

# Eksperimentalna analiza realno ostvarivih protoka u infrastrukturnoj IEEE 802.11n WLAN mreži

Mladen Koprivica, Nenad Pitra, Nataša Nešković, Aleksandar Nešković

Laboratorija za radio-komunikacije, Katedra za telekomunikacije  
Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu  
Beograd, Srbija

[kopra@etf.rs](mailto:kopra@etf.rs), [pitranenad@gmail.com](mailto:pitranenad@gmail.com), [natasha@etf.rs](mailto:natasha@etf.rs), [neshko@etf.rs](mailto:neshko@etf.rs)

**Sažetak**— U okviru ovog rada izvršena je eksperimentalna analiza performansi IEEE 802.11n WLAN mreže merenjem maksimalne i srednje vrednosti realno ostvarivih TCP protoka u zavisnosti od odnosa korisnog signala i šuma na ulazu u prijemnik. Dobijeni rezultati pokazuju da se protok povećava sa povećavanjem vrednosti odnosa signal-šum, kao i da se smanjuje sa povećavanjem broja klijenata. Najveća izmerena vrednost realno ostvarenog protoka iznosi približno 130Mb/s, što je oko 48% maksimalnog nominalnog protoka na fizičkom sloju za razmatrani slučaj.

**Ključne riječi**— IEEE 802.11n; realno ostvarivi protok; WLAN mreža;

## I. UVOD

Svakodnevni razvoj novih korisničkih servisa, kao i veliki porast broja korisnika doveli su do potrebe za bržim i kvalitetnijim prenosom podataka korišćenjem WLAN (*Wireless Local Area Network*) mreža. Da bi se postiglo zadovoljenje ovih potreba definisan je IEEE 802.11n standard [1]-[3]. Uvođenjem 802.11n standarda, uvedene su brojne promene na fizičkom sloju i MAC (*Medium Access Control*) podsloju, čime su ostvarena znatna poboljšanja na protoku, oblasti pokrivanja i pouzdanosti komunikacije [4]-[6].

Standardima su definisani maksimalni protoci na fizičkom nivou od 11Mb/s (802.11b), 54Mb/s (802.11a i 802.11g) i 600Mb/s (IEEE 802.11n [7], [8]) u zavisnosti od tehnologije koja se koristi za realizaciju WLAN mreže. Početni uslov za uspešnu realizaciju nekog servisa je zadovoljavajući realno ostvariv protok na nivou aplikacije. S obzirom da se realno ostvarivi protoci znatno razlikuju od deklariranih maksimalnih protoka, kao što je to pokazano u [9]-[11] za 802.11b i 802.11g mreže, u ovom radu izvršeno je eksperimentalno određivanje realno ostvarivih protoka u infrastrukturnoj 802.11n mreži.

Eksperimentalna analiza performansi 802.11n WLAN mreže sprovedena je merenjem realno ostvarivih protoka u zavisnosti od odnosa korisnog signala i šuma na ulazu u prijemnik. Na ovaj način uzet je u obzir uticaj pozicije klijenta u odnosu na AP (*Access Point*) u WLAN mreži, što u najvećoj meri određuje kolike će protoke klijent moći realno da ostvari. Vršeno je testiranje TCP (*Transmission Control Protocol*) protoka, i to njegove maksimalne, odnosno srednje vrednosti.

Rad je organizovan u 5 poglavlja. U drugom poglavlju predstavljena su unapređenja uvedena 802.11n standardom. Merne topologije i način merenja dati su u trećem poglavlju. Četvrto poglavlje sadrži rezultate merenja. Na kraju, u petom poglavlju, izveden je zaključak.

## II. UNAPREĐENJA UVEDENA IEEE 802.11N WLAN STANDARDOM

Uvođenjem 802.11n standarda, uvedene su brojne promene na fizičkom sloju i MAC podsloju [1]-[6]. Unapređenja uvedena na fizičkom sloju su primena MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) tehnologije, *channel bonding*, smanjenje *guard* intervala i poboljšanje korišćene OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) modulacione tehnike. MAC unapređenja se odnose na uvođenje RIFS (*Reduced Inter Frame Space*) intervala, agregacije okvira i blok potvrđivanja, kao i definisanje novih tehnika za upravljanje snagom MIMO WLAN uređaja.

Uvođenjem 802.11n standarda predviđen je rad u oba frekvencijska opsega, 2.4GHz i 5GHz, i definisani su protoci iznad 100Mb/s (maksimalni protok 600Mb/s). Ono što je veoma bitno, 802.11n standard je potpuno kompatibilan sa prethodnim standardima.

802.11n standard uvodi MIMO tehnologiju, koja se bazira na korišćenju većeg broja antena na predaji i prijemu, odnosno većeg broja primopredajnih lanaca. MIMO uređaji koriste prednosti višestrukih putanja na dva načina. Prvi način podrazumeva korišćenje više antena i odgovarajućih primopredajnih lanaca za ostvarivanje diverzitija na predaji i/ili prijemu (čime se povećava robusnost sistema). Drugi način je korišćenje tehnike prostornog multipleksiranja (čime povećava se kapacitet sistema). MIMO uređaji, korišćenjem prostornog multipleksiranja preko razdvojenih primopredajnih lanaca, obezbeđuju mnogo veći protok. Pojedinačan okvir se deli i multipleksira kroz više prostornih tokova, koji se objedinjuju na prijemu. 802.11n podržava do četiri primopredajna lanca.

U specifikacijama 802.11n standarda postoje dve tehnike kojima se obezbeđuje poboljšanje performansi MIMO sistema, a to su diverziti na predaji (*beamforming*) i diverziti na prijemu. *Beamforming* je tehnika fokusiranja radio signala na ciljnu antenu čime se povećava kvalitet signala na prijemu i smanjuje uticaj interferencije. Tehnika se koristi kada

prijemnik ima samo jednu prijemnu antenu, a postoji više predajnih antena. Predajni *beamforming* se može izvršiti jedino u slučaju kada predajna strana sistema može dobiti povratne informacije od samog prijemnika. Sa druge strane, u slučajevima kada na prijemu postoji više antena nego na predajnoj strani, 802.11n standardom je predviđeno korišćenje prijemnog diverzitija.

U okviru 802.11n standarda, uvedena je CB (*Channel Bonding*) tehnika, koja omogućava da se povežu dva susedna nepreklapajuća kanala širine 20MHz u jedan kanal širine 40MHz. Pored duplo većeg propusnog opsega, korišćenje CB tehnike dovodi i do boljeg iskorišćenja raspoloživog opsega. Naime, kanal širine 40MHz koristi 108 podnosilaca za prenos korisnih podataka, dok je 802.11n standardom predviđeno da se u jednom 20MHz-kanalu koristi 52 podnosioca za prenos korisnih podataka.

Osnovni mod rada definisan 802.11n standardom predviđa korišćenje *guard* intervala trajanja 800ns. Međutim, ako u okruženju sa višestrukim putanjama nisu strogi zahtevi po pitanju razlike u dužinama putanja između predajnika i prijemnika (problem intersimbolske interferencije), 802.11n predviđa mogućnost korišćenja skraćenog *guard* intervala trajanja 400ns. Ovo skraćuje trajanje simbola sa 4 $\mu$ s na 3.6 $\mu$ s, što ima značajan uticaj na povećanje brzine prenosa.

OFDM modulacionom tehnikom definisanom u 802.11n standardu povećan je broj podnosilaca koji služe za prenos podataka u 20MHz-kanalu, sa 48 na 52. Ovo dovodi do povećanja protoka na 65Mb/s po prostornom toku. Svaki radio predajnik može biti podešen na osam različitih brzina prenosa. Moguće je koristiti do četiri radio primopredajnika, što može obezbediti do četiri različita prostorna toka. Na taj način obezbeđeni su sledeći maksimalni protoci: 65Mb/s (jedan tok), 130Mb/s (dva toka), 195Mb/s (tri toka) i 260Mb/s (četiri toka). Za 40MHz-kanale, OFDM koristi 108 podnosilaca za prenos podataka, što rezultuje maksimalnim protocima od 135Mb/s (jedan tok), 270Mb/s (dva toka), 405Mb/s (tri toka) i 540Mb/s (četiri toka). Za 20MHz-kanale i 400ns *guard* interval, protoci su: 72Mb/s (jedan tok), 144Mb/s (dva toka), 216Mb/s (tri toka) i 288Mb/s (četiri toka), a za 40MHz kanale i 400ns *guard* interval, protoci su 150Mb/s (jedan tok), 300Mb/s (dva toka), 450Mb/s (tri toka) i 600Mb/s (četiri toka).

Da bi se smanjio *overhead*, i poboljšalo iskorišćenje bežičnog medijuma, u okviru 802.11n standarda definisane su tehnike agregacije okvira i blok potvrđivanja. Agregacija omogućava da se pri jednom pristupu medijumu šalje više okvira, kombinovanjem okvira u jedan veći, agregirani okvir. Postoje dve tehnike za agregaciju okvira: MSDU (*Mac Service Data Units*) agregacija i MPDU (*Mac Protocol Data Unit*) agregacija. Postupak MSDU agregacije podrazumeva formiranje okvira agregiranjem više MSDU jedinica, kojima se dodaje jedinstveno MAC zaglavlje, radio zaglavlje i radio preambula, dok se za MPDU agregaciju svakom pojedinačnom okviru dodaje WLAN MAC zaglavlje, odnosno agregiraju se MPDU jedinice. Za MPDU agregaciju, svaki od individualnih okvira, unutar agregiranog MPDU okvira, mora biti potvrđen. U okviru 802.11n standarda, definisan je novi mehanizam za blok potvrđivanje (*Block Acknowledgement*), kojim je omogućeno ispunjenje ovog zahteva.

Kada nije moguća agregacija okvira, a jedan od slučajeva je prenos okvira na različita odredišta, 802.11n standard obezbeđuje dodatni mehanizam za smanjenje *overhead*-a. Ovaj mehanizam se bazira na uvođenju RIFS intervala, kojim se smanjuje IFS interval između trenutka primanja okvira, tipično ACK okvira, i trenutka slanja sledećeg okvira. Skraćanjem vremena između okvira, povećava se vreme koje se koristi za prenos okvira, odnosno smanjuje se *overhead*.

Specifikacije 802.11n standarda uključuju MIMO PS (*Power-Save*) mod, koji smanjuje potrošnju energije usled korišćenja više radio primopredajnika. Funkcionisanje nekoliko radio primopredajnika istovremeno kod MIMO sistema zahteva dodatnu snagu u poređenju sa dotadašnjim WLAN uređajima. Dva nova mehanizma su SMPS (*Spatial Multiplexing Power Save*) mehanizam i PSMP (*Power Save Multi-Poll*) mehanizam. SMPS mehanizam omogućava da 802.11n klijent isključi sve osim svog jednog radio primopredajnika. PSMP mehanizam je proširenje APSD (*Automatic Power Save Delivery*) mehanizma definisanog u 802.11e standardu. Korišćenjem APSD mehanizma, klijent informiše AP da okviri nekih određenih nivoa QoS-a treba da budu baferisani, dok ih klijent ne zatraži.

802.11n ima nekoliko mehanizama za obezbeđivanje kompatibilnosti sa 802.11 a/b/g uređajima kojima se omogućava da ovi *legacy* uređaji razumeju informacije koje su neophodne, a da se dozvoli rad 802.11n uređaja u istoj oblasti. U okviru 802.11n standarda definisana su tri različita moda rada u kojima 802.11n uređaj može da radi u zavisnosti od postojanja *legacy* sistema: *legacy* mod (radi kao *legacy* uređaj, *mixed* mod (šalje *legacy* okvire zbog kompatibilnosti) i *greenfield* mod (mreža koristi samo 802.11n uređaje). Mehanizam zaštite u mešanom modu rada kod 802.11n baziran je na slanju okvira sa *radio preamble*-om i zaglavljem koji mogu biti dekodovani od strane 802.11a i 802.11g uređaja. Ovo obezbeđuje dovoljno informacija *legacy* uređajima da bi znali da postoji druga transmisija u vazduhu i koliko će dugo da traje.

### III. MERNE TOPOLOGIJE I POSTUPAK MERENJA

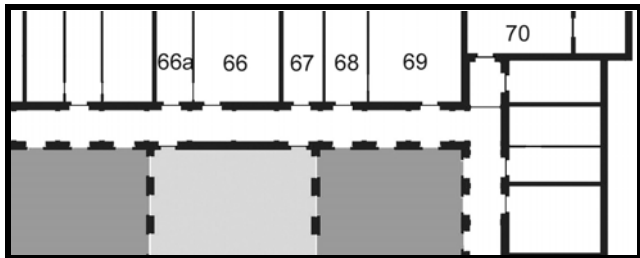
Za potrebe merenja korišćena je oprema kompanije Linksys, preciznije AP (*Linksys WRT350N Wireless-N Gigabit Router with Storage Link*), PCI klijent (*Linksys Wireless-N PCI Adapter WMP300N*) i PCMCIA klijent (*Linksys WPC300N Wireless-N Notebook Adapter*). Prilikom testiranja, PCI klijent je bio instaliran u stoni PC računar (CPU *Intel Core 2 Duo E7200 / 2.53GHz*, memorija DIMM 2GB). Antenski sistem se sastojao od tri antene, pri čemu su dve korišćene za predaju, a svaka od njih se posebnim konektorom povezivala na karticu. PCMCIA klijent je bio instaliran na *IBM ThinkPad X41* laptop računaru.

Za podešavanje obe kartice korišćen je softver *Linksys wireless network monitor* koji omogućava praćenje statistike uspostavljene veze, i to prikazom trenutnih nivoa signala i šuma na ulazu u prijemnik, brzine prenosa uspostavljene veze, količine primljenih i predatih podataka, kao i drugih parametara. Podešavanje AP-a je vršeno preko *web* interfejsa. Prilikom merenja korišćena su osnovna podešavanja za *mixed* mode, što podrazumeva kanal širine 40MHz, kao i sistem bez

zaštite podataka. Merenja su vršena u delu hodnika Elektrotehničkog fakulteta (ETF) ispred amfiteatra Mihajlo Pupin (Sl. 1), kao i u Laboratoriji za radio-komunikacije (soba 66) u kojoj se i nalazio AP. U delu hodnika u kojem su vršena merenja, nalazila su se dva AP-a koji pripadaju mreži ETF-a (uređaji rade po 802.11g standardu). Pored pomenute akademske mreže, prisutne su bile i druge mreže komercijalnog tipa.

Sva merenja su izvršena u praznim prostorijama, bez kretanja ljudi, da bi uslovi u kojima su merenja vršena bili približno isti. Razlog za to je činjenica da nije lako proceniti uticaj ljudi i njihovog kretanja u prostoriji na karakteristike WLAN mreže. Na ovaj način su ostvareni približno isti uslovi prilikom merenja, čime je omogućeno poređenje dobijenih rezultata.

Osnovni cilj analize bio je merenje performansi WLAN mreže koja radi po 802.11n standardu. Analiza performansi je vršena merenjem realno ostvarivog protoka [12] u zavisnosti od odnosa signal-šum na ulazu u prijemnik, pri čemu je u svim merenjima analiziran TCP protok. Merenja su obavljena korišćenjem *Jperf* softverskog paketa, koji koristi klijent-server arhitekturu.



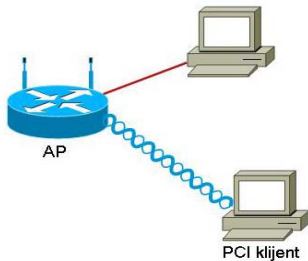
Slika 1. Deo zgrade ETF-a u kojem su vršena merenja

Nivo signala je menjan na taj način što je klijentima menjana pozicija, odnosno rastojanje između AP-a i klijenata. Kako na sam protok utiče veliki broj parametara, prilikom svih merenja se težilo da se ostvare identični uslovi, pa je u skladu sa tim položaj AP-a pri svim merenjima bio identičan, kao i njegovo setovanje, dok se težilo da se klijenti pri svim merenjima kreću istim putanjama.

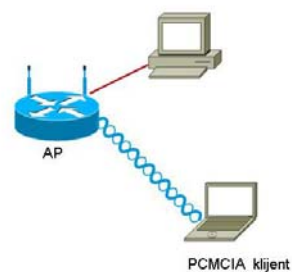
Topologije koje su korišćene prilikom analize performansi, su: AP-PCI klijent (Sl. 2), PCI klijent-PCI klijent (Sl. 3), AP-PCMCIA klijent (Sl. 4) i PCI klijent-PCMCIA klijent (Sl. 5).

Prilikom merenja u topologiji AP-PCI klijent (Sl. 2), računar na kojem je bila instalirana PCI kartica je bio postavljen na pokretna kolica. Time je omogućeno da se menja rastojanje između AP-a i klijenta, a na taj način i nivo signala na ulazu u prijemnik. Što se podešavanja *Jperf* softvera tiče, računar žičano povezan na AP je bio podešen kao prijemna strana (server), dok je računar koji je imao ulogu klijenta bio podešen kao predajna strana (klijent).

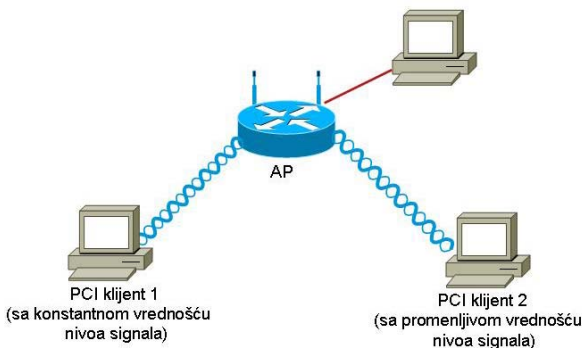
Merenja su započinjana uvek iz iste tačke (ispred laboratorije 66a), a smer kretanja je bio ka učionici 70 (Sl. 1). Na svakoj tački su pomoću *Linksys wireless network monitor*-a očitavani nivo signala i nivo šuma na ulazu u prijemnik, dok su pomoću *Jperf* softvera dobijeni rezultati merenja protoka. Tačke u kojima su vršena merenja su birane u zavisnosti od nivoa signala na ulazu u prijemnik. Preciznije rečeno, klijent je pomeran sve dok se nivo signala ne promeni za 3 dB. U radu se ponekad pominje samo vrednost nivoa signala, iako je analiza rađena korišćenjem odnosa signal-šum. Razlog za to je relativno konstantan nivo šuma koji se menjao u znatno manjoj meri nego nivo korisnog signala.



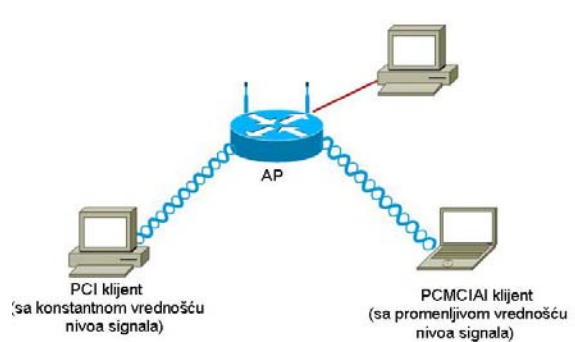
Slika 2. Topologija sa jednim PCI klijentom



Slika 4. Topologija sa jednim PCMCIA klijentom



Slika 3. Topologija sa dva PCI klijenta



Slika 5. Topologija sa jednim PCI i jednim PCMCIA klijentom

Kolica sa računarom su se udaljavala sve dok se konekcija između AP-a i klijenta ne bi prekinula. U ovom slučaju to se događalo ispred učionice 70, koja se nalazila na 32 m od AP-a. Posle gubitka konekcije, klijent se kretao ka AP-u sve do ponovnog uspostavljanja veze, posle čega se opisani postupak merenja ponavljao, ali ovog puta uz smanjivanje rastojanja, tj. povećavanje nivoa korisnog signala na ulazu u prijemnik. Posle vraćanja klijenta na početnu tačku (ispred laboratorije 66a), merenja su nastavljena unutar laboratorije.

U topologiji PCI klijent–PCI klijent korišćena su dva klijenta (Sl. 3), od kojih je jedan bio stacionaran, a samim tim je i nivo signala, tačnije odnos signal-šum na ulazu u prijemnik, tog klijenta bio približno konstantan. Prilikom merenja, softver za analizu protoka na stacionarnom klijentu je bio podešen kao prijemna strana (server), dok je klijent koji je menjao svoj položaj bio podešen kao predajna strana (klijent). Merenja su vršena za tri različite vrednosti odnosa signal-šum fiksiranog klijenta, dok se drugi klijent kretao po istoj putanji kao prilikom merenja sa prethodnom topologijom. Treba pomenuti da se kod najveće, od tri analizirane vrednosti nivoa korisnog signala, antena stacionarnog PCI klijenta nalazila u neposrednoj blizini AP-a.

Postupak primenjen u topologiji AP–PCMCIA klijent (Sl. 4) je identičan postupku opisanom za topologiju AP-PCI klijent, osim što je na strani klijenta korišćen laptop računar, sa instaliranom PCMCIA karticom.

U slučaju topologije PCI klijent–PCMCIA klijent korišćena su dva klijenta (Sl. 5), pri čemu je jedan PCI klijent odnosno desktop računar, dok je drugi PCMCIA, odnosno laptop računar. Kao i u slučaju topologije sa dva PCI klijenta, i ovde je jedan klijent bio fiksiran, odnosno vrednost odnosa signal-šum na ulazu u prijemnik je bila približno konstantna. U ovom slučaju to je bio PCI klijent. Treba napomenuti, da su za ovu topologiju merenja vršena za samo jednu vrednost odnosa signal-šum stacionarnog klijenta. Pokretni klijent se kretao istom putanjom kao u ranije opisanim postupcima merenja.

#### IV. REZULTATI MERENJA

Prilikom planiranja merenja, usvojeno je da se odnos signal-šum na ulazu u prijemnik u tačkama na kojima će se vršiti merenja, razlikuje za 3 dB. U skladu sa tim su birane i merne tačke. Međutim, kako vrednost nivoa signala varira u vremenu, dešavalo se da se na početku merenja vrednost odnosa signal-šum promeni za jedan do dva decibela, čime se gubi ranije usvojena rezolucija. Dobijeni rezultati pri ovim vrednostima su, takođe, uzimani u obzir tako što su pridruživani najbližim planiranim vrednostima.

Kao jedan odbirak merenja uzimana je srednja vrednost protoka u uzorku od 20 sekundi. Kako je ostvaren veliki broj merenja, pri čemu se broj odbiraka u različitim tačkama razlikovao (zbog objašnjene promene nivoa signala), podaci su predstavljani preko srednje i maksimalne vrednosti ostvarene za svaku planiranu vrednost nivoa signal-šum.

##### A. Rezultati merenja za topologiju AP–PCI klijent

Na Sl. 6 prikazana je zavisnost maksimalnih vrednosti protoka u zavisnosti od odnosa signal-šum, dok je na Sl. 7

prikazana zavisnost srednjih vrednosti. Dobijeni rezultati pokazuju da se sa povećanjem vrednosti odnosa signal-šum, povećava i vrednost ostvarenog protoka (opseg maksimalnih vrednosti je 4.2-128.1Mb/s, dok je opseg srednjih vrednosti 2.3-57.2Mb/s). U središnjem delu grafika postoje izvesna odstupanja od prethodno utvrđenog pravila što je posledica promenljivosti odnosa signal-šum tokom jednog merenja (jedna merna pozicija) i činjenice da je fizičko rastojanje između dve merne pozicije u kojima su vršena merenja bilo mnogo veće na krajnjim vrednostima odnosa signal-šum, u odnosu na vrednosti iz središnjeg dela grafika.

Takođe, treba primetiti da u slučaju kada je klijent veoma blizu AP-a, odnosno za najveće vrednosti odnosa signal-šum, ostvareni protok u izvesnoj meri opada. Ovo je verovatno posledica izraženog uticaja predajnika na prijemnik, s obzirom na činjenicu da ne postoji dinamička kontrola snage.

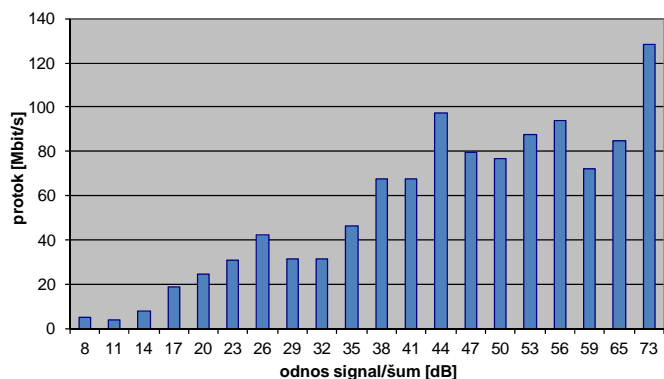
##### B. Rezultati merenja za topologiju PCI klijent–PCI klijent

Kao što je već rečeno, prilikom merenja jedan od klijenta se nalazio na udaljenosti od AP-a kojom je ostvaren željeni odnos signal-šum, koji je bio približno konstantan tokom celog merenja. Na Sl. 8 prikazana je zavisnost maksimalnih vrednosti protoka ostvarenih za tri vrednosti odnosa signal-šum stacionarnog klijenta, dok je na Sl. 9 prikazana zavisnost srednjih vrednosti za isti slučaj.

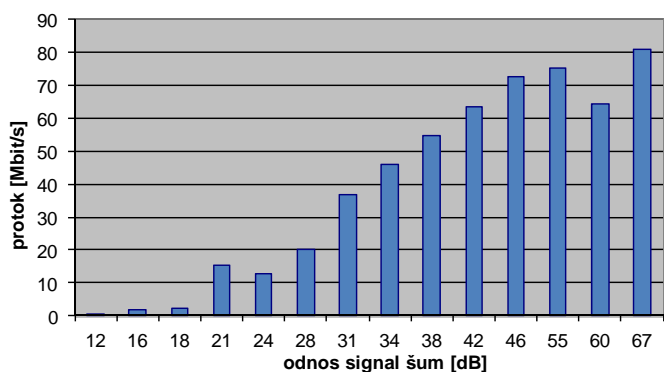
Ovi rezultati, takođe, pokazuju da se sa povećanjem vrednosti odnosa signal-šum, povećava i vrednost ostvarenog protoka. Opseg maksimalnih vrednosti protoka je 1.7-33.8Mb/s, 6.4-36.1Mb/s i 0.3-45Mb/s za odnos S/N fiksnog klijenta od 75dB, 61dB i 46dB, respektivno, dok je opseg srednjih vrednosti 0.3-29Mb/s, 2.5-34.9Mb/s i 0.3-39.4Mb/s za odnos S/N fiksnog klijenta od 75dB, 61dB i 46dB, respektivno. U poređenju sa slučajem iz prve topologije pokazuje se da su ostvareni protoci približno duplo manji za slučaj kada dva klijenta dele medijum. Uporedni grafici, prikazani na Sl. 8 i 9, pokazuju očekivanu zavisnost da je protok pokretnog klijenta veći što je veći odnos signal-šum fiksnog klijenta. Naime, što je veći odnos signal-šum fiksnog klijenta, on za slanje podataka koristi veće signalizacione protoke na fizičkom sloju, pa samim tim koristi deljeni radio-medijum kraće vreme. Ovo važi za slučajeve merenja sa nižim odnosom korisnog signala i šuma stacionarnog klijenta (46dB i 61dB), dok se kod merenja pri najvećoj vrednosti pomenutog parametra (75dB) dobija krajnje neočekivan rezultat, posebno pri nižim vrednostima odnosa signal-šum pokretnog klijenta. Ovaj efekat se može pripisati uočenom problemu, kada se javljaju lošije performanse za slučaj kad se klijent nalazi isuviše blizu AP-a.

##### C. Rezultati merenja za topologiju AP–PCMCIA klijent

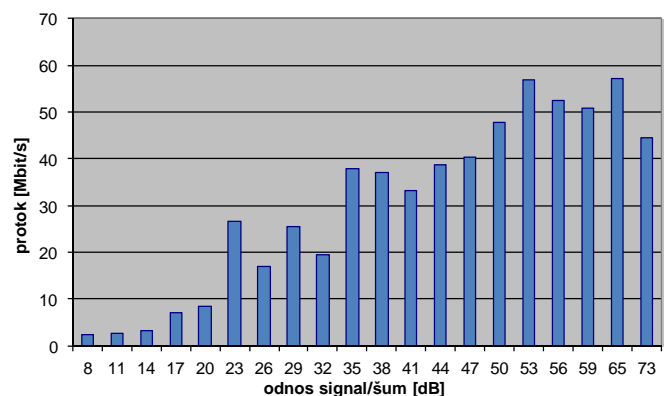
Prikaz rezultata dobijenih prilikom analize topologije sa jednim PCMCIA klijentom, odnosno karticom instaliranom u laptop-u, dat je na Sl. 10 i 11. Rezultati su, kao i u prethodnim slučajevima, prikazani za maksimalne i srednje vrednosti dobijenih rezultata za određene vrednosti odnosa signal-šum. Dobijeni rezultati pokazuju da se sa povećanjem vrednosti odnosa signal-šum, povećava i vrednost ostvarenog protoka, što je u ovom slučaju posebno izraženo i ogleda se u gotovo linearnoj zavisnosti. Opseg maksimalnih vrednosti protoka je 0.3-80.7Mb/s, dok je opseg srednjih vrednosti 0.3-79Mb/s.



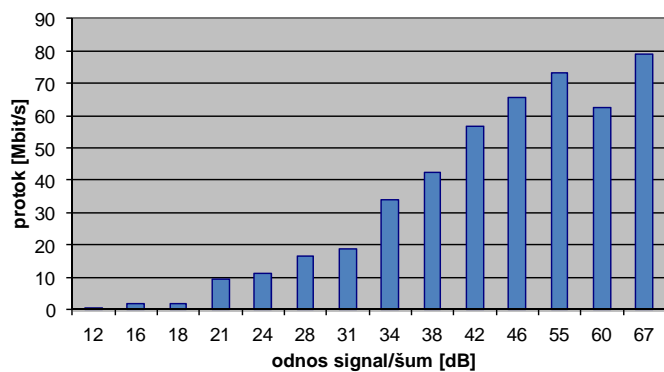
Slika 6. Zavisnost maksimalnih vrednosti protoka od odnosa signal-šum za topologiju AP-PCI klijent



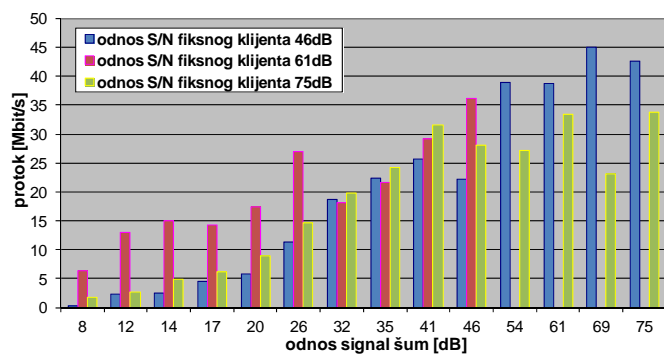
Slika 10. Zavisnost maksimalnih vrednosti protoka od odnosa signal-šum za topologiju AP-PCMCIA klijent



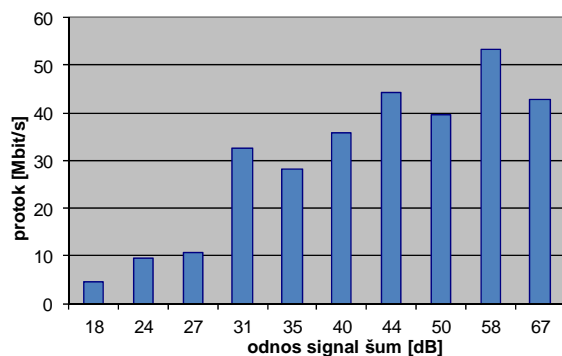
Slika 7. Zavisnost srednjih vrednosti protoka od odnosa signal-šum za topologiju AP-PCI klijent



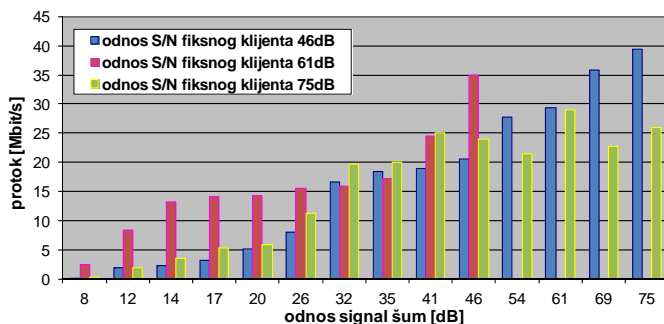
Slika 11. Zavisnost srednjih vrednosti protoka od odnosa signal-šum za topologiju AP-PCMCIA klijent



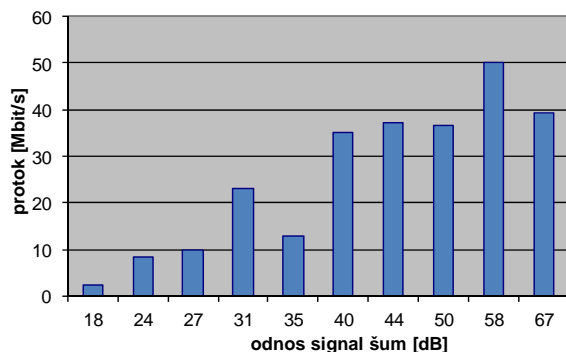
Slika 8. Uporedni prikaz zavisnosti maksimalnih vrednosti protoka od odnosa signal-šum za topologiju PCI klijent-PCI klijent



Slika 12. Zavisnost maksimalnih vrednosti protoka od odnosa signal-šum za topologiju PCI klijent-PCMCIA klijent



Slika 9. Uporedni prikaz zavisnosti srednjih vrednosti protoka od odnosa signal-šum za topologiju PCI klijent-PCI klijent



Slika 13. Zavisnost srednjih vrednosti protoka od odnosa signal-šum za topologiju PCI klijent-PCMCIA klijent

#### D. Rezultati merenja za topologiju PCI klijent-PCMCIA klijent

Na Sl. 12 i 13 predstavljeni su rezultati dobijeni prilikom analize topologije sa jednim PCI i jednim PCMCIA klijentom. U ovom slučaju PCI klijent je bio stacionaran, i vrednost odnosa signal-šum je iznosila približno 56dB. Dobijeni rezultati su u potpunosti u skladu sa očekivanjima. Rezultati pokazuju da se sa povećanjem vrednosti odnosa signal-šum, povećava i vrednost ostvarenog protoka (opseg maksimalnih vrednosti je 4.5-53.2Mb/s, dok je opseg srednjih vrednosti 2.4-50.2Mb/s), kao i da se dobijaju približno duplo manje vrednosti u poređenju sa slučajem jednog WLAN klijenta.

#### V. ZAKLJUČAK

U okviru ovog rada izvršena je eksperimentalna analiza performansi IEEE 802.11n WLAN mreže. Analiza je urađena merenjem realno ostvarivih protoka u zavisnosti od odnosa korisnog signala i šuma na ulazu u prijemnik. Vršeno je merenje TCP protoka, i to njegove maksimalne i srednje vrednosti. Sami uslovi u kojima su izvršena merenja nisu mogli da budu do kraja realni. Naime, sva merenja su izvršena u praznim prostorijama, bez prisustva ljudi. Na taj način ostvareni su identični uslovi, što je od posebnog značaja jer je time omogućeno poređenje dobijenih rezultata, a samim tim i donošenje određenih zaključaka.

Dobijeni rezultati pokazuju da se povećavanjem vrednosti odnosa signal-šum, protok, takođe, povećava. Ovaj zaključak važi i za topologije sa većim brojem klijenata. Bitno je istaći da je povećavanje broja klijenata rezultovalo smanjivanjem protoka po klijentu. Najveći protok je izmeren za slučaj sa jednim PCI klijentom, i iznosio je nešto manje od 130Mb/s, što je oko 48% maksimalnog nominalnog protoka protoka na fizičkom sloju za razmatrani slučaj (dva prostorna toka, 40MHz kanal i 800ns guard interval).

Kada su u pitanju uporedni rezultati, može se reći da su skoro svi rezultati potvrdili očekivanja pre analize. Upoređivanje topologija sa jednim, odnosno dva klijenta, pokazalo je da je protok u slučaju prve topologije najčešće dvostruko veći, u odnosu na slučaj kada dva klijenta dele medijum. Posle poređenja ostvarenih rezultata prilikom korišćenja PCI, odnosno PCMCIA klijenta, može se ustanoviti da nisu primećene značajnije razlike u postignutim protocima, koje bi dovele do zaključka da jedna od kartica postiže bolje rezultate.

Određena nepravilnost u radu sistema, i nelogičnost dobijenih rezultata primećena je prilikom merenja protoka za topologiju sa dva PCI klijenta. Ostvareni protoci pri najvećoj vrednosti odnosa signal-šum fiksnog klijenta, bili su uglavnom manji nego u preostala dva slučaja, kada je pomenuti odnos bio manji. To se može objasniti efektom koji je uočen prilikom merenja protoka za topologiju sa jednim PCI klijentom. U slučaju kad se klijent nalazio u neposrednoj blizini AP-a,

dobijeni su manji protoci. Ovo je verovatno posledica izraženog uticaja predajnika na prijemnik, s obzirom da nije implementirana dinamička kontrola snage.

#### LITERATURA

- [1] IEEE Standard 802.11n-2009: Enhancements for Higher Throughput.
- [2] IEEE Standard 802.11-2012: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications (Revision of IEEE Standard 802.11-2007).
- [3] J. Geier, Designing and Deploying 802.11n Wireless Networks. Cisco Press, Indianapolis 2010.
- [4] Y. Xiao, "IEEE 802.11n: Enhancements for higher throughput in wireless LANs", IEEE Wireless Communications, vol. 12, no. 6, pp. 82-91, December 2005.
- [5] E. Perahia, "IEEE 802.11n development: History, process, and technology", IEEE Communications Magazine, vol. 46, no. 7, pp. 48-55, July 2008.
- [6] A. Van Zelst, and T.C. Schenk, "Implementation of a MIMO OFDM-based wireless LAN system", IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 52, no. 2, pp. 483-494, February 2004.
- [7] T. Paul, and T. Ogunfunmi, "Evolution, insights and challenges of the PHY layer for the emerging IEEE 802.11n amendment", IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 11, no. 4, pp. 131-150, 2009.
- [8] S.G. Sankaran, et al, "Design and implementation of a CMOS 802.11n SoC", IEEE Communications Magazine, vol. 47, no. 4, pp. 134-143, 2009.
- [9] P. Radić, M. Koprivica, and A. Nešković, "Analiza protoka u infrastrukturalnoj 802.11b WLAN mreži u realnim uslovima", TELFOR 2005, Beograd, pp. 1-4, Novembar 2005
- [10] Đ. Đurović, M. Koprivica, N. Nešković, and Đ. Paunović, "Analiza protoka u infrastrukturalnoj IEEE 802.11g WLAN mreži u realnim uslovima", TELFOR 2006, Beograd, pp. 218-221, Novembar 2006
- [11] N. Nešković, Lj. Pajević, "Analysis of User Plane in IEEE 802.11b/g QoS Networks", Telfor Journal, vol. 2, no. 1, pp. 32-37, Novembar 2010
- [12] D. Dujovne, T. Turletti, and F. Filali, "A Taxonomy of IEEE 802.11 Wireless Parameters and Open Source Measurement Tools", IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 12, no. 2, pp. 249-262, June 2010

#### ABSTRACT

In this paper the experimental analysis of the performance of IEEE 802.11n WLAN by measuring the maximum and average values of realistically achievable TCP throughput with regards to signal-to-noise ratio, was performed. The results show that the throughput increases with the increasing of the signal-to-noise ratio, and decreases with increasing of the number of clients. The maximum measured value of throughput was approximately 130Mb/s, which is about 48% of the maximum nominal datarate at the physical layer for the considered case.

#### EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THROUGHPUTS FOR INFRASTRUCTURE IEEE 802.11n WLAN

Mladen Koprivica, Nenad Pitra,  
Nataša Nešković, Aleksandar Nešković