predložene u literaturi [8-14].

Nadalje, OFDM signal ima veliki odnos srednje i vršne snage, pa tako i veliki dinamički opseg, što zahtijeva linearna pojačala ili dodatnu obradu signala pri modulaciji (zbog čega se u uzlaznom LTE linku, umjesto OFDMA, koristi SC-FDMA) [15-23]. Osim toga, dok CDMA koristi skrembliranje da osigura zaštitu od interćelijske interferencije na rubovima ćelija, OFDM nema takvu mogućnost, pa je neka vrsta frekvencijskog planiranja za ta područja nužna.

Ovdje ćemo samo spomenuti već izložene ideje za rješavanje problema velike vršne snage. Najjednostavniji način je amplitudsko limitiranje (*clipping*) signala, no tada se javlja intermodulacija koja povećava vjerovatnoću greške, odnosno radijsku interferenciju prema susjednim opsezima. Velike amplitude se također mogu reducirati množenjem s nepravouglim prozorima [3], uvođenjem odgovarajućeg zaštitnog kodiranja, ili pak, skrembliranjem, a jedna mogućnost je i primjena kodova koji direktno generišu OFDM signal koji ne može imati velike trenutne vrijednosti. Vremenska i frekvencija sinhronizacija predajnika i prijemnika ima izrazitu važnost kod OFDM sistema i utiče na degradaciju mjera performansi. Različite tehnike procjene vremenskog i frekvencijskog otklona za OFDM sisteme su predstavljene kao u, [24-29] i za OFDM MIMO [30-32].

Da bi navedene nesavršenosti uslijed uticaja kanala što manje reflektirale na mjere performansi sistema potrebno je izvršiti estimaciju parametara kanala kao jednog od najvažnijih procesa u dizajnu telekomunikacijskog sistema kome se posvećuje izrazita pažnja. Proces estimacije parametara kanala je izrazito važan zbog stohastičkih osobina kanala u vremenskom i frekvencijskom domenu. U [33] je dat pregled tehnika estimacije za OFDM SISO i OFDM MIMO sisteme. Tehnike estimacije se mogu podijeliti na dva tipa “*blind*” (koja koristi statističke osobine primljenih signala, ali zahtjeva veliku količinu podataka za analizu i imaju izrazitu degradaciju u slučaju “*fast fading*” kanala) i “*non-blind*” (koja zahtjeva poznavanje dijela prethodnih estimiranih parametara ili informacionog signala). Za OFDM-MIMO se više koriste “*non-blind*” estimatori i “*semi-blind*” estimatori u odnosu na “*blind*” estimatore.

Različiti pristupi estimaciji parametara kanala je slanje pilot nosilaca [34] koji se ne preklapaju na različitim antenama, pa se estimacija MIMO sistema svodi na estimaciju SISO sistema koji se može obaviti različitim algoritmima kao što su (*Least Squares-LS*, *Linear Minimum Mean Square Error-LMMSE*) uz određene modifikacije za optimizaciju. U slučaju pretpostavke da se stanje kanala ne mijenja u toku jednog trajanja simbola može se koristiti i preklapanje pilot nosilaca [35,36], ali tada dolazi do opadanja spektralne efikasnosti i povećanja (*Peak to Average Power Ratio-PAPR*). Posebno je interesantno analizirati promjenu ako dolazi do promjene parametara kanala unutar trajanja jednog simbola (slučaj brzog *fadinga-Fast Fading*). Drugi pristup je korištenje prostorno-vremenskih kodova i prostorno-frekvencijskih kodova [37-39], ali oni daju dobre performanse u slučaju kratkog impulsnog odziva, ali ne i u slučaju selektivnog kanala, pa se uticaj selektivnosti kanala na performanse nameće kao jedan od mogućih pravaca istraživanja. Kod [40-42] je zapaženo da se estimacija parametara kanala može svesti na estimaciju SISO u slučaju dovoljne prostorne razdvojenosti antena, ali ako taj uslov nije ispunjen potrebno je vršiti dodatno filtriranje i poznavanje PDP kanala. Potencijalni pravci istraživanja su estimacija profila snage kanala (*PDP-Power Delay Profile*), impulsnog odziva kanala (*CIR-Channel Impulse Response*) za slučaj selektivnih kanala te uticaj estimiranih parametara na mjere performansi. Takođe većina estimatora kanala OFDM-MIMO sistema zanemaruje efekat ICI i ISI zbog kretanja prijemnika i vanjskih interferencija. Potencijalno rješenje problema je aproksimacija ICI i ISI [43] ili tačnije modeliranje istih. Drugi pristup je korištenje informacija drugih blokova fizičkog sloja (estimacija vremenskog i frekvencijskog otklona).

U literaturi [44,45] razmatraju estimaciju parametara kanala u slučaju kada je CP (Cyclic Prefix) manji od dužine CIR, (uvođenje ICI i ISI), ali samo za slučaj UWB (*Ultra Wideband*) kanala, ne *outdoor* i *indoor* modele kanala mobilnih radiokomunikacija. Takođe nije istražen uticaj oblika (raspodjele) PDP ili CIR u vremenskom domenu na mjere performansi sistema.

Mjere performansi OFDM MIMO sistema sa prostorno vremenskim kodiranjem [46-48] su analizirane za *Rayleigh* i *Rice* kanale, dok su u manjoj mjeri analizirane kanali sa korelacijom [49-52], relejni kanali [54] i kanali opisani višeparametarskim raspodjelama [53].

Pored estimacije parametara kanala koji direktno utiču na degradaciju performansi prvog i konsekvantno viših slojeva, interesantno je posmatrati rad mehanizama na višim slojevima (2 i više) koji za zadatak imaju smanjivanje broja grešaka i performanse sistema, pa je potrebno dizajnirati protokole koji će sa što manjom kompleksnošću (vremenskom i hardverskom) dovoljno dobro odgovoriti (sa aspekta korisnika) na zadane uslove. Jedan od tih mehanizama je HARQ tehnika koja kombinuju ARQ i FEC (*Forward Error Correction*) u cilju osiguranja više pouzdanosti i propusnosti, i zbog navedenog se često koriste u modernim komunikacijskim sistemima. Sistemi sa HARQ se mogu klasificirati kao sistemi sa selektivnom povratnom spregom i iscrpno su istraživani za SISO sisteme [55,56]. Dva osnovna tipa HARQ tehnika su HARQ-CC i HARQ-IR opisane u [57]. Uvođenje HARQ u MIMO OFDM sisteme je pokrenulo novi talas istraživanja koja se mogu podijeliti u dvije kategorije: kompromis između diverziteta i multipleksiranja uz korištenje ARQ [58-60] ili združeni dizajn MIMO sistema i ARQ [61,62]. Dva pristupa dizajnu predajnika MIMO sistema su rearanžiranje bita/simbola za ARQ retransmisije [63,64] ili korištenje linearnog prekodera [65,66]. Performanse MIMO sistema za oba tipa HARQ tehnika su istraživane u [67,68] za *quasi-static* i *slow-fading* kanale, a sveobuhvatna analiza je urađena u [69] pri čemu je ostavljen prostor za buduća istraživanja u pravcu analize performansi HARQ za MIMO OFDM sistem u *fast fading* kanalu, odnosno kada se parametri kanala mijenjaju tokom trajanja jednog OFDM simbola, kao što je [70]. [71] analizira različite načine kombinovanja i bira optimalni način u zavisnosti od ograničenja sistema, ali ostavlja prostor za analizu razlike pouzdanosti ponovljenih bita kod retransmisija.

### 3.2. Procjena performansi OFDM-MIMO sistema pri prijenosu vremenski disperzivnim kanalom

Istraživanja u oblasti OFDM-MIMO sistema su doživjela izrazitu ekspanziju u posljednjih 15-tak godina, paralelno sa do sada nezabilježenom brzinom i širinom tehnološkog razvoja na polju telekomunikacija. Povećani zahtjevi za prijenosom informacija i pouzdanošću prijenosa su usmjerili pravce razvoja počevši od fizičkog sloja ka višim slojevima. Međutim, vjerovatnoća ili relativni intenzitet greške po bitu i/ili po simbolu je osnovna mjera kvaliteta prijenosa na fizičkom sloju komunikacijskog sistema, ali i ključni povratni kontrolni parametar u savremenim i perspektivnim adaptivnim radiosistemima, kada je *online* procjena njegovih relativno velikih vrijednosti, sa minimalnom *a priori* informacijom, sve češći zahtjev.

OFDM osigurava *prosječno* dobar prijenos, ali neki od relativno velikog broja podkanala, mogu biti pogođeni dubokim *fadingom*, tako da u njima BER može dostići gotovo vrijednost od 0,5. Ovo se može popraviti primjenom zaštitnog kodiranja, korištenjem više podnosilaca, uz odgovarajući *interleaving*, što bi uspješno djelovalo i u slučaju kada duboki *fading* zahvati više podnosioca. Na taj način, performanse OFDM sistema ne zavise od snage najslabijeg podnosioca, već od srednje primljene snage. Modeliranje kanala i predikcija performansi prijenosa su vrlo često primjenjivani u analizi komunikacijskih mreža, što vrijedi i za mreže koje koriste radijski fizički sloj.

Zbog nepostojanja programski baziranog upravljanja radijskim fizičkim slojem, modeliranje i analiza slojeva iznad njega, postaju iznimno popularni [72-80]. Ovakvi kanali, koji se u



literaturi često nazivaju rezidualnim [72] i MAC-MAC [73] kanalima, određeni su greškama koje nisu ispravljene od strane fizičkog sloja, pa daju pogled iz perspektive viših slojeva na radijski kanal. Važna metrika koja se zahtijeva od strane protokola viših slojeva i aplikacija, je robusna predikcija stanja kanala u realnom vremenu, a posebno predikcija BER-a po rezidualnom kanalu, koja može olakšati projektiranje, procjenu performanse i podešavanje parametara mnogih radiokomunikacijskih protokola i aplikacija.

Tako npr. aplikacije s promjenjivom brzinom prijenosa i protokoli linka podataka mogu koristiti tačnu BER predikciju da prilagode svoje brzine izvornog i kanalnog kodiranja u skladu s predviđenim stanjem kanala. Radijski protokoli za upravljanje zagušenjem mogu koristiti predikciju BER-a da bi diferencirali gubitke usljed zagušenja od onih usljed kanalskih grešaka. Pouzdani usmjerivački algoritmi i multimedijalne aplikacije mogu koristiti BER predikcije da bi odabrali pouzdane radijske putanje.

Konvencionalni način procjene stanja kanala je pomoću bita pilota na prijemniku, ali ovakva strategija rezultira rasipanjem dragocjenog radijskog frekvencijskog opsega. Zbog toga postoji rastući interes za *online* procjenu i predikciju BER-a korištenjem ostalih podataka o fizičkom sloju radiokanala, a kakav je npr. SNR [81], [82]. Budući da se rezidualni kanali promatraju nakon obrade na fizičkom sloju, informacija o kanalu, kakva je SNR, procijenjen na fizičkom sloju, na raspolaganju je samo od paketa do paketa višim slojevima, gdje je rezidualni kanal prisutan. Međutim, novija istraživanja potvrđuju da čak i ovakva „gruba“ usputna informacija može biti vrlo korisna u predikciji BER-a [83].

No, ovako definisani rezidualni BER (RBER) karakterizira vjerovatnoću da će se dogoditi bitska greška, ali da neće biti otkrivena kao takva. Kod projektiranja digitalnih komunikacijskih sistema, maksimalni prihvatljivi RBER se može koristiti, zajedno s drugim metrikama kvaliteta, da se proračuna minimalni prihvatljivi SNR sistema. Ovo dalje određuje minimalne zahtjeve fizikalnim i elektroničkim sklopovima predajnika i prijemnika, Mnogi radovi su se bavili procjenom performanse OFDM-MIMO sistema u prisustvu praktičnih nesavršenosti kakve su, npr. greške u sinhronizaciji ili procjeni kanala [84-85] budući da su od kritičnog značaja, posebno ako se koristi višesimbolni modulacijski postupak radi postizanja visoke spektralne efikasnosti.

No, kako je već nagoviješteno u uvodnom dijelu, centralno mjesto ovih istraživanja treba biti razvoj analitičkog modela za procjenu rezidualnog BER-a (i BER-a) na fizičkom sloju, analogno već spomenutom analitičkom 2G modelu za prijenos MSK signala kanalom male vremenske disperzije [1, 86-87], ali sada za uslove OFDM-MIMO sistema, ali opet uz vrlo visoke vrijednosti SNR, pri čemu treba, sada u novim uvjetima, pratiti performansu kanala (BER) za različite kombinacije vrijednosti parametara sistema i nesavršenosti koje su naprijed obrađene - osobito kada se vrijednosti CP, CFO i Dopplerovog pomaka približavaju svojim granicama tolerancije, pri čemu treba obratiti na njihove zajedničke i sinergijske efekte. Ova ispitivanja treba izvesti za različite (karakteristične) profile kašnjenja, kako bi se pokušala ustanoviti eventualna zavisnost BER-a od *oblika* profila, [1, 86-87], gdje je, za slučaj 2G sistema, pokazano da je sami *delay spread* nedovoljan karakterizirajući parametar disperzije u odnosu na performansu, te identificirani za predikciju BER-a relevantni parametri oblika profila, čije poznavanje ne samo omogućuje tačniju procjenu BER-a, već omogućuju i određivanje optimalnog trenutka uzorkovanja simbola.

No, budući da je evolucijom radijskog sučelja ka 4G izrazito povećana interakcija među slojevima, spomenuti i za ovo istraživanje referentni 2G model [1, 86-87] se treba proširiti

barem na sloj linka, što uključuje i procjenu rezidualnog BLER-a na link sloju. Naime, prema klasičnom slojevitom komunikacijskom modelu, svaki sloj OSI-ISO ili TCP/IP protokolskog stoga (*stack*) radi neovisno od ostalih, s kojima (susjednima) je statično povezan interfejsima koja su neovisna od individualnih mrežnih ograničenja i aplikacija, što je omogućilo interoperabilnost i značajno pojednostavilo projektiranje i izvedbu mreža, te dovelo do razvoja robustnih i skalabilnih internetskih protokola. Međutim, za razliku od fiksnih mreža, u kojima se QoS može garantirati neovisnim optimiziranjem svakoga sloja OSI modela, u radijskim mrežama, ovakav pristup ograničava performansu ukupne mrežne arhitekture, usljed nedostatka koordinacije među protokolima, osobito stoga što sama priroda fizičkog prijenosnog medija (uključujući vremensku promjenjivost, ograničeni propusni opseg, te propagacijske nesavršenosti) uvodi nekoliko ozbiljnih ograničenja performanse TCP/IP protokola, koji su bili predviđeni za fiksne mreže. Dakle, budući da, u radijskim mrežama prisutna jaka međupovezanost slojeva ima za posljedicu neefikasno slojevito projektovanje mreže, odnosno njenu nefleksibilnost i podoptimalnost, posebno kada je energija ograničena, ili kada aplikacija zahtijeva široki propusni opseg i/ili kratko vrijeme prijenosa, da bi se zadovoljili ovi zahtjevi, potrebno je projektirati mrežu na način da se ostvari adaptibilnost i optimalnost kroz više slojeva protokolskog *stacka*, tako da se paradigma slojevitog projektiranja modificira tzv. međuslojnim (*cross-layer*) projektovanjem, gdje je osnovna ideja održavanje funkcionalnosti originalnih slojeva, ali se dozvoljava koordinacija, interakcija i zajedničko projektiranje protokola koji prelaze granice različitih slojeva. Tako npr. sloj linka podataka može prilagoditi brzinu prijenosa, energiju i kod zahtjevima aplikacije, za data kanalska i mrežna ograničenja, a međuzavisno se adaptiraju: MAC sloj (na temelju interferencijskih, vremenskih odzivnih i prioritetskih ograničenja), adaptibilni rutirajući protokoli (polazeći od linkovnih, mrežnih i prometnih ograničenja), te, konačno, aplikacijski protokoli, koristeći „mekani“ QoS koji se adaptira prema željenoj kvaliteti na aplikacijskoj razini.

Dakle, kako je ideja međuslojne razmjene informacija da se koriste različiti parametri sa različitih slojeva za zajedničku optimizaciju protokola uzduž protokolskog *stacka*, važno je da se protokoli svakoga sloja ne rade u izolaciji, već unutar integralnog i hijerarhijskog okvira da se iskoriste njihove međuzavisnosti koje se temelje na adaptibilnosti *svakoga* sloja, u odnosu na opća sistemska ograničenja, kakva su energetska učinkovitost, mobilnost i tip aplikacija koje mreža podržava.

S tim u vezi, sve više se nameće kao nužan integralni pristup ispitivanju performansi i QoS, što podrazumijeva koreliranje između performansi individualnih slojeva modela, s ciljem formuliranja i verifikacije na analitičkoj, simulacijskoj i praktičnoj razini, integralnog QoS kriterija za tipične mrežne aplikacije mobilnih radijskih mreža, nove generacije. Dakle, budući da postoji direktna povezanost fizičkog i viših slojeva, odabire se holistički pristup: održava se slojna struktura protokola, ali se dozvoljava navedena interakcija između slojeva, te vrši međuslojna optimizacija.

Primijenjeno na predikciju performansi, ovakav pristup implicira ne samo procjenu intenziteta grešaka okvira (FER), odnosno BLER-a, već i potrebu analize BLER/BER korelacije, u smislu određivanja međuzavisnosti karakteristika fizičkog sloja (BER), MAC sloja (kašnjenje pristupa, propusnost), te mrežnog sloja (kašnjenje, propusnost, vjerovatnoća blokiranja, vjerovatnoća ispada). (Kada bi bitske greške bile međusobno neovisni i identično raspodijeljeni događaji, BER i FER bi bili vezani sljedećom jednakosti:  $FER = 1 - (1 - BER)^{\text{bita/okviru}}$ )

#### 4. Osnovni ciljevi istraživanja:

Ciljevi istraživanja se mogu podijeliti u sljedeće cjeline:

1. Identificirati parametre i nesavršenosti realnih OFDM-MIMO sistema na fizičkom sloju, koji utječu na njegovu vršnu performansu - rezidualni intenzitet bitskih grešaka (R)BER, uključujući i izobličenja vremenski disperzivnog prijenosnog kanala i izvršiti korelaciju sa utjecajem estimacije kanala na parametre performansi OFDM-MIMO sistema
2. Razviti odgovarajući analitički model za predikciju (R)BER fizičkog sloja ciljanog sistema
3. Identificirati relevantne kombinacije parametara protokola ciljanog *stacka*
4. Identificirati koja informacija se izmjenjuje između relevantnih protokolskih slojeva, te kako se ukupna ograničenja sistema i njegove karakteristike inkorporiraju u protokol svakoga sloja?
5. Razviti odgovarajući analitički model za predikciju (R)BLER sloja linka podataka
6. Paralelno razviti odgovarajuće simulacijske modele
7. Komparativnim analizama i sinergijom analitičkih rezultata i programskih simulacija, ispitati da li je ispitivano (međuslojno korelirano) rješenje optimalno u odnosu na sistemsku performansu i aplikacijski QoS.
8. Validnost analitičkog modela i simulatora potvrditi eksperimentalnim putem u kontrolisanom okruženju.

#### 5. Plan istraživanja:

Predviđeni plan istraživanja slijedi gore navedene postavljene ciljeve. Najprije je potrebno postaviti formalni okvir za identifikaciju i modeliranje interakcija koje prelaze granice slojeva standardnog protokolskog *stacka*, sistematičnim proučavanjem međuslojnih efekata i njihovom interpretacijom odgovarajućim kvantitativnim modelima (npr. Markovljevom analizom, teorijom čekanja ili numeričkim aproksimacijama), pri tome identificirajući korelacije između različitih parametara, te ih pogodno opisujući modelom koji mora odgovoriti na sljedeća fundamentalna pitanja:

- Koje informacije se izmjenjuju između protokolskih slojeva i kakva (kolika) je interakcija među njima u zavisnosti od primijenjenih metoda estimacije?
- Kako se ukupna ograničenja sistema i njegove karakteristike preslikavaju u protokole i parametre svakoga sloja?
- Da li je projektovano međuslojno rješenje i optimalno u odnosu na sistemsku performansu i aplikacijski QoS ?

## 6. Metode istraživanja:

U skladu s identificiranim ciljevima i zadacima, metode istraživanja se zasnivaju na teoretskim razmatranjima, računarskoj simulaciji i, u skladu s mogućnostima, odnosno raspoloživosti potrebne opreme, eksperimentalnim mjerenjima na realnom sistemu.

Teoretska razmatranja obuhvataju:

- Analizu postojećih OFDM-MIMO sistema u vremenski disperzivnim kanalima
- Analiza algoritama za estimaciju kanala, kvantificiranje utjecaja izabranog algoritama na parametre performansi OFDM-MIMO sistema
- Modeliranje višeslojne korelacije između mjera performansi OFDM-MIMO sistema (sa posebnim osvrtom na (R)BER i (R)BLER), uzimajući u obzir uticaj procese estimacije različitih parametara kanala i OFDM-MIMO sistema

Rezultat teoretskih razmatranja je odgovarajući analitički model za mjere performansi i njihovu korelaciju kroz slojeve, čija verifikacija i validacija će se izvršiti simulacijom u odgovarajućem programskom paketu. Sljedeći nivo verifikacije predviđa eksperimentalna mjerenjima realnog sistema u kontrolisanim uslovima.

## 7. Očekivani izvorni naučni doprinos disertacije:

I pored brojnih napora koje čine istraživači, cijela oblast pruža mnogo prostora za nove ideje i istraživanja. Ovaj rad ima za cilj ući u oblast OFDM-MIMO sistema sa kompleksnijim ograničenjima nego do sada u cilju postavljanja što vjernijeg i šire upotrebljivog modela MIMO sistema. U tom smislu potencijalni doprinosi doktorske disertacije su:

- Razvijen odgovarajući analitički model i izveden(i) eksplicitni izraz(i) za predikciju (kodiranog i nekodiranog) (R)BER-a u funkciji identificiranih relevantnih faktora, pored srednjom-snom-ponderiranog srednjekvadratnog širenja (*delay spread*) profila kašnjenja kanala (*power-delay profile*), a kakav je npr. što je npr. *oblik* profila, čime bi se otvorila mogućnost za korektnije kvalificiranje različitih profila kanala u odnosu na očekivane performanse na fizičkom sloju, odnosno omogućila distinkcija između (vrlo) različitih kanala s jednakim *delay spread* vrijednostima i ispitati korelaciju metoda estimacije i mjera performansi.
- Razvijen odgovarajući analitički model i izveden eksplicitni izraz za predikciju (rezidualnog) intenziteta blokovskih grešaka (R)BLER na sloju podatkovnog linka, uzimajući u obzir HARQ funkcionalnosti, a u funkciji performansi fizičkog kanala (RBER), čime bi se omogućio analitički eksplicitan i brzi način za procjenu i verifikaciju dostignutog stepena međuslojne (*cross-layer*) optimizacije ukupne performanse sistema

## 8. Polazna literatura:

1. Vladimir Lipovac, *Rezidualni intenzitet bitskih grešaka mobilnog radiokomunikacijskog kanala, male vremenske disperzije* Sarajevo, ISBN: 9958-629-14-3, Elektrotehnički fakultet u Sarajevu, 2005.
2. Z. Wang, G.B. Giannakis, "Wireless Multicarrier Communications", *IEEE Signal. Proc. Mag.*, vol. 17 (2000), no. 3., pp. 29-48
3. A. Peled, A. Ruiz, "Frequency Domain Data Transmission Using Reduced Computational Complexity Algorithms", *Proc. IEEE Int. Conf. ASSP*, Denver, 1980., pp. 964-967
4. Chong-Ren Sheu, Ming-Chien Tseng, Ching-Yung Chen, Hsin-Piao Lin, "A Low-Complexity Concatenated ICI Cancellation Scheme for High-Mobility OFDM Systems", *Proc. of IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC 2007*, pp. 1389-1393
5. R. van Nee, R. Prasad, *OFDM Wireless Multimedia Communications*, Artech House, Boston, 2000.
6. P. H. Moose, "Technique for orthogonal frequency division multiplexing frequency offset correction," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 42, no. 10, pp. 2908–2914, 1994.
7. T. M. Schmidl and D. C. Cox, "Robust frequency and timing synchronization for OFDM," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 45, no. 12, pp. 1613–1621, 1997.
8. O. Besson and P. Stoica, "On parameter estimation of MIMO flat-fading channels with frequency offsets," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 51, no. 3, pp. 602–613, 2003.
9. Y. Yao and T. S. Ng, "Correlation-based frequency offset estimation in MIMO system," in *Proceedings of the 58th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC '03)*, vol. 1, pp. 438–442, October 2003.
10. Y. Zeng, R. A. Leyman, and T. S. Ng, "Joint semiblind frequency offset and channel estimation for multiuser MIMO-OFDM uplink," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 55, no. 12, pp. 2270–2278, 2007.
11. S. Sezginer, P. Bianchi, and W. Hachem, "Asymptotic Cramer- Rao bounds and training design for uplink MIMO-OFDMA systems with frequency offsets," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 55, no. 7, pp. 3606–3622, 2007.
12. S. Sezginer and P. Bianchi, "Asymptotically efficient reduced complexity frequency offset and channel estimators for uplink MIMO-OFDMA systems," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 56, no. 3, pp. 964–979, 2008.
13. J. Chen, Y. C. Wu, S. Ma, and T. S. Ng, "Joint CFO and channel estimation for multiuser MIMO-OFDM systems with optimal training sequences," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 56, no. 8, pp. 4008–4019, 2008.
14. M. Morelli and U. Mengali, "Carrier-frequency estimation for transmissions over selective channels," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 48, no. 9, pp. 1580–1589, 2000. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 11]
15. S. Shepherd, P. van Eetvelt, C. Wyatt-Millington, and S. Barton, "Simple coding scheme to reduce peak factor in QPSK multicarrier modulation," *Electronics Letters*, vol. 31, pp. 1131–1132, July 1995.
16. D. Wulich, "Reduction of peak to mean ratio of multicarrier modulation by cyclic coding," *Electronics Letters*, vol. 32, pp. 432–433, 1996.

17. R. Dinis and A. Gusmao, "Performance evaluation of OFDM transmission with conventional and 2-branch combining power amplification schemes," in *Proceeding of IEEE Global Telecommunications Conference, Globecom 96*, (London, UK), pp. 734– 739, IEEE, 18–22 November 1996.
18. B. H. Sharif and M. Khalaj ., "Peak to mean envelope power ratio of oversampled OFDM signals: An analytical approach," in *Proc. of 2001 IEEE International Conf. on Commun.*, 2001, pp. 1476 -1480.
19. Anh Tai Ho; Helard, J.-F.; Nasser, Y.; , "A novel combined PAPR reduction and channel estimation approach for OFDM systems," *Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), 2010 IEEE International Symposium on* , vol., no., pp.1-5, 24-26 March 2010
20. Jin Soo Wang; Sung Hyun Hwang; Ickho Song; Yun Hee Kim;, "Reduction of PAPR without Side Information for Frequency Switched Transmit Diversity-Based MIMO-OFDM Systems" *IEEE Communications Letters*, Dec. 2010
21. Umeda, S.; Suyama, S.; Suzuki, H.; Fukawa, K., PAPR Reduction Method for Block Diagonalization in Multiuser MIMO-OFDM Systems, *Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Spring)*, 2010
22. Wei Xuefeng, A new algorithm for reduction of peak-to-average power ratio in MIMO-OFDM system, *Electric Information and Control Engineering (ICEICE)*, 2011 International Conference on, May 2011
23. Sivakumar, P.; Sangeetha, S.; Rajaram, M.; PAPR reduction in OFDM for SC-FDMA channels, *International Conference on Signal Processing, Communication, Computing and Networking Technologies (ICSCCN)*, 2011, Sep 2011]
24. H. Nikookar and R. Prasad, "On the sensitivity of multicarrier transmission over multipath channels to phase noise and frequency offset," in *Proceedings of IEEE International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC'96)*, (Taipei, Taiwan), pp. 68–72, IEEE, 15–18 October 1996.
25. W. Warner and C. Leung, "OFDM/FM frame synchronization for mobile radio data communication," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 42, pp. 302–313, August 1993.
26. H. Sari, G. Karam, and I. Jeanclaude, "Transmission techniques for digital terrestrial TV broadcasting," *IEEE Communications Magazine*, pp. 100–109, February 1995.
27. F. Daffara and O. Adami, "A new frequency detector for orthogonal multicarrier transmission techniques," in *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC'95)*, (Chicago, USA), pp. 804–809, IEEE, 15–28 July 1995.
28. M. Sandell, J.-J. van de Beek, and P. B. orjesson, "Timing and frequency synchronisation in OFDM systems using the cyclic prefix," in *Proceedings of International Symposium on Synchronisation*, (Essen, Germany), pp. 16–19, 14–15 December 1995.
29. Feifei Gao; Nallanathan, A., "Identifiability of Training Based CFO Estimation over Frequency Selective Channels", *IEEE International Conference on Communications, ICC '06*. June 2006, pp. 1421 - 1426
30. Xu He; Xiaoyong Peng; Yue Xiao; Shaoqian Li; A Novel Time and Frequency Synchronization Technique for MIMO-OFDM System, *Fourth Advanced International Conference on Telecommunications, AICT '08.*, Jun 2008
31. Feng Wan; Wei-Ping Zhu; Swamy, M.N.S.; Frequency-domain estimation of time-domain correlation matrix for MIMO-OFDM systems, *IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, Aug. 2010

32. Simon, E.P.; Ros, L.; Hijazi, H.; Jin Fang; Gaillot, D.P.; Berbineau, M., Joint Carrier Frequency Offset and Fast Time-Varying Channel Estimation for MIMO-OFDM Systems, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Mar 2011
33. Mehmet Kemal Ozdemir, Huseyin Arslan, "Channel Estimation for Wireless OFDM Systems", *IEEE Communication Surveys and Tutorials*, Second Quarter 2007, Vol 9, No. 2, pp 18-48.
34. W. G. Jeon, K. H. Paik, and Y. S. Cho, "An Efficient Channel Estimation Technique for OFDM Systems with Transmitter Diversity," *Proc. IEEE Int'l. Symp. Personal, Indoor and Mobile Radio Commun.*, vol. 2, London, UK, Sept. 2000, pp. 1246–50.
35. M. Shin, H. Lee, and C. Lee, "Enhanced Channel-Estimation Technique for MIMO-OFDM Systems," *IEEE Trans. Vehic. Tech.*, vol. 53, no. 1, Jan. 2004, pp. 261–65.
36. M. Shin *et al.*, "A New Training Symbol Structure to Enhance the Performance of Channel Estimation for MIMO-OFDM Systems," *Proc. IEEE Int'l. Conf. Acoust., Speech, and Signal Processing*, vol. 4, Hong Kong, China, Apr. 2003, pp. 397–400.
37. S. Liang and W. Wu, "Channel Estimation Based on Pilot Subcarrier in Space-Time Block Coded OFDM System," *Proc. IEEE Int'l. Conf. Commun. Technol.*, vol. 2, Beijing, China, Apr. 2003, pp. 9–11.
38. H. Minn, D. I. Kim, and V. K. Bhargava, "A Reduced Complexity Channel Estimation for OFDM Systems with Transmit Diversity in Mobile Wireless Channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, no. 5, May 2002, pp. 799–807.
39. Marcello Cicerone, Osvaldo Simeone, Umberto Spagnolini, "Channel Estimation for MIMO-OFDM Systems by Modal Analysis/Filtering", *IEEE Transactions On Communications*, Vol. 54, No. 11, Nov. 2006, pp. 2062-74
40. G. Auer, "Channel Estimation for OFDM Systems with Multiple Transmit Antennas by Filtering in Time and Frequency," *Proc. IEEE Vehic. Tech. Conf.*, vol. 2, Orlando, FL, Oct. 2003, pp. 1204–08.
41. G. Auer, "Channel Estimation in Two Dimensions for OFDM Systems with Multiple Transmit Antennas," *Proc. IEEE Globecom Conf.*, vol. 1, San Francisco, CA, Dec. 2003, pp. 322–26.
42. G. Auer, "Analysis of Pilot-Symbol Aided Channel Estimation for OFDM Systems with Multiple Transmit Antennas," *Proc. IEEE Int'l. Conf. Commun.*, vol. 6, Paris, France, June 2004, pp. 3221–25.
43. H. Q. Lai, W. P. Siri Wongpairat, and K. J. Ray Liu, "Performance analysis of multiband OFDM UWB system with imperfect synchronization and intersymbol interference," *IEEE J. Select. Topic Signal Processing, Special Issue Performance Limits Ultra-Wideband Systems*, vol. 1, no. 3, pp. 521-534, Oct. 2007.
44. Juan I. Montojo, Laurence B. Milstein, "Channel Estimation for Non-Ideal OFDM Systems", *IEEE Transactions On Communications*, Vol. 58, No. 1, Jan. 2010, pp. 146-56
45. Juan I. Montojo, Laurence B. Milstein, "Effects of Imperfections on the Performance of OFDM Systems", *IEEE Transactions On Communications*, Vol. 57, No. 7, July. 2009, pp. 2060-70
46. S. Alamouti, "A Simple Transmitter Diversity Technique for Wireless Communications", *IEEE Journal on Selected Areas of Communications, Special Issue on Signal Processing for Wireless Communications*, vol. 16, no. 8, pp. 1451-1458, Oct. 1998.
47. Mohinder Jankiraman, "*Space-Time Codes and MIMO Systems*", Artech House 2004
48. Hamid Jafarkhani, "*Space-Time Coding Theory and Practice*", Cambridge University Press 2005
49. Shi Jin, Xiao Li, Xiqi Gao, "Statistical Transmit Antenna Selection for Correlated Rayleigh Fading MIMO Channels", *IEEE 63rd Vehicular Technology Conference, 2006. VTC 2006-Spring*, p. 1665 – 1669

50. Aissa, S.; Aniba, G., "WLC16-5: BER Analysis of STBC with Packet Combining in MIMO Rayleigh Fading Channels: LLR-Based Approach", IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM '06.
51. Kotecha, J.H., Sayeed, A.M., "Transmit signal design for optimal estimation of correlated MIMO channels", IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 52, No. 2, p. 546 – 557, Feb. 2004
52. M. T. Ivrlac, T. P. Kurpjuhn, C. Brunner, W. Utschick, "Efficient use of fading correlation in MIMO systems", 54th VTC, Atlantic City, USA, vol. 4, pp. 2763-2767, Oct. 2001.
53. M. D. Yacoub, "The  $\kappa$ - $\mu$  Distribution and the  $\eta$ - $\mu$  Distribution", in *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 49, No. 1, February 2007, pp. 68 – 81.
54. Ting Kong; Yingbo Hua, Optimal Design of Source and Relay Pilots for MIMO Relay Channel Estimation, IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 59. No.9 p.4438 – 4446, September 2011
55. C. Shen, T. Liu, and M. Fitz, "Aggressive transmission with ARQ in quasi-static fading channels," in *Proc. IEEE Int. Conf. Communications*, May 2008, pp. 1092–1097.
56. C. Shen, T. Liu, and M. Fitz, "On the average rate performance of Hybrid-ARQ in quasi-static fading channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 57, no. 11, pp. 3339–3352, Nov. 2009.
57. S. Wicker, "Error Control Systems for Digital Communication and Storage", Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1995.
58. L. Zheng and D. Tse, "Diversity and multiplexing: A fundamental tradeoff in multiple-antenna channels," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol.49, no. 5, pp. 1073–1096, May 2003.
59. H. El Gamal, G. Caire, and M. O. Damen, "The MIMO ARQ channel: Diversity-multiplexing-delay tradeoff," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 52, no. 8, pp. 3601–3621, Aug. 2006.
60. T. Kim and M. Skoglund, "Diversity-Multiplexing tradeoff in MIMO channels with partial CSIT," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 53, no. 8, pp. 2743–2759, Aug. 2007.
61. E. N. Onggosanusi, A. G. Dabak, Y. Hui, and G. Jeong, "Hybrid ARQ transmission and combining for MIMO systems," in *Proc. IEEE Int. Conf. Communications*, May 2003, vol. 5, pp. 3205–3209.
62. M.-K. Oh, Y.-H. Kwon, and D.-J. Park, "Efficient Hybrid ARQ with space-time coding and low-complexity decoding," in *Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing*, May 2004, vol. 4, pp. 589–592.
63. T. Koike, H. Murata, and S. Yoshida, "Hybrid ARQ scheme suitable for coded MIMO transmission," in *Proc. IEEE Int. Conf. Communications*, Jun. 2004, vol. 5, pp. 2919–2923.
64. S. Moon, H. Park, A. Goldsmith, and M. Oh, "Bit rearrangement for MIMO retransmissions," in *Proc. IEEE Global Telecommunications Conf.*, Nov. 2007, pp. 3509–3513.
65. A. V. Nguyen and M. A. Ingram, "Hybrid ARQ protocols using spacetime codes," in *Proc. IEEE 54th Vehicular Technology Conf.*, 2001, vol. 4, pp. 2364–2368.
66. K. Zheng, H. Long, L. Wang, and W. Wang, "Linear space-time precoder with Hybrid ARQ transmission," in *Proc. IEEE Global Telecommunications Conf.*, Nov. 2007, pp. 3543–3547.
67. Y. Liu, V. K. N. Lau, O. Y. Takeshita, and M. P. Fitz, "Optimal rate allocation for superposition coding in quasi-static fading channels," in *Proc. IEEE Int. Symp. Information Theory*, Jun.–Jul. 2002, p. 111.
68. S. Shamai and A. Steiner, "A broadcast approach for a single-user slowly fading MIMO channel," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 49, no. 10, pp. 2617–2635, Oct. 2003.,



69. Cong Shen, Michael P. Fitz, "Hybrid ARQ in Multiple-Antenna Slow Fading Channels: Performance Limits and Optimal Linear Dispersion Code Design", *IEEE Transactions On Information Theory*, Vol. 57, No. 9, September 2011, pp. 5863-83
70. Soomin Ko, Hanbyul Seo, Byeong Gi Lee, "Estimation-Based Retransmission Mode Selection for Reinforced HARQ Operation in MIMO Systems", *IEEE Transactions On Wireless Communications*, Vol. 8, No. 9, September 2009, pp. 4623-4633
71. Edward W. Jang, Jungwon Lee, Hui-Ling Lou, John M. Cioffi, "On the Combining Schemes for MIMO Systems with Hybrid ARQ", *IEEE Transactions On Wireless Communications*, Vol. 8, No. 2, Feb. 2009, pp. 836-42
72. M. Zorzi and R. R. Rao, "On the statistics of block errors in bursty channels," *IEEE Trans. Com.*, (45)6, 660–667, June 1997.
73. S. A. Khayam and H. Radha, "Linear-complexity models for wireless MAC-to-MAC channels," *ACM Wireless Networks (WINET)*, (11)5, 543–555, Sep. 2005.
74. S. A. Khayam and H. Radha, "On long-range dependence in wireless residual channels," *CISS*, Mar. 2005.
75. A. Konrad, B. Y. Zhao, A. D. Joseph, and R. Ludwig, "A Markov-based channel model algorithm for wireless networks," *ACM Wireless Net.*, (9), 189–199, May 2003.
76. P. Ji, B. Liu, D. Towsley, Z. Ge, and J. Kurose, "Modeling frame-level errors in GSM wireless channels," *Performance Evaluation*, (55)1–2, 165–181, Jan. 2004.
77. G. T. Nguyen, R. H. Katz, B. Noble, and M. Satyanarayanan, "A tracebased approach for modeling wireless channel behavior," *Winter Sim.Conf.*, 1996.
78. H. Balakrishnan and R. H. Katz, "Explicit loss notification and wireless web performance," *IEEE Globecom*, 1998.
79. A. Willig, M. Kubisch, C. Hoene, and A. Wolisz, "Measurements of a wireless link in an industrial environment using and 802.11-compliant physical layer," *IEEE Trans. Indus. Elec.*, (49)6, 1265–1282, Dec. 2002.
80. C. Jiao, L. Schwiebert, and B. Xu, "On modeling the packet error statistics in bursty channels," *IEEE LCN*, Nov. 2002.
81. H. S. Wang and N. Maoyeri, "Finite-state Markov channel – A useful model for radio communication," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, (44)1, 163–171, Feb. 1995.
82. Q. Zhang and S. A. Kassam, "Finite-state Markov model for rayleigh fading channels," *IEEE Trans. Comm.*, (41)11, 1688–1692, Nov. 1999.
83. S. Karande, U. Parrikar, K. Misra, and H. Radha, "On modeling of 802.11b residue errors," *CISS*, Mar. 2006.
84. G. L. Stuber, J. R. Barry, S. W. McLaughlin, Y. G. Li, M. A. Ingram, and T. G. Pratt, "Broadband MIMO-OFDM wireless communications," *Proc. IEEE*, vol. 92, no. 2, pp. 271–294, Feb. 2004.
85. A. van Zelst and T. C. W. Schenk, "Implementation of a MIMO OFDM-based wireless LAN system," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 52, no. 2, pp. 483–494, Feb. 2004.
86. Vladimir Lipovac, "Impact of Transmitter and Receiver Filtering on the Phase and Error Floor of MSK Signal Indoor Transmission", *European Transactions on Telecommunications* 2004, Vol 15, no. 1, pp. 49-54;
87. Vladimir Lipovac, "On the Error Floor of MSK Signal Transmission over a Multipath Channel with Small Time Dispersion", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. vol. 49 (2000) , no 1, pp 117-129;