

ANALIZA UTJECAJA ZRAČENJA SAMONOSIVOG TELEKOMUNIKACIJSKOG KABELA ZA VDSL2 PRIJENOSNE TEHNOLOGIJE

Gal, Mario

Professional thesis / Završni specijalistički

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:501064>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-06**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

Mario Gal, dipl. ing. el.

**ANALIZA UTJECAJA ZRAČENJA SAMONOSIVOG
TELEKOMUNIKACIJSKOG KABELA ZA VDSL2 PRIJENOSNE
TEHNOLOGIJE**

Specijalistički rad

Osijek, 2020.

Specijalistički rad izrađen je na Zavodu za komunikacije

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Marijan Herceg

Sumentor: Doc. dr. sc. Josip Milanović

Specijalistički rad ima: 88 stranica

Datum obrane rada: 13. ožujak 2020.

Specijalistički rad br.:

SADRŽAJ

| | |
|--|----|
| 1. UVOD | 1 |
| 2. ISTRAŽIVANJE UTJECAJA ZRAČENJA XDSL TEHNOLOGIJA NA DRUGE TEHNOLOGIJE KOJE RADE U ISTOM FREKVENCIJSKOM PODRUČJU | 3 |
| 3. RAZVOJ ŠIROKOPOJASNIH TEHNOLOGIJA | 5 |
| 3.1. xDSL tehnologije | 6 |
| 3.1.1. Konfiguracija DSL-a..... | 7 |
| 3.1.2. Problemi DSL tehnologije | 8 |
| 3.1.3. Načini otklanjanja osnovnih problema u prijenosu DSL signala..... | 11 |
| 3.2. Simetrične xDSL tehnologije..... | 11 |
| 3.2.1. High bitrate DSL – HDSL | 11 |
| 3.2.2. High bitrate DSL2 – HDSL2 | 11 |
| 3.2.3. Single-Pair DSL – SDSL ili Single-Pair High-Speed DSL – SHDSL..... | 11 |
| 3.3. Asimetrične DSL tehnologije..... | 12 |
| 3.3.1. ADSL | 12 |
| 3.3.2. ADSL bez razdjelnika – G.lite..... | 14 |
| 3.3.3. ADSL2 | 15 |
| 3.3.4. ADSL2plus | 16 |
| 3.3.5. Prednosti i nedostaci ADSL-a..... | 16 |
| 3.4. VDSL | 17 |
| 3.5. VDSL2 | 20 |
| 3.5.1. Usnopljavanje (<i>engl. Bonding</i>) | 22 |
| 3.5.2. Vektorizirani prijenos (<i>engl. Vectoring</i>)..... | 23 |
| 3.6. G.fast..... | 24 |
| 4. KABLIRANJE U DSL-U | 26 |
| 4.1. Telekomunikacijski kabel za xDSL prijenosne tehnologije | 26 |
| 4.1.1. Osnovne karakteristike telekomunikacijskih kabela za xDSL prijenosne tehnologije..... | 28 |
| 5. UTJECAJ XDSL TEHNOLOGIJE NA DRUGE SUSTAVE | 30 |
| 5.1. Elektromagnetsko zračenje telekomunikacijskog kabela | 30 |
| 5.2. Mjerenje jakosti električnog polja..... | 37 |
| 5.3. Sustavi koji rade u istom frekvencijskom području s xDSL tehnologijom | 39 |
| 5.3.1. Frekvencijska norma i vremenski signali za točno vrijeme..... | 41 |
| 5.3.2. Radioamaterska služba..... | 41 |

| | |
|--|----|
| 5.3.3. Radiodifuzija..... | 43 |
| 5.3.4. Radiofar..... | 44 |
| 5.3.5. Građanski radijski opseg..... | 44 |
| 5.3.6. Zrakoplovna radiokomunikacija..... | 45 |
| 5.3.7. Meteorološki sateliti..... | 46 |
| 6. ZAKONSKA REGULATIVA..... | 48 |
| 6.1. ITU-T K.60..... | 50 |
| 6.2. ECC Recommendation (05)04 – Mjerila za utvrđivanje radijske smetnje uzrokovane neželjenim zračenjem žičane telekomunikacijske mreže..... | 51 |
| 6.3. Ostale norme i preporuke..... | 52 |
| 7. MJERENJA I ANALIZA MJERNIH REZULTATA..... | 53 |
| 7.1. Mjerna procedura..... | 53 |
| 7.2. Rezultati mjerenja i analiza mjernih rezultata..... | 57 |
| 7.3. Usporedba mjernih rezultata s drugim normama i pravilnicima..... | 65 |
| 8. SIMULACIJA UTJECAJA IZRAČENOG ELEKTRIČNOG POLJA VDSL2 TELEKOMUNIKACIJSKOG KABELA NA PRIJEM DRM SIGNALA..... | 68 |
| 9. ZAKLJUČAK..... | 78 |
| LITERATURA..... | 80 |
| SAŽETAK..... | 83 |
| ABSTRACT..... | 84 |
| ŽIVOTOPIS..... | 85 |
| PRILOG..... | 86 |

1. UVOD

Informacija u svome osnovnom obliku, neovisno o vremenskom razdoblju razvoja čovječanstva, oduvijek predstavlja vrlo bitnu stavku. Upravo iz toga razloga postoji potreba njenog prijenosa u što većim količinama i u što kraćem roku. Počevši od govora kao temeljnog prijenosa informacija, različiti izumi čovječanstva pogodovali su razvoju prijenosa informacije na sve veće udaljenosti i sve većim brzinama. Tako je nakon pojave telegrafa, kojim je prijenos informacija u najmanju ruku s današnjeg gledišta bio vrlo oskudan i siromašan, preko telefona, radija, računala, te u današnje vrijeme mobilnih komunikacija i interneta stvari (*engl. Internet Of Things – IoT*) taj prijenos postao iznimno brz i podatkovno velik.

U današnje vrijeme prijenos informacija, kao i kašnjenje pri prijenosu informacija od bitne je važnosti za cjelokupno funkcioniranje čovječanstva. U nastojanju da gore spomenuto kašnjenje bude što manje, a količina podataka koja se prenosi u jedinici vremena bude što veća, ulaže se sve više i više resursa. Današnji život gotovo da je nezamisliv bez interneta i brzog prijenosa podataka u relativno kratkom vremenskom roku, odnosno bez širokopojsnih tehnologija prijenosa podataka.

U prvom dijelu ovog specijalističkog rada opisan je razvoj širokopojsnih tehnologija prijenosa podataka s fokusom na xDSL sustave, njihove osnovne karakteristike i problemi, kablovi koji se koriste, njegove karakteristike i zračenje. Ukratko su opisani sustavi koji rade u istom frekvencijskom području kao i xDSL sustavi te njihov međusobni utjecaj. U praktičnoj primjeni rad na istom frekvencijskom području, zbog velike zauzetosti frekvencijskog područja, čest je slučaj te ukoliko se ovi sustavi nalaze u neposrednoj blizini postoji mogućnost pojavljivanja smetnji u radu, odnosno neželjenog utjecaja jednih sustava na druge. Praktični dio ovog specijalističkog rada zasniva se na mjerenjima izračenog električnog polja samonosivog telekomunikacijskog kabela za xDSL prijenosne tehnologije, odnosno razmatranju postoji li mogućnost da izračeno električno polje samonosivog telekomunikacijskog kabela neželjeno utječe na neke druge radijske sustave koji se nalaze u blizini samonosivog telekomunikacijskog kabela. Mjerenja zračenja električnog polja napravljena su za nekoliko specifičnih slučajeva, nakon čega su dobivene izmjerene vrijednosti analizirane i uspoređene s preporukom Europskog odbora za komunikacije (ECC/REC/(04)/05), preporukom Međunarodne telekomunikacije unije (ITU-T K.60), preporukom Kraljevine Norveške i preporukom Republike Koreje. Također su u programskom paketu Matlab za izmjerene slučajeve napravljene i simulacije utjecaja izračenog električnog polja samonosivog telekomunikacijskog kabela za xDSL prijenosne tehnologije na

najmanje razine snage na ulazu u digitalni radijski prijemnik koje bi omogućavale zadovoljavajući prijem digitalnog radijskog signala – DRM (*engl. Digital Radio Mondiale*).

2. ISTRAŽIVANJE UTJECAJA ZRAČENJA XDSL TEHNOLOGIJA NA DRUGE TEHNOLOGIJE KOJE RADE U ISTOM FREKVENCIJSKOM PODRUČJU

S obzirom na razvoj i rasprostranjenost usluga xDSL tehnologija kao i na činjenicu da iste koriste frekvencijski spektar sve veće širine, javila se potreba za istraživanjem utjecaja zračenja telekomunikacijskog kabela za širokopojasni prijenos podataka xDSL tehnologija na druge tehnologije koje rade u istom frekvencijskom području.

2003. godine Odbor za elektroničke komunikacije izradio je izvještaj broj 24 [1] u kojem se razmatra utjecaj kablinskih komunikacijskih sustava, uključujući DSL, na radijske tehnologije koje rade u istom frekvencijskom području. Zbog vrlo širokog raspona frekvencija željenih signala koji rade unutar kabela frekvencijski raspon koji je promatran u ovom izvješću kreće se od 9 kHz (početna frekvencija radiokomunikacija) do 3 GHz. U izvješću su opisane različite radijske tehnologije koje mogu biti pod utjecajem neželjenog zračenja iz telekomunikacijskih mreža. Na svjetskoj razini postoje različite norme i preporuke s različitim vrijednostima izračenog električnog polja telekomunikacijskog kabela koje se smatra graničnim za nepovoljan utjecaj na druge radijske tehnologije koje rade u istom frekvencijskom području. Stoga isto izvješće predlaže propisivanje uniformne granične razine na europskoj i svjetskoj razini. Prema rezultatima mjerenja zračenja telekomunikacijskog kabela ADSL tehnologije koja su provedena u Njemačkoj utvrđeno je da je izračeno električno polje u skladu s tada važećom njemačkom normom NB30.

Slična mjerenja provedena su i 2001. godine u Velikoj Britaniji. Regulatorna agencija za komunikacije Velike Britanije provela je mjerenje zračenja telekomunikacijskog kabela za širokopojasni prijenos podataka VDSL tehnologije i usporedbu s MPT1570 preporukom koja je važeća u Velikoj Britaniji. Sukladno izvješću britanske radne grupe [2] zaključeno je da bi izmjerene razine elektromagnetskog zračenja koje nastaju od telekomunikacijskog kabela mogle nepovoljno utjecati na druge tehnologije koje rade u istom frekvencijskom području.

U Republici Hrvatskoj 2018. godine također je mjereno zračenje telekomunikacijskog kabela TK 33-U za VDSL2 tehnologiju koji se sastoji od tri para upredenih parica debljine 0,4 mm [3]. Mjerenje utjecaja izračenog električnog polja telekomunikacijskog kabela na druge tehnologije koje rade u istom frekvencijskom području provedeno je sukladno međunarodnoj ITU-T K.60 preporuci [4] te je uspoređivano s graničnim vrijednostima iste preporuke. Frekvencijsko područje u kojem se mjerilo zračenje telekomunikacijskog kabela prostire se od 9 kHz do 30 MHz.

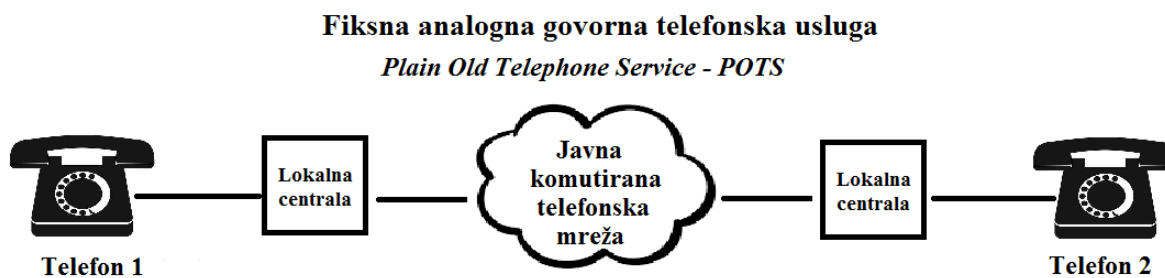
Zaključak mjerenja i istraživanja bio je da su izračene vrijednosti električnog polja TK 33-U kabela ispod graničnih vrijednosti koje su propisane preporukom.

Do danas još uvijek nisu u potpunosti usuglašene donje granice izračenog električnog polja telekomunikacijskog kabela za širokopoljasni prijenos podataka koje se smatraju da bi mogli nepovoljno utjecati na rad drugih tehnologija koje rade u istom frekvencijskom području kao i xDSL tehnologije. Tako postoje znatne razlike između trenutno važeće međunarodne preporuke ITU-T K.60 i europske preporuke ECC/REC/(05)04 [5].

3. RAZVOJ ŠIROKOPOJASNIH TEHNOLOGIJA

Javna komutirana telefonska mreža (*engl. Public Switched Telephone Network*) prvenstveno je bila zamišljena i namijenjena prijenosu govora, no s vremenom se pojavila potreba da se kroz nju prenose i informacije u obliku podataka.

U Republici Hrvatskoj 17. listopada 1992. godine počela je sa svojim službenim radom Hrvatska akademska i istraživačka računalno komunikacijska mreža (CARNet) i tako je uspostavljena prva međunarodna veza između CARNet-ovog čvora u Zagrebu i Austrije. Ovime je činom Republika Hrvatska zvanično dobila internet priključak [6]. Brzina interneta bila je za današnje vrijeme skromnih 64 kbps. Krajnji korisnici bili su mrežnom opremom i lokalnim petljama ili pretplatničkim linijama povezani s lokalnim centralama, odnosno korisnici krajnjih usluga su preko parica, spojeni na lokalne centrale. Telefonska mreža je dugi niz godina korištena isključivo za analognu govornu telefonsku uslugu (*engl. Plain Old Telephone Service – POTS*) te manjim dijelom za prijenos podataka i to preko standardnih kanala analogne telefonske usluge. Budući da su ovi kanali, širine svega 4 kHz (frekvencijsko područje od 300 Hz do 3400 Hz), analogni, sami podaci su se prenosili *dial-up* modemom. Početna brzina prijenosa podataka bila je 33,6 kbps dok se u konačnici postizala brzina i od 56 kbps. Osim male brzine jedan od glavnih nedostataka bila je i činjenica da ova tehnologija nije omogućavala istovremeni prijenos govora i podataka preko jedne upredene parice. Slika 3.1. prikazuje osnovnu strukturu fiksne analogne govorne telefonske usluge.



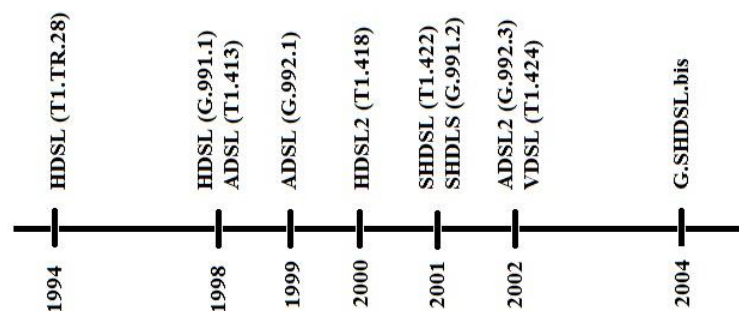
Slika 3.1. Fiksna analogna govorna telefonska usluga

Osamdesetih godina prošlog stoljeća uvedena je nova digitalna tehnologija nazvana uskopojasna digitalna mreža integriranih usluga (*engl. Narrowband Integrated Services Digital Network*) ili N-ISDN. Ova usluga riješila je problem istovremenog korištenja govora, koji je sada digitaliziran, i prijenosa podataka jer su postojala dva kanala. Najveća brzina prijenosa podataka bila je za privatne korisnike 144 kbps, a za poslovne korisnike 2 Mbps.

Neko vrijeme je brzina od 2 Mbps bila dovoljna, no strelovitim razvojem interneta i širokopojasnih komunikacija vrlo brzo se javlja potreba za većim brzinama. Tako dolazi do razvoja digitalne pretplatničke linije, odnosno DSL tehnologije (*engl. Digital Subscriber Line*). I u ovom slučaju prijenos podataka, koji su u digitalnom obliku, vrši se preko standardnih kanala analogne telefonske usluge. Budući da postoji više inačica DSL-tehnologije često se koristi njihov zajednički naziv xDSL. Danas xDSL tehnologija predstavlja sinonim za širokopojasni pristup internetu.

3.1. xDSL tehnologije

Osamdesetih godina prošlog stoljeća počeo je razvoj digitalne pretplatničke linije odnosno DSL-a, dok je ubrzani razvoj pa tako i masovna primjena diljem svijeta počela devedesetih godina prošloga stoljeća. Osnovna ideja bila je da se razvije tehnologija koja će koristiti postojeću bakrenu paricu, ali da se prijenos informacija vrši koristeći veći frekvencijski opseg. Prva masovno primjenjiva inačica xDSL-a bila je digitalna pretplatnička linija velike prijenosne brzine, tj. HDSL (*engl. High bitrate DSL*), koja se pojavila 1998. godine, a tri godine kasnije pojavila se SDSL (*engl. Single-Pair DSL*), tehnologija. Puno veće brzine prijenosa podataka postižu se 2002. godine, kada je razvijena digitalna pretplatnička linija vrlo velike prijenosne brzine, tj. VDSL (*engl. Very high data rate DSL*). Na slici 3.2. prikazan je vremenski razvoj DSL tehnologije.



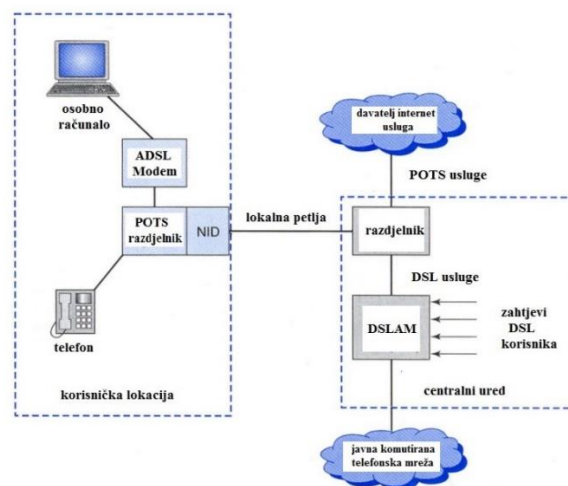
Slika 3.2. Vremenski razvoj DSL tehnologije

Kod DSL tehnologija postoje one kojima je dolazna i odlazna brzina prijenosa podataka (*engl. download i upload*) jednaka pa se govori o simetričnoj DSL tehnologiji, te one kojima ove dvije brzine nisu jednake pa se govori o asimetričnoj DSL tehnologiji. Asimetrična DSL tehnologija (*engl. Asymmetric DSL*) je u najvećoj mjeri zastupljena u svijetu s time da je važno napomenuti da je u ovom slučaju dolazna brzina prijenosa podataka puno veća od odlazne brzine, što je za većinu korisnika prihvatljivo. Povećanjem brzine prijenosa podataka, odnosno pojavom

xDSL tehnologija, širina upotrebe radiofrekvencijskog spektra se povećava pa se tako npr., pri korištenju ADSL-a koristi frekvencijsko područje od 25 kHz do 1104 kHz, za razliku od analognih modema koji su koristili samo frekvencijsko područje od 300 Hz do 25 kHz.

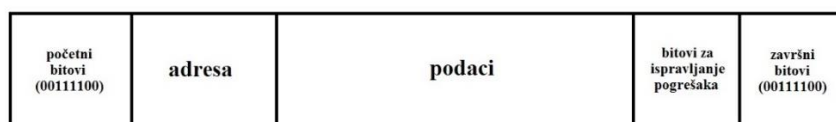
3.1.1. Konfiguracija DSL-a

Osnovnu konfiguraciju DSL-a čini korisnička oprema (osobno računalo s mrežnom karticom i telefon), POTS razdjelnik, te pristupni DSL multiplekser - DSLAM (*engl. Digital Subscriber Line Access Multiplexer*). Osobno računalo se preko svoje mrežne kartice spaja na DSL modem koji se dalje spaja na POTS razdjelnik. DSL modem ima dvije izvedbe, koje se obično nalaze na korisničkoj lokaciji i nazivaju se asimetrična primopredajna jedinica ATU-R (*engl. Asymmetric Transceiver Unit-Remote*) te simetrična primopredajna jedinica STU-R (*engl. Symmetric Transceiver Unit-Remote*), a ovisno o tipu primjene xDSL tehnologije (asimetrična ili simetrična). Na isti razdjelnik spaja se i telefon. POTS razdjelnik sastoji se od dva filtera koji odvajaju POTS promet (govor) od DSL prometa (podaci). Uređaj mrežnog sučelja NID (*engl. Network Interface Device*) odvaja korisničku stranu od lokalne petlje. Dalje lokalna petlja dolazi do lokalne centrale, gdje se također spaja na razdjelnik i na taj način izravno se povezuju krajnji korisnici s pristupnim DSL multiplekserom, odnosno modemskim karticama koje su ugrađene u DSLAM. Ove modemske kartice ekvivalent su DSL modemima na korisničkoj strani i nazivaju se ATU-C (*engl. Asymmetric Transceiver Unit-Central office*) ili STU-C (*engl. Symmetric Transceiver Unit-Central office*), ovisno o primijenjenoj xDSL tehnologiji (asimetrična ili simetrična). Slika 3.3. prikazuje osnovnu konfiguraciju DSL tehnologije.



Slika 3.3. Osnovna konfiguracija DSL tehnologije

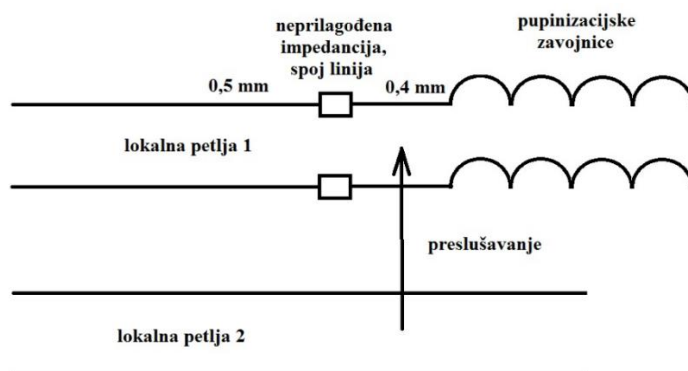
Zadatak DSLAM-a je da multipleksira DSL promet krajnjih DSL korisnika na brzu jezgrenu ATM (*engl. Asynchronous Transfer Mode*) mrežu, odnosno na brzu mrežu davatelja internetskih usluga (*engl. Internet Service Provider*). Prijenos podataka između ATU-C jedinica i ATU-R jedinica kod krajnjeg korisnika temeljena je na prijenosu okvira i obavlja se tehnologijom komutacije okvira (*engl. Frame Relay*) i to protokolom visoke razine upravljanja podatkovnom poveznicom – HDLC (*engl. High level Data Link Control*) ili protokolom komuniciranja od točke od točke – PPP (*engl. Point to Point Protocol*). Okvir je zapravo niz podataka koji se prenose komutacijskom linijom. Sastoji se od informacija, početnih i završnih bitova koji označavaju okvir, određene adrese i informacije o ispravljanju pogrešaka. Tehnologija komutacije okvira ne ovisi o vrsti protokola za prijenos podataka, odnosno može prihvatiti bilo kakav tip podataka, što znači da mreža koja se zasnivana na tehnologiji komutacije okvira može prihvatiti i prenijeti bilo koji oblik podataka. Na ovaj način se dolazi do velike uštede vremena jer nije potrebna konverzija podataka. Na slici 3.4. prikazana je struktura komutacijskog okvira.



Slika 3.4. Komutacijski okvir

3.1.2. Problemi DSL tehnologije

Osnovna prednost DSL tehnologije u odnosu na POTS je upravo činjenica da se koristi veće frekvencijsko područje. To međutim dovodi do drugih problema kao što su veće prigušenje signala, ograničenost dometa, preslušavanje, pupinizacijske zavojnice, te neprilagođena impedancija, što je prikazano na slici 3.5.



Slika 3.5. Glavni problemi xDSL tehnologija

3.1.2.1. Prigušenje signala u xDSL-u i ograničenje dometa

Veća brzina prijenosa podataka kod xDSL tehnologija omogućena je korištenjem frekvencijskog spektra veće širine što dovodi do problema kraćeg dometa prijenosa lokalnom petljom. To proizlazi iz činjenice da korištenje viših frekvencija dovodi do slabljenja signala. Što je veće slabljenje signala u lokalnoj petlji, to je domet prijenosa kraći. Osnovni parametar koji izravno utječe na slabljenje signala je otpor u parici. Kako bi se on smanjio, telekom operateri koriste vodiče što većeg presjeka, odnosno parice sa što manjim otporom. Debljina vodiča izrazito utječe na troškove infrastrukture. Zato se pri planiranju mreže vodi računa o ukupnom kapacitetu linije, odnosno u konačnici o debljini vodiča. Problem također predstavlja i međusobno spajanje kabela jer se time povećava ukupan otpor i na ovaj se način unosi dodatno slabljenje u sustav. Kako lokalne petlje često znaju biti dugačke nekoliko kilometara, ovaj parametar nije zanemariv. Upotreba regeneratora nameće se kao jedno od rješenja. Naime, upotrebom regeneratora znatno se povećava domet ostvaren lokalnom petljom i primjenjivi su na sve xDSL tehnologije. Jedini problem je u tome što su regeneratori aktivni elektronički sklopovi i kao takvi zahtijevaju korištenje električne energije, što uvijek nije lako izvedivo pa se njihovo korištenje svodi na minimum.

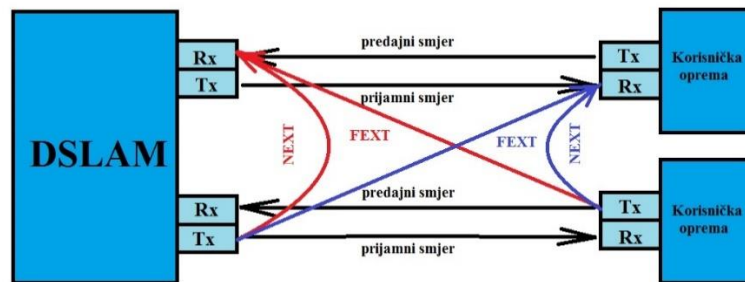
3.1.2.2. Induktivne zavojnice

Ugradnja induktivnih zavojnica u prijenosnu liniju naziva se pupinizacija. Utvrđeno je da se korištenjem induktivnih zavojnica znatno povećava domet POTS signala jer se na ovaj se način smanjuje ukupan otpor, odnosno prigušenje prijenosne linije. Korištenje induktivnih zavojnica tako je predstavljalo dobrobit za POTS tehnologiju, no uvođenje ISDN tehnologije, a pogotovo xDSL tehnologije, odnosno korištenje frekvencijskog pojasa viših frekvencija, zahtjeva korištenje induktivnih zavojnica vrlo malog induktiviteta čime se gubi efekt smanjenja prigušenja zbog kojeg je i uvedena pupinizacija. Iz ovog se razloga kod xDSL tehnologije ne koriste induktivne zavojnice.

3.1.2.3. Preslušavanje

Preslušavanje (*engl. Crosstalk*) je jedan od osnovnih problema xDSL tehnologija. Prilikom prijenosa moduliranog signala prijenosnom linijom, dolazi do zračenja elektromagnetskog polja na susjedne linije. Kako susjedne linije u kablskom snopu odašilju ili primaju informacije u istom frekvencijskom području dolazi do smetnji, tj. do izobličenja signala. Može se reći da je preslušavanje zapravo preklapanje signala susjednih parica u istom kablskom snopu, odnosno smetnja kojoj elektromagnetsko polje jedne linije utječe na signale druge linije u parici tako da

degradira kvalitetu signala. Postoje dva oblika preslušavanja: preslušavanje na bližem kraju – NEXT (*engl. Near End crosstalk*) te preslušavanje na daljem kraju – FEXT (*engl. Far End crosstalk*). NEXT preslušavanje ima štetniji učinak na izobličenje signala u parici na koju djeluje, od FEXT preslušavanja zato što je signal smetnje koji se prenosi na dalji kraj ujedno i jače prigušen. Primjer NEXT i FEXT preslušavanja prikazan je na slici 3.6.



Slika 3.6. Primjeri preslušavanja kod DSL-a

NEXT preslušavanje može uzrokovati značajnu deformaciju primarnog signala. Kako bi se ovaj problem u što većoj mjeri smanjio neki xDSL sustavi zasnovani su na korištenju različitih frekvencijskih opsega za prijamne i predajne smjerove prijenosa podataka. Ovakvo frekvencijsko razdvajanje signala naziva se multipleksiranje po frekvencijski raspodijeljenim kanalima (*engl. Frequency Division Multiplexing – FDM*). Na ovaj način jedan sustav ne prima signale u frekvencijskom pojasu u kojem drugi, susjedni, sustav šalje signale, pri čemu se značajno smanjuje utjecaj NEXT preslušavanja. Nedostatak ove metode je korištenje šireg frekvencijskog pojasa, što dovodi do smanjenja maksimalne duljine prijenosa.

3.1.2.4. Neprilagođena impedancija

Lokalne petlje veće dužine sastavljene su od više ulančanih upredenih parica. Svaka parica ima svoju karakterističnu impedanciju. Bilo koje neprilagođene impedancije između dvije parice predstavlja mjesto gdje dolazi od refleksije signala, odnosno gubitka snage signala (*engl. return loss*). Jedan dio izračene snage vraća se u predajnik, dok oslabljeni signal nastavlja prema prijemniku. Oslabljeni signal ima smanjen domet prijenosa, te manji odnos signal/šum, što ga čini podložnijim utjecaju vanjskih smetnji. Dodatne probleme, što se impedancije tiče, stvaraju i kablanski spojevi, jer svaki kablanski spoj mijenja ukupan iznos impedancije pojedine parice.

3.1.3. Načini otklanjanja osnovnih problema u prijenosu DSL signala

Jedna od najučinkovitijih mjera za otklanjanje problema u prijenosu DSL signala je automatska prilagodba brzine prijenosa. Prilagođavanjem brzine prijenosa utječe se na domet DSL sustava. Druga važna mjera je kašnjenje signala (*engl. delay*) u svrhu ispravljanja pogrešaka, ukoliko to usluga dopušta. Na ovaj način, ukoliko prijenos podataka u stvarnom vremenu nije nužan, sustav prepoznaje pogreške i ima ih vremena ispraviti.

3.2. Simetrične xDSL tehnologije

Simetrične xDSL tehnologije su HDSL, HDSL2 i SDSL. Zajedničko svima je jednaka dolazna i odlazna brzina prijenosa podataka. Simetrične xDSL tehnologije koriste najčešće poslovni korisnici gdje je odlazna brzina prijenosa podataka ključna. Važno je napomenuti da je korisnicima s manjim zahtjevima puno ekonomičnije osigurati asimetričnu uslugu jer ona koristi puno manje mrežnih resursa.

3.2.1. High bitrate DSL – HDSL

HDSL je jedna od najstarijih xDSL tehnologija. Ova tehnologija za prijenos podataka koristi frekvencijski pojas od 80 kHz do 240 kHz uz najveće brzine od 2,048 Mbps. Najveća udaljenost koja se može ostvariti HDSL tehnologijom je do 4 km, a upotrebom regeneratora udaljenost se može povećati do 12 km. HDSL tehnologija se koristi za prijenos podataka između centrala, za međusobno povezivanje baznih stanica i centrala pokretne mreže, za povezivanje velikih firmi preko zakupljenih vodova, za pristup lokalnim mrežama, odnosno na mjestima gdje je simetričnost prijenosa podataka od velike važnosti. Brza i jednostavna instalacija HDSL modema te ostvarivost veze do 4 km jedne su od najvećih prednosti ove tehnologije, dok je glavni nedostatak ne podržavanje istovremenog prijenosa DSL podatkovnog prometa i POTS-a te nužnost korištenja više od jedne upredene parice.

3.2.2. High bitrate DSL2 – HDSL2

HDSL2 je nastao kao nasljednik HDSL-a i karakterizira ga brzina prijenosa podataka od 1,544 Mbps preko jedne upredene parice na udaljenosti do 3,7 km bez korištenja regeneratora.

3.2.3. Single-Pair DSL – SDSL ili Single-Pair High-Speed DSL – SHDSL

SDSL predstavlja naziv za nekoliko sličnih tehnologija. Simetrična digitalna linija velike prijenosne brzine ili SHDSL je xDSL tehnologija koja je međunarodno priznata od strane

Međunarodne telekomunikacijske unije (*engl. International Telecommunication Union – ITU*). Ova tehnologija podržava brzine prijenosa podataka od 192 kbps do 2,312 Mbps na udaljenostima do 4 km bez korištenja regeneratora. SHDSL je zapravo razvijen kako bi objedinio sve postojeće simetrične xDSL tehnologije u standardiziranoj usluzi. Zbog velike simetrične brzine prijenosa podataka, podrške za usluge poput prijenosa više govornih linija preko DSL-a ili VoDSL (*engl. Voice over DLS*), videokonferencija, kao i podrške za virtualne privatne mreže ili VPN (*engl. Virtual Private Networks*) i dr., SHDSL je namijenjen prvenstveno poslovnim korisnicima.

3.3. Asimetrične DSL tehnologije

Kod asimetričnih xDSL tehnologija dolazna i odlazna brzina prijenosa podataka nije jednaka što je glavna značajka ove tehnologije. Iz razloga što se više upredenih parica nalazi na strani lokalne centrale, signali se u smjeru od lokalne centrale prema krajnjim korisnicima mogu prenositi na veće udaljenosti nego u suprotnom smjeru. Puno više upredenih parica u kabelu generira i puno veće preslušavanje, što je jedan od osnovnih problema xDSL tehnologija. Nasuprot tome, kabeli na strani krajnjih korisnika sadrže manje upredenih parica pa je i učinak preslušavanja manji.

Asimetrične DSL tehnologije mogu se podijeliti na tri osnovne vrste – ADSL, RADSL (*engl. Rate-Adaptive DSL*) i VDSL. Osnovna primjena ADSL-a je postizanje većih prijenosnih brzina osnovnih vrsta podataka, kao što je pregledavanje web-a, prijenos datoteka i slično. RADSL je naprednija verzija ADSL-a. Kako se u današnje vrijeme javlja velika potreba za video uslugama, kao što je video na zahtjev (*engl. Video On Demand*), koje zahtijevaju veliku brzinu prijenosa podataka, razvijen je VDSL kojemu je ovo bila primarna zadaća.

3.3.1. ADSL

1999. godine Međunarodna telekomunikacijska unija za standarde odobrila je ADSL standard nazvan ADSL1 G.992.1 [7]. Njegova je namjena prvenstveno bila ostvarivanje brzina od 8 Mbps u silaznom smjeru te 640 kbps u uzlaznom smjeru [8]. Kasnije je ovaj standard bio unaprijeđen te su se pri korištenju ove verzije postizale brzine do 12 Mbps u silaznom smjeru. S korisničke strane gledano ADSL je doživio najveći uspjeh kod kućnih korisnika i malih poslovnih korisnika te je postao je sinonim za kućni internet. Prednost je ove tehnologije korištenje iste infrastrukture koja već postoji u kućnim instalacijama, odnosno istom paricom vrši se prijenos POTS kanala i ADSL signali.

3.3.1.1. Modulacijske tehnike ADSL-a

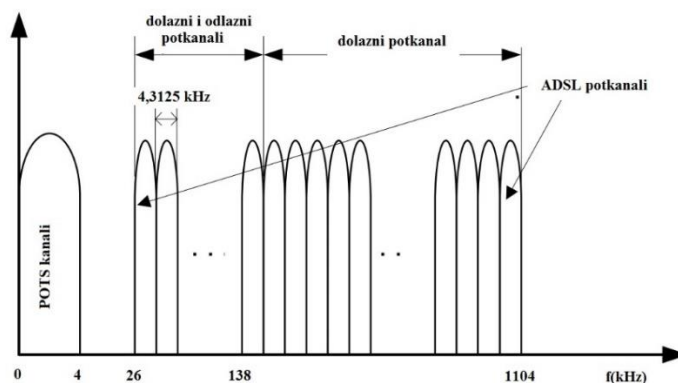
Osnovne modulacijske tehnike pri prijenosu podataka kod ADSL-a su:

- Amplitudna modulacija bez nosioca (*engl. Carrierless Amplitude Phase modulation – CAP*)
- Diskretna višetonaska modulacija (*engl. Discrete Multitone Modulation – DMT*)

Amplitudna modulacija bez nosioca je varijacija kvadraturno amplitudne modulacije - QAM-a (*engl. Quadrature Amplitude Modulation*). Kod ove modulacije amplituda i faza dva sinusna signala čije se frekvencije nalaze u okviru propusnog opsega pretplatničke linije mijenjaju se u skladu s konstelacijom signala.

Diskretna višetonaska modulacija je naprednija verzija modulacijske tehnike ADSL-a, a temelji se na kombinaciji multipleksiranja podjelom frekvencijskog područja – FDM-a i QAM-a. Ukupni propusni opseg dijeli se na potkanale (*engl. subchannels*), pri čemu svaki potkanal koristi vlastiti podnosilac (*engl. subcarrier*). Podaci u svakom potkanalu sadrže dio ukupne informacije i prenose se koristeći QAM modulaciju.

DMT dijeli frekvencijsko području od 26 kHz do 1104 kHz na 256 potkanala od kojih je svaki širine 4,3125 kHz. Svaki potkanal neovisan je o ostalima, sadrži jedan dio informacije i ima svoj vlastiti podnosioc. Najniži potkanali koriste se za prijenos POTS informacija, a ostali potkanali koriste se pri prijenosu informacija u uzlaznom i silaznom smjeru, s time da se u silaznom smjeru koristi veći broj kanala. Prema ANSI standardu po svakom potkanalu, kada se koristi diskretna višetonaska modulacija, podaci se prenose brzinom od 4000 bauda (simbola/sekundi). Teoretski, najveće brzine koje se mogu postići u silaznom smjeru su 8,192 Mbps, a u uzlaznom 1,024 Mbps i to ukoliko ATU-C koristi 265 potkanala, a ATU-R 32 potkanala. Potrebno je napomenuti da se ne koristi cijelo frekvencijsko područje za prijenos informacija, nego postoji zaštitni pojas od pet kanala između 4 kHz i 26 kHz kako bi se spriječile interferencije između POTS i ADSL podataka. Ukoliko potkanal iz nekog razloga ne može prenositi podatke, može ga se isključiti iz prijenosa, dok se ostatak frekvencijskog pojasa normalno koristi. Slika 3.7. prikazuje strukturu ADSL potkanala.



Slika 3.7. Struktura ADSL potkanala [9]

Realne brzine prijenosa podataka u praksi iznose do 8 Mbps u silaznom i 864 kbps u uzlaznom smjeru i u najvećoj mjeri ovise o duljini lokalne petlje. Prije nego što se počnu prenositi korisnički podaci, ATU-R i ATU-C uređaji međusobno razmjenjuju ekvilizacijske sljedove kako bi mogli točno proračunati broj potkanala koje će koristiti u komunikacijskoj sesiji (*engl. session*). Potkanal broj 64 (gornje granične frekvencije 276 kHz) koristi se za prijenos pilot-frekvencije, kao i za sinkronizaciju između ATU-R i ATU-C uređaja. Ti uređaji šalju spomenute sljedove po svih 256 potkanala, mjere odziv sustava, pri čemu u proračun uzimaju i prigušenje signala te ostala otkrivena obilježja linije. Proračunom se određuje konačni broj potkanala i broj simbola po potkanalu. Vrijednosti brzine prijenosa podataka pri korištenju standardne bakrene parice, u ovisnosti o duljini lokalne petlje prikazane su u tablici 3.1.

| Udaljenost (m) | Brzina (Mbps) |
|----------------|---------------|
| 5400 | 1,544 |
| 4800 | 2,048 |
| 3600 | 6,312 |
| 2700 | 8,448 |

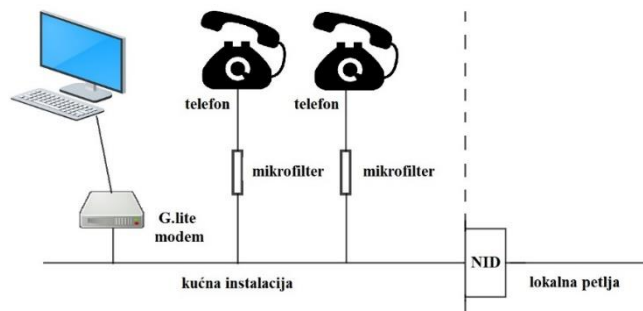
Tablica 3.1. Brzine prijenosa podataka u ovisnosti o duljini lokalne petlje

Iz tablice je vidljivo smanjenje brzine prijenosa podataka kako raste duljina lokalne petlje što je upravo karakteristično za sve xDSL tehnologije.

3.3.2. ADSL bez razdjelnika – G.lite

G.lite je sustav koji se temelji na osnovnom ADSL sustavu, samo što ovaj sustav čini jednostavnija struktura i instalacija opreme jer se ne koristi razdjelnik na korisničkom dijelu.

Standardiziran je pod oznakom ITU-T G.992.2. U prošlim sustavima razdjelnik je omogućavao istovremeno korištenje POTS usluga i prijenosa podataka. Njegovim izbacivanjem iz sustava doprinosi se smanjenju kašnjenja, složenosti uvođenja ADSL usluge kao i troškova. Upravo zbog ovih razloga došlo je do razvoja G.lite-a, odnosno ADSL-a bez razdjelnika (*engl. Splitterless ADSL*) koji, podržava istovremeno korištenje POTS usluge i ADSL prijenosa podataka. Sustav ne podržava cijeli raspon prijenosnih brzina pa je tako prijenosna brzina u dolaznom smjeru ograničena na 1,5 Mbps. Prijenosne brzine u odlaznom smjeru kod G.lite sustava iznose do 512 kbps. Razlog manje dolazne brzine u odnosu na ADSL rezultat je činjenice da G.lite za dolazni kanal koristi područje frekvencijskog spektra do 578 kHz, a ADSL pune brzine do 1104 kHz. S obzirom na do sada navedene karakteristike, ovaj sustav je interesantan krajnjim korisnicima i zbog niske cijene usluge te zbog malih troškova pružanja usluge. Problemi koji mogu nastati pri korištenju ovog sustava su izobličenje, koje se može javiti zbog nelinearne impedancije nekih analognih telefona ili drugih uređaja koji se koriste u sustavu, te šuma u POTS kanalu koji proizvode G.lite signali. Upravo zbog ovih razloga u ovim sustavima koriste se mikrofilteri i mikrorazdjelnici koji su malih dimenzija, jeftini i jednostavni za upotrebu čak i krajnjim korisnicima. Veći problem ovog sustava je to što osnovna konfiguracija omogućava korištenje samo jednog analognog telefonskog priključka, što ne odgovara svim krajnjim korisnicima. Ovaj problem se također može lako riješiti korištenjem internih mikrofiltera koji se ugrađuju odmah iza svakog sljedećeg analognog telefonskog uređaja što je prikazano na slici 3.8.



Slika 3.8. Upotreba mikrofiltera u G.lite sustavu

G.lite također koristi DMT modulacijsku tehniku, ali zbog ograničenja frekvencijskog područja dolaznog kanala, koristi samo 128 potkanala.

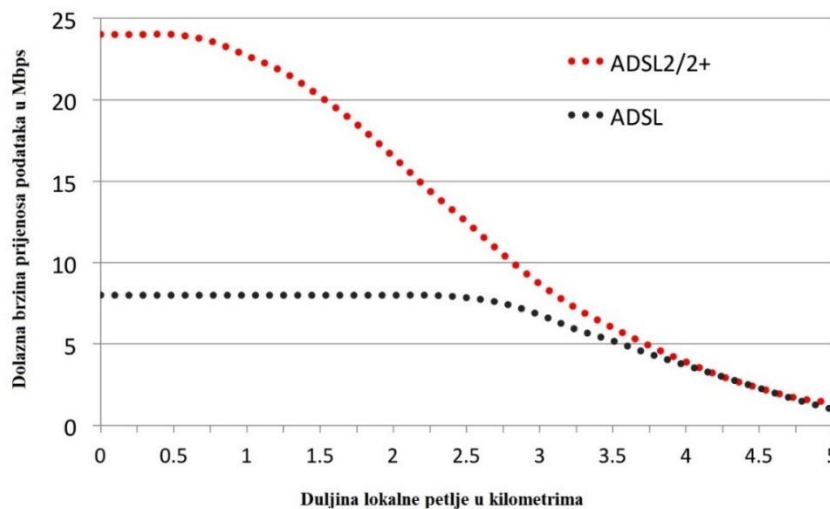
3.3.3. ADSL2

ADSL2 je razvijen kako bi se dodatno povećala brzina prijenosa podataka te povećao domet ADSL sustava. Korištenjem ADSL2 tehnologije postižu se brzine u silaznom smjeru do 12 Mbps, a u uzlaznom do 1 Mbps. Standard koji definira ADSL2 nosi oznaku ITU-T G.992.3 [10] i

temeljen je na prvoj generaciji ADSL-a. Povećanje brzine prijenosa podataka zasnivaju se na boljoj učinkovitosti modulacijskog postupka te na složenijim algoritmima koji učinkovitije ispravljaju pogreške koje nastaju pri prijenosu podataka. Prednost ADSL2 sustava je i usnoplavanje linija pa tako u jednu ADSL2 poveznicu može biti usnopljeno dvije ili više upredenih parica.

3.3.4. ADSL2plus

ADSL2plus je standardiziran prema preporuci ITU-T G.992.5 [11]. i njegova glavna značajka je korištenje frekvencijskog spektra do 2,2 MHz uz 512 dolaznih potkanala. Samim time povećava se brzina prijenosa podataka, koja u ovom slučaju doseže preko 16 Mbps u silaznom smjeru. Na slici 3.9. prikazana je usporedba dolazne brzine prijenosa podataka u ADSL2/2plus i ADSL sustavima u odnosu na duljinu lokalne petlje.



Slika 3.9. Usporedba dolazne brzine prijenosa podataka u ADSL2/2plus i ADSL sustavima u odnosu na duljinu lokalne petlje [12]

Iz slike 3.9. vidljivo je da se prednost ADSL2plus sustava postiže pri kraćim udaljenostima, dok se pri većim duljinama lokalne petlje dolazna brzina prijenosa podataka izjednačava s ADSL sustavom. Velika brzina prijenosa podataka u silaznom smjeru ADSL2plus sustav čini pogodnim i za prijenos multimedijalnih sadržaja kao što je višekanalna televizijska usluga, odnosno IPTV.

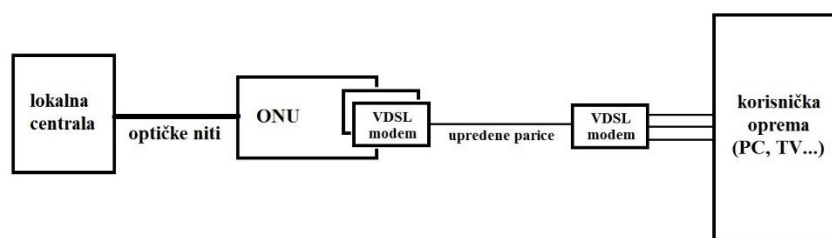
3.3.5. Prednosti i nedostaci ADSL-a

Prednosti ADSL sustava u odnosu na POTS i ISDN sustave su prvenstveno brzina prijenosa podataka i u silaznom i u uzlaznom smjeru, kao i činjenica da je korisnik cijelo vrijeme spojen na mrežu te nema prekida u prijenosu podataka prilikom paralelnog korištenja POTS

usluge. Oprema koja se koristi na korisničkom kraju u ADSL sustavima relativno je jeftina i lako se održava. Druga mogućnost širokopolasnog prijenosa podataka je preko koaksijalnog kabela. Na ovaj način postižu se puno veće brzine prijenosa podataka, ali ulaganje u koaksijalnu infrastrukturu znatno povećava ukupne troškove prijenosa podataka s obzirom da se ne može koristiti postojeća infrastruktura, nego se mora raditi potpuno nova infrastruktura. Zbog navedenog razloga ova usluga trenutno je dostupna samo u većim urbanim sredinama, gdje su skupa ulaganja u infrastrukturu s obzirom na veliki broj korisnika i njihovu financijsku snagu isplativa i opravdana.

3.4. VDSL

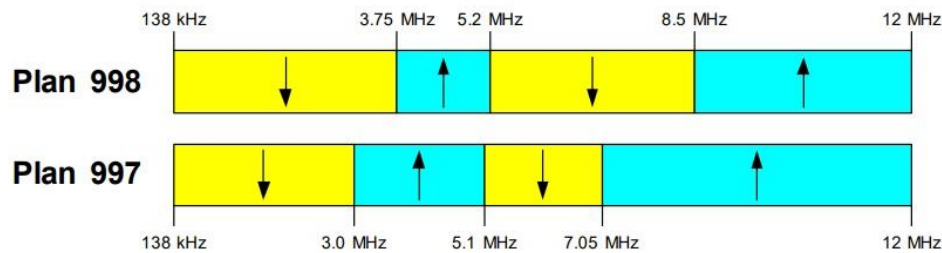
S obzirom na sve veće zahtjeve za velikim brzinama, naročito kada se govori o prijenosu video sadržaja visoke rezolucije ili čak 4K rezolucije uz istovremeni prijenos govora i ostalih podataka, ADSL u svojim verzijama (ADSL2 i ALSL2plus) ne može zadovoljiti potrebe korisnika pa je stoga razvijen VDSL. VDSL podržava simetričan i asimetričan prijenos podataka s brzinama do nekoliko desetaka Mbps na upredenim paricama. Za razliku od ostalih xDSL sustava, VDSL koristi frekvencijsko područje od čak 12 MHz, a ukupna brzina, uzimajući u obzir i silaznu i uzlaznu brzinu prijenosa podataka, doseže do 80 Mbps preko upredenih parica. Sustav je standardiziran prema ITU-T G.993.1 [13] preporuci, a velike brzine prijenosa podataka postižu se zahvaljujući podršci za FTTN (*engl. Fiber To The Node*) arhitekturu te korištenjem širokog frekvencijskog pojasa. FTTN arhitektura kombinira korištenje optičkih niti i upredenih parica na način da su lokalne centrale optičkim nitima povezane s optičkim mrežnim jedinicama – ONU (*engl. Optical Network Units*), dok su krajnji korisnici upredenim paricama povezani s optičkim mrežnim jedinicama kako je prikazano na slici 3.10.



Slika 3.10. FTTN arhitektura s VDSL sustavom

Ovdje je važno napomenuti da su ove vrlo visoke brzine prijenosa podataka podržane na malim udaljenostima, što je osnovni nedostatak VDSL sustava. Za razliku od ADSL sustava, koji je namijenjen prvenstveno asimetričnom prijenosu podataka, VDSL podržava i simetrični i asimetrični prijenos podataka kako za privatne tako i za poslovne korisnike. Krajnja frekvencija

koja se koristi je 12 MHz, samo su frekvencijska područja koja se koriste u silaznom i uzlaznom smjeru različita. Slika 3.11. prikazuje frekvencijske planove 998 i 997 za VDSL sustave.



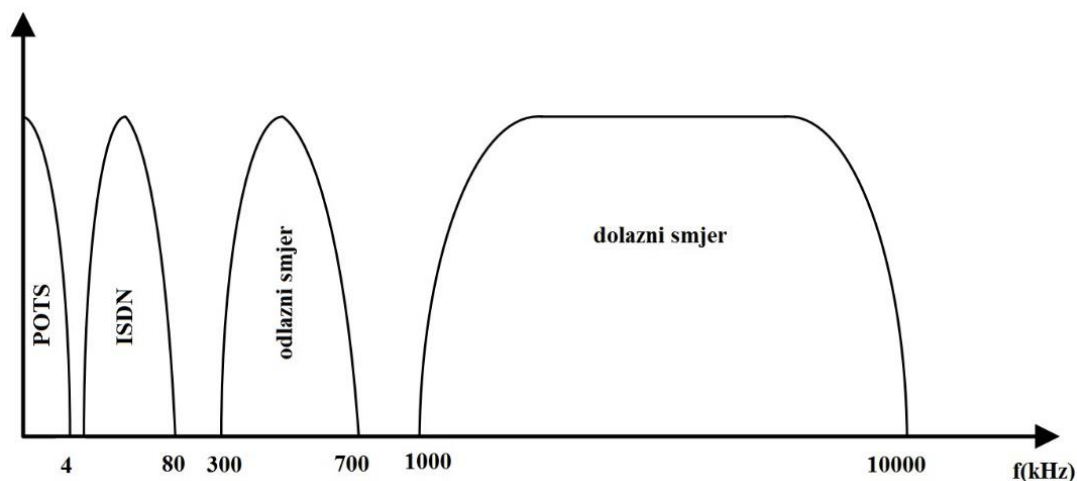
Slika 3.11. Frekvencijski planovi za VDSL sustave

Nadalje zbog korištenja naprednijih modulacijskih tehnika VDSL sustavi su nešto kompleksniji od ADSL sustava. U tablici 3.2. prikazana je usporedba brzine kod VDSL sustava u odnosu na udaljenost između lokalne centrale i korisničke opreme.

| | Udaljenost | 200 m | 500 m | 1000 m |
|----------|---------------|---------|---------|---------|
| Plan 997 | silazni smjer | 35 Mbps | 30 Mbps | 20 Mbps |
| | uzlazni smjer | 35 Mbps | 25 Mbps | 8 Mbps |
| Plan 998 | silazni smjer | 45 Mbps | 40 Mbps | 25 Mbps |
| | uzlazni smjer | 20 Mbps | 15 Mbps | 4 Mbps |

Tablica 3.2. Brzina kod VDSL sustava u odnosu na udaljenost između lokalne centrale i korisničke opreme [14]

Ranije verzije VDSL-a koristile se multipleksiranje po frekvencijski raspodijeljenim kanalima ili FDM za odvajanje odlaznih od dolaznih kanala te njihovo zajedničko odvajanje od osnovnog telefonskog kanala i ISDN-a. Metoda poništavanja odjeka koristi se u novijim sustavima koji omogućavaju simetričan prijenos podataka. Zbog značajne frekvencijske udaljenosti između najnižeg podatkovnog kanala i osnovnog telefonskog kanala mogu se koristiti jednostavni i jeftini POTS razdjelnici. Najviše frekvencijsko područje koje se koristi u VDSL sustavima je 30 MHz za prijenosa podataka na udaljenost do 300 m, dok se za duže udaljenosti koristi frekvencijsko područje do 10 MHz. Na slici 3.12. prikazan je raspored kanala kod VDSL tehnologije.

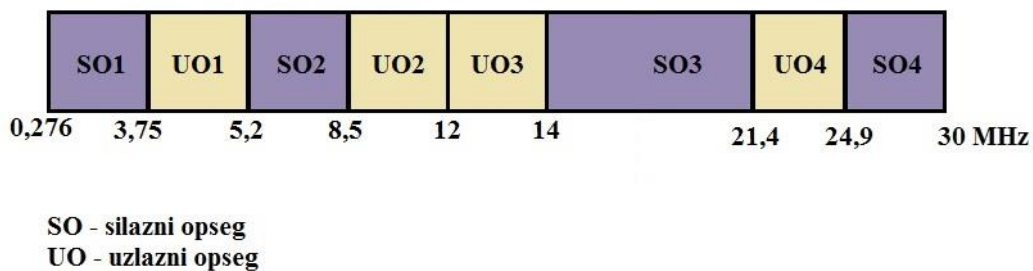


Slika 3.12. Razdvajanje kanala kod VDSL tehnologije

Kao i kod ADSL-a, u VDSL sustavima koriste se amplitudno fazna modulacija bez nosioca – CAP, diskretna višetonaska modulacija – DMT, diskretna višetonaska modulacija malih valova – DWMT (*engl. Discrete Wavelet Multitone modulation*) te modulacija jednostavnog linijskog kodiranja – SLC (*engl. Simple Line Code modulation*). S obzirom na velike brzine prijenosa podataka VDSL se najčešće koristi na mjestima gdje njegovi prethodnici nisu mogli postići tražene performanse kao što su telemedicina, video na zahtjev, televizija visoke rezolucije (HDTV, 4K TV), daljinski rad na velikim udaljenostima, emitiranje televizijskog programa, mrežno igranje videoigara i dr. Važno je također napomenuti da se zbog mogućnosti simetričnih brzina prijenosa podataka, VDSL nameće kao izvrsno rješenje za poslovne korisnike, naročito za one koji zahtijevaju izuzetno velike brzine prijenosa podataka. U današnje vrijeme osobito je zanimljiv prijenos video sadržaja, bilo da je riječ o unaprijed definiranom ili o video sadržaju koje se prenosi u stvarnom vremenu preko interneta. To je omogućeno korištenjem VDSL tehnologije uz kodeke najnovije generacije kao što je H.265. Unatoč mnogim prednostima VDSL sustava, jedan od njegovih osnovnih nedostataka je domet. Budući da se kod VDSL sustava koristi frekvencijski spektar do 30 MHz, bitno je obratiti pozornosti i na potencijalne smetnje koje mogu nastati jer svaka nadzemna parica kojom se prenose VDSL signali predstavlja u određenim slučajevima antenu koja stvara elektromagnetsko zračenje po cijelom frekvencijskom području. Isto tako i te druge tehnologije mogu u VDSL sustav unositi vanjske smetnje. Kako mnogi drugi sustavi rade na ovom frekvencijskom području, potencijalni nastanak smetnji nije zanemariv. Problemi preslušavanja koji su također prisutni kod VDSL sustava rješavaju se na isti način kao i kod njegovih prethodnika, odnosno multipleksiranjem po frekvencijski raspodijeljenim kanalima ili FDM-om.

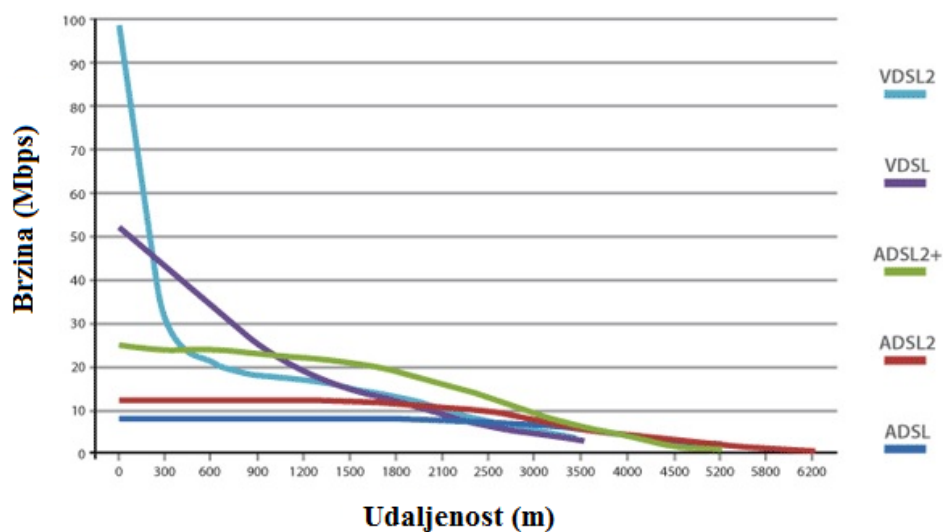
3.5. VDSL2

2005. godine objavljena je preporuka ITU-T G.993.2 [15] prema kojoj je definirana naprednija verzija VDSL tehnologije, nazvana VDSL2. Ova tehnologija podržava vrlo visoke brzine prijenosa podataka do čak 100 Mbps u oba smjera (simetričan prijenos podataka) jednom upredenom paricom koristeći DMT modulaciju. Veliko povećanje brzine prijenosa posljedica je činjenice da VDSL2 tehnologija koristi prošireni frekvencijski pojas do čak 30 MHz kako je prikazano na slici 3.13.



Slika 3.13. Prikaz frekvencijskog spektra VDSL2 tehnologije

U današnje vrijeme krajnjim korisnicima izuzetno je interesantna tzv. „triple play“ usluga, tj. integrirani prijenos govora, podatka i videosadržaja preko iste pretplatničke petlje, a upravo u ovom slučaju VDSL2, sa svojim velikim brzinama prijenosa podataka ovu uslugu čini lako dostupnom. Krajnja brzina prijenosa podataka ovisi o kvaliteti bakrene parice kao i o udaljenosti od lokalne centrale. S većom duljinom parice brzina prijenosa podataka drastično opada tako da VDSL2 tehnologiju na većim udaljenostima zamjenjuje ADSL2+ tehnologija. Na udaljenosti većoj od 1600 m od lokalne petlje brzine prijenosa podataka VDSL2 tehnologije izjednačavaju se s ADSL2+ tehnologijom. VDSL2 tehnologija podržava također simetričan i asimetričan prijenos podataka. Velike brzine prijenosa podataka kod VDSL sustava postižu se na udaljenostima do 500 m od lokalne petlje kao što je prikazano na slici 3.14.



Slika 3.14. Usporedba brzine prijenosa podataka u odnosu na udaljenost od lokalna petlje [16]

VDSL2 tehnologija u većini slučajeva svoju primjenu nalazi kod kratkih pretplatničkih petlji te se DSLAM čvorovi pomiču bliže prema krajnjem korisniku. Ukoliko druge usluge poput ADSL-a, ADSL2, te ADSL2+ dijele istu kabelsku grupu kao i VDSL2 može doći do smanjenja brzine prijenosa podataka u silaznoj vezi zbog pojave preslušavanja između parica u VDSL2 sustavima. Velike probleme kod VDSL2 tehnologije predstavljaju impulсни šum i veliki pad brzine prijenosa podataka s povećanjem udaljenosti od lokalne petlje. Rješenje spomenutih problema predstavljaju koncepti vektorizacije i usnopljavanja.

Bakrene parice su osjetljive na kratke impulse koji u sustav dolaze od vanjskih čimbenika. Vanjski impulsi mogu uzrokovati pogreške pri prijenosu podataka, npr. degradacije slike pri prijenosu videosadržaja i sl. Impulсни šum bi se mogao definirati kao unos energetske impulsa nasumičnih amplituda u koristan signal. Ovu pojavu može uzrokovati ljudski faktor kao i prirodni elektromagnetski čimbenici. Osnovne karakteristike impulsnog šuma su amplituda, trajanje i vrijeme preklapanja te se tako u ovisnosti o ovim karakteristikama razlikuju tri vrste impulsnog šuma – REIN (*engl. Repetitive Electrical Imupluse Noise*), PEIN (*engl. Prolonged Electrical Impulse Noise*) i SHINE (*engl. Single Isolated Impulse Noise*). Kako bi se riješili ovi problemi, u VDSL2 je ugrađena tehnika ispravljanja impusnih pogrešaka – INP (*engl. Impulse Noise Protection*). Tehnika ispravljanja impulsnih pogrešaka ima sposobnost ispravljanja impulsnog šuma koji traje manje od 250 ms, što je ujedno najveće trajanje impulsnog šuma koje se može ispraviti. Što se dužine trajanja impulsnog šuma tiče REIN traje manje od 1 ms, PAIN traje od 1

ms do 10 ms, a SHINE više od 10 ms. Postoje različite tehnike ispravljanja pogrešaka proizvedenih impulsnim šumom, a najčešće se koriste:

- Reed-Solomon dekodiranje
- retransmisija

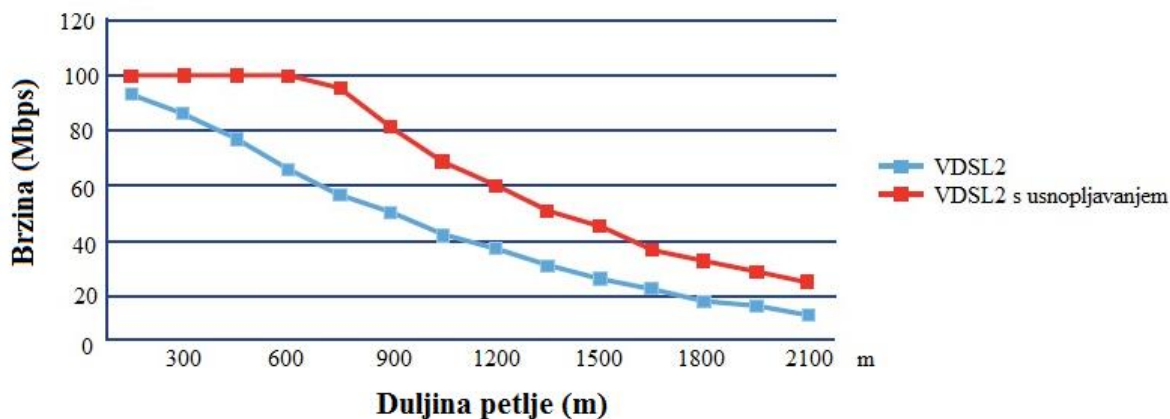
Osnovna ideja ispravljanja pogrešaka proizvedenih impulsnim šumom je da se odvoje korisni podaci od smetnje odnosno šuma u vremenskoj domeni. U tu svrhu koristi se Reed-Solomon dekoder, koji omogućuje da se podaci koji su u nekom određenom trenutku bili oštećeni šumom isprave, odnosno rekonstruiraju. Reed-Solomon dekoder ima određena ograničenja kao što su npr. porast zahtjeva za sustavnom memorijom pri većem trajanju impulsnog šuma te povećavanje kašnjenja pri prijenosu podataka. Retransmisija je drugi mehanizam i temelji se na ponovljenom prijenosu podataka između prijemnika i predajnika kako bi se izbjegle pogreške koje nastaju uslijed šuma.

3.5.1. Usnopljavanje (*engl. Bonding*)

Usnopljavanje je tehnika koja se koristi u VDSL2 tehnologiji i zaslužna je za postizanje većih brzina prijenosa podataka. Ova tehnika temelji se na spajanju više linija na podatkovnoj razini iz DSLAM-a do krajnjeg odredišta i njihovom korištenju kao jedne zasebne cjeline, odnosno jedne protočne strukture. Na ovaj se način povećava domet VDSL2 signala i omogućuje veća brzina prijenosa podataka. U slučaju da se spoje dvije VDSL2 linije povećanje brzine prijenosa podataka je skoro dvostruko na istoj udaljenosti. Ukoliko se brzina prijenosa podataka ne povećava, povećava se konačna udaljenost do krajnjeg korisnika. Usnopljavanjem četiriju i više VDSL2 linija postižu se vrlo visoke brzine koje su posebno zanimljive poslovnim korisnicima koji zahtijevaju veliki protok podataka u kratkom vremenu. Primjerice usnopljavanjem osam linija mogu se postići brzine blizu 400 Mbps. Tehnika usnopljavanja standardizirana je prema ITU G.998 preporuci. Tako postoje:

- G.998.1 odnosno višelinijnsko usnopljavanje bazirano na ATM-u [17]
- G.998.2 odnosno višelinijnsko usnopljavanje bazirano na Ethernetu [18]
- G.998.3 odnosno xDSL usnopljavanje korištenjem vremenske raspodjele s inverznim multipleksiranjem [19]

Nužan uvjet za usnopljavanje su minimalno dvije linije po svakom korisniku, što zbog ograničenosti same infrastrukture može biti potencijalni problem s upitnom financijskom isplativošću. Na slici 3.15 prikazana je usporedba brzine prijenosa podataka s i bez usnopljavanja za VDSL2 tehnologiju.

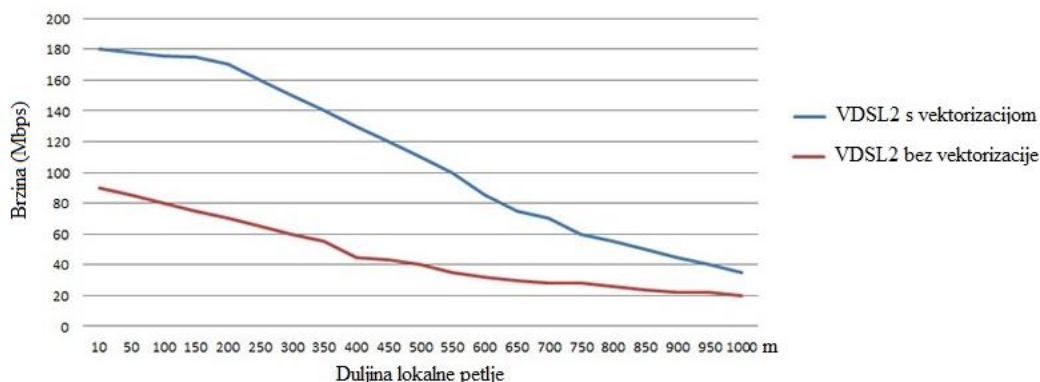


Slika 3.15. Usporedba brzine prijenosa podataka s i bez usnopljavanja za VDSL2 tehnologiju [20]

Iz slike 3.15. vidi se da je najveća dobit usnopljavanja upravo na udaljenostima od 500 m do 1300 m.

3.5.2. Vektorizirani prijenos (*engl. Vectoring*)

Jedan od najvećih problema xDSL tehnologija za postizanje većih brzina prijenosa podataka je preslušavanje na daljem kraju između parica, odnosno FEXT. Preslušavanje na daljem kraju smanjuje se skraćivanjem duljine pretplatničke petlje [21]. Upravo iz ovog razloga skraćivanjem pretplatničke petlje ne dobiva se maksimalna učinkovitost ako se koristi klasična širokopojasna prijenosna tehnologija. Metoda koja potiskuje ili u potpunosti eliminira utjecaj preslušavanja između parica naziva se vektorizirani prijenos. Korištenjem ove metode postižu se brzine u dolaznom smjeru preko 100 Mbps na udaljenostima do 500 m. Vektorizirani prijenos koristi napredne tehnike obrade signala kako bi se smanjilo ili u potpunosti eliminirao utjecaj preslušavanja između parica. Primjenom vektoriziranog prijenosa učinkovitost signala se povećava za 30% do 100%. Važno je napomenuti da se ova metoda ne izvodi na principu parica po parica, nego se izvodi zajednički između grupe parica. Učinci tehnike vektorizacije umanjuju se s povećanjem duljine lokalne petlje, dok se za lokalne petlje dulje od 1000 m ne postiže gotovo nikakav učinak, odnosno učinci vektorizacije praktično su zanemarivi, što je vidljivo iz slike 17. Svaka ne vektorizirana parica u kabelu može negativno utjecati na ostale parice pa tako i na rad cjelokupne usluge. Vektorizirani prijenos standardiziran je preporukom ITU G.993.5 [22] te se može koristiti osim u VDSL2 tehnologiji i u ADSL i ADSL2 tehnologijama. Slika 3.16. prikazuje usporedba brzine prijenosa podataka s i bez vektorizacije kod VDSL2 tehnologije.



Slika 3.16. Usporedba brzine prijenosa podataka s i bez vektorizacije za VDSL2 tehnologiju [23]

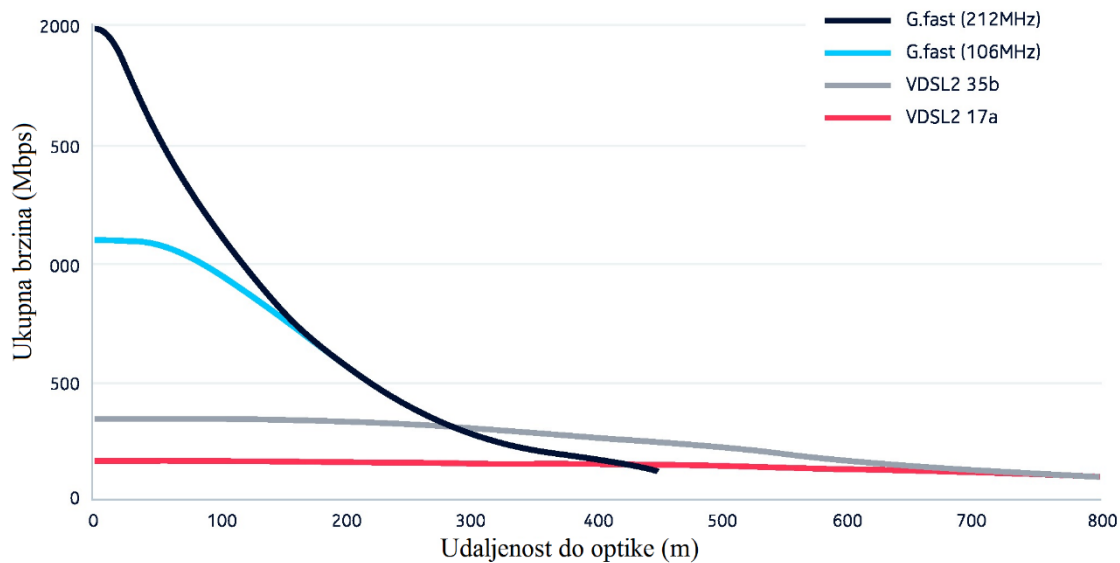
3.6. G.fast

S obzirom da je sama implementacija optike do krajnjeg korisnika – FTTH (*engl. Fiber To The Home*) izuzetno skupa i teško izvediva, a kako bi se krajnjim korisnicima osigurale brzine veće od 100 Mbps, uvedena je G.fast tehnologija. G.fast tehnologija svoju temeljnu upotrebu nalazi na povezivanju postojeće pristupne infrastrukture, kao što su telefonske linije i koaksijalni kabeli na optičke točke distribucije, tj. FTTdp (*engl. Fiber To The distribution point*), ali na vrlo malim udaljenostima. U FTTdp implementacijama, određeni broj pretplatnika na kratkim udaljenostima (200 m do 300 m) priključen je na jedan čvor optike, koji djeluje kao DSLAM. G.Fast FTTdp čvor ima veličinu manjeg ormarića koji se obično smješta ispred stambene zgrade. Kod G.Fast tehnologije, podaci se moduliraju pomoću DMT modulacije, kao u VDSL2 i većini ADSL varijanti i to na način da se modulira do 12 bita po DMT nosiocu frekvencije. Ukupna brzina prijenosa podataka koja se postiže na udaljenosti do 70 m je 1 Gbps, dok na udaljenosti do 100 m ona iznosi do 800 Mbps. Pri ovako velikim brzinama preslušavanje je izuzetno veliki problem te je vektorizirani prijenos kod G.fast-a nužan. Također, za postizanje ovako velikih brzina prijenosa podataka koristi se širina frekvencijskog pojasa do 106 MHz, a za neke buduće inačice predviđeno je i do 212 MHz. Problem kod G.fast sustava je također kao i kod VDSL2 sustava impulsni šum te se i u ovim sustavima koriste tehnike ispravljanja impulsnih pogrešaka Reed-Solomon dekodiranje i retransmisija.

| Udaljenost | 70 m | 100 m | 200 m | 250 m | 500 m |
|------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Brzina | do 1000 Mbps | do 800 Mbps | do 200 Mbps | do 150 Mbps | do 100 Mbps |

Tablica 3.3. Brzine G.Fast sustava u odnosu na udaljenost do optike

Ukupne brzine G.fast sustava u odnosu na udaljenost do FTTdp čvora prikazane su u tablici 3.3., dok je usporedba ukupne brzine prijenosa podataka G.fast sustava i VDSL2 sustava prikazana na slici 3.17.



Slika 3.17. Odnos ukupne brzina G.Fast sustava i VDSL2 sustava u ovisnosti o udaljenosti od optike [24]

Kako je već bilo rečeno, danas se već koristi i G.fast druge generacije koji koristi frekvencijski spektar do 212 MHz, s najvećim brzinama prijenosa podataka do 1,5 Gbps na malim udaljenostima. Ovakvim velikim brzinama prijenosa ujedno se rješava i problem „posljednje milje“ ili „posljednjeg kilometra“ (*engl. Last Mile*). U telekomunikacijskoj infrastrukturi, pod pojmom „posljednja milja“ smatra se završni dio do krajnjeg korisnika, koji je zapravo i bio jedan od najvećih problema što se brzine prijenosa podataka tiče. Telekomunikacijska infrastruktura davatelja internet usluga u većini slučajeva je danas na optičkom kabelu i podržava velike brzine, dok je tu istu brzinu, zbog toga što su najčešće na bakrenoj infrastrukturi krajnji korisnici nisu bili u mogućnosti postići. Uvođenjem modernih xDSL tehnologija kao što je VDSL2 i G.fast ovaj problem je donekle riješen, mada je konačno i trajno rješenje uvođenje optike do svakog krajnjeg korisnika, što opet zbog visoke ukupne cijene potrebnih radova trenutno nije financijski isplativo.

4. KABLIRANJE U DSL-U

Pojavom osnovne telefonske usluge počelo je intenzivno provlačenje telefonskih kabela od telefonskih centrala do krajnjih korisnika. Danas gotovo svako kućanstvo ima priključak na telefonsku mrežu. Sam postupak provlačenja kabela relativno je skup i zahtjevan posao, tako da se nastojalo, kako su tehnologije napredovale, da se u što većoj mjeri iskoristi postojeća telekomunikacijska infrastruktura. Upravo velika popularnost i prednost DSL tehnologija i jest činjenica da one koriste već postojeće telefonske bakrene parice koristeći napredne tehnike modulacije signala za prijenos podataka velikim brzinama i to na način da se koristi neiskorišteni dio frekvencijskog pojasa parice.

4.1. Telekomunikacijski kabel za xDSL prijenosne tehnologije

Osnova telekomunikacijske infrastrukture je vodič, odnosno cilindrična, jednolično izvučena, homogena bakrena žica. Vodič se izrađuje od elektrolitskog bakra, najčešće promjera 0,4 mm, 0,5 mm i 0,6 mm. Vodiči se izoliraju bešavnim slojem pjenastog polietilena, iznad kojega se postavlja tanak pokrovni sloj od punog polietilena.

Paricu čine dva zajedno upredena izolirana vodiča ili žile, a upredenje se radi kako bi se smanjilo preslušavanje koje nastaje uslijed indukcije. Upredene parice koriste se obično kod kablova većih dužina. Pokrovni sloj postavljen iznad izolacije obavezno se izrađuje u boji. Izolirani vodiči u jednoj parici moraju biti različitih boja. Dvije parice ili četiri upredene žile zajedno nazivaju se četvorke. Četvorke se obično koriste za polaganje kablova na veće udaljenosti, s time da je svaka žila posebno označena. Jezgra telekomunikacijskog kabela sastoji se od žila, tj. parica, odnosno četvorki. Prema rasporedu osnovnih elemenata unutar jezgre telekomunikacijskog kabela razlikujemo jezgre s koncentričnim slojevima, gdje su svi elementi koncentrično raspoređeni unutar jezgre, te jezgre sa sektorskim slojevima, gdje su elementi unutar jezgre raspoređeni zajedno prema sektorima. Pojedini slojevi jezgre kabela omataju se s jednom ili više termoplastičnih traka u otvorenoj zavojnici. Jezgra kabela mora biti potpuno ispunjena masom za punjenje radi sprečavanja prodiranja vode uzduž kabela. Sama masa za punjenje ne smije se na temperaturama ispod 0 °C stvrdnjavati, što može otežati polaganje kabela pri niskim temperaturama. Preko jezgre kabela postavlja se pojasna izolacija od najmanje dvije termoplastične trake i to tako da se namotaji svake pojedinačne trake međusobno preklapaju. Na pojasnu izolaciju postavlja se uzdužno aluminijska traka debljine oko 0,2 mm na koju potom dolazi

tanak sloj kopolimer etilena debljine oko 0,1 mm. Iznad aluminijske trake postavlja se bešavni plašt od polietilena crne boje na kojem stoji oznaka kabela.

Razlikuju se dvije vrste telekomunikacijskih kabela za xDSL prijenosne tehnologije: samonosive kablove (kablovi koji se postavljaju iznad zemlje) i podzemne kablove (kablovi koji se postavljaju ispod površine zemlje). Važno je napomenuti da samonosivi telekomunikacijski kabel za xDSL prijenosne tehnologije uz sam kabel ima i noseće uže, koje se izrađuje pouzavanjem čeličnih pocinčanih žica promjera 1,0 i 1,2 mm i koje služi kao nosač telekomunikacijskog kabela. Na slici 4.1. prikazan je telekomunikacijski kabel TK 53U-50 GM.



Slika 4.1. Primjer telekomunikacijskog kabela s vidljivim četvorkama i nosećim užetom

Pojavom širokopojsnih usluga, odnosno brzog pristupa internetu, videa na zahtjev, učenja na daljinu, rada na daljinu, te općenitim povećanjem količine informacija koja se svakodnevno razmjenjuje preko interneta, zahtjevi za prijenos podataka postaju iznimno veliki. Zahtjevi pak za većom brzinom prijenosa podataka traže veće širine prijenosnog pojasa kako bi se što više informacija po jednom kanalu moglo prenijeti i u što kraćem roku postigla zadovoljavajuća kvaliteta usluge prijenosa podataka. Stara telekomunikacijska infrastruktura ne zadovoljava u potpunosti stvarne potrebe za prijenosom velike količine podataka, pa se preporučuje ispitivanje postojeće infrastrukture i zamjena barem 500 m pristupnog dijela mreže novim vrstama telekomunikacijskih kabela za xDSL prijenosne tehnologije koji omogućuju povećanje kapaciteta prijenosa podataka, čime se poboljšavaju karakteristike telekomunikacijske mreže. S obzirom da se trend povećanja broja korisnika modernih telekomunikacijskih usluga svakim danom znatno povećava, postoji realna bojazan da ovakva djelomična zamjena telekomunikacijske infrastrukture vrlo brzo neće moći osigurati sve potrebe krajnjih korisnika, te bi najbolje rješenje bila kompletna zamjena telekomunikacijske infrastrukture novim telekomunikacijskim kablovima. Ovo je veliki projekt koji zahtjeva visoke troškove ulaganja u infrastrukturu kao i druge administrativne probleme. U praksi se pokazalo da je ove probleme najbolje riješiti postupnom zamjenom telekomunikacijske infrastrukture ponajprije u pojedinim dijelovima urbanih sredina, gdje se

nalazi i najveći broj krajnjih korisnika, a time i najveće potrebe za širokopojasnim uslugama, a naknadno zamjenom telekomunikacijske infrastrukture u suburbanim i ruralnim sredinama.

4.1.1. Osnovne karakteristike telekomunikacijskih kabela za xDSL prijenosne tehnologije

Pored osnovnih karakteristika koji su zajednički svim kablovima kao što su otpor vodiča, otpor izolacije vodiča, radni kapacitet, dielektrična čvrstoća te karakteristična impedancija, jedan od najvažnijih parametara telekomunikacijskih kabela za xDSL prijenosne tehnologije je preslušavanje, odnosno najlošija vrijednost sume snaga preslušavanja na bližem kraju što se označava kao PSNEXT (*engl. Power Sum NEXT*) i najlošija vrijednost sume snaga preslušavanja istog nivoa na daljem kraju što se označava kao PSELFEXT (*engl. Power Sum Equal Level FEXT*). PSNEXT predstavlja ukupan utjecaj snage preslušavanja na bližem kraju svih ometajućih parica u odnosu na mjerenu ometanu paricu. Granične vrijednosti ovoga parametra računaju se prema jednadžbi:

$$PSNEXT(f) = PSNEXT Ref - 15 \log(f) \quad (4 - 1)$$

gdje je f frekvencija u MHz, a vrijednosti $PSNEXT Ref$ dane su u tablici 4.1.

| Referentno frekvencijsko područje kabela | PSNEXT Ref (dB) |
|--|-----------------|
| od 1 MHz do 30 MHz | 44 |
| od 1 MHz do 60 MHz | 52 |
| od 1 MHz do 100 MHz | 62 |

Tablica 4.1. Vrijednosti PSNEXT Ref za referentno frekvencijsko područje kabela [25]

PSELFEXT predstavlja ukupan utjecaj snage preslušavanja na daljem kraju svih parica u odnosu na mjerenu paricu. Granične vrijednosti ovoga parametra računaju se prema jednadžbi:

$$PSELFEXT(f) = PSELFEXT Ref - 20 \log(f) \quad (4 - 2)$$

gdje je f frekvencija u MHz, a vrijednosti $PSELFEXT Ref$ dane su u tablici 4.2.

| Referentno frekvencijsko područje kabela | PSELFEXT Ref (dB) |
|--|-------------------|
| od 1 MHz do 30 MHz | 45 |
| od 1 MHz do 60 MHz | 53 |
| od 1 MHz do 100 MHz | 62 |

Tablica 4.2. Vrijednosti PSELFEXT Ref za referentno frekvencijsko područje kabela [25]

Objekti vrijednosti iskazane su u dB u odnosu na duljinu od 100 m.

Ostali važni parametri telekomunikacijskih kabela za xDSL prijenosne tehnologije su:

- Povratni gubici – RL (*engl. Return Loss*) predstavljaju odnos ulazne i reflektirane snage signala te se iskazuju u dB. Povratni gubici nastaju na onim mjestima uzduž telekomunikacijskog kabela gdje postoji nehomogenost karakteristične impedancije parice. Za bilo koju paricu u frekventijskom području od 1 MHz do najveće referentne frekvencije minimalna vrijednost povratnih gubitaka ne smije biti manja od vrijednosti prema Tablici 4.3.

| Najveća referentna frekvencija [MHz] | Granične vrijednosti povratnih gubitaka za frekventijsko područje [dB] | | |
|--------------------------------------|--|-------------|---------------------------|
| | 1 – 10 MHz | 10 – 20 MHz | >20 MHz |
| 30 | $15 + 2 \cdot \log(f)$ | 17 | $17 - 7 \cdot \log(f/20)$ |
| 60 | $17 + 3 \cdot \log(f)$ | 20 | $20 - 7 \cdot \log(f/20)$ |
| 100 | $20 + 5 \cdot \log(f)$ | 25 | $25 - 7 \cdot \log(f/20)$ |

Tablica 4.3. Granične vrijednosti povratnih gubitaka za pojedinu frekvenciju [25]

- Brzina propagacije signala (*engl. Velocity of propagation*) je parametar brzine prostiranja signala kroz paricu i iskazuje se u odnosu na brzinu prostiranja svjetlosti u vakuumu. Minimalna vrijednost propagacijske brzine za bilo koju paricu ne smije biti manja od $0,58 \cdot c$ (gdje je c brzina svjetlosti u vakuumu) za sve frekvencije između 1 MHz i maksimalne referentne frekvencije. Nesimetričnost brzine propagacije definira se kao razlika brzina propagacije signala između bilo koje dvije parice unutar istog kabela za duljinu od 100 m. Ovaj parametar je bitan za sustave s prijenosom signala preko više parica odnosno multipleksiranjem, gdje se na prijemnoj strani signali ponovo prikupljaju, odnosno obavlja se demultipleksiranje. U ovom slučaju vrlo je važno da vrijeme kašnjenja signala bude što manje radi točne regeneracije signala na prijemnoj strani. Najveća vrijednost ovog parametra ne smije biti veća od 48 ns na udaljenosti od 100 m.
- Površinska prijenosna impedancija definira se kao kvocijent uzdužno induciranog napona u sekundarnom (unutarnjem) krugu koji je posljedica struje koja teče primarnim (vanjskim) krugom. Ovaj parametar ukazuje koliko je zaštitno djelovanje plašta kabela od utjecaja različitih vrsta vanjskih visokofrekventijskih smetnji.

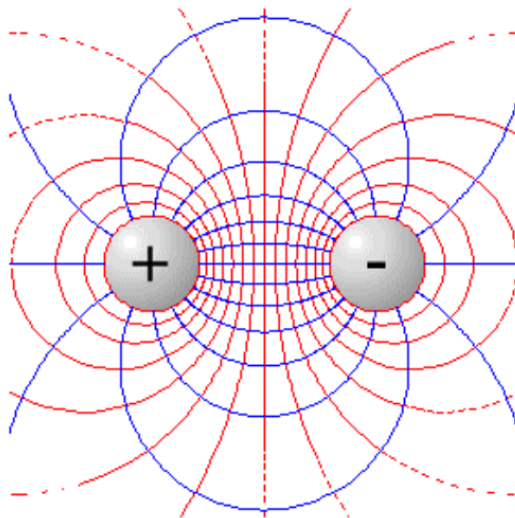
Danas se za xDSL prijenosne tehnologije koristi telekomunikacijski kabel oznake TK 59U-xDSL. S obzirom na sve navedeno, jasno je vidljivo kao je telekomunikacijska infrastruktura iznimno važan čimbenik u cijelom lancu prijenosa podataka do krajnjeg korisnika.

5. UTJECAJ XDSL TEHNOLOGIJE NA DRUGE SUSTAVE

Uzevši u obzir razvoj xDSL tehnologija kao i potrebe krajnjeg korisnika za sve većim brzinama pored naprednih modulacijskih tehnika, povećanje brzina prijenosa podataka postiže se i proširivanjem frekvencijskog pojasa kojeg određena xDSL tehnologija koristi. Kako VDSL2 tehnologija koristi frekvencijski pojas do 30 MHz, a G.Fast i do 106 MHz, odnosno novija verzija i do 212 MHz jasno je da postoji opasnost od njihovog utjecaja ili stvaranja smetnji na tehnologije koje već rade u tim frekvencijskim područjima.

5.1. Elektromagnetsko zračenje telekomunikacijskog kabela

Gibanjem električnog naboja, odnosno protjecanjem struje kroz vodič nastaje elektromagnetsko polje. Na slici 5.1. prikazan je pozitivni i negativni električni naboj kao izvor elektromagnetskog polja.

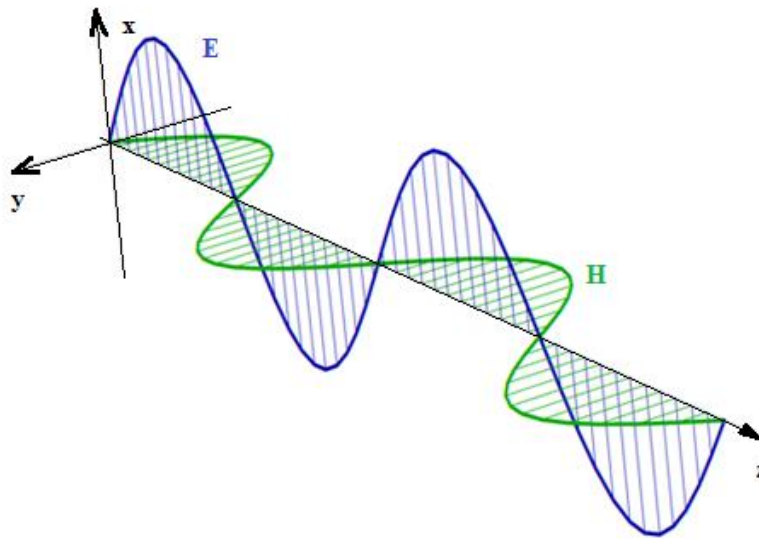


Slika 5.1. Pozitivni i negativni električni naboj

Elektromagnetski valovi stvaraju elektromagnetsko polje koje se sastoji od komponente električnog polja E i komponente magnetskog polja H . Promjenjivo električno polje stvara promjenjivo magnetsko, a promjenjivo magnetsko polje stvara promjenjivo električno itd. te tako nastaje elektromagnetski val. Izračeni elektromagnetski val u nekom drugom vodiču koji se nalazi u blizini, inducira električnu struju, odnosno prenosi informaciju od neke točke odašiljanja do točke prijema. Ovo je temelj bežične komunikacije, odnosno bežičnog prijenosa informacija. Elektromagnetski val se u vakuumu prostire brzinom svjetlosti. Osnovne varijable elektromagnetskog polja su:

- gustoća magnetskog toka \mathbf{B} , koja se iskazuje u jedinici T – Tesla
- jakost magnetskog polja \mathbf{H} , koja se iskazuje u jedinicama A/m
- gustoća električnog polja \mathbf{D} , koja se iskazuje u jedinicama C/m²
- jakost električnog polja \mathbf{E} , koja se iskazuje u jedinicama V/m

Prikaz prostiranja elektromagnetskog vala u prostoru prikazan je na slici 5.2.



Slika 5.2. Prikaz prostiranja elektromagnetskog vala u prostoru

Rasprostiranje elektromagnetskih valova u prostoru opisano je Maxwellovim jednažbama. Za električno i magnetsko polje valne jednažbe definirane su prema:

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (5 - 1)$$

$$\nabla^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} = 0 \quad (5 - 2)$$

gdje je

$$k = \omega \sqrt{\mu \varepsilon} \quad (5 - 3)$$

valni broj ili koeficijent faze, ω je kutna frekvencija vala, μ je relativna permeabilnost sredstva, a ε relativna permitivnost sredstva.

Električno i magnetsko polje mogu imati komponente u sva tri smjera x, y, z. Ako se uzme da je rješenje jednažbe:

$$\nabla \vec{E} = 0 \quad (5 - 4)$$

a da je vektor električnog polja jednak u svim točkama ravnine koja je okomita na jedan pravac, tj. na z-os pravokutnog koordinatnog sustava, te ako se pretpostavi da je komponenta električnog polja u smjeru z jednaka nuli, dobiva se sljedeća valna jednadžba:

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (5 - 5)$$

Uz uvjet Gaussovog zakona iz jednadžbe (5-4), dobiva se:

$$\frac{\partial E_z}{\partial z} = 0 \quad (5 - 6)$$

Uvjet iz jednadžbe (5-6) može biti zadovoljen samo ako je E_z jednako nuli ili konstantno. Uz pretpostavku da je

$$E_y = 0 \quad (5 - 7)$$

električno polje ima samo komponentu u smjeru x-osi, odnosno rješenje jednadžbe je ravni val. Tako se valna jednadžba svodi na diferencijalnu jednadžbu drugog reda.

$$\frac{d^2 E_x}{dz^2} + k^2 E_x = 0 \quad (5 - 8)$$

Električno i magnetsko polje povezano je veličinom koja se naziva intrinzična impedancija sredstva i ona se može opisati jednadžbom:

$$\eta = \frac{\omega \mu}{k} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (5 - 9)$$

i ona za val u vakuumu iznosi

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 376,7 \, \Omega \cong 120\pi \quad (5 - 10)$$

gdje je ϵ_0 dielektrična konstanta vakuuma i iznosi

$$\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \quad [F/m] \quad (5 - 11)$$

a μ_0 je relativna permeabilnost vakuuma i iznosi

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \quad [H/m] \quad (5 - 12)$$

Također vrijedi da je:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c_0^2} \quad (5 - 13)$$

gdje je c_0 brzina svjetlosti u vakuumu i iznosi

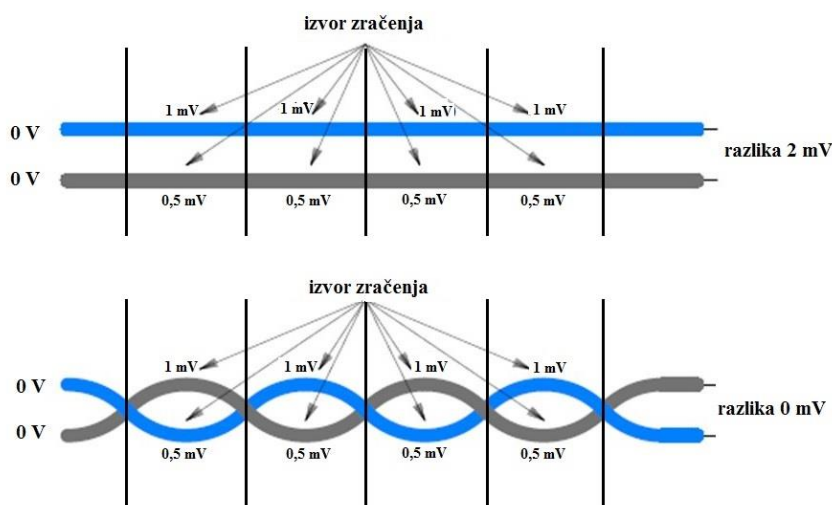
$$c_0 = 3 \cdot 10^8 \quad [m/s] \quad (5 - 14)$$

Dakle, na dovoljnoj udaljenosti od izvora, za elektromagnetski val može se reći da je on gotovo ravan, te vrijedi jednačina:

$$\eta_0 = \frac{E}{H} \quad (5 - 15)$$

Iz gornje jednačine vidi se povezanost električnog i magnetskog polja. Isto se događa i kod telekomunikacijskih kabela. Stari telefonski kablovi bili su namijenjeni prvenstveno prijenosu govora i signala u frekvencijskom opsegu od svega nekoliko kHz. Kao što je poznato, svojstvo svakog vodiča je da se pri povećanju frekvencijskog opsega prijenosnog signala sve više i više ponaša kao antena i pri tome emitira elektromagnetsko zračenje. U ovom slučaju, isti taj kabel, budući da se ponaša kao antena također prima signale drugih tehnologija koje rade u istom frekvencijskom području. Razlog zašto se u telekomunikacijama koriste upredene parice jest upravo činjenica da je elektromagnetsko zračenje pri njihovom korištenju manje nego kada bi se koristile ravne parice. Npr. uz pretpostavku da se prijenos signala vrši preko dva vodiča te da na oba djeluje neki vanjski izvori smetnje. Ukoliko vanjski izvor smetnje djeluje na oba vodiča jednako, na samome kraju prijenosne linije, gledajući razliku potencijala ta dva vodiča, nema nikakvih promjena jer se signali poništavaju. Međutim, problem nastaje kada vanjski izvor smetnje

djeluje različito, odnosno na jedan vodič više, a na drugi manje i tada krajnja razlika između vodiča nije ista kao na izvoru signala. Ovo se najčešće javlja u telekomunikacijskim kablovima većih dužina koji su jedan do drugog. Na slici 5.3. prikazano je djelovanje smetnje na dva vodiča koji su na bliskoj udaljenosti jedan od drugoga. Na gornjoj slici vodiči su paralelni jedan s drugim, dok su na donjoj slici vodiči upredeni. U slučaju paralelnih vodiča pod utjecajem smetnje, na plavom vodiču na nekoj jedinici duljine inducira se napon od 1 mV, dok se na sivom na istoj jedinici duljine inducira 0,5 mV. Na kraju prijenosne linije razlika je 2 mV. U drugom slučaju, kod upredenih vodiča, na kraju prijenosne linije razlika je 0 mV jer se inducirane vrijednosti zbog upredanja vodiča međusobno poništavaju.

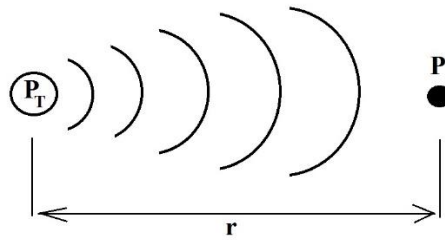


Slika 5.3. Izloženost paralelnih i upredenih vodiča izvoru zračenja

Jedan dio smetnje koje se unose u xDSL sustav može se ispraviti zahvaljujući kompleksnim modulacijama koje sustav koristi. Također važan parametar je i gustoća snage koja se iskazuje u W/m^2 . Ukoliko se pretpostavi da neki točkasti izvor zrači jednako u svim smjerovima srednja gustoća snage u nekoj točki u prostoru opisuje se jednadžbom:

$$P = \frac{P_T}{4\pi r^2} \quad [W/m^2] \quad (5 - 16)$$

gdje je P_T [W] izračena snaga, a r [m] je udaljenost između izvora zračenja i mjerne točke. Slika 5.4. prikazuje gustoću snage na udaljenosti r od izvora zračenja.



Slika 5.4. Gustoća snage na udaljenosti od izvora zračenja

Jakost električnog polja može se tada opisati sljedećom jednačbom:

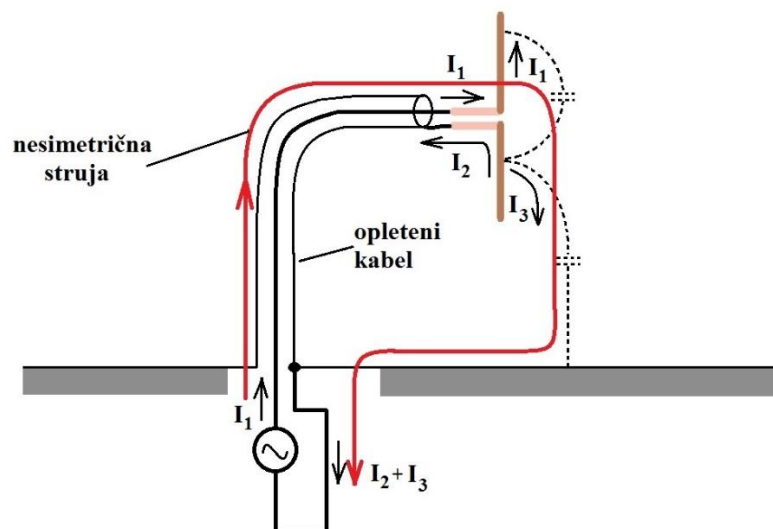
$$E = \sqrt{\frac{P_T \eta_0}{4\pi r^2}} = \sqrt{\frac{120 P_T}{4r^2}} = \sqrt{120 \pi P} \quad [\text{V/m}] \quad (5 - 17)$$

Ova jednačba vrijedi samo za daleka polja, gdje se elektromagnetski val može smatrati kao ravan val, odnosno dokle god su ispunjeni uvjeti iz jednačbe (5-18)

$$\frac{2\pi r}{\lambda} > 10 \quad (5 - 18)$$

gdje je λ [m] valna duljina radiofrekvencijskog signala [21].

Iz teorije o antenama poznato je da antena mora biti dobro balansirana. Na slici 5.5. prikazan je primjer nebalansirane dipol antene.



Slika 5.5. Nebalansirana dipol antena [26]

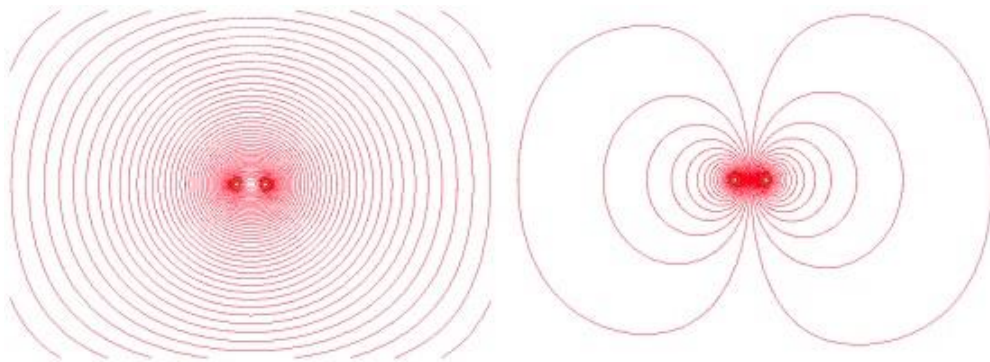
Iz slike 5.5. vidi se da parazitni kapacitet koji se javlja između antene i zemlje uzrokuje da jedan dio struje teče kroz zemlju a ne kroz oplet kabela. U ovom slučaju struja na anteni je neuravnotežena te antena postaje manje učinkovita. Struja koja nastaje u ovom slučaju naziva se nesimetrična struja (*engl. Common Mode Current*). Ako kabel promatramo kao antenu koja nije sasvim dobro balansirana, jedan mali dio struje javlja se izvan vodiča. Jakost ove struje određena je parametrom koji se naziva strujna ravnoteža kabela. Strujna ravnoteža kabela definirana je jednadžbom [27]:

$$b_i = \frac{I_{cm}}{I_{diff}} \quad (5 - 19)$$

gdje je I_{cm} nesimetrična struja, a I_{diff} diferencijalna struja, odnosno normalna struja koja teče vodičem. Parametar ravnoteže raspodjele struje po upredenoj parici naziva se gubitak uslijed longitudinalne simetrije – LCL (*engl. Longitudinal Conversion Loss*) i definiran je sljedećom jednadžbom:

$$LCL = 20 \log_{10}(b_i) \text{ [dB]} \quad (5 - 20)$$

Može se reći da je gubitak uslijed longitudinalne simetrije parametar koji govori koliko dobro je pojedini kabel balansiran, odnosno koliko zrači neželjeno elektromagnetsko polje te također koliko dobro će biti otporan na utjecaj vanjskih smetnji. U upredenoj parici koja nije dobro balansirana javlja se neželjeno zračenje uslijed razlika u amplitudi i fazi signala, dok kod dobro balansirane upredene parice signali imaju isti iznos amplitude, ali imaju faznu razliku od 180° , te se međusobno zračenje elektromagnetskog polja poništava što je prikazano na slici 5.6.



Slika 5.6. Zračenje lijevo loše, desno dobro balansirane parice

Kako bi se u što većoj mjeri smanjilo neželjeno elektromagnetsko zračenje telekomunikacijskog kabela iznimno je važna dobra simetričnost istoga. Gubitak uslijed longitudinalne simetrije je frekvencijski ovisan parametar, te u frekvencijskom području ispod 1 MHz za standardne telekomunikacijske kablove ima iznos 50 dB ili više, dok ova vrijednost s porastom frekvencije opada pa tako u 10 MHz području iznosi 30 do 40 dB [21].

U području telekomunikacija ukupna snaga najčešće se mjeri u odnosu na jedan mW [dBm], te se računa prema jednadžbi:

$$P_{dBm} = 10 \log\left(\frac{P}{1 \text{ mW}}\right) = P_{dBW} + 30 \text{ dB} = 10 \log\left(\frac{U^2}{R}\right) + 30 \text{ dB} \quad (5 - 21)$$

gdje je P [mW] snaga, U [V] je napon, a R [Ω] je impedancija.

Mjerni instrumenti vrlo često prikazuju vrijednost napona na ulazu u instrument ($\text{dB}\mu\text{V}$), te se u tom slučaju za 50Ω sustave koristi jednadžba:

$$V_{dB\mu V} = P_{dBm} + 107 \quad (5 - 22)$$

5.2. Mjerenje jakosti električnog polja

Za mjerenje jakosti električnog polja u nekoj točki koriste se mjerni prijemnici ili analizatori spektra s mjernim antenama. Jakost električnog polja osobito je važna i pri mjerenju smetnji koje se pojavljuju kada dvije tehnologije rade u istom frekvencijskom području ili kada neka tehnologija, uslijed neispravnosti ili neprilagođenosti frekvencijskom području na kojem radi, proizvodi signal smetnje. Osim u V/m jakost električnog polja u nekoj točki u praksi se najčešće iskazuje u $\text{dB}\mu\text{V/m}$. Vrijednosti koje se očitavaju na instrumentima su napon, koji se uz poznate karakteristike mjerne antene pretvara u jakost električnog polja. Dakako da mjerni instrumenti kao i mjerne antene moraju biti umjereni tako da uz određenu mjernu nesigurnost mjere točne vrijednosti. Jedan od osnovnih parametara mjerne antene je dobitak antene, koji je promjenjiv ovisno o frekvenciji koju antena mjeri. Kako bi se utvrdila jakost električnog polja u nekoj točki potrebno je na vrijednosti dobivene na mjernom instrumentu dodati utjecaj antene, odnosno faktor antene [28].

$$E = V_{dB\mu V} + K \quad [\text{dB}\mu\text{V/m}] \quad (5 - 23)$$

gdje je K faktor antene u dB/m.

Izračena snaga koju mjerna antena prima definirana je jednačbom:

$$P_r = PA_r = P \frac{G\lambda^2}{4\pi} \quad [\text{W}] \quad (5 - 24)$$

gdje je P gustoća snage odnosno jakost elektromagnetskog polja na nekoj udaljenosti antene od izvora zračenja, A_r efektivna površina prijemne antene, λ valna duljina, a G dobitak antene. Uz jednačbu (5-17) slijedi:

$$P_r = \frac{E^2 G \lambda^2}{480\pi^2} \quad (5 - 25)$$

a budući da vrijedi

$$P_r = \frac{U_r^2}{Z_0} \quad (5 - 26)$$

gdje je U_r napon na prijemu, a Z_0 ulazna impedancija mjernog instrumenta, slijedi da je:

$$\frac{U_r^2}{Z_0} = \frac{E^2 G \lambda^2}{480\pi^2} \quad (5 - 27)$$

te uz

$$\lambda = \frac{300 \text{ (m/s)}}{f \text{ (MHz)}} \quad (5 - 28)$$

slijedi da je

$$E = \frac{U_r f \text{ (MHz)} \pi}{75} \sqrt{\frac{30}{Z_0 G}} \quad (5 - 29)$$

Ako se uzme u obzir da je faktor antene definiran prema jednadžbi:

$$K = \frac{E}{U_r} \quad (5 - 30)$$

dobiva se da je faktor antene

$$K = \frac{f(\text{MHz})\pi}{75} \sqrt{\frac{30}{Z_0 G}} \quad (5 - 31)$$

Uz vrijednost Z_0 od 50Ω , jednadžba (5-31) u logaritamskom obliku iznosi:

$$K = 20 \log f(\text{MHz}) - G_{dB} - 29,78 \quad (5 - 32)$$

te uz jednadžbu (5-23) vrijedi:

$$E = V_{dB\mu V} + (20 \log f(\text{MHz}) - G_{dB} - 29,78) \quad (5 - 33)$$

Jednadžba (5-33) najčešće se u praksi koristi za dobivanje vrijednosti jakosti električnog polja na mjestu na kojemu se nalazi mjerna antena. Radi točnog iznosa gornjoj vrijednosti potrebno je još dodati i gubitke u prijenosnoj liniji odnosno mjernom kabelu s konektorima.

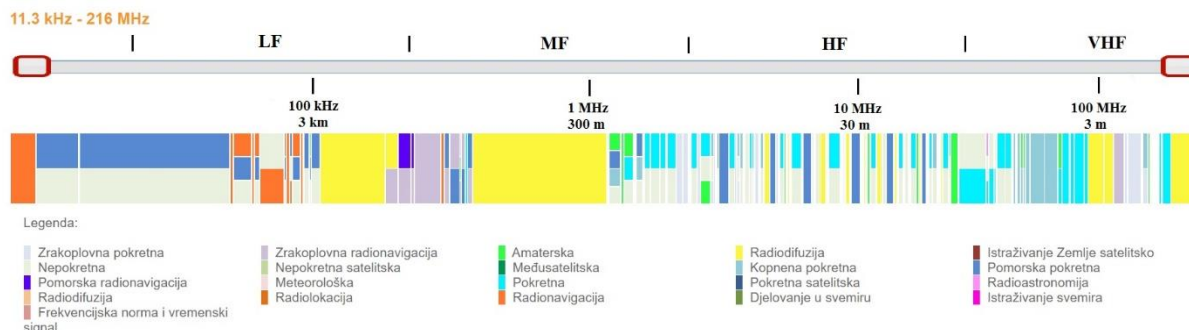
5.3. Sustavi koji rade u istom frekvencijskom području s xDSL tehnologijom

Hrvatska regulatorna agencija za mrežne djelatnosti kao nacionalni regulator iz područja telekomunikacija, pošte i željeznice u Republici Hrvatskoj propisuje tablicu namjene radiofrekvencijskog spektra. Ova tablica određuje namjenu radiofrekvencijskih pojaseva za pojedine radiokomunikacijske službe u skladu s radijskim propisima Međunarodne telekomunikacijske unije (ITU). Za svaki pojedinačni frekvencijski pojas posebno se utvrđuje:

- njegova namjena
- dodjela prema primjeni ili tehnologiji koja se koristi
- svrha (civilna ili vojna uporaba)
- mogućnost prijenosa ili najma

- način izdavanja dozvole

Frekvencijsko područje koje obuhvaćaju xDSL tehnologije proteže se trenutno do 212 MHz. Tablica radiofrekvencijskog spektra toga područja prikazana je na slici 5.6.



Slika 5.6. Namjena radiofrekvencijskog spektra do 212 MHz

Kako je vidljivo iz slike 5.6 frekvencijski spektar do 212 MHz zauzet je s različitim radijskim tehnologijama. Neke od njih prikazane su u tablici 5.1.

| Frekvencija (kHz) | Uporaba | Namjena | Primjena |
|---|-----------------|--|---------------------------------|
| 19,95 – 20,05; 2498 – 2502; 4995 – 5005; 9995 – 10005; 14990 – 15010; 19990 – 20010; 24990 – 25010 | civilna | frekvencijska norma i vremenski signali za točno vrijeme | |
| 135,7 – 137,8; 1810 – 2000; 3500 – 3800; 7000 – 7200; 10100 – 10150; 14000 – 14350; 18068 – 18168; 21000 – 21450; 24890 – 24990; 28000 – 29700; 50000 – 52000; 68000 – 70450; 144000 – 146000 | civilna | radioamaterska služba | prijenos govora ili telemetrija |
| 148,5 – 283,5 | civilna | radiodifuzija | radio na dugom valu |
| 255,0 – 495,0 | civilna / vojna | zrakoplovna navigacija | radio-farovi |
| 526,5 – 1606,5; 5900 – 6200; 7200 – 7450; 9400 | civilna | radiodifuzija | radio na srednjem valu |

| | | | |
|---|--------------------|------------------------------------|--|
| - 9900; 11600 – 12100; 13570 – 13870; 15100 – 15800; 17480 – 17900; 18900 – 19020; 21450 – 21850; 25670 - 26100 | | | |
| 26175 - 27500 | civilna | radio komunikacija | komunikacija govorom (građanski opseg) |
| 37500 - 61000 | vojna | pokretne i nepokretne komunikacije | sustavi obrane |
| 87500 - 108000 | civilna | radiodifuzija | UKV radio (FM) |
| 108000 - 137000 | civilna / vojna | zrakoplovna radiokomunikacija | ILS/Lokalizer, VOR, komunikacija govorom |
| 137000 – 138000 | civilna | meteorološka satelitska | meteorološki sateliti |
| 174000 – 216000 | civilna | radiodifuzija | digitalna televizija (DTV), digitalni radio (DAB) |

Tablica 5.1. Popis tehnologija do 216 MHz

5.3.1. Frekvencijska norma i vremenski signali za točno vrijeme

Prema ITU preporuci ITU-R TF.768 [29] frekvencijska norma i vremenski signali za točno vrijeme definirani su kao radiotelekomunikacijska usluga za znanstvene, tehničke i ostale svrhe, koja osigurava emitiranje signala specifične frekvencije, signala točnog vremena ili oba, visoke točnosti, koji su namijenjeni za uobičajenu upotrebu. Riječ je dakle o većem broju radijskih odašiljača koji su strateški smješteni na točno određene lokacije preko cijele zemaljske kugle i koji se generalno koriste kao norma za određivanje točnosti frekvencije ili čije signale koriste uređaji koji iz prijemnog signala ugađaju svoje točno vrijeme. Važno je napomenuti da su frekvencijski opsezi koje emitiraju ovi odašiljači pažljivo određeni kako ne bi proizvodili smetnje drugim tehnologijama. Izračena snaga ovih odašiljača iznimno je velika, a u većini slučajeva koriste se omnidirekcijske antene kako bi se emitirani signal jednakomjerno emitirao u prostor. Nama najbliži odašiljači u osnovnom frekvencijskom području smješteni su u Češkoj Republici u Pragu, te u Rimu u Italiji. Lokacije ovih odašiljača u većini slučajeva su izvan urbanih područja u kojima je smještena glavna infrastruktura xDSL preko koje se prenose xDSL signali i zbog toga nisu zabilježene značajne međusobne smetnje.

5.3.2. Radioamaterska služba

Osnovna ideja radioamaterizma je razmjena informacija (govor, telegrafija...) na daljinu. Prije nekoliko desetaka godina radioamaterizam je bio izrazito popularan hobi i zastupljen u

društvu. Osnovna karakteristika radioamaterske službe je korištenje prijemne opreme visoke osjetljivosti s iznimno velikim i posebno konstruiranim prijemnim antenama, koje omogućuju prijem signala iz vrlo velikih udaljenosti. Razmjena informacija između radioamatera obavlja se ne samo na razini države, nego i kontinenta. Posebno je bila zanimljiva komunikacija refleksijama signala od raznih prirodnih pojava, kao što je polarna svjetlost ili ionizirani tragovi meteora, a vrhunac radioamaterske komunikacije bila je refleksija signala od Mjeseca. Na slici 5.7. prikazan je radioamaterski antenski sustav i primopredajnik.



Slika 5.7. Radioamaterski antenski sustav i primopredajnik

U današnje vrijeme, razvojem interneta olakšana je razmjena informacija te je razumljivo smanjenje interesa za radioamaterizam kojim se koristi sve manji broj ljudi. Radioamaterizam je tehnologija koja svoju iznimno veliku važnost ima pri kriznim slučajevima (prirodne katastrofe) kada većina komunikacijskih tehnologija, kao što su telefoni ili uređaji mreža pokretnih komunikacija mogu zbog nestanka električne energije ili uslijed preopterećenosti mreže zakazati.

Radioamaterska služba koristi frekvencijsko područje od 135,7 kHz do 146 MHz i to prema područjima opisanim u tablici 5.1. Za rad je potrebno imati dozvolu koja se dobiva nakon položenog radioamaterskog ispita. Zbog svoje prisutnosti u urbanim područjima i samog oblika i prirode signala, koji zauzima vrlo uzak frekvencijski pojas te velikih izračenih snaga i činjenice da signal nije cijelo vrijeme prisutan nego samo povremeno tijekom nekog vremenskog perioda, radioamatersko područje predstavlja puno veći problem kada se govori o smetnji od xDSL tehnologija. Upravo činjenica da postoje dva ili više jaka izvora zračenja na bliskoj udaljenosti dovodi do velike vjerojatnosti potencijalnih smetnji. Dakle, frekvencijsko područje u kojem su najčešće zabilježene smetnje koje uzrokuje xDSL tehnologija upravo je radioamatersko područje.

5.3.3. Radiodifuzija

Radiodifuzija je radiokomunikacijska usluga koja se temelji na odašiljanju radijskih signala najčešće radija ili televizije. Prema tablici namjene radiodifuzijski sustavi koji se preklapaju s frekvencijskim područjem koji koriste xDSL tehnologije su radio na dugom valu, radio na srednjem valu, radio na ultrakratkom valu (FM radio), te digitalna televizija (DVB-T) i digitalni radio (DAB+) na VHF području. Na području Europske unije za emitiranje radijskog programa s amplitudnom modulacijom namijenjena su tri odvojena frekvencijska pojasa i to dugi, srednji i kratki val. Dugi val koristi frekvencijsko područje od 148,5 kHz do 283,5 kHz, srednji val od 526,5 kHz do 1606,5 kHz, dok je kratki val od 3 MHz do 30 MHz. Radiostanice s amplitudnom modulacijom emitiraju s vrlo visokim izlaznim snagama te je njihovo područje pokrivanja izrazito veliko. Gotovo svi amplitudno modulirani odašiljači smješteni su izvan urbanih područja, gdje je najveća koncentracija xDSL tehnologija, tako da ne postoji velika opasnost od međusobnih smetnji ovih dviju tehnologija. Ako se uzme u obzir činjenica da je emitiranje radijskih programa na kratkom valu u Republici Hrvatskoj završeno 1. siječnja 2013. godine, a na srednjem valu 1. siječnja 2014. godine, te da je kod nas moguć jedino prijem radiostanica s amplitudnom modulacijom koje imaju matične odašiljače izvan Republike Hrvatske, potencijalno ometajući signali koje emitiraju radiostanice s amplitudnom modulacijom i ne postoje. Frekvencijsko područje emitiranja radijskog programa s frekvencijskom modulacijom proteže se od 87,5 MHz do 108 MHz. U Republici Hrvatskoj prisutno je mnogo ovakvih odašiljača koji su u većini slučajeva, osobito oni veće izračene snage, smješteni također izvan urbanih područja te nisu pod utjecajem potencijalne smetnje koje bi stvarao xDSL sustav. 2002. godine počelo je probno emitiranje digitalne televizije u Republici Hrvatskoj, a do 31. prosinca 2010. godine svi televizijski odašiljači koji su emitirali u analognoj tehnologiji prestaju s radom i emitiranje televizijskog programa je u potpunosti digitalno. Važno je napomenuti da u Republici Hrvatskoj trenutno nema emitiranja digitalne televizije u VHF području, odnosno u frekvencijskom području od 176 MHz do 216 MHz, iako ovaj frekvencijski pojas ima namjenu za radiodifuzijsko emitiranje digitalne televizije. Digitalna tehnologija koja je u Republici Hrvatskoj aktivna u ovom području jest digitalno emitiranje radijskog programa ili DAB+ (*engl. Digital Audio Broadcasting*). Probno emitiranje digitalnog radija koji bi u budućnosti trebao zamijeniti analogno emitiranje radijskog programa s frekvencijskom modulacijom počelo je 20. studenog 2017. godine. Važno je napomenuti da su odašiljači digitalne televizije i digitalnog radija smješteni na unaprijed planiranim i međunarodno koordiniranim lokacijama koji su također izvan utjecaja potencijalne

smetnje od xDSL sustava, a i same napredne modulacijske tehnike ovih sustava čine ih relativno otpornim na vanjske ometajuće signale.

U nekim državama europske unije (Velika Britanija, Francuska, Italija, Njemačka, Španjolska) kao i u nekim državama svijeta (Kina, Rusija) emitira se digitalni radijski program na kratkom, srednjem i dugom valu. Zadaća DRM-a bila ja zamjena emitiranja analognog radijskog programa na kratkom, srednjem i dugom valu digitalnim emitiranjem na istim frekvencijama uz visoku kvalitetu zvuka. Kvaliteta zvuka DRM-a usporediva je s kvalitetom zvuka emitiranja radijskog programa s frekvencijskom modulacijom s time da se iz razloga što se koristi nisko frekvencijsko područje, na kojemu se emitira radijski program, za istu izračenu snagu odašiljača s frekvencijskom modulacijom kod emitiranja radijskog programa u DRM tehnologiji pokriva puno veće područje. DRM je standardiziran prema ETSI ES 201 980 standardu. Za emitiranje radijskog programa koristi se frekvencijsko područje od 148,5 kHz pa sve do 300 MHz uz širinu kanala od 10 kHz i COFDM modulaciju (*engl. Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). S obzirom da DRM koristi isto frekvencijsko područje kao i xDSL tehnologija kod ove tehnologije postoji mogućnost pojavljivanja smetnji u prijemu DRM signala ukoliko se DRM prijemnik nalazi u blizini telekomunikacijskog kabela za širokopojasni prijenos podataka.

5.3.4. Radiofar

Radiofarovi su najčešće odašiljači koji se koriste za radionavigaciju. Ovi odašiljači koriste frekvencijsko područje od 255,0 kHz do 495,0 kHz te imaju neusmjerenu (kružnu) ili usmjerenu karakteristiku zračenja. Postavljaju se na važne geolozijske točke, odakle odašilju signale s pomoću kojih se može utvrditi trenutni položaj u prostoru ili udaljenost do točke odakle se emitira signal. Najčešće se koriste za određivanje točnog položaja zrakoplova ili brodova. Ovi se sustavi također ne postavljaju blizu xDSL sustava tako da nema potencijalne opasnosti od neželjenog zračenja između istih.

5.3.5. Građanski radijski opseg

Građanski radijski opseg (*engl. Citizen Band Radio*) ili CB radio obuhvaća frekvencijsko područje od 26,965 MHz do 27,405 MHz i omogućava dvosmjernu glasovnu komunikaciju kratkog dometa. Postoje ručne, mobilne i stacionarne odašiljačke stanice s najvećom izračenom snagom do 4 W. Frekvencijski opseg kojega koriste ovi sustavi sastoji se od 40 kanala širine 10 kHz. Sama komunikacija između sudionika je jednostrana (*engl. simplex*), što znači da kada jedan sugovornik odašilje signal na određenom kanalu, ne može u isto vrijeme primati signale drugih sugovornika. Ovo je na neki način mana ovog komunikacijskog sustava, ali je zbog jeftine cijene

uređaja, lakoće uporabe i besplatne komunikacije danas dosta raširen. Zbog relativno male izračene snage uređaja nisu zabilježene značajne međusobne smetnje između xDSL tehnologija i uređaja koji rade na građanskom radijskom opsegu.

5.3.6. Zrakoplovna radiokomunikacija

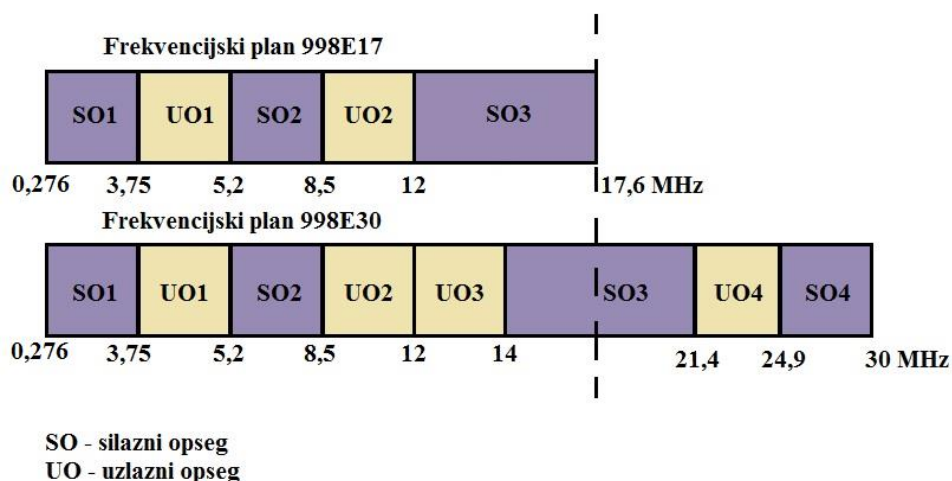
Frekvencijsko područje koje je namijenjeno aeronautičkim servisima, a koje se preklapa s frekvencijskim područjem koji koriste xDSL sustavi proteže se od 108 MHz do 137 MHz. Glavne zadaće aeronautičkog servisa su radionavigacija, koja zauzima frekvencijsko područje od 108 MHz do 117,975 MHz te komunikacija, za koju je predviđen frekvencijski spektar od 117,975 MHz do 137 MHz. Komunikacija može biti podatkovna ili glasovna. Frekvencijski spektar koji se koristi za radionavigaciju naziva se još i VHF Nav područje, dok se frekvencijski spektar koji se koristi za komunikaciju naziva i VHF Com područje, iako se u današnje vrijeme mogu kombinirati obje vrste usluga u oba frekvencijska spektra. Najvažnije usluge radionavigacijskog dijela frekvencijskog spektra su VOR (*engl. VHF Omnidirectional Range*) i ILS lokalizator (*engl. Instrument Landing System Localizer*). VOR je radionavigacijski sustav koji omogućava pilotu da s bilo koje pozicije odredi smjer letjelice prema VOR-u ili smjer od VOR-a prema letjelici. VOR odašiljač emitira dva VHF signala s jedne lokacije. Jedan signal se odašilje kao neusmjereni signal, a drugi signal se odašilje kao rotacijsko polje. Uz pomoć ova dva signala i magnetskog sjevera koji se uzima kao referentna točka određuje se položaju zrakoplova u prostoru. ILS sustav za instrumentalno slijetanje je radionavigacijski sustav koji osigurava zrakoplovu horizontalno i vertikalno navođenje tijekom slijetanja na pistu. Sustav za horizontalno navođenje zrakoplova naziva se ILS lokalizator, dok se sustav za vertikalno navođenje zrakoplova naziva ILS klizna putanja. ILS lokalizator daje informaciju zrakoplovu koliko mu horizontalna putanja prilikom slijetanja odstupa od centralne linije piste, a ILS klizna putanja daje informaciju ravnine poniranja zrakoplova u odnosu od idealne putanje slijetanja. Odašiljač ILS lokalizatora smješten je na suprotnom kraju piste u odnosu na početak piste na koju zrakoplov slijeće. Odašiljač ILS klizne putanje smješta se uz pistu na mjestu gdje pista počinje. Slično kao VOR sustav, ILS lokalizator pored navigacijskih signala može odašiljati govorne poruke i signale identifikacije zrakoplovne luke odnosno piste. Radiokomunikacijski frekvencijski pojas koristi se za komunikaciju između zemlje i zrakoplova. Signali koji se odašilju amplitudno su modulirani. Unutar ovog pojasa postoje dva kanala koji se koriste u slučaju nesreće ili opasnosti. Ovi signali odašilju se na frekvencijama 121,5 MHz i 123,1 MHz.

5.3.7. Meteorološki sateliti

Umjetni Zemljini sateliti koji su napravljeni za mjerenja Zemljine atmosfere i meteoroloških pojava u stvarnom vremenu te predviđanja prognoze vremena nazivaju se meteorološki sateliti. Geostacionarni sateliti nalaze se u ekvatorijalnoj orbiti na visini od 36 000 km s kutnom brzinom i smjerom gibanja jednakim kutnoj brzini i smjeru rotacije Zemlje tako da su prividno cijelo vrijeme iznad istog područja prema površini Zemlje. Kako bi se istovremeno snimili svi važni procesi vezani uz Zemljinu atmosferu potrebno je pet ovakvih satelita. Frekvencijsko područje koje koriste meteorološki sateliti, a koje se poklapa s frekvencijskim područjem koje koriste i xDSL sustavi je od 137 MHz do 138 MHz i koristi se za komunikaciju od satelita prema sustavima na Zemlji. Komunikacija se zasniva na slanju slika trenutnih podataka Zemljine atmosfere. Pored ovog frekvencijskog područja za komunikaciju u oba smjera koriste se i brojna druga. Meteorološki centri koji primaju informacije sa satelita smješteni su na posebnim geostrateškim lokacijama, a i sama frekvencijska područja koja se koriste od iznimnog su značaja te se na osobit način štite od vanjskih smetnji.

Ako se izuzme G.fast sustav, koji trenutno nije implementiran u velikoj mjeri u Republici Hrvatskoj, frekvencijsko područje koje koriste ostale xDSL tehnologije proteže se do 30 MHz.

S obzirom na izloženost telekomunikacijske infrastrukture u prostoru, samonosivi telekomunikacijski kabeli za xDSL prijenosne tehnologije potencijalni su izvori smetnji jer je kod njih elektromagnetsko zračenje puno veće nego kod kabela koju su ukopani u zemlju. Na slici 5.8 prikazan je frekvencijski plan VDSL2 tehnologije.



Slika 5.8. Frekvencijski plan za VDSL2

Usporedbom frekvencijskih područja iz tablice namjene radiofrekvencijskog spektra s vrijednostima frekvencijskih područja sa slike 5.8. te analizirajući prirodu signala i lokacije odašiljača gore navedenih tehnologija, lako se može zaključiti da je najveći potencijalni izvor smetnji od VDSL2 tehnologije upravo radioamaterska služba, digitalna radiodifuzija na kratkom, srednjem i dugom valu – DRM. Karakteristika ometajućeg elektromagnetskog zračenja xDSL sustava jest da je ono prisutno cijelo vrijeme te da je generalno vrlo niske razine, što ga čini dosta teškim za otkrivanje. Stoga se pri mjerenju zračenja treba približiti telekomunikacijskom kabelu na vrlo malu udaljenost. Postoje brojna međunarodna ograničenja i harmonizirane norme koje ograničavaju ovakva zračenja upravo zbog mogućnosti pojave ometajućih signala. Neke od osnovnih preporuka su preporuka Međunarodne telekomunikacije unije ITU-T K.60 te preporuka Europskog odbora za komunikacije ECC/REC/(04)/05. Praktični dio ovog specijalističkog rada bilo je mjerenje zračenja samonosivog telekomunikacijskog kabela tipa TK 59U-xDSL za xDSL prijenosne tehnologije te usporedba izmjerenih vrijednosti s postojećim normama.

6. ZAKONSKA REGULATIVA

Posebne propise i preporuke za granične vrijednosti elektromagnetskog zračenja propisuju tijela za normizaciju. Tijela za normizaciju dijele se na međunarodna i europska. Na međunarodnoj razini, to je ITU sa svoja dva pododjeljka ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) i ITU-R (ITU Radiocommunication Sector). Osnovna zadaća ITU organizacije je upravljanje s dodjelom frekvencijskih pojaseva te razvijanje propisa i preporuka u telekomunikacijskom i radiokomunikacijskom području. Za međunarodnu normizaciju u elektrotehnici odgovara Međunarodni odbor za elektrotehniku – IEC (*engl. International Electrotechnical Commission*). Posebne standarde i preporuke za ograničavanje i kontrolu elektromagnetskih smetnji donosi Međunarodni odbor za radio smetnje – CISPR (*fr. Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques*), koji je povezan s IEC-om. Ovi standardi predstavljaju temelj europskih standarda, koji u području elektromagnetske kompatibilnosti izrađuje Europski odbor za elektrotehničku normizaciju – CENELEC (*engl. European Committee for Electrotechnical Standardization*). Za normizaciju elektromagnetske kompatibilnosti u području telekomunikacija, CENELEC ima pomoć Europskog instituta za telekomunikacijske standarde – ETSI (*engl. European Telecommunications Standards Institute*).

ITU

Sjedište ITU organizacije je u Ženevi u Švicarskoj. Osnovni zadatak ITU-a je osigurati racionalno, pravedno, učinkovito i ekonomično korištenje radiofrekvencijskog spektra od strane svih radiokomunikacijskih službi, te provoditi studije i usvajati preporuke u području radiokomunikacija i telekomunikacija. ITU-T i ITU-R, koji su ranije zvani CCITT (*engl. Consultative Committee for International Telephony and Telegraphy*) i CCIR (*engl. Consultative Committee on International Radio*), su dva poddjela ITU-a koji razvijaju standarde, preporuke i propise u telekomunikacijskom sektoru (ITU-T), odnosno radiokomunikacijskom sektoru (ITU-R). Tijelo koje je, unutar ITU-a, odgovorno za dodjelu frekvencija je Međunarodni odbor za registraciju frekvencija – IFRB (*engl. International Frequency Registration Board*).

IEC

Međunarodni odbor za elektrotehniku odgovoran je za normizaciju u području elektrotehničkih znanosti. IEC priprema i objavljuje međunarodne standarde za sve električne, elektroničke i srodne tehnologije. Sjedište organizacije je također u Švicarskoj. IEC ima svoje odbore u više od 80 zemalja diljem svijeta. Hrvatski nacionalni odbor unutar IEC-a je Hrvatski zavod za norme.

CISPR

CISPR je posebni međunarodni odbor za radio smetnje i dio je IEC-a. Glavna zadaća odbora je definiranje opreme i metoda za mjerenje smetnji, te utvrđivanje minimalnih razina smetnje. Odbor također razmatra sigurnosne propise za suzbijanje smetnji koje mogu nastati od električne opreme.

CELNEC

Europski odbor za elektrotehničku normizaciju i odgovoran je za normizaciju na području Europske unije. Osim normi i standarda CELNEC također radi tehničke specifikacije i izvješća elektroničke opreme. Sastoji se od 34 zemlje članice, gdje su pored zemalja EU još Island, Norveška, Švicarska, Makedonija, Srbija i Turska. Hrvatski nacionalni odbor unutar CELNEC-a je Hrvatski zavod za norme. CENELEC je osnovan 1972. Usklađene norme objavljuju se u Službenom listu Europske komisije.

ETSI

Europski institut za telekomunikacijske standarde, sa svojim sjedištem u Sophia Antipolis u Francuskoj, odgovoran je za normizaciju unutar telekomunikacijskog područja. Za razliku od CENELEC-a, ETSI ima preko 800 članova u 64 država diljem svijeta. Članovi su proizvođači i korisnici telekomunikacijske opreme, mrežni operatori, istraživačke institucije, sveučilišta i tijela za normizaciju. Aktivnosti normizacije za područje telekomunikacija koje su se prije provodile unutar Europske konferencije poštanskih i telekomunikacijskih uprava – CEPT (*engl. European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*) prebačene su u ETSI 1988. godine. Glavna svrha Europskog instituta za telekomunikacijske standarde je otvoreno sudjelovanje u stvaranju standarda telekomunikacijske opreme uključujući proizvođače, korisnike, mrežne operatore i druge. Republika Hrvatska ima samo 3 člana od kojih je najpoznatije Sveučilište u Zagrebu. Sjedište ETSI-ja je u Francuskoj.

ECC

Odbor za elektroničke komunikacije – ECC (*engl. Electronic Communications Committee*) okuplja 48 zemalja sa sjedištem u Danskoj. Glavna zadaća Odbora je razvijanje zajedničke politike i propisa u području elektroničkih komunikacija, te planiranje i predlaganje što učinkovitije uporaba frekvencijskog spektra s ciljem uvođenja novih tehnologija, uz istovremenu zaštitu postojećih. Također ECC zastupa europske interese u ITU-u i drugim međunarodnim organizacijama.

6.1. ITU-T K.60

Međunarodna preporuka koja se odnosi na granične vrijednosti ukupno izračenog elektromagnetskog polja kao i mjerne metode za utvrđivanje istoga nosi oznaku ITU-T K.60. Ova preporuka propisuje razine emisija i ispitne metode za žičane telekomunikacijske mreže s ciljem smanjenja elektromagnetskih smetnji. Važno je napomenuti da je cilj ove preporuke utvrđivanje opravdanosti pritužbi na smetnje između telekomunikacijskih sustava i nije namijenjena za propisivanje zahtjeva vezanih za elektromagnetsku kompatibilnost (EMC). Frekvencijsko područje koje preporuka pokriva je od 9 kHz do 400 GHz dok su granične razine za izračeno elektromagnetske smetnje propisane za frekvencijsko području od 9 kHz do 6 GHz.

Primjena definiranih metoda za ispitivanje smetnje u ovoj preporuci ograničena je na dio telekomunikacijske mreže u neposrednoj blizini smetnje i ne može se izravno primjenjivati na sve dijelove telekomunikacijske mreže. Granične razine izračenog elektromagnetskog polja odabrane su tako da bi se osiguralo da u većini slučajeva ne prelaze razinu koja bi mogla ometajuće djelovati na radiokomunikacijske uređaje koji rade u neposrednoj blizini. Tablica 6.1. prikazuje granične vrijednosti jakosti polja u određenom frekvencijskom području prema ITU-T K.60 preporuci.

| Frekvencijsko područje [MHz] | Jakost polja [dB μ V/m] | | Udaljenost od izvora zračenja | Propusni pojas (Measurement Bandwidth) |
|------------------------------|---|------------|-------------------------------|--|
| | Peak | Quasi-peak | | |
| 0,009 do 0,15 | $52 - 20 \cdot \log_{10}(f[\text{MHz}])$ | – | 3 m | 200 Hz |
| 0,15 do 1 | $52 - 20 \cdot \log_{10}(f[\text{MHz}])$ | – | 3 m | 9 kHz |
| 1 do 30 | $52 - 8,8 \cdot \log_{10}(f[\text{MHz}])$ | – | 3 m | 9 kHz |

Tablica 6.1. Granične vrijednosti jakosti polja u određenom frekvencijskom području prema ITU-T K.60 preporuci

Osim samih graničnih razina u preporuci je opisana i mjerna procedura. Kako bi se dobila najveća izmjerena vrijednost elektromagnetskog polja smetnje, treba osigurati da dio telekomunikacijske mreže koja se procjenjuje, radi na najvišim razinama signala i da je na lokaciji na kojoj se mjeri, izmjerena vrijednost elektromagnetskog polja smetnje najveća. U frekvencijskom području od 9 kHz do 30 MHz mjeri se magnetska komponenta izračene smetnje. Mjerni sustav, koji se sastoji od radijskog prijemnika (analizator spektra) na koji se spaja mjerna kružna (*engl. loop*) antena, mora biti kalibriran, u skladu s IEC CISPR 16-1-1 preporukom [30]. Kružna antena promjera 0,8 m predstavlja vrlo dobar izbor prijemne antene zato što se u

frekvencijskom području ispod 30 MHz u električnom smislu smatra malom antena o odnosu na valnu duljinu frekvencije koja se mjeri. Po potrebi mogu se koristiti i druge antene kao što su antene s rezonantnim petljama. Prema preporuci mjerni prijemnik i kružna antena trebaju imati neovisno napajanje, odnosno električni izvor bez uzemljenja (npr. baterija), a antena se postavlja na nevodljivi tronožac kako bi se smanjila mogućnost strujnih petlji koji bi preko uzemljenja mogli utjecati na rezultate mjerenja. Mjerna procedura provodi se tako da se kružna antena postavlja na tronožac na visinu od 1 m, na samo mjesto mjerenja koje je prethodno identificirano kao točka u kojoj se očekuje najveća vrijednost jakosti polja. Pri mjerenju magnetskog polja koje se emitira iz telekomunikacijskih mreža u frekvencijskom području do 30 MHz potrebno je voditi računa o prisutnosti raznih visokih razina drugih signala koji rade u ovom frekvencijskom području. Mjerna točka treba biti odabrana tako da su ti neželjeni signali obavezno manji od vrijednosti koje su navedene u Tablici 5., a ukoliko je moguće treba voditi računa da je odnos signala koji se mjeri i neželjenih signala barem 6 dB. Ukoliko su ti signali vidljivi u spektru treba ih identificirati i uzeti u obzir pri mjerenju, pri tome treba voditi računa da se položaj antene u prostoru ne mijenja.

6.2. ECC Recommendation (05)04 – Mjerila za utvrđivanje radijske smetnje uzrokovane neželjenim zračenjem žičane telekomunikacijske mreže

Europska preporuka koja se odnosi na granične vrijednosti ukupno izračenog elektromagnetskog polja kao i mjerne ispitne metode za utvrđivanje istoga nosi oznaku ECC/REC/(05)04. Ona također propisuje razine emisija i ispitne metode za žičane telekomunikacijske mreže kako bi se smanjile elektromagnetske smetnje. Postupak utvrđivanja smetnje sličan je ITU-T K.60 preporuci uz znatno strože granične vrijednosti ukupno izračenog električnog polja. U tablici 6.2. prikazane su granične vrijednosti jakosti polja u određenom frekvencijskom području prema ECC preporuci (05)04.

| Frekvencijsko područje [MHz] | Vršna granična vrijednost električnog polja [dB μ V/m] | Udaljenost od izvora zračenja | Propusni pojas (Measurement Bandwidth) |
|------------------------------|--|-------------------------------|--|
| 0,009 do 0,15 | $40 - 20 \cdot \log_{10}(f[\text{MHz}])$ | 3 m | 200 Hz |
| 0,15 do 1 | $40 - 20 \cdot \log_{10}(f[\text{MHz}])$ | 3 m | 9 kHz |
| 1 do 30 | $40 - 8,8 \cdot \log_{10}(f[\text{MHz}])$ | 3 m | 9 kHz |

Tablica 6.2. Granične vrijednosti jakosti polja u određenom frekvencijskom području prema ECC preporuci (05)04

6.3. Ostale norme i preporuke

Pojedine države imaju vlastite preporuke za mjerenje granične vrijednosti ukupno izračenog elektromagnetskog polja kao i vlastite mjerne ispitne metode za utvrđivanje istoga. Tako postoji preporuka Kraljevine Norveške [1] i preporuka Republike Koreje [31], čije su granične vrijednosti ukupno izračenog polja navedene u tablicama 6.3. i 6.4.

| Frekvencijsko područje [MHz] | Vršna granična vrijednost električnog polja [dB μ V/m] | Udaljenost od izvora zračenja | Propusni pojas (Measurement Bandwidth) |
|------------------------------|--|-------------------------------|--|
| 0,15 do 1 | $20 - 20 \cdot \log_{10}(f \text{ [MHz]})$ | 3 m | 9 kHz |
| 1 do 30 | $20 - 7,7 \cdot \log_{10}(f \text{ [MHz]})$ | 3 m | 9 kHz |

Tablica 6.3. Granične vrijednosti jakosti polja u određenom frekvencijskom području prema preporuci Kraljevine Norveške [1]

| Frekvencijsko područje [MHz] | Vršna granična vrijednost električnog polja [dB μ V/m] | Udaljenost od izvora zračenja |
|------------------------------|--|-------------------------------|
| 0,009 do 0,45 | $47 - 20 \cdot \log_{10}(f \text{ [MHz]})$ | 3 m |
| 0,45 do 30 | 54 | 3 m |

Mjereni pojas propusnosti postavlja se prema CISPR preporuci.

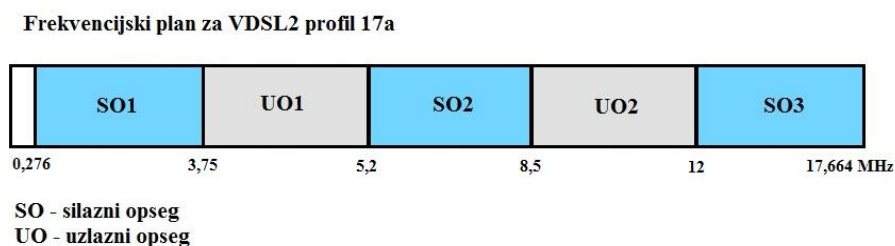
Tablica 6.4. Granične vrijednosti jakosti polja u određenom frekvencijskom području prema preporuci Republike Koreje [31]

Budući da je upravljanje frekvencijskim spektrom na području Europske unije pod regulativom Odbora za elektroničke komunikacije, tj. ECC-a, vršne vrijednosti električnog polja koje su izmjerene u ovom radu uspoređene su s vršnim graničnim vrijednostima električnog polja prema ECC/REC/(05)04 preporuci. Ostale vršne granične vrijednosti električnog polja koje su gore tablično prikazane također su uzete u obzir pri analizi mjernih rezultata ali samo za usporedbu.

7. MJERENJA I ANALIZA MJERNIH REZULTATA

Nadzemni telekomunikacijski kablovi za širokopojasni prijenos podataka potencijalno su veći izvori neželjenog zračenja, odnosno smetnji koji dolaze od VDSL2 tehnologije od podzemnih telekomunikacijskih kabela. Telekomunikacijski kablovi mogu biti različite kvalitete i mogu imati različite karakteristike. Oni mogu biti ravni, upredeni, s različitim izolacijskim materijalima. U Republici Hrvatskoj za širokopojasni prijenos podataka učestalo se koristi TK59U-xDSL nadzemni kabel promjera bakrenog vodiča od 0,4 mm, 0,5 mm ili 0,6 mm. Ovaj kabel sastoji se od deset upredenih parica. Zbog preklapanja frekvencijskog spektra kojeg koristi VDSL2 tehnologija i drugi radiokomunikacijski uređaji postoji mogućnost pojavljivanja smetnji.

Kako se VDSL i VDSL2 tehnologija sve više koristi u praktičnoj primjeni javila se potreba za mjerenjem izračenog elektromagnetskog polja telekomunikacijskog kabela za širokopojasni prijenos podataka, kao i provjera utjecaja toga zračenja na druge tehnologije koje rade u istom frekvencijskom području. Provjera utjecaja učinjena je tako da se promatralo prelazi li i u kojoj mjeri električno polje koje nastaje zračenjem telekomunikacijskog kabela pravilnikom dopuštene norme. Kako na međunarodnoj razini postoje razne norme i pravilnici koje definiraju granične vrijednosti izračenog električnog polja telekomunikacijskog kabela, praktični dio ovog specijalističkog rada sastoji se od mjerenja električnog polja telekomunikacijskog kabela prema frekvencijskom planu 988 profil 17a Annex B, te analize utjecaja zračenja na tehnologije koje rade u istom frekvencijskom području, kao i usporedbe izmjerenih vrijednosti s međunarodnim normama i pravilnicima. Na slici 7.1. prikazan je frekvencijski plan za VDSL2 profil 17a.

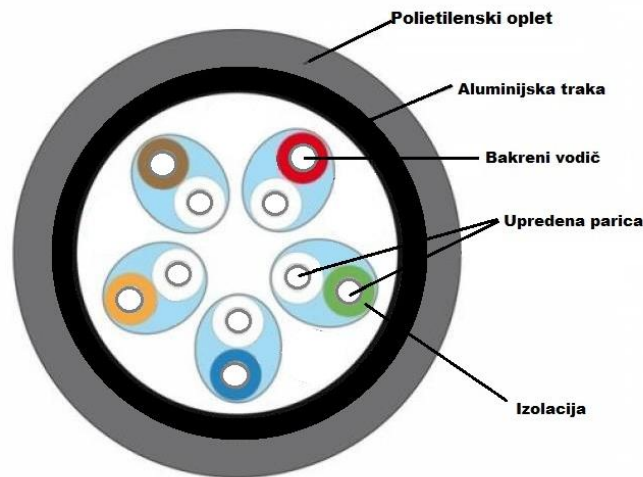


Slika 7.1. Frekvencijski plan za VDSL2 profil 17a

7.1. Mjerna procedura

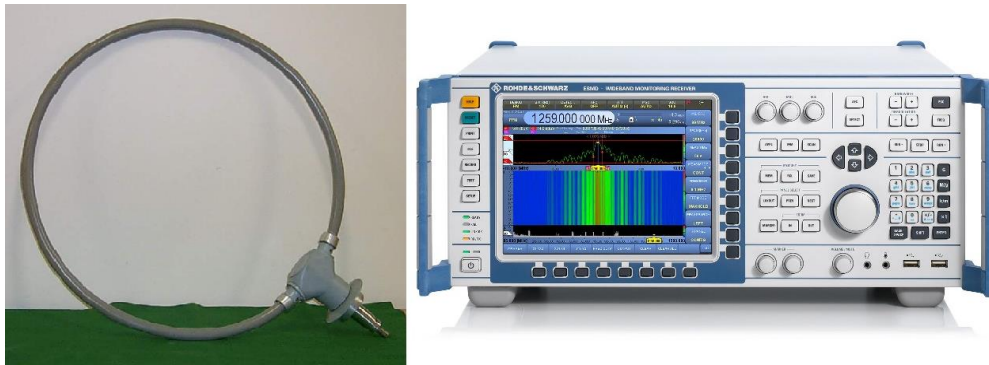
Prema ITU-T K.60 preporuci mjerni sustav koji se koristi za mjerenje zračenja telekomunikacijskog kabela za širokopojasni prijenos podataka u frekvencijskom opsegu od 9 kHz do 30 MHz treba biti prema dokumentu IEC CISPR 16-1-1. IEC CISPR 16-1-1 dokument

propisuje karakteristike i osobine mjerne opreme za mjerenje radio smetnji u frekvencijskom području od 9 kHz do 18 GHz. Prema prethodno navedenoj preporuci sustav za mjerenje mora se sastojati od umjerenog mjernog analizatora ili mjernog prijemnika i umjerene kružne (*engl. loop*) mjerne antene. Ista preporuka predlaže da se prije početka mjerenja utvrdi točka u kojoj je izračeno elektromagnetsko polje najveće. Mjerenja za potrebe ovog specijalističkog rada izvršena su u gradu Rijeci. Kao zračeci kabel odabran je nadzemni telekomunikacijski kabela TK59U-xDSL budući da se isti često koristi u Republici Hrvatskoj za prijenos VDSL2 signala između korisničke opreme – CPE (*engl. Customer Premises Equipment*) i lokalne centrale – CO (*engl. Central Office*). TK59U-xDSL kabela ima oznaku 10x2x0,5 što znači da se sastoji se od 10 upredenih parica s promjerom vodiča od 0,5 mm. Kabel je opleten s aluminijskom trakom debljine 0,2 mm koja prigušuje zračenje kabela, te također smanjuje utjecaj vanjskih signala na karakteristiku prijenosnog signala. Slika 7.2. prikazuje strukturu TK59U-xDSL kabela.



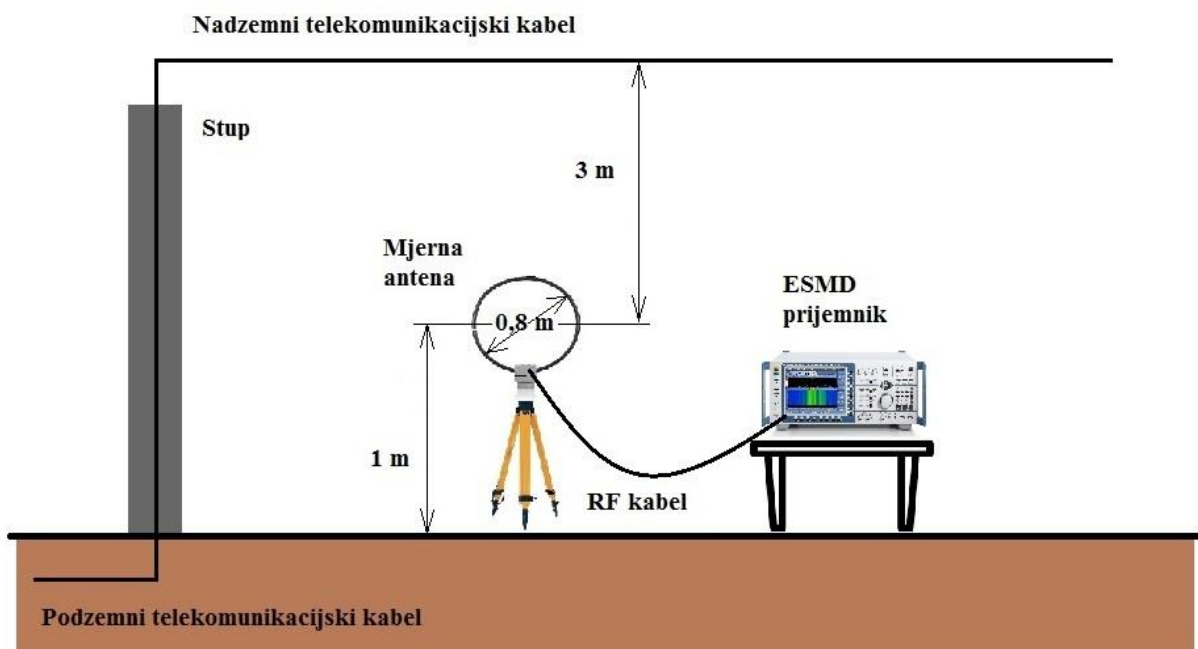
Slika 7.2. Struktura TK59U-xDSL kabela

Mjerna oprema kojom su izvršena mjerenja sastoji se Rohde&Schwarz ESMD širokopoljarnog mjernog prijemnika, te Rohde&Schwarz pasivna kružna mjerna antena tip BN150012, promjera 0,8 metara. Rohde&Schwarz ESMD širokopoljarni mjerni prijemnik koristi se za frekvencijsko područje od 8 kHz do 40 GHz, a mjerenja su sukladna ITU preporukama, te zadovoljavaju zahtjeve sigurnosnih tijela i organizacija. Kružna mjerna antena BN150012 prema deklaraciji proizvođača namijenjena je za mjerenje signala u frekvencijskom području od 0,1 MHz do 30 MHz čime je obuhvaćeno područje frekvencijskog plana 988 profil 17a Annex B VDSL2 tehnologije. Na slici 7.3. prikazana je mjerna oprema koja se koristila za mjerenje zračenja telekomunikacijskog kabela za širokopoljarni prijenos podataka.



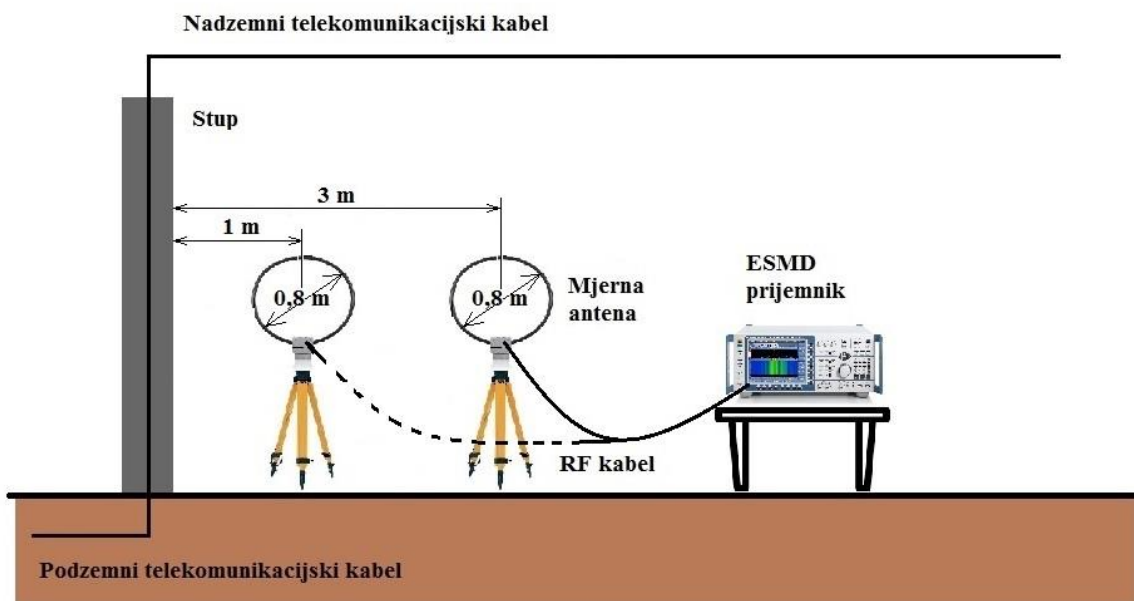
Slika 7.3. Kružna mjerna antena tip BN150012 i Rohde&Schwarz ESMD širokopojasni mjerni prijemnik

S obzirom na poznate parametre i karakteristiku mjerne antene, izračeno električno polje u točki mjerenja dobiveno je prema formuli (5-33) uzimajući u obzir poznato gušenje prijenosne linije, odnosno mjernog kabela i konektora kojima je mjerna antena spojena s mjernim prijemnikom. Mjerna procedura zasnovana je na dva tipa mjerenja. U prvom tipu mjerenja izračeno električno polje izmjereno je kada je mjerna antena bila smještena 3 m ispod nadzemnog telekomunikacijskog kabela, kao što je prikazano na slici 7.4.



Slika 7.4. Položaj mjerne antene u prostoru kod prvog tipa mjerenja

Mjerenje izračenog električnog polja analizirano je za slučaj kada su oba vodiča upredene parice bila spojena (balansirani način rada), mjerenje zračenja kabela analizirano je i kada je jedan od vodiča upredene parice bio odspojen (nebalansirani način rada). U praktičnoj primjeni nebalansirani način rada smatra se najgorim slučajem jer kod njega nema međusobnog poništavanja induciranog napona na vodičima. Telekomunikacijski kabel se u ovom slučaju ponaša kao antena, čime se povećava elektromagnetsko zračenje iz istog. Mjerenje i analiza izračenog električnog polja učinjeno je i za slučaj kada je u telekomunikacijskom kabelu aktivna samo jedna upredena parica te kada je aktivno sedam upredenih parica. U drugom slučaju uzeto je u obzir da se potencijalna korisnička oprema može nalaziti u neposrednoj blizini telekomunikacijskog kabela. Kako udaljenost između telekomunikacijskog kabela i korisničke opreme može biti i manja od 3 metra (npr. radio amaterska antena), provedeno je mjerenje električnog polja vertikalno postavljenog nadzemnog telekomunikacijskog kabela. U tom slučaju mjerna antena najprije je postavljena na udaljenost 1 metar a zatim na udaljenost od 3 metra od telekomunikacijskog kabela. Sva mjerenja odrađena su na udaljenosti unutar 15 metara od korisničke opreme, tj. na bliskoj udaljenosti, te na udaljenosti do 600 m od lokalne centrale. Na slici 7.5. prikazan je položaj mjerne antene u prostoru kod drugog tipa mjerenja.



Slika 7.5. Položaj mjerne antene u prostoru kod drugog tipa mjerenja

Prema preporuci ITU K.60 kako bi se dodatno smanjio utjecaj uzemljenja koje bi moglo povećati šum mjerenja, mjerni prijemnik i mjerna antena imali su baterijsko napajanje, odnosno neovisan izvor napajanja koji nije direktno uzemljen. Sukladno ECC/REC/(05)04 preporuci ESMD mjerni prijemnik postavljen je da mjeri s pojasom propusnosti (*engl. RBW – Resolution*

Bandwidth) od 9 kHz uz detektor vršne vrijednosti signala električnog polja. Frekvencijski raspon koji se mjerio bio je od 100 kHz do 20 MHz uz korak od 5 kHz. Budući da ESMD mjerni prijemnik na svome ulazu očitava napon signala koji se mjeri u dB μ V, potrebno je primijeniti jednadžbu (5-33) kako bi se dobilo ekvivalentno električno polje u dB μ V/m. Zato je potrebno poznavati karakteristiku mjerne antene, točnije njeno pojačanje na točno određenoj frekvenciji kako bi se koristeći jednadžbu (5-32) dobio faktor mjerne antene. Vrijednosti pojačanja mjerne antene na pojedinoj frekvenciji dobiva se od proizvođača mjerne opreme. Također kako bi mjerni rezultati bili ispravni potrebno je voditi računa i o gušenju prijenosne linije, tj. mjernog kabela i konektora te je na ukupnu vrijednost električnog polja potrebno nadodati poznate vrijednosti gušenja. Gušenje u mjernom kabeu i konektorima dobiva se od proizvođača opreme ili se iznos gušenja utvrđuje mjerenjima u laboratorijskim uvjetima. Uzimajući sve ove parametre u obzir ukupna vrijednost električkog polja u točki mjerenja računa se prema jednadžbi:

$$E = V_{dB\mu V} + K + L \quad (7 - 1)$$

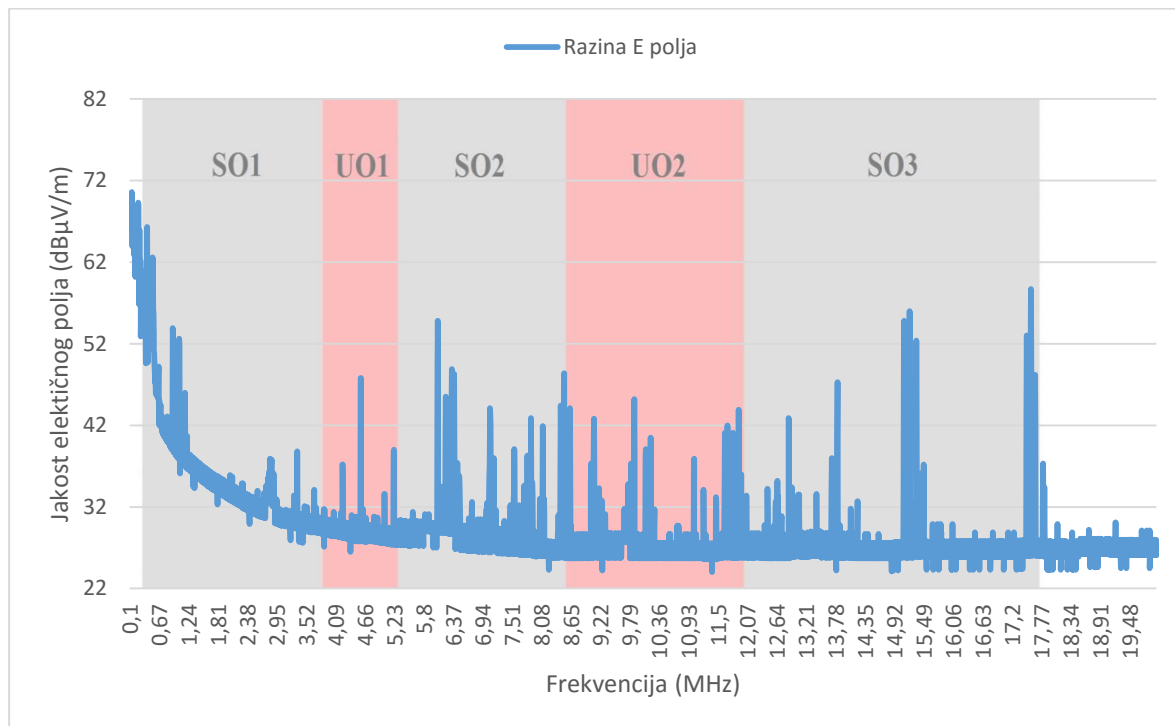
gdje je $V_{dB\mu V}$ napon na ulazu u mjerni prijemnik, K faktor antene, a L gubici u kabeu i konektorima.

Nakon što se preliminarnim mjerenjima utvrdila točna lokacija u prostoru gdje je elektromagnetsko polje najveće, započeta je procedura mjerenja.

7.2. Rezultati mjerenja i analiza mjernih rezultata

S ciljem smanjenja utjecaja vanjskih smetnji na rezultat mjerenja mjerenje zračenja električnog polja telekomunikacijskog kabela napravljeno je u ruralnom dijelu grada Rijeke. Sukladno ITU K.60 preporuci, da bi se dobile najveće vrijednosti izračenog električnog polja telekomunikacijskog kabela izlazna snaga modema u lokalnoj centrali (silazni opseg) postavljena je na najveću razinu, u ovom slučaju na 11,9 dBm dok je izlazna snaga modema na korisničkoj strani (uzlazni opseg) postavljena na najvišu razinu od 9,4 dBm. Kako u frekvencijskom opsegu do 20 MHz rade i mnogo drugih radijskih tehnologija potrebno je prije početka mjerenja utvrditi koje su pojedinačne frekvencije zauzete te odrediti razinu šuma. Stoga je prvo mjerenje napravljeno kada se VDSL2 signali ne prenose telekomunikacijskim kabeu, odnosno kada telekomunikacijski kabel ne zrači nikakvo elektromagnetsko polje. Izmjereni uskopojasni signali čiji su iznosi električnog polja barem 10 dB iznad šuma izvori su drugih radijskih tehnologija koji rade u frekvencijskom opsegu do 20 MHz. U ovom slučaju mjerna antena postavljena je na

udaljenost od 3 metra od nadzemnog TK 59U-xDSL telekomunikacijskog kabela. Rezultati mjerenja prikazani su na slici 7.6.

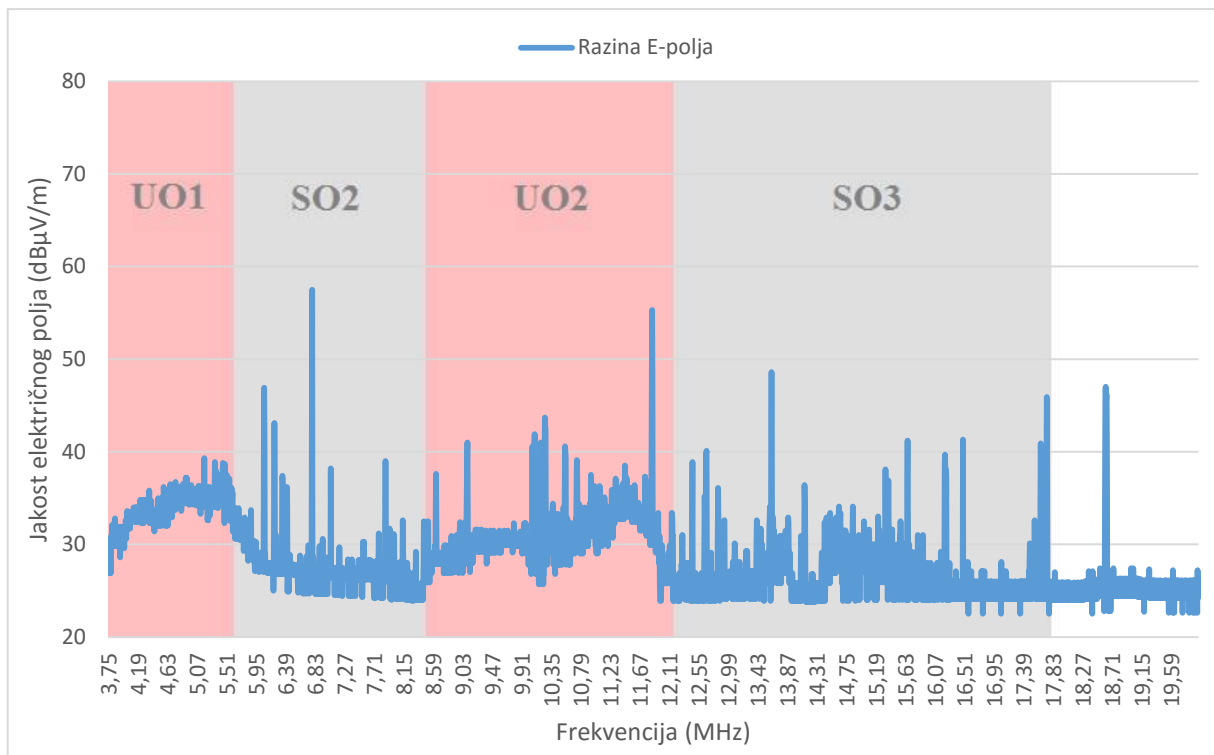


Slika 7.6. Vrijednosti električnog polja u frekvencijskom opsegu od 100 kHz do 20 MHz bez VDSL2 signala

Iako je prema deklaraciji proizvođača navedeno da je radni frekvencijski opseg mjerne antene od 0,1 MHz do 30 MHz, na slici 7.6 vidi se kako je u frekvencijskom opsegu od 0,1 MHz do 3 MHz izrazito visoka razina šuma, te je u ovom opsegu nemoguće izmjeriti niske razine elektromagnetskog polja. Iz tog razloga izmjerene vrijednosti u frekvencijskom području do 3 MHz nisu uzete u obzir prilikom analize mjernih rezultata nego samo izmjerene vrijednosti električnog polja u uzlaznom opsegu 1 i 2 (UO1, UO2), kao i silaznom opsegu 2 i 3 (SO2, SO3). Iz izmjerenih vrijednosti električnog polja vidi se kako je na frekvencijskim područjima od 5,9 MHz do 6,2 MHz, od 7,2 MHz do 7,45 MHz, od 9,4 MHz do 9,9 MHz, od 11,6 MHz do 12,1 MHz, te od 15,1 MHz do 15,8 MHz aktivna radiodifuzija dok je od 7,0 MHz do 7,2 MHz, te na 10,1 MHz do 10,15 MHz aktivna radioamaterska služba bilo u vidu prijenosa govora ili telemetrije. Najviše pojedinačne vrijednosti električnog polja izmjerene su na 17,57 MHz i to u iznosu od 61,8 dBµV/m, na 15,22 MHz u iznosu od 59,1 dBµV/m, te na 6,07 MHz u iznosu od 57,9 dBµV/m. U uzlaznom opsegu 1 od 3,75 MHz do 5,2 MHz aktivne ili zauzete pojedinačne frekvencije čine samo 1,38 % opsega, u silaznom opsegu 2 od 5,2 MHz do 8,5 MHz aktivne ili zauzete pojedinačne frekvencije čine 5,91 % opsega, u uzlaznom opsegu 2 od 8,5 MHz do 12 MHz

one čine 4,43 % opsega, a u silaznom opsegu 3 od 12 MHz do 17,664 MHz one čine 2,65 %, dok je u ukupnom dijelu frekvencijskog opsega od 3,75 MHz do 20 MHz taj postotak svega 3,77 %. Na temelju prethodno navedenog može se zaključiti da je lokacija mjerenja dobro odabrana jer u promatranom frekvencijskom opsegu nema izrazite radijske aktivnosti.

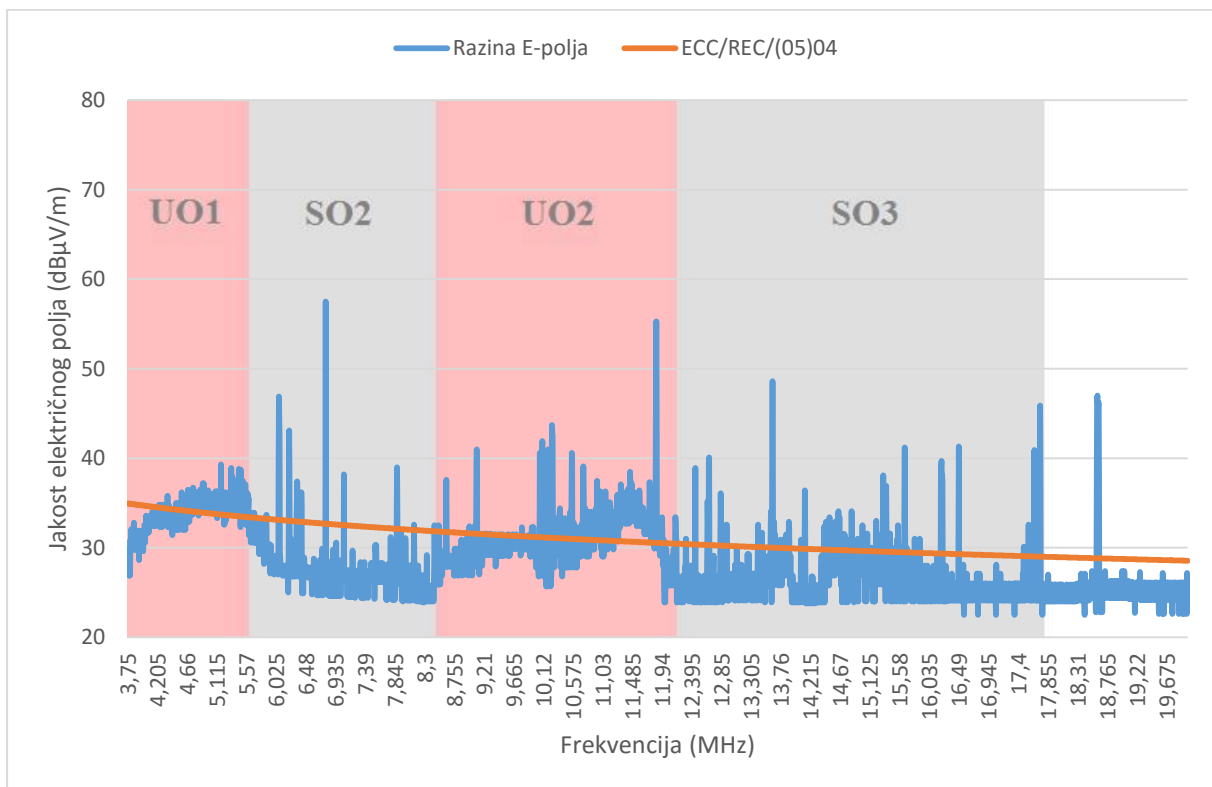
Nakon utvrđivanja čistoće frekvencijskog opsega izvršena su mjerenja zračenja električnog polja uz prijenos VDSL2 signala kroz TK59U-xDSL telekomunikacijski kabel. Rezultati prvog tipa mjerenja kada je mjerna antena smještena tri metra ispod nadzemnog telekomunikacijskog kabela uz jednog korisnika koji je spojen na lokalnu centralu i s balansiranom upredenom paricom prikazani su na slici 7.7.



Slika 7.7. Vrijednosti izračenog električnog polja u frekvencijskom opsegu od 3,75 MHz do 20 MHz za jednog korisnika, balansirana parica, na udaljenosti 3 m od kabela

Iz slike 7.7. vide se aktivna frekvencijska područja uzlaznog opsega 1 i uzlaznog opsega 2. Najveća pojedinačna izračena vrijednost električnog polja u uzlaznom opsegu 1 izmjerena je na 5,18 MHz i iznosi 39,3 dBµV/m, dok u uzlaznom opsegu 2 najveća pojedinačna izračena vrijednost električnog polja izmjerena na frekvenciji 11,45 MHz iznosi 38,5 dBµV/m. Također, izračeno električno polje telekomunikacijskog kabela koje stvaraju uzlazni opsezi znatno su veći od izračenog električnog polja telekomunikacijskog kabela koje stvaraju silazni opsezi iako je izlazna snaga silaznog opsega veća za 2,5 dBm. Veće vrijednosti razina izračenog električnog polja uzlaznih opsega proizlaze iz činjenice da su mjerenja rađena bliže korisničkoj opremi, tj.

korisničkom modemu. Visoke pojedinačne vrijednosti električnog polja na pojedinačnim frekvencijama ukazuju na prisutnost ostalih aktivnih tehnologija koje rade u istom frekvencijskom opsegu. Ukoliko je izračeno električno polje telekomunikacijskog kabela previsoko postoji velika vjerojatnost da će ono prouzročiti smetnju radijskim tehnologijama koje rade u istom frekvencijskom području te na taj način onemogućavati njihov neometani rad. Kako bi se osigurao neometan rad radijskih tehnologija koje rade u istom frekvencijskom području kao i VDSL2 tehnologija, Odbor za elektroničke komunikacije kao Europsko regulatorno tijelo odgovorno za donošenje propisa u području elektroničkih komunikacija predložilo je najviše dopuštene granične razine izračenog električnog polja telekomunikacijskog kabela. Te granične vrijednosti definirane su u dokumentu ECC/REC/(05)04. Na slici 7.8. prikazano je izračeno elektromagnetsko polje telekomunikacijskog kabela uz granične vrijednosti prema ECC/REC/(05)04 preporuci.

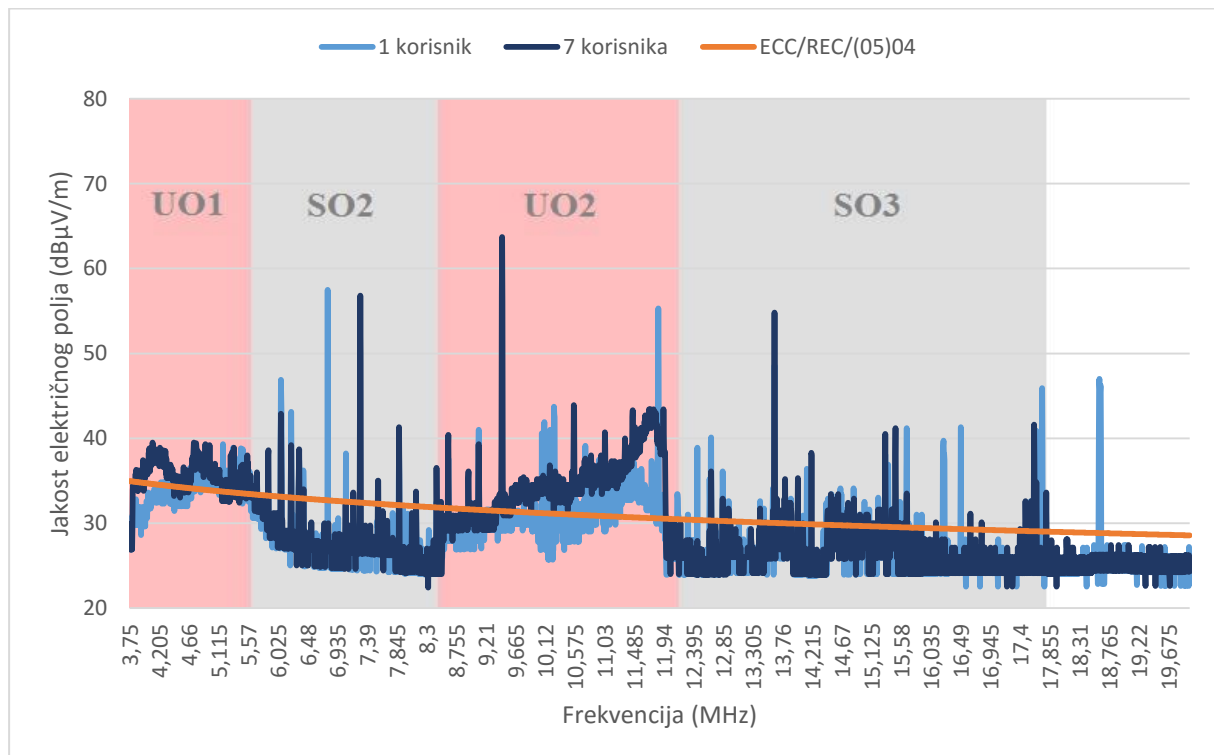


Slika 7.8. Usporedba izračenog električnog polja na 3 m od kabela s graničnim vrijednostima ECC/REC/(05)04 preporuke

Slika 7.8. prikazuje da su izračene vrijednosti električnog polja na pojedinačnim frekvencijama uzlaznog opsega 1 i ulaznog opsega 2 veće od graničnih razina koje su propisane ECC/REC/(05)04 preporukom. Sukladno ECC/REC/(05)04 preporuci pojedinačna granična vrijednost električnog polja na frekvenciji 5,18 MHz je 33,7 dB μ V/m, a na 11,45 MHz je 30,7 dB μ V/m što je za približno

6 dB niže od izmjerenih vrijednosti. U uzlaznom opsegu 1 postotak pojedinačnih frekvencija na kojima električno polje prelazi graničnu razinu propisanu ECC/REC/(05)04 preporukom iznosi 38,6 % opsega dok je taj postotak u uzlaznom opsegu 2 iznosi 36,3 % opsega. S obzirom da većina radijskih prijemnika koji rade u istom frekvencijskom opsegu kao i VDSL2 tehnologija imaju nisku razinu osjetljivosti prijarnih signala, ovako visoka zastupljenost pojavljivanja kao i visoke vrijednosti električnog polja iznad graničnih razina ECC/REC/(05)04 preporuke zasigurno bi mogle uzrokovati probleme u radu takvih uređaja. Najčešći problemi su otežan ili nemoguć prijem korisnih signala zbog povećane razine ometajućeg signala odnosno signala smetnje.

U slučaju kada se u telekomunikacijskom kabelu koristi sedam upredenih balansiranih parica rezultati dobiveni mjerenjem prikazani su na slici 7.9.

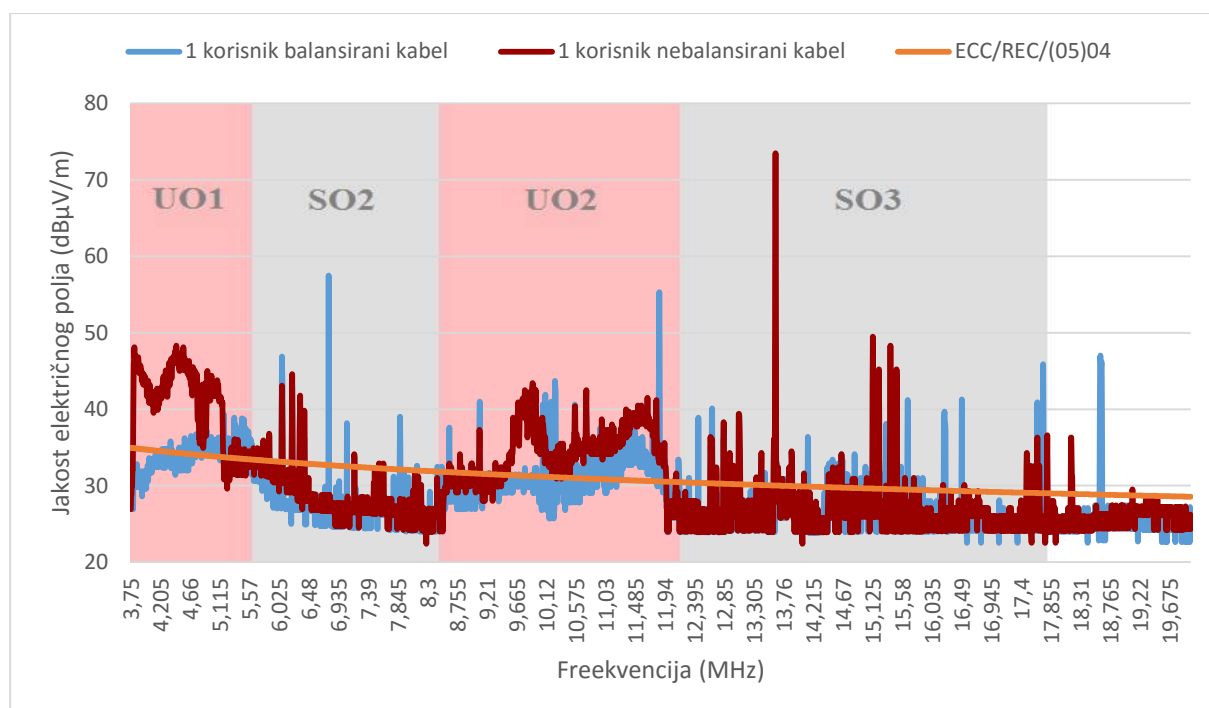


Slika 7.9. Usporedba jakosti izračenog električnog polja izmjerene na 3 m udaljenosti od kabela uz korištenje jedne i sedam upredenih parica s graničnim vrijednostima ECC/REC/(05)04 preporuke

Slika 7.9. pokazuje kako se uz korištenje sedam upredenih parica ukupno izračeno električno polje povećava. Najveća pojedinačna izračena vrijednost električnog polja u uzlaznom opsegu 1 uz korištenje sedam upredenih parica izmjerena je na 4,1 MHz i iznosi 39,5 dBµV/m, dok u uzlaznom opsegu 2 najveća pojedinačna izračena vrijednost električnog polja izmjerena na frekvenciji 11,71 MHz iznosi od 43,4 dBµV/m. U uzlaznom opsegu 1 postotak pojedinačnih frekvencija čije

električno polje prelazi graničnu razinu propisanu ECC/REC/(05)04 preporukom uz korištenje sedam upredenih parica iznosi 83,5 % opsega dok je taj postotak u uzlaznom opsegu 2 iznosi 71,6 % opsega. Ovo su očekivani rezultati s obzirom da se povećanjem aktivnih upredenih parica povećava i ukupna snaga signala koji prolazi telekomunikacijskim kabelom. Dakako da su granične vrijednosti elektromagnetskog polja koje su propisane ECC/REC/(05)04 preporukom u ovom slučaju još više premašene.

Rezultati mjerenja kada je jedna parica odspojena (nebalansirani način rada) prikazani su na slici 7.10.



Slika 7.10. Usporedba jakosti izračenog električnog polja izmjerene na 3 m udaljenosti od kabela, uz jednog korisnika uz balansirani kabel i jednog korisnika uz nebalansirani kabel s graničnim vrijednostima ECC/REC/(05)04 preporuke

Iz slike 7.10. vidljivo je da se izračeno električno polje znatno povećava u slučaju da se koristi nebalansirani telekomunikacijski kabel. Najveća pojedinačna izračena vrijednost električnog polja u uzlaznom opsegu 1 je na 4,45 MHz i iznosi 48,3 dBμV/m, dok je u uzlaznom opsegu 2 najveća pojedinačna izračena vrijednost električnog polja frekvencija na frekvenciji 9,91 MHz i iznosi 43,4 dBμV/m. U usporedbi s balansiranom upredenom paricom to je u uzlaznom opsegu 1 povećanje izračenog električnog polja od 9 dB, a u usporedbi graničnom razinom ECC/REC/(05)04 preporuke na istoj frekvenciji povećanje od 14 dB dok je u uzlaznom opsegu 2 povećanje u odnosu na balansiranu upredenu paricu povećanje za 4,9 dB, odnosno u odnosu na

graničnu razinu ECC/REC/(05)04 preporuke na istoj frekvenciji povećanje od 12,2 dB. U uzlaznom opsegu 1 postotak pojedinačnih frekvencija čije električno polje prelazi graničnu razinu propisanu ECC/REC/(05)04 preporukom je čak 94,5 % opsega dok je taj postotak u uzlaznom opsegu 2 čak 70,4 % opsega. S obzirom na ovako visoka odstupanja u slučaju nebalansiranog kabela od graničnih vrijednosti ovakvo izračeno elektromagnetsko polje uzrokovalo bi ozbiljne smetnje u prijemu radiofrekvencijskih signala drugih radijskih tehnologija koje rade u istom frekvencijskom području kao i VDSL2 tehnologija. Zbog svega navedenog telekomunikacijski operatori trebaju učestalo kontrolirati parametre telekomunikacijskih kabela te ih po potrebi popraviti ili zamijeniti kako bi ovakvi slučajevi bili minimalno zastupljeni. U tablici 7.1. prikazan je usporedni prikaz najvećih vrijednost električnog polja na pojedinačnim frekvencijama kao i postotak pojedinačnih frekvencija koje prelaze graničnu vrijednost prema ECC/REC/(05)04 preporuci za uzlazne opsege 1 i 2.

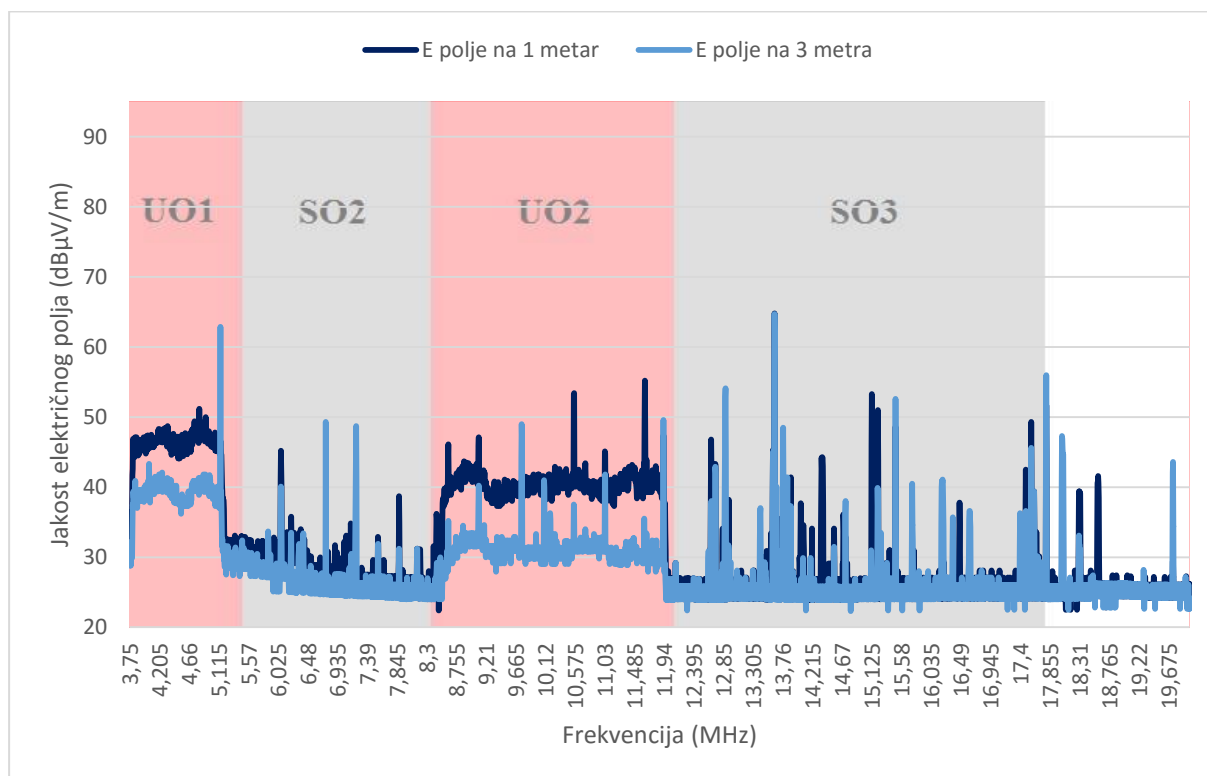
| | Najveća vrijednost E polja na pojedinačnoj frekvenciji (dB μ V/m) | Postotak pojedinačnih frekvencija koje prelaze graničnu vrijednost prema ECC/REC/(05)04 preporuci (%) |
|----------------------------|---|---|
| Uzlazni opseg 1 | | |
| Jedna balansirana parica | 39,3 | 38,6 |
| Sedam balansiranih parica | 39,5 | 83,5 |
| Jedna nebalansirana parica | 48,3 | 94,5 |
| Uzlazni opseg 2 | | |
| Jedna balansirana parica | 38,5 | 36,3 |
| Sedam balansiranih parica | 43,4 | 71,6 |
| Jedna nebalansirana parica | 43,4 | 70,4 |

Tablica 7.1. Usporedni prikaz najvećih vrijednost jakosti električnog polja na pojedinačnim frekvencijama i postotak pojedinačnih frekvencija koje prelaze graničnu vrijednost prema ECC/REC/(05)04 preporuci za uzlazne opsege 1 i 2, mjereno na udaljenosti 3 m od kabela

Kao što je vidljivo iz tablice 7.1. ukoliko je telekomunikacijski kabel nebalansiran najveća izračena vrijednost električnog polja na pojedinačnoj frekvenciji jedne parice u uzlaznom opsegu 2 gotovo je jednaka najvećoj izračenoj vrijednost električnog polja na pojedinačnoj frekvenciji kada se u telekomunikacijskom kabelu koriste sedam upredenih balansiranih parica što dovoljno govori o važnosti ispravnosti telekomunikacijskog kabela, odnosno potrebi redovite provjere ispravnosti istoga.

U ECC/REC/(05)04 preporuci granične vrijednosti izračenog elektromagnetskog polja dane su za udaljenosti od 3 metra od telekomunikacijskog kabela. U praksi, prijemne antene i korisnička oprema drugih radijskih tehnologija koje rade na istom frekvencijskom području kao i VDSL2 tehnologija (npr. radioamateri) mogu biti i na udaljenosti manjoj od 3 metra od

telekomunikacijskog kabela. Kako bi se utvrdila razlika u vrijednostima jakosti električnog polja s obzirom na udaljenost od telekomunikacijskom kabela izvršena su mjerenja jakosti izračenog električnog polja uz korištenje jedne balansirane upredene parice na udaljenosti od 1 metar od vertikalnog telekomunikacijskog kabela, a nakon toga su ponovljena mjerenja na udaljenosti od 3 metra od istog kabela kako je prikazano na slici 7.5. Rezultati mjerenja prikazani su na slici 7.11.



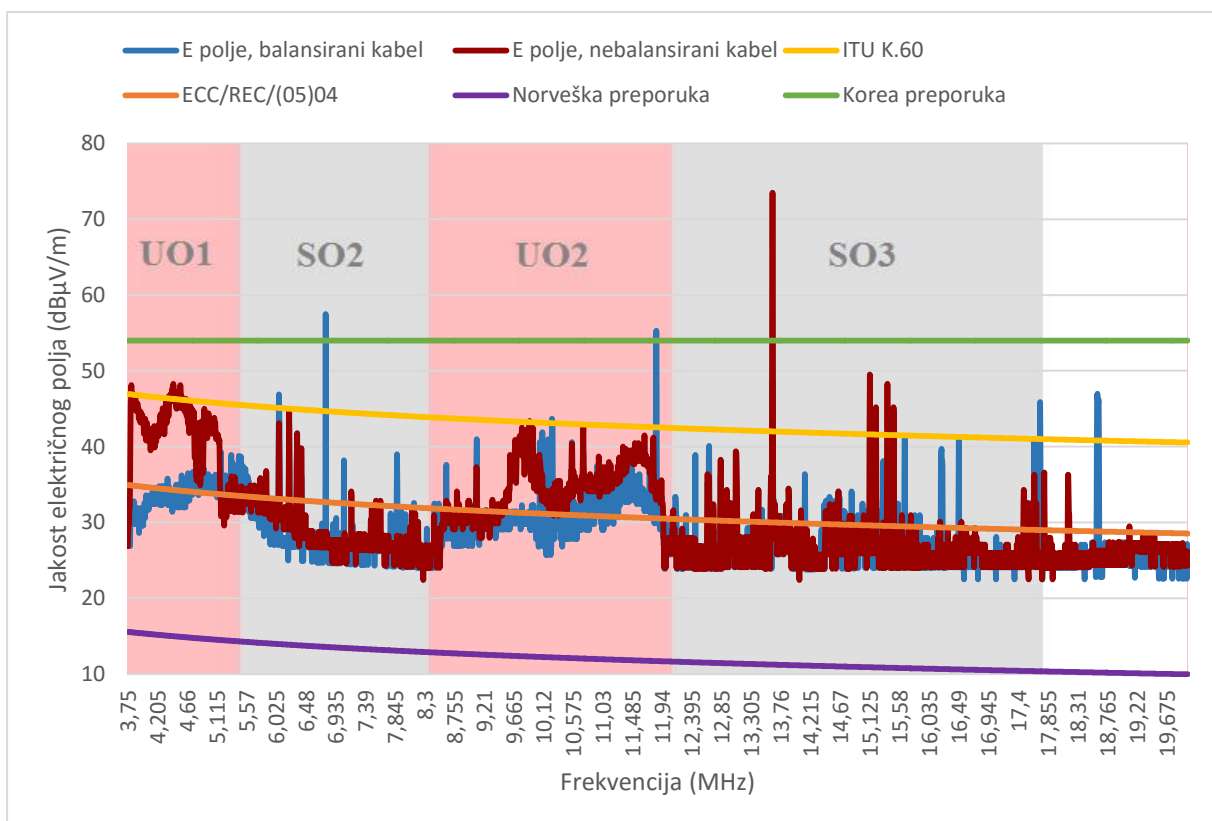
Slika 7.11. 11 Usporedba jakosti izračenog električnog polja na udaljenosti 1 metar i na udaljenosti od 3 metra od telekomunikacijskog kabela

Iz slike 7.11. vidi se da je izračeno električno polje izmjereno na udaljenosti 1 metar od telekomunikacijskog kabela znatno veće nego električno polje koje je izmjereno na udaljenosti od 3 metra. Najveća pojedinačna izračena vrijednost električnog polja u uzlaznom opsegu 1 na udaljenosti 1 metar od telekomunikacijskog kabela je na frekvenciji 4,815 MHz i iznosi 51,2 dBµV/m, dok najveća pojedinačna izračena vrijednost električnog polja istog opsega na udaljenosti 3 metara od telekomunikacijskog kabela na frekvenciji 4,88 MHz i iznosi 41,8 dBµV/m, što je u skoro 10 dB manje. U uzlaznom opsegu 2 najveća pojedinačna izračena vrijednost električnog polja na udaljenosti 1 metar od telekomunikacijskog kabela je na frekvenciji 8,875 MHz i iznosi 43,7 dBµV/m, dok je najveća pojedinačna izračena vrijednost električnog polja istog opsega na udaljenosti 3 metara od telekomunikacijskog kabela na frekvenciji 8,9 MHz i

iznosi 33,5 dB μ V/m, što je također skoro 10 dB manje. Rezultati mjerenja pokazuju da se sa smanjenjem udaljenosti između zračećeg telekomunikacijskog kabela i mjerne antene iznos električnog polja značajno povećava čime se povećava i vjerojatnost utjecaja nadzemnog telekomunikacijskog kabela na neometan rad radijskih sustava.

7.3. Usporedba mjernih rezultata s drugim normama i pravilnicima

Osim preporuke Odbora za elektroničke komunikacije ECC/REC/(05)04 postoje i druge norme i preporuke koje koriste telekomunikacijski regulatori u svrhu utvrđivanja prekoračenja graničnih izračenih razina elektromagnetskog polja telekomunikacijskih kablova. Vrlo često se koriste ITU K.60 preporuka, preporuka Kraljevine Norveške, te preporuka Republike Koreje. S ciljem usporedbe navedenih preporuka izvršena je usporedba i analiza izmjerenih vrijednosti s graničnim vrijednostima definiranim u gornjim preporukama.



Slika 7.12. Usporedba jakosti izračenog električnog polja izmjerenih na udaljenosti 3 m, za balansirani kabel i za nebalansirani kabel s graničnim vrijednostima

Slika 7.12. prikazuje usporedbu izračenog električnog polja uz korištenje jedne upredene parice balansiranog kabela i jedne upredene parice nebalansiranog kabela dobivenog mjerenjem

na udaljenosti od 3 metra ispod telekomunikacijskog kabela s graničnim vrijednostima definiranim gornjim preporukama. Iz slike 7.12. vidi se da postoje velike razlike graničnih vrijednosti izračenog električnog polja definiranog gornjim preporukama. Tako je najmanja razlika graničnih vrijednosti električnog polja u frekvencijskom opsegu od 3,75 MHz do 20 MHz između preporuke Kraljevine Norveške i preporuke Republike Koreje čak 38,4 dB. Analizom mjernih rezultata te grafičkim prikazom na slici 7.12 također se vidi da su sve izmjerene vrijednosti izračenog električnog polja bilo balansirano ili nebalansirano kabela veće od vrijednosti koje su definirane preporukom Kraljevine Norveške. U slučaju balansirano telekomunikacijskog kabela najveća izmjerena vrijednost električnog polja u uzlaznom opsegu 1 je čak 39,3 dB iznad granične vrijednosti preporuke Kraljevine Norveške dok u uzlaznom opsegu 2 ta razlika iznosi 26,6 dB. Kod nebalansirano kabela razlike su još puno veće. Može se stoga zaključiti da preporuka Kraljevine Norveške ima izrazito niske granične vrijednosti izračenog električnog polja telekomunikacijskih kablova. Nasuprot, preporuka Republike Koreje ima previsoke granične vrijednosti električnog polja jer su najveće izmjerene vrijednosti električnog polja nebalansirano kabela u uzlaznom opsegu 1 čak 5,7 dB niže od graničnih vrijednosti definiranih preporukom Republike Koreje dok su u uzlaznom opsegu 2 najveće izmjerene vrijednosti električnog polja čak 10,6 dB niže od graničnih vrijednosti definiranih preporukom. U slučaju balansirano kabela razlika izmjerenih vrijednosti električnog polja i graničnih vrijednosti je još veća. U slučaju usporedbe izmjerenih vrijednosti električnog polja s graničnim vrijednostima definiranih ITU K.60 preporukom može se zaključiti da su sve vrijednosti ispod graničnih vrijednosti u slučaju balansirano kabela, dok je u slučaju nebalansirano kabela u uzlaznom opsegu 1 prisutno 8,28% pojedinačnih frekvencija čije električno polje prelazi granične vrijednosti s time da je najveća izmjerena vrijednost električnog polja u uzlaznom opsegu 1 samo 2,0 dB iznad granične vrijednosti dok na uzlaznom opsegu 2 nema pojedinačnih frekvencija čije električno polje prelazi granične vrijednosti definirane ITU K.60 preporukom. S obzirom na analizu može se zaključiti da su i granične vrijednosti propisane ITU K.60 preporukom dosta blage.

Iz slike 7.12. može se zaključiti da pojedinačne izračene vrijednosti električnog polja uzlaznog opsega 1 i 2 u usporedbi s ECC/REC/(05)04 i preporukom Kraljevine Norveške prelaze granične dopuštene vrijednosti te takva zračenja TK 59U-xDSL telekomunikacijskog kabela mogu uzrokovati neželjene smetnje drugim radijskim tehnologijama koja rade u istom frekvencijskom području kao i VDSL2 tehnologija. Što se tiče graničnih vrijednosti propisanih ITU K.60 preporukom i preporukom Republike Koreje izmjerene vrijednosti električnog polja balansirano kabela su niže od graničnih vrijednosti te zadovoljavaju gornje preporuke. U slučaju nebalansirano telekomunikacijskog kabela situacija je puno lošija te su jedino granične

vrijednosti preporuke Republike Koreje zadovoljene kada se gledaju pojedinačne izračene vrijednosti električnog polja uzlaznog opsega 1 i 2. Tablica 7.2. prikazuje usporedni prikaz najveće vrijednosti električnog polja na pojedinačnoj frekvenciji s ekvivalentnim graničnim vrijednostima za jednu balansiranu paricu i jednu nebalansiranu paricu u uzlaznom opsegu 1 i 2.

| | <i>E max</i> (dB μ V/m) | <i>E max</i> ECC (dB μ V/m) | <i>E max</i> ITU (dB μ V/m) | <i>E max</i> Nor (dB μ V/m) | <i>E max</i> Kor (dB μ V/m) |
|----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Uzlazni opseg 1 | | | | | |
| Jedna balansirana parica | 39,3 | 33,7 | 45,7 | 14,5 | 54,0 |
| Jedna nebalansirana parica | 48,3 | 34,3 | 46,3 | 15,0 | 54,0 |
| Uzlazni opseg 2 | | | | | |
| Jedna balansirana parica | 38,5 | 30,7 | 42,7 | 11,8 | 54,0 |
| Jedna nebalansirana parica | 43,4 | 31,2 | 43,2 | 12,3 | 54,0 |

E max – najveća vrijednost *E* polja na pojedinačnoj frekvenciji

E max ECC – granična vrijednost *E* polja na istoj frekvenciji prema ECC/REC/(05)04 preporuci

E max ITU – granična vrijednost *E* polja na istoj frekvenciji prema ITU K.60 preporuci

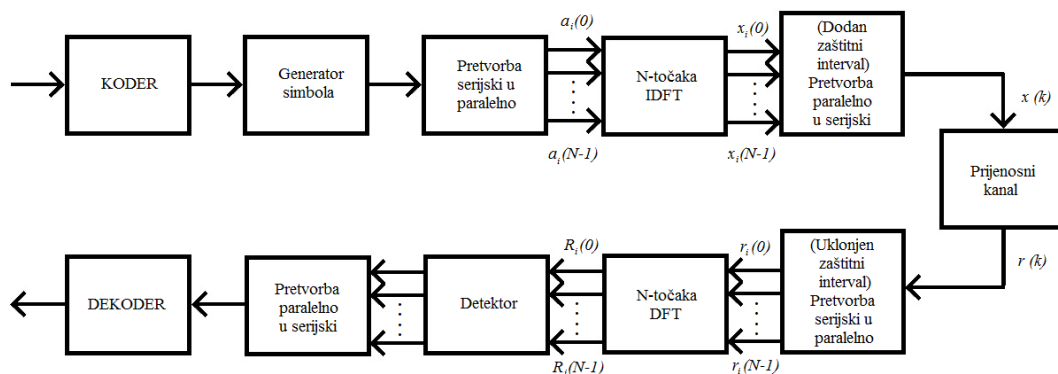
E max Nor – granična vrijednost *E* polja na istoj frekvenciji prema preporuci Kraljevine Norveške

E max Kor – granična vrijednost *E* polja na istoj frekvenciji prema preporuci Republike Koreje

Tablica 7.2. Usporedni prikaz najveće vrijednosti jakosti električnog polja na pojedinačnoj frekvenciji s ekvivalentnim graničnim vrijednostima

8. SIMULACIJA UTJECAJA IZRAČENOG ELEKTRIČNOG POLJA VDSL2 TELEKOMUNIKACIJSKOG KABELA NA PRIJEM DRM SIGNALA

Osim mjerenja zračenja telekomunikacijskog kabela za širokopojasni prijenos podataka i usporedbe dobivenih rezultata s međunarodnim normama i pravilnicima u ovom specijalističkom radu provedena je i simulacija utjecaja izračenog električnog polja VDSL2 telekomunikacijskog kabela na prijem DRM signala. Simulacija je provedena prema modelu koji je opisan u [32]. U [32] je učinjena je analitička analiza OFDM sustava odnosno analiziran je utjecaj istokanalne i istosimbolne smetnje na karakteristike istog sustava. Osnovni model koji se koristio u analizi i simulaciji prikazan je na slici 8.1.



Slika 8.1. Osnovni model za simulaciju OFDM sustava prema [32]

Prema osnovnom modelu vidljivo je da vanjska smetnja u sustav dolazi preko prijenosnog komunikacijskog kanala. Prijenosni kanal koji u ovom slučaju koristio je vremenski promjenjiv višestazni Rayleighov kanal. Parametar koji se koristio za određivanje kvalitete prenesenog signala preko komunikacijskog kanala koji je pod utjecajem vanjske smetnje je broj pogrešno prenesenih bitova u jedinici vremena (*engl. Bit Error Rate – BER*), odnosno broj pogrešno prenesenih simbola u jedinici vremena (*engl. Symbol Error Rate – SER*).

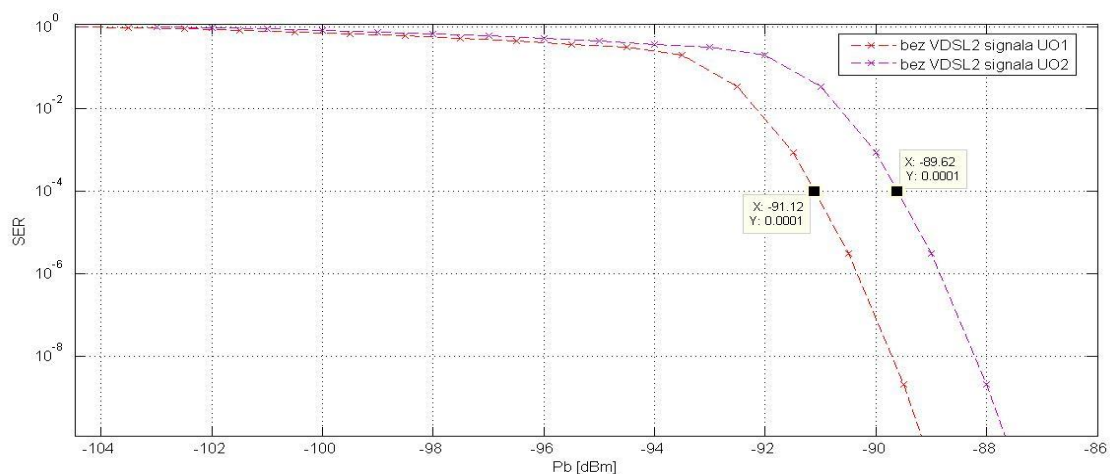
U ovom specijalističkom radu za potrebe simulacije utjecaja izračenog električnog polja VDSL2 telekomunikacijskog kabela na prijem DRM signala koristio se programski paket Matlab. Simulacijski model napravljen je prema [32], a programski kod nalazi se u prilogu pod poglavljem 11. ovoga rada. Procjena kvalitete prijema prenesenog DRM signala preko komunikacijskog kanala koji je pod utjecajem izračenog električnog polja VDSL2 telekomunikacijskog kabela promatrana je preko BER parametra, odnosno preko SER parametra. Utjecaj izračenog električnog polja VDSL2 telekomunikacijskog kabela u simulaciji je promatran kao šum na prijemu čija je

vrijednost prikazana preko spektralne gustoće snage (*engl. Power Spectral Density – PSD*). PSD je izračunat uzimajući najveće vrijednosti izračenog električnog polja VDSL2 telekomunikacijskog kabela u pojedinom frekvencijskom opsegu na udaljenosti od 3 m i na udaljenosti od 1 m dok je za graničnu vrijednost SER-a uzeta vrijednost od 10^{-4} . Za izračun PSD-a prvo je izračeno električnog polje preračunato u snagu u dBm-u korištenjem (5-22) i (5-33) te nakon toga prema formuli (8-1) u dBm/Hz [33]:

$$PSD = P_{dBm} - 10 \log(RBW), \quad [\text{dBm/Hz}] \quad (8 - 1)$$

uz pojas propusnosti – RBW koji je prilikom mjerenja na mjernom prijemniku bio postavljena na 9 kHz.

Kako bi se odredila najmanja razina jakosti polja na kojoj bi DRM prijemnik bez problema demodulirao primani signal (vrijednost razine SER-a od 10^{-4}) provedena je simulacija bez utjecaja izračenog električnog polja VDSL2 telekomunikacijskog kabela. U ovom slučaju kao ulazni parametar uzeta je vrijednost šuma na lokaciji na kojoj je učinjeno testno mjerenje. Iznos razine šuma u uzlaznom opsegu 1 prema izmjerenim vrijednostima je -104,5 dBm, dok je ista vrijednost na uzlazom opsegu 2 iznosi -103,0 dBm. Na slici 8.2. prikazane su vrijednosti dobivene simulacijom u Matlabu.



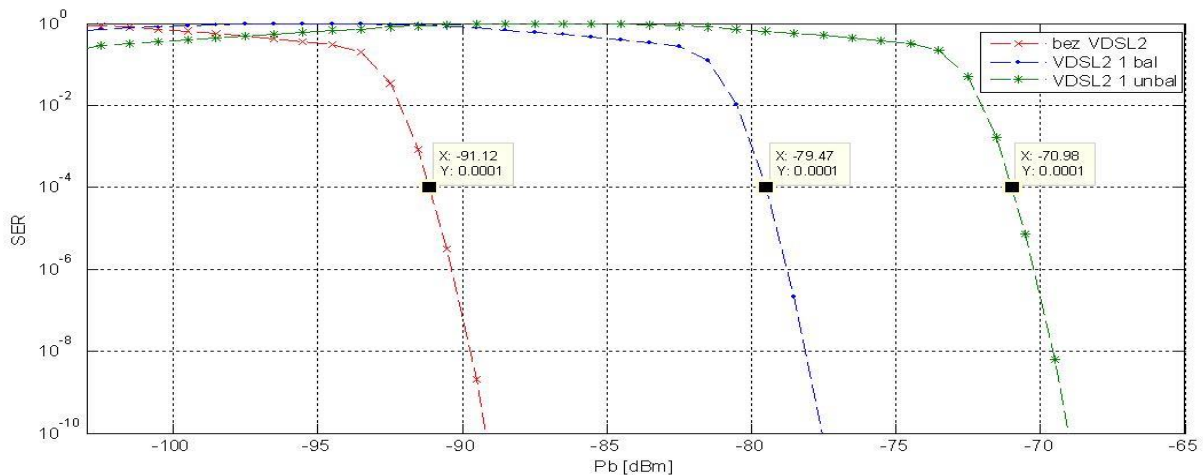
Slika 8.2. SER u odnosu na snagu na ulazu u DRM prijemnik za uzlazni opseg 1 i uzlazni opseg

2

Iz slike 8.2. može se zaključiti da granična vrijednost zadovoljavajućeg prijema za vrijednost SER-a od 10^{-4} u uzlaznom opsegu 1 iznosi -91,12 dBm, dok je u uzlaznom opsegu 2 ta vrijednost -89,62 dBm. To znači da je na lokaciji na kojoj je izvršeno mjerenje zračenja VDSL2

telekomunikacijskog kabla u slučaju da istim kablom ne prolaze VDSL2 signali najmanja razina snage na ulazu u DRM prijemnik koja bi omogućavala zadovoljavajući prijem DRM signala u frekvencijskom području od 3,75 MHz do 5,2 MHz (uzlazni opseg 1) treba biti -91,12 dBm, što odgovara iznosu napona na ulazu u prijemnik od 15,88 dB μ V, dok iznos te iste snage u frekvencijskom području od 8,5 MHz do 12 MHz (uzlazni opseg 2) iznosi -89,62 dBm, što odgovara iznosu napona na ulazu u prijemnik od 17,38 dB μ V. Dobivene vrijednosti napona na ulazu u DRM prijemnik su u skladu s izvješćem broj 24 Odbora za elektroničke komunikacije [1].

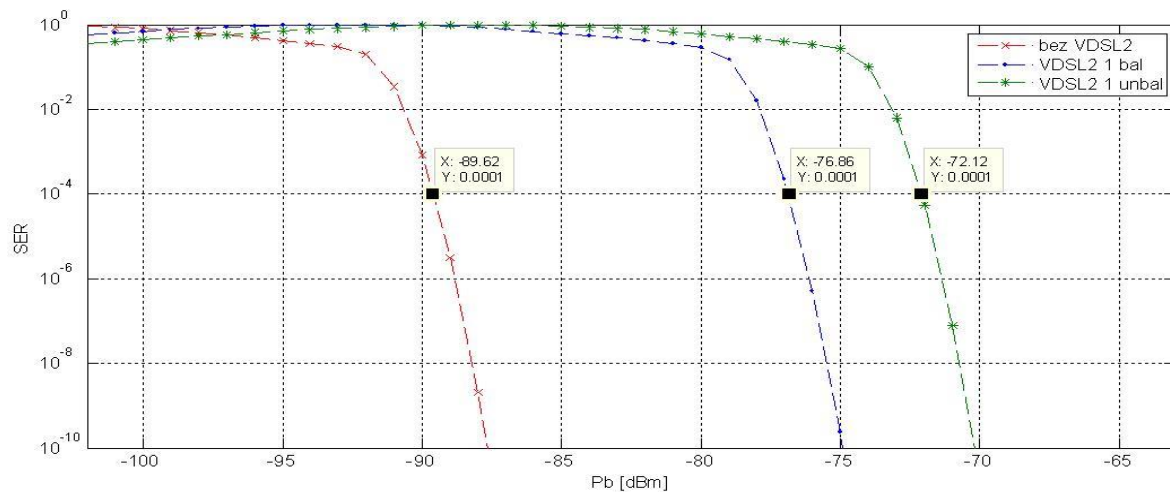
Nakon određivanja najmanje razine napona na ulazu u DRM prijemnik izvršena je simulacija za slučaj da se DRM prijemnik nalazi na udaljenosti od 3 m od zračećeg VDSL2 telekomunikacijskog kabla za nekoliko slučajeva u oba frekvencijska opsega. Prvo je promatran utjecaj izračenog električnog polja VDSL2 telekomunikacijskog kabla na povećanje najmanje prijemne razine snage na ulazu u DRM prijemnik u slučaju da je u telekomunikacijskom kablolu aktivna jedna balansirana upredena parica i jedna nebalansirana upredena parica za oba frekvencijska opsega. Rezultati simulacije prikazani su na slikama 8.3. i 8.4.



Slika 8.3. SER u odnosu na snagu na ulazu u DRM prijemnik kada je aktivna 1 balansirana upredena parica i kada je aktivna 1 nebalansirana upredena parica za uzlazni opseg 1

Iz slike 8.3. vidi se da je najmanja razina snage na ulazu u DRM prijemnik koja bi omogućavala zadovoljavajući prijem DRM signala u slučaju da je aktivna jedna balansirana upredena parica znatno veća nego da ne postoji zračenje VDSL2 telekomunikacijskog kabla, a u slučaju da je aktivna jedna nebalansirana upredena parica najmanja razina snage je još veća nego za prethodni slučaj. U slučaju aktivne jedne balansirane upredene parice najmanja razina snage na ulazu u DRM prijemnik koja bi omogućavala zadovoljavajući prijem DRM signala u uzlaznom području 1 iznosi -79,47 dBm, što odgovara iznosu napona na ulazu u prijemnik od 27,53 dB μ V,

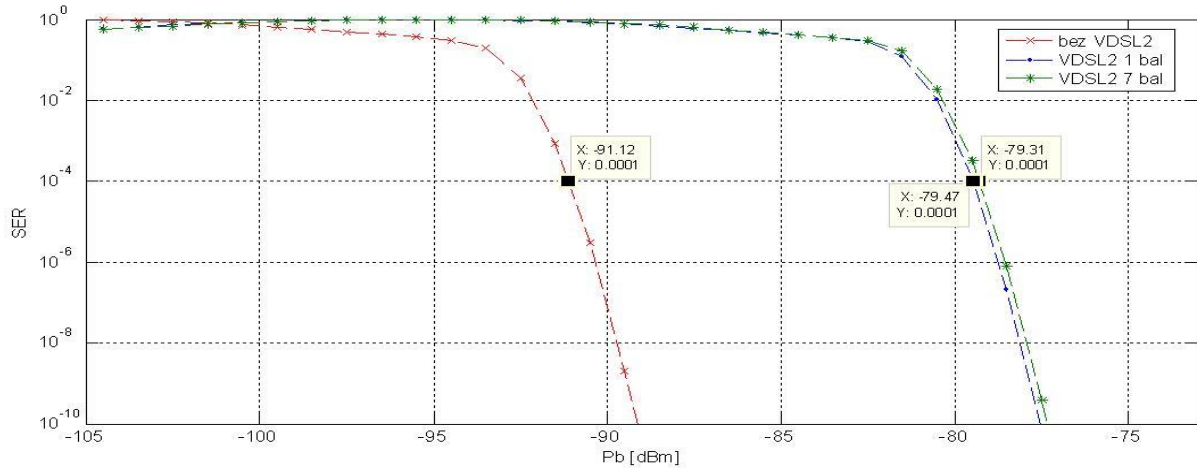
dok ista razina snage na ulazu u DRM prijemnik u uzlaznom području 1 u slučaju aktivne jedne nebalansirane parice iznosi -70,98 dBm, što odgovara iznosu napona na ulazu u prijemnik od 36,02 dB μ V. Uz aktivnu jednu balansiranu upredenu paricu povećanje najmanje razine snage na ulazu u DRM prijemnik, koja bi omogućavala zadovoljavajući prijem DRM signala u odnosu na najmanju razinu snage pod istim uvjetima u slučaju da ne postoji VDSL2 signal iznosi 11,65 dB, dok u slučaju aktivne jedne nebalansirane upredene parice isto povećanje iznosi čak 20,35 dB.



Slika 8.4. SER u odnosu na snagu na ulazu u DRM prijemnik kada je aktivna 1 balansirana upredena parica i kada je aktivna 1 nebalansirana upredena parica za uzlazni opseg 2

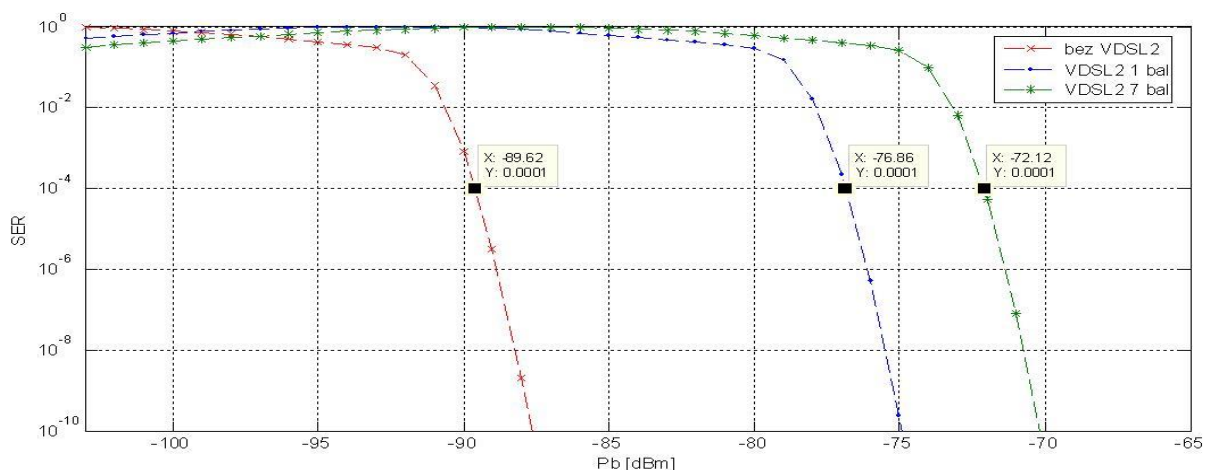
Iz slike 8.4. vidi se da situacija vrlo slična kao u uzlaznom opsegu 1. U slučaju aktivne jedne balansirane upredene parice najmanja razina snage na ulazu u DRM prijemnik koja bi omogućavala zadovoljavajući prijem DRM signala u uzlaznom području 2 iznosi -76,86 dBm, što odgovara iznosu napona na ulazu u prijemnik od 30,14 dB μ V, dok ista razina snage na ulazu u DRM prijemnik u uzlaznom području 2 u slučaju aktivne jedne nebalansirane parice iznosi -72,12 dBm, što odgovara iznosu napona na ulazu u prijemnik od 34,88 dB μ V. Uz aktivnu jednu balansiranu upredenu paricu povećanje najmanje razine snage na ulazu u DRM prijemnik koja bi omogućavala zadovoljavajući prijem DRM signala u odnosu na najmanju razinu snage pod istim uvjetima u slučaju da ne postoji VDSL2 signal za uzlazni opseg 2 iznosi 12,76 dB, dok u slučaju aktivne jedne nebalansirane upredene parice isto povećanje iznosi čak 17,50 dB.

Nakon toga simulirana je usporedba utjecaja izračenog električnog polja VDSL2 telekomunikacijskog kabela na povećanje najmanje prijemne razine snage na ulazu u DRM prijemnik u slučaju da je u telekomunikacijskom kabelu aktivna jedna balansirana upredena parica i sedam balansiranih upredenih parica za oba frekvencijska opsega. Rezultati simulacije prikazani su na slikama 8.5. i 8.6.



Slika 8.5. SER u odnosu na snagu na ulazu u DRM prijemnik kada je aktivna 1 balansirana upredena parica i kada su aktivne 7 balansiranih upredenih parica za uzlazni opseg 1

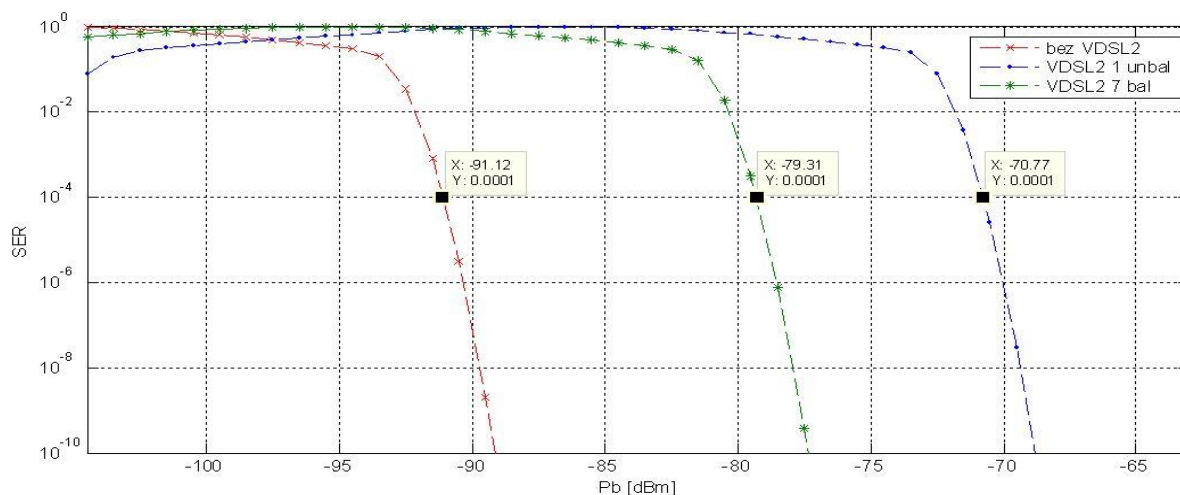
Prema rezultatima simulacije koji su prikazani na slici 8.6. vidi se da je najmanja razina snage na ulazu u DRM prijemnik koja bi omogućavala zadovoljavajući prijem DRM signala u uzlaznom opsegu 1 u slučaju aktivnih sedam balansiranih upredena parica nešto malo veća nego u slučaju da je aktivna jedna balansirana upredena parica. U slučaju aktivnih sedam balansiranih upredenih parica najmanja razina snage na ulazu u DRM prijemnik koja bi omogućavala zadovoljavajući prijem DRM signala u uzlaznom području 1 iznosi -79,31 dBm, što odgovara iznosu napona na ulazu u prijemnik od 27,69 dB μ V što je povećanje od samo 0,16 dB u odnosu na najmanju razinu snage na ulazu u DRM prijemnik koja bi omogućavala zadovoljavajući prijem DRM signal u slučaju kada je aktivna samo jedna parica.



Slika 8.6. SER u odnosu na snagu na ulazu u DRM prijemnik kada je aktivna 1 balansirana upredena parica i kada su aktivne 7 balansiranih upredenih parica za uzlazni opseg 2

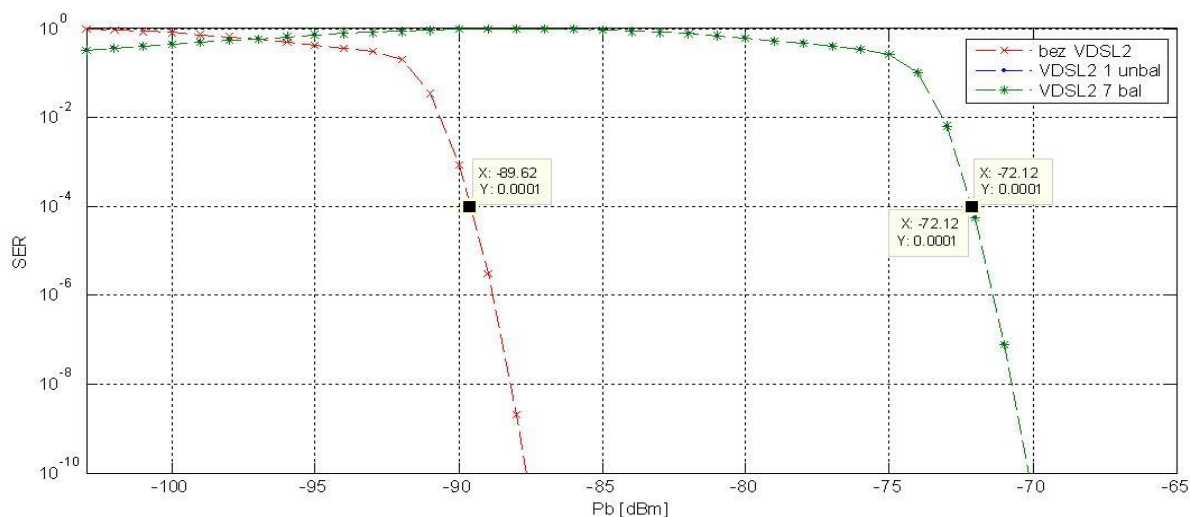
Iz slike 8.6. vidi se da je najmanja razina snage na ulazu u DRM prijemnik koja bi omogućavala zadovoljavajući prijem DRM signala u uzlaznom opsegu 2 u slučaju da su aktivne sedam balansiranih upredena parica veća nego u slučaju da je aktivna jedna balansirana upredena parica i iznosi -72,12 dBm, što odgovara iznosu napona na ulazu u prijemnik od 34,88 dB μ V. To je povećanje od 4,74 dB u odnosu na najmanju razinu snage na ulazu u DRM prijemnik koja bi omogućavala zadovoljavajući prijem DRM signal u slučaju kada je aktivna samo jedna parica. Rezultati simulacije pokazuju da se najmanja razina snage na ulazu u DRM prijemnik koja bi omogućavala zadovoljavajući prijem DRM signala uz aktivnih sedam balansiranih upredenih parica u odnosu na istu razinu snage uz aktivnu jednu balansiranu upredenu paricu ne razlikuje puno u uzlaznom opsegu 1, dok su iste usporedne vrijednosti za uzlazni opseg 2 ipak nešto veće. Ovo dovodi do zaključka da su najveće izračene vrijednosti električnog polja VDSL2 kabela na pojedinačnim frekvencijama u uzlaznom opsegu 1 u slučaju da se koristi jedna upredena parica i sedam upredenih parica dosta slične dok se iste vrijednosti u uzlaznom opsegu 2 razlikuju za skoro 5 dB kako je i prikazano na slici 7.9. Ova povećana razlika nastaje jer su kao ulazne vrijednosti simulacije uzete najviše vrijednosti izračenog elektromagnetskog polja. Kada bi se promatrale srednje vrijednosti izračenog električnog polja, razlike između jedne i sedam upredenih parica ne bi bile toliko velike. Uz aktivnih sedam balansiranih upredenih parica povećanje najmanje razine snage na ulazu u DRM prijemnik koja bi omogućavala zadovoljavajući prijem DRM signala u odnosu na najmanju razinu snage pod istim uvjetima u slučaju da ne postoji VDSL2 signal za uzlazni opseg 1 iznosi 11,81 dB, dok u uzlaznom opsegu 2 isto povećanje iznosi čak 17,50 dB.

Nadalje, simulirana je usporedba utjecaja izračenog električnog polja VDSL2 telekomunikacijskog kabela na povećanje najmanje prijemne razine snage na ulazu u DRM prijemnik u slučaju da je u telekomunikacijskom kabeu aktivna jedna nebalansirana upredena parica i sedam balansiranih upredenih parica za oba frekvencijska opsega. Rezultati simulacije prikazani su na slikama 8.7. i 8.8.



Slika 8.7. SER u odnosu na snagu na ulazu u DRM prijemnik kada je aktivna 1 nebalansirana upredena parica i kada su aktivne 7 balansiranih upredjenih parica za uzlazni opseg 1

Slika 8.7. pokazuje da je najmanja razina snage na ulazu u DRM prijemnik koja bi omogućavala zadovoljavajući prijem DRM signala u uzlaznom opsegu 1 znatno veća u slučaju da je aktivna jedna nebalansirana parica u odnosu na slučaj kada su aktivne sedam balansiranih upredena parica. Razlika najmanje razine snage na ulazu u DRM prijemnik koja bi omogućavala zadovoljavajući prijem DRM signala u ova dva slučaja iznosi čak 8,54 dB.

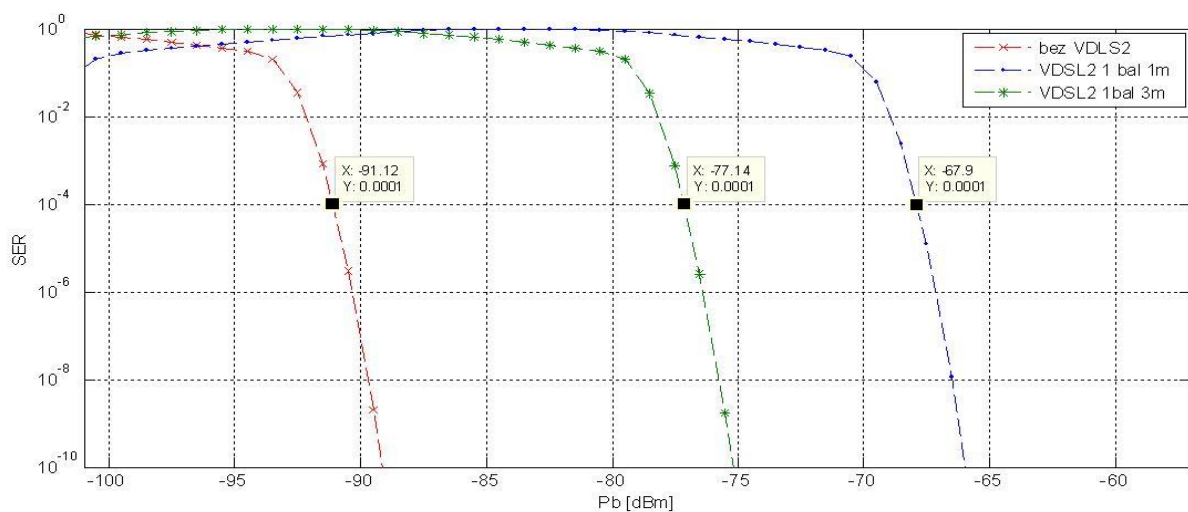


Slika 8.8. SER u odnosu na snagu na ulazu u DRM prijemnik kada je aktivna 1 nebalansirana upredena parica i kada su aktivne 7 balansiranih upredjenih parica za uzlazni opseg 2

Na slici 8.8. vidi se da je najmanja razina snage na ulazu u DRM prijemnik koja bi omogućavala zadovoljavajući prijem DRM signala u uzlaznom opsegu 2 jednaka u slučaju da je

aktivna jedna nebalansirana parica u odnosu na slučaj kada su aktivne sedam balansiranih upredena parica. U praktičnoj primjeni to znači da postoji znatno veća vjerojatnost pojave smetnje od izračenog električnog polja VDSL2 kabela u slučaju nebalansirane upredene parice nego u slučaju sedam balansiranih upredeni parica u uzlaznom području 1 dok je u uzlaznom području 2 vjerojatnost pojave eventualne smetnje u oba slučaja jednaka. Ovo dovoljno govori o važnosti održavanja ispravnosti telekomunikacijskih kabela za širokopolasni prijenos podataka.

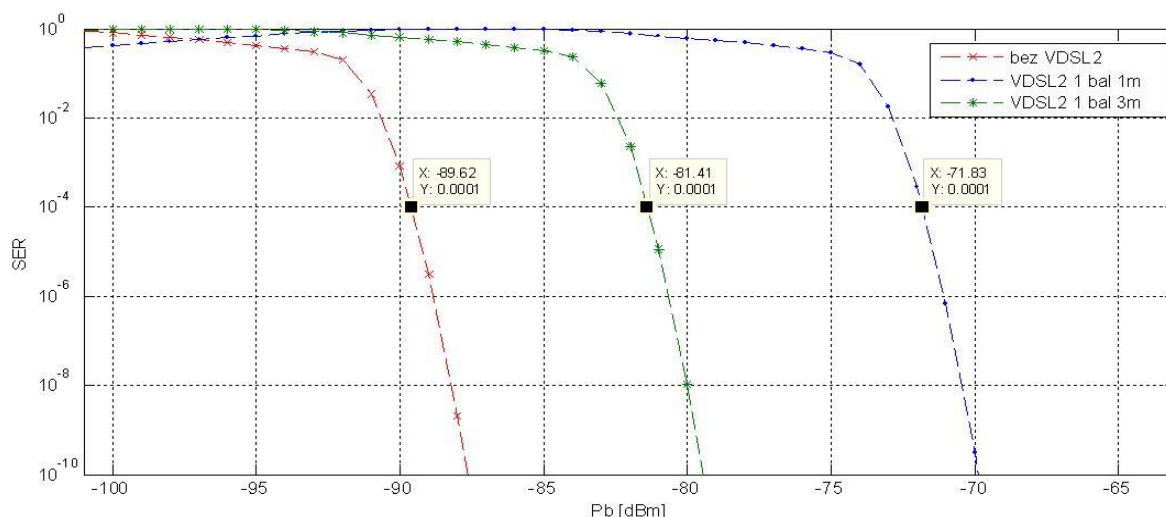
Na kraju je simuliran i utjecaj izračenog električnog polja VDSL2 telekomunikacijskog kabela na udaljenosti 1 m i 3 m na prijem DRM signala. Rezultati simulacije za uzlazni opseg 1 prikazani su na slici 8.9.



Slika 8.9. SER u odnosu na snagu na ulazu u DRM prijemnik kada je aktivna 1 balansirana upredena parica na udaljenosti 1 m i 3 m za uzlazni opseg 1

Rezultati simulacije SER-a u odnosu na snagu na ulazu u DRM prijemnik kada je aktivna 1 balansirana upredena parica za uzlazni opseg 1 pokazuju da najmanja razina snage na ulazu u DRM prijemnik koja bi omogućavala zadovoljavajući prijem DRM signala na udaljenosti jedan metar od upredene parice iznosi -67,9 dBm, što odgovara iznosu napona na ulazu u prijemnik od 39,10 dB μ V. U odnosu na iste vrijednosti na udaljenosti od tri metra to je povećanje od čak 9,24 dB, a u odnosu na najmanju razinu snage pod istim uvjetima u slučaju da ne postoji VDSL2 signal povećanje iznosi čak 23,22 dB.

Na slici 8.10. prikazani su rezultati simulacije SER-a u odnosu na snagu na ulazu u DRM prijemnik kada je aktivna 1 balansirana upredena parica za uzlazni opseg 2.



Slika 8.10. SER u odnosu na snagu na ulazu u DRM prijemnik kada je aktivna 1 balansirana upredena parica na udaljenosti 1 m i 3 m za uzlazni opseg 2

Na slici 8.10. vidi se da je najmanja razina snage na ulazu u DRM prijemnik koja bi omogućavala zadovoljavajući prijem DRM signala na udaljenosti jedan metar od upredene parice u uzlaznom opsegu 2 također znatno veća nego ista vrijednost na udaljenosti od tri metra i iznosi -71,83 dBm, što odgovara iznosu napona na ulazu u prijemnik od 35,17 dB μ V. U odnosu na iste vrijednosti na udaljenosti od tri metra to je povećanje od čak 9,58 dB što je gotovo identično kao u uzlaznom opsegu 1 dok razlika u odnosu na najmanju razinu snage pod istim uvjetima u slučaju da ne postoji VDSL2 signal iznosi čak 17,79 dB što je nešto manje nego u uzlaznom opsegu 1. Iz rezultata dobivenim simulacijom može se zaključiti da izračeno električno polje VDSL2 kabela ukoliko se DRM prijemnik nalazi na udaljenosti od jedan metar od telekomunikacijskog kabela znatno utječe na povećanje najmanje razine snage na ulazu u DRM prijemnik koja bi omogućavala zadovoljavajući prijem DRM signala. U tablici 8.1 prikazan je usporedni prikaz porasta najmanje razine snage na ulazu u DRM prijemnik koja bi omogućavala zadovoljavajući prijem DRM signala u svim slučajevima za koje je učinjena simulacija u odnosu na istu razinu snage kada nema izračenog električnog polja VDSL2 telekomunikacijskog kabela.

| | Bez VDSL2 | 1 balansirana parica | 1 nebalansirana parica | 7 balansiranih parica | 1 balansirana parica 1m |
|------------------------------|-----------|----------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Uzlazni opseg 1 | | | | | |
| P_b uz $SER 10^{-4}$ (dBm) | -91,12 | -79,47 | -70,96 | -79,31 | -67,90 |
| Razlika (dB) | - | 11,65 | 20,16 | 11,81 | 23,22 |
| Uzlazni opseg 2 | | | | | |
| P_b uz $SER 10^{-4}$ (dBm) | -89,62 | -76,86 | -72,12 | -72,12 | -71,83 |
| Razlika (dB) | - | 12,76 | 17,5 | 17,5 | 17,79 |

P_b uz $SER 10^{-4}$ – snaga uz vrijednost SER-a od 10^{-4}

Razlika – razlika snage kada VDSL2 nije aktivan i kada jest za vrijednost SER-a 10^{-4}

Tablica 8.1. Usporedni prikaz porasta najmanje razine snage na ulazu u DRM prijemnik koja bi omogućavala zadovoljavajući prijem DRM signala u različitim slučajevima

Iz vrijednosti u tablici 8.1. vidi se da je najmanja razina snage na ulazu u DRM prijemnik koja bi omogućavala zadovoljavajući prijem DRM signala najveća u slučaju da se DRM prijemnik nalazi na udaljenosti od jednog metra od aktivnog VDSL2 telekomunikacijskog kabela za oba frekvencijska opsega. Idući najnepovoljniji slučaj je kada je upredena parica nebalansirana.

9. ZAKLJUČAK

Praktični dio ovog specijalističkog rada zasnovan je na mjerenju zračenja telekomunikacijskog kabela TK 59U-xDSL i na razmatranju utjecaja zračenja istog na druge radijske tehnologije koje rade u istom frekvencijskom području kao i VDSL2 tehnologija kao i na simulaciji utjecaja zračenja istog kabela na DRM prijemnik koji se nalazi u njegovoj blizini. S obzirom na veliku zastupljenost VDSL2 tehnologije u urbanim sredinama postoji velika vjerojatnost da se u blizini VDSL2 telekomunikacijskog kabela nalazi i druga radiokomunikacijska oprema. Visoke razine izračenog električnog polja telekomunikacijskog kabela mogu izravno utjecati na otežan rad ili u potpunosti onemogućiti rad druge radiokomunikacijske opreme. Stoga su izračene vrijednosti električnog polja dobivene mjerenjem analizirane i uspoređene s graničnim vrijednostima koje su propisane važećim pravilnicima i normama. S obzirom na položaj telekomunikacijskog kabela i opreme u prostoru obavljena su dva tipa mjerenja, na udaljenosti 3 metra od telekomunikacijskog kabela i na udaljenosti 1 metar o telekomunikacijskog kabela. Analiza mjernih rezultata prvog tipa mjerenja pokazala je da je jakost izračenog električnog polja telekomunikacijskog kabela na pojedinačnim frekvencijama uzlaznog opsega 1 i 2 otprilike 6 dB više od granične vrijednosti definirane preporukom Odbora za elektroničke komunikacije ECC/REC/(05)04. U uzlaznom opsegu 1 postotak pojedinačnih frekvencija čija jakost električnog polja prelazi graničnu razinu propisanu ECC/REC/(05)04 preporukom iznosi 38,6% opsega dok taj postotak u uzlaznom opsegu 2 iznosi 36,3% opsega. Mjerenja su također pokazala da se u slučaju nabalansiranog telekomunikacijskog kabela jakost izračenog električno polje znatno povećava te na frekvenciji uzlaznog opsega 1 od 4,45 MHz prelazi dopuštenu graničnu razinu ECC/REC/(05)04 preporuke za čak 14 dB. Odstupanje izračenog električnog polja nebalansiranog telekomunikacijskog kabela od dopuštene granične vrijednosti ECC/REC/(05)04 preporuke na frekvenciji uzlaznog opsega 2 od 9,91 MHz je nešto malo manje i iznosi 12,2 dB. U slučaju korištenja sedam upredenih parica u odnosu na korištenje samo jedne upredene parice jakost izračenog električnog polje znatno se povećava, pa je tako u ovom slučaju postotak pojedinačnih frekvencija čije električno polje prelazi graničnu razinu propisanu ECC/REC/(05)04 preporukom u uzlaznom opsegu 1 čak 83,5% opsega dok je taj postotak u uzlaznom opsegu 2 čak 71,6% opsega. Usporedna analiza jakosti izračenog električnog polja jedne nebalansirane upredene parice gotovo da je jednako jakosti izračenog električnog polja kada se u telekomunikacijskom kabelu koristi sedam upredenih parica u balansiranom modu, što govori o važnosti tehničke ispravnosti telekomunikacijskih kablova. Analizom mjernih rezultata drugog tipa mjerenja utvrđeno je da se jakost izračenog električnog polja povećava sa smanjenjem

udaljenosti između mjerne antene i zračućeg telekomunikacijskog kabela. Na udaljenosti 1 metar od telekomunikacijskog kabela izračeno električno polje oba uzlazna opsega znatno je povećano. Budući da na području telekomunikacija na svjetskoj razini postoji više preporuka o graničnim vrijednostima izračenog električnog polja telekomunikacijskog kabela napravljena je i usporedba izmjerenih rezultata prvog tipa mjerenja osim s ECC/REC/(05)04 preporukom i s ITU K.60 preporukom, preporukom Kraljevine Norveške te preporukom Republike Koreje. Analize rezultata pokazuju da u slučaju balansirano telekomunikacijskog kabela izračeno elektromagnetsko polje telekomunikacijskog kabela zadovoljava granične uvjete zračenja za ITU K.60 preporuku i preporuku Republike Koreje dok ne zadovoljava granične uvjete koji su propisani ECC/REC/(05)04 i preporukom Kraljevine Norveške. Budući da je Republika Hrvatska članica Europske unije, kod nas se primjenjuje ECC/REC/(05)04 preporuka te se sukladno analizi mjernih rezultata može zaključiti da ukoliko se neka radiokomunikacijska oprema nalazi blizu telekomunikacijskog kabela, te u neposrednoj blizini telekomunikacijske opreme (korisnički modemi ili modemi u lokalnoj centrali) postoji velika vjerojatnost da će izračeno elektromagnetsko polje koje emitira telekomunikacijski kabel u većoj ili manjoj mjeri ometati rad te iste radiokomunikacijske opreme. Rezultati simulacije također pokazuju da se najmanja razina snage na ulazu u DRM prijemnik koja bi omogućavala zadovoljavajući prijem DRM signala najviše povećava kada se prijemnik nalazi na udaljenosti od jednog metra od aktivnog VDSL2 telekomunikacijskog kabela za oba frekvencijska opsega dok je idući najgori slučaj kada je upređena parica nebalansirana. Zbog svega ovoga može se zaključiti da je ukoliko se želi izbjeći nepovoljan utjecaj zračenja VDSL2 telekomunikacijskog kabela na druge tehnologije koje se nalaze u njegovoj blizini iznimno važno da njihova međusobna udaljenost bude dovoljno velika te da je telekomunikacijski kabel dobro balansiran.

LITERATURA

- [1] ECC Report 24, "PLT, DSL, Cable Communications (including cable tv), Lans and their effect on radio services", 2003.
- [2] British Radiocommunications Agency, "Compatibility of VDSL & PLT with radio services in range 1.6 MHz to 30 MHz, Final report of the tehcnical working group", 2002.
- [3] M. Jakovac, "Measurement of Radiated Emissions up to 30 MHz from Installed Multi-pair Communication Cable", IEEE, 2018 International Symposium ELMAR, 2018.
- [4] ITU-T, "ITU-T K.60 Recommendation, Emission levels and test methods for wireline telecommunication networks to minimize electromagnetic disturbance of radio services", 2015., <https://www.itu.int/rec/T-REC-K.60-201512-I/en>, pristup 3.10.2019.
- [5] ECC, "ECC Recommendation (05)04, Criteria for the assessment of radio interferences caused by radiated disturbances from wire-line telecommunication networks", <https://www.ecodocdb.dk/download/732d965f-241c/REC0405.PDF>, pristup 3.10.2019.
- [6] Carnet, "Povijest Carneta", https://www.carnet.hr/o_carnetu/o_nama/povijest_carneta, pristup, 3.10.2019.
- [7] ITU-T, "ITU-T Asymmetric digital subscriber line (ADSL) transceivers", 2000., <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.992.1>, pristup 3.10.2019.
- [8] E. Eriksson, B. Odenhammar, "VDSL2: Next important broadband technology", Ericsson Review No. 1, 2006.
- [9] A. Bažand, T. Car, G. Gledec, D. Jevtić, G. Jetić, M. Kunštić, I. Lovrek, M. Matijašević, B. Mikac, Z. Skočir, "Telekomunikacije-tehnologija i tržište", Element, 2007.
- [10] ITU-T, "ITU-T Asymmetric digital subscriber line (ADSL2) transceivers 2", 2009., <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.992.3>, pristup 3.10.2019.
- [11] ITU-T, "ITU-T Asymmetric digital subscriber line (ADSL) transceivers – Extended bandwidth ADSL2 (ADSL2plus) ", 2005., <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.992.5/en>, pristup 3.10.2019.
- [12] M. Heath, "Chart of ADSL and ADSL2+ Speed Versus Distance" <https://www.increasebroadbandspeed.co.uk/2012/graph-ADSL-speed-versus-distance>, pristup 3.10.2019.
- [13] ITU-T, "ITU-T Very high speed digital subscriber line transceivers", 2004., <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.993.1-200406-I/en>, pristup 3.10.2019.

- [14] D. J. Rauschmayer, "ADSL/VDSL Principles: A Practical and Precise Study of Asymmetric Digital Subscriber Lines and Very High Speed Digital Subscriber Lines", Macmillan Technical Publishing, 1999.
- [15] ITU-T, "ITU-T Very high speed digital subscriber line transceivers 2 (VDSL2) ", 2011., <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.993.2>, pristup 3.10.2019.
- [16] "Why not FTTN?", <https://nbnmyths.wordpress.com/why-not-fttn/>, pristup 3.10.2019.
- [17] ITU-T, "ITU-T ATM-based multipair bonding", 2005., <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.998.1-200501-I/en>, pristup 11.10.2019.
- [18] ITU-T, "ITU-T Ethernet-based multipair bonding", 2018. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.998.2-201811-P/en>, pristup 11.10.2019.
- [19] ITU-T, "ITU-T Multi-pair bonding using time-division inverse multiplexing", 2005. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.998.3-200501-I/en>, pristup 11.10.2019.
- [20] "Benefits of Pair-Bonded VDSL2" https://www.zyxel.com/solutions/solution_detail_20120224_055920_tab2.inc, pristup 11.10.2019.
- [21] P. Golden, H. Dedieu, K. S. Jacobsen, "Fundamentals of DSL Technology", Taylor & Francis Group, 2006.
- [22] ITU-T, "ITU-T Self-FEXT cancellation „vectoring“ for use with VDSL2 transceivers", 2019. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.993.5-201902-I/en>, pristup 11.10.2019.
- [23] "Vectoring bei VDSL: Anbieter, Tarife, Technik und Perspektiven" <https://www.vdsl-tarifvergleich.de/vdsl-technik/vectoring.html>, pristup 11.10.2019.
- [24] Nokia, "G.Fast", <https://www.nokia.com/networks/technologies/gfast/#highlights>, pristup 11.10.2019.
- [25] Hrvatski Telekom d.d., "Tehnički uvjeti T.U.062: Samonosivi TK kabel s nosećim užetom za xDSL prijenosne tehnologije", Sektor za strategiju i projektiranje mreže, 2006.
- [26] Item media, "Antenna Fundamentals", <https://interferencetechnology.com/antenna-fundamentals/>, pristup 4.12.2019.
- [27] R. Stolle, "Electromagnetic Coupling of Twisted Pair Cables", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 20, No. 5, broj stranice: 883 – 892, 2002.
- [28] W. Fischer, "Digital Video and Audio Broadcasting Technology: A Practical Engineering Guide", Second edition, Springer, 2008.
- [29] ITU-T, "ITU Recommendation ITU-R TF.768", 2011. <https://www.itu.int/rec/R-REC-TF.768-7-201104-I/en>, pristup 11.10.2019.

- [30] IEC, "CISPR 16-1-1: Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1-1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Measuring apparatus", 2019.
- [31] ITU-R, "ITU Recommendation ITU-R SM.1879-1, The impact of power line high data rate telecommunication systems on radiocommunication systems below 30 MHz and between 80 and 470 MHz", 2011.
- [32] Y. H. Kim, I. Song, H. G. Kim, T. Chang, H. M. Kim, "Performance analysis of a coded OFDM system in time-varying multipath Rayleigh fading channels", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 48, No. 5, broj stranice: 1610 – 1615, 1999.
- [33] Tektronix, "How can I measure and calculate nV/Root Hz (nanovolt per root Hertz) on a spectrum analyzer?", <https://tw.tek.com/faq/how-can-i-measure-and-calculate-nv-root-hz-nanovolt-root-hertz-spectrum-analyzer>, pristup 5.2.2020.

SAŽETAK

Analiza utjecaja zračenja samonosivog telekomunikacijskog kabela za VDSL2 prijenosne tehnologije

U ovom specijalističkom radu analiziran je utjecaj zračenja samonosivog telekomunikacijskog kabela za VDSL2 prijenosne tehnologije na druge radijske tehnologije koje rade u istom frekvencijskom području. Analiza se zasnivala na terenskim mjerenjima jakosti izračenog električnog polja samonosivog telekomunikacijskog kabela za VDSL2 prijenosne tehnologije, odnosno razmatranju postoji li mogućnost da izračeno električno polje istoga neželjeno utječe na neke druge radijske sustave koji se nalaze u blizini samonosivog telekomunikacijskog kabela. Mjerenja zračenja električnog polja bila su napravljena za nekoliko specifičnih slučajeva, nakon čega su dobivene izmjerene vrijednosti analizirane i uspoređene s preporukom Europskog odbora za komunikacije (ECC/REC/(04)/05), preporukom Međunarodne telekomunikacije unije (ITU-T K.60), preporukom Kraljevine Norveške i preporukom Republike Koreje. Također je u programskom paketu Matlab za izmjerene slučajeve napravljena simulacija utjecaja izračenog električnog polja samonosivog telekomunikacijskog kabela za VDSL2 prijenosne tehnologije na najmanje razine snage na ulazu u digitalni radijski prijemnik koje bi omogućavale zadovoljavajući prijem digitalnog radijskog signala.

KLJUČNE RIJEČI:

- VDSL2
- samonosivi telekomunikacijski kabel za VDSL2 prijenosne tehnologije
- mjerenje jakosti električnog polja
- ECC/REC/(04)/05
- ITU-T K.60
- DRM – digitalni radio

ABSTRACT

Radiation analysis of self-supporting telecommunication cable for VDSL2 transmission technologies

In this paper is analyzed radiation influence of self-supporting telecommunication cable for VDSL2 transmission technologies on other radio technologies operating in the same frequency range. The analysis was based on field measurements of electric field strength from self-supporting telecommunication cable for VDSL2 transmission technology and the possibility of making an electric field that causes unwanted interference on other radio systems located near the telecommunication cable. Measurements of electric field radiation were made for several specific cases. After that, measured values were analyzed and compared with the recommendation of the European Communications Committee (ECC/REC/(04)/05), recommendation of the International Telecommunications Union (ITU-T K.60), recommendation of the Kingdom of Norway and recommendation of the Republic of Korea. In the Matlab software, a simulation was also made of the effect of electric field from a self-supporting telecommunication cable for VDSL2 transmission technologies on the minimum power level at the input of digital radio receiver that could satisfy the reception of a digital radio signal.

KEY WORDS:

- VDSL2
- self-supporting telecommunication cable for VDSL2 transmission technologies
- electric field strength measurement
- ECC/REC/(04)/05
- ITU-T K.60
- DRM – Digital Radio Mondiale

ŽIVOTOPIS

Mario Gal rođen je u Našicama 1979. godine. Osnovnu i srednju školu pohađao je u Donjem Miholjcu. Maturirao je 1998. kada upisuje Elektrotehnički fakultet na Sveučilištu J. J. Strossmayera u Osijeku. 2003. godine diplomirao je na istom fakultetu s temom diplomskog rada “MPEG-2 kompresija za digitalnu obradu videa”. Od 2004. godine radi u Hrvatskog regulatornoj agenciji za mrežne djelatnosti (HAKOM), trenutno kao viši stručnjak uglavnom na poslovima mjerenja u radiofrekvencijskom spektru i istraživanju smetnji.

PRILOG

```
clear all
clc
T_s = 10e-6; %%symbol time reverese proportional to 10 kHz (total
bandwidth)
N = 256; %%number of subcarriers
t = 62; %%Reed Solomon code error corection capability
NDSL=-117; %%%DSL snaga u dBm/Hz
Nffloor=-132; %%%Noise flooru dBm/Hz
SNR = [0:1:50];
G = 5; %Guard time
tau_0 = T_s; %channel mean delay spread
f_d = 0; %%doppler frequency
M = 5; %number of multipath components
E_b = 1 %symbol energy
T_G = G*T_s; %%guard interval
T_m = M*T_s; %%%multipath delay spread
var_h = 0;
var_m = 0;
for m = 0:M-1
    var_m = var_m + exp(-m*T_s/tau_0);
end
A = 1/var_m;
var_m1 = 0;
for m = 1:M
    var_m1 = var_m1 + A*exp(-m*T_s/tau_0);
end
sum_1 = 0;
for k = M-G : N - 1
    for u = M - G : N - 1
        for m = 0 :M - 1
            sum_1 = sum_1 + A * exp(-m*T_s/tau_0) * besselj(0,2*pi*f_d*T_s*(k
- u));
        end
    end
end
sum_2 = 0;
for k = 0 : M - G -1
    for u = M - G : N - 1
        for m = 0 : k + G
            sum_2 = sum_2 + A * exp(-m*T_s/tau_0) * besselj(0,2*pi*f_d*T_s*(u
- k));
        end
    end
end
sum_3 = 0;
for k = 0 : M - G -1
    for u = 0 : M - G -1
        for m = 0 : min([k u]) + G
            sum_3 = sum_3 + A * exp(-m*T_s/tau_0) * besselj(0,2*pi*f_d*T_s*(u
- k));
        end
    end
end
var_h = 1/N^2*(sum_1 + 2*sum_2 + sum_3);
```

```

eq(14)%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
var_s = 0;
sum_1 = 0;
E_sc = 1*E_b/(1+G/N);
for k = 0 : M - G - 1
    for m = k + G + 1 : M - 1
        sum_1 = sum_1 + A * exp(-m*T_s/tau_0);
    end
end
var_s = 1/N*sum_1;
sum_1 = 0;
for m = 0: M-1
    sum_1 = sum_1 + A * exp(-m*T_s/tau_0);
end
sum_2 = 0;
for k = M - G : N - 1
    for u = M - G : N - 1
        for m = 0 : M - 1
            sum_2 = sum_2 + A * exp(-m*T_s/tau_0) * besselj(0,2*pi*f_d*T_s*(k
- u));
        end
    end
end
sum_3 = 0;
for u = M - G : N - 1
    for k = 0 : M - G - 1
        for m = 0 : k + G
            sum_3 = sum_3 + A * exp(-m*T_s/tau_0) * besselj(0,2*pi*f_d*T_s*(k
- u));
        end
    end
end
sum_4 = 0;
for k = 0: M - G - 1
    for m = 0 : k + G
        sum_4 = sum_4 + A * exp(-m*T_s/tau_0);
    end
end
sum_5 = 0;
for k = 0 : M - G - 1
    for u = 0 : M - G - 1
        for m = 0 : min([u k]) + G
            sum_5 = sum_5 + A * exp(-m*T_s/tau_0) * besselj(0,2*pi*f_d*T_s*(k
- u));
        end
    end
end
o = (N - (M - G))^2*sum_1;
o1 = N*sum_4;
o2 = 2*sum_2 + sum_5;
var_c = 1/N^2*((N - (M - G))*(N)*sum_1 - sum_2 - 2*sum_3 + N*sum_4 -
sum_5);
for j=1:length(SNR)
    j
    N0=1;
    if(Nfloor < NDSL)
        Ni = 10^(abs(Nfloor - NDSL)/10);
    else

```

```

        Ni = 0;
    end
    eb = 10^((SNR(j))/10);
    gamma_avg = 0;
    gamma_avg = 1*var_h/(var_c + var_s + 1/4/eb*(N0+Ni)*(1+G/N));
    Pb = 3/8*(1-sqrt(gamma_avg/(gamma_avg+10)))+1/4*(1-
sqrt(9*gamma_avg/(9*gamma_avg+10)))-1/8*(1-
sqrt(5*gamma_avg/(5*gamma_avg+2)));
    sum_1 = 0;
    l=255;
    for i=t+1:l
        sum_1=sum_1+1/l*i*nchoosek(l,i)*((1-(1-4*Pb)^2)^i*(1-(1-(1-
4*Pb)^2))^(l-i));
    end
    ber(j)= sum_1;
end
figure(1)
semilogy(SNR + Nfloor + 40,ber,'rx--') % BER dcsk
axis([Nfloor + 40 (max(SNR) + Nfloor + 40) 1E-10 1])
xlabel('Pb [dBm]')
ylabel('SER')
legend('OFDM BER Sim' )
grid on

```