

Ispitivanje kvalitete signala bežične komunikacijske mreže

Gabud, Tomislav

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:491041>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -
Institutional Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

Tomislav Gabud

**ISPITIVANJE KVALITETE SIGNALA BEŽIČNE
KOMUNIKACIJSKE MREŽE**

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2019.

Zagreb, 20. travnja 2016.

Zavod: **Zavod za inteligentne transportne sustave**
Predmet: **Računalstvo**

ZAVRŠNI ZADATAK br. 3751

Pristupnik: **Tomislav Gabud (0135230257)**
Studij: **Promet**
Smjer: **Informacijsko-komunikacijski promet**

Zadatak: **Ispitivanje kvalitete signala bežične komunikacijske mreže**

Opis zadatka:

U današnjem umreženom svijetu bežične komunikacijske mreže su vrlo bitne za povezivanje različitih pokretnih i nepokretnih uređaja. Kako bi se oni mogli nesmetano koristiti potrebno je osigurati dovoljnu kvalitetu signala bežične komunikacijske mreže. U tu svrhu se prilikom i nakon postavljanja opreme za uspostavu bežične komunikacijske mreže vrše mjerenja kvalitete signala. U radu je potrebno opisati značajke bežičnih komunikacijskih mreža, analizirati dostupne alate za mjerenje kvalitete signala te korištenjem odabranog alata ispitati kvalitetu bežične komunikacijske mreže unutar ZUK Borongaj.

Zadatak uručen pristupniku: 23. ožujka 2016.

Mentor:



izv. prof. dr. sc. Edouard Ivanjko

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

**ISPITIVANJE KVALITETE SIGNALA BEŽIČNE
KOMUNIKACIJSKE MREŽE**

**MEASURING THE SIGNAL QUALITY OF A WIRELESS
COMMUNICATION NETWORK**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Edouard Ivanjko
Student: Tomislav Gabud, 0135230257

Zagreb, rujan 2019.

Sažetak

Naslov: Ispitivanje kvalitete signala bežične komunikacijske mreže

Bežične komunikacijske mreže predstavljaju važnu komponentu moderne telekomunikacije. Najčešće se klasificiraju prema području pokrivanja odnosno dometu. Kao prijenosni medij, bežične komunikacijske mreže koriste elektromagnetske valove što ih čini podložnim mnogim pojava koje utječu na performanse i sigurnost samih mreža. IEEE 802.11, dominantna WLAN tehnologija, tvori većinu ovoga rada. Uz opis njenih značajki, opisano je i nekoliko lako dostupnih programskih alata za analizu IEEE 802.11 mreža. Korištenjem programskog alata WirelessMON potpomognutim GPS-om izvršena je analiza snage primljenoga signala WLAN mreže na lokaciji ZUK Borongaj. Uz komentar rezultata, predloženo je i nekoliko načina za poboljšanje trenutnoga stanja bežične mreže.

Ključne riječi: Bežične komunikacijske mreže, elektromagnetski valovi, WLAN, 802.11, WirelessMON

Summary

Title: Measuring the Signal Quality of a Wireless Communication Network

Wireless communication networks represent an important component of modern telecommunications networks. Most often they are classified by their area of coverage i.e. range. As a transmission medium, wireless communication networks use electromagnetic waves which makes them susceptible to many phenomena that affect the performances and security of networks. IEEE 802.11, the dominant WLAN technology, forms the majority of this thesis. Along with the description of its features, several easily available software tools for the analysis of IEEE 802.11 are reviewed. By using the software tool named WirelessMON aided by GPS, an analysis of received signal strength of the WLAN network on the premises of ZUK Borongaj was performed. Along with the commentary of the results, a number of ways to improve the current state of the wireless network are proposed.

Keywords: Wireless communication networks, electromagnetic waves, WLAN, 802.11, WirelessMON

Sadržaj

1.	Uvod	1
2.	Vrste bežičnih komunikacijskih mreža.....	3
2.1.	Bežična osobna mreža	4
2.2.	Bežična lokalna mreža.....	7
2.2.1.	HiperLAN	8
2.2.2.	HomeRF	9
2.3.	Bežična gradska mreža	9
2.3.1.	Free Space Optics	10
2.3.2.	IEEE 802.16 WiMAX	11
2.4.	Bežične mreže širokog područja.....	13
2.4.1.	Ćelijski komunikacijski sustavi	13
2.4.2.	Satelitski komunikacijski sustavi	14
3.	Karakteristike WLAN komunikacijskih mreža	17
3.1.	IEEE 802.11 protokolni složaj.....	18
3.1.1.	IEEE 802.11 MAC podsloj.....	18
3.1.1.1	Dostava podataka.....	18
3.1.1.2	Povezivanje.....	19
3.1.1.3	Timing i sinkronizacija.....	19
3.1.1.4	Upravljanje napajanjem.....	20
3.1.2.	IEEE 802.11 fizički sloj	20
3.1.2.1	Prošireni spektar skakanja frekvencija	21
3.1.2.2	Prošireni spektar izravnim širenjem spektra.....	21
3.1.2.3	Ortogonalna tehnika modulacije u frekvencijskoj domeni.....	21
3.1.2.4	Višestruki ulaz višestruki izlaz	22
3.2.	Standardi iz skupine 802.11	22

3.3.	IEEE 802.11 topologije	23
3.3.1.	Komponente topologija	24
3.3.2.	Osnovni skup usluga.....	25
3.3.3.	Prošireni skup usluga.....	26
3.3.4.	Neovisni skup osnovnih usluga	27
3.3.5.	Isprepleteni skup osnovnih usluga.....	28
3.4.	Sigurnost u IEEE 802.11 standardu.....	28
3.4.1.	Autentifikacija	28
3.4.2.	Povjerljivost.....	29
4.	Karakteristike širenja elektromagnetskog vala.....	31
4.1.	Elektromagnetski spektar	32
4.2.	Načini širenja radiovalova	33
4.3.	Pojave pri širenju radiovalova	34
5.	Programi za mjerenje snage signala	36
5.1.	Acrylic Wi-Fi Home	36
5.2.	Ekahau HeatMapper	37
5.3.	Vistumbler	38
5.4.	NetSpot	39
5.5.	WirelessMon.....	40
5.6.	Usporedba programskih alata	42
6.	Rezultati ispitivanja kvalitete signala bežične mreže ZUK Borongaj	45
6.1.	Postupak mjerenja	45
6.2.	Rezultati mjerenja.....	46
6.3.	Analiza i komentari rezultata.....	50
6.3.1.	Usporedba izvornoga i ponovljenoga mjerenja	50
6.3.2.	Komentar trenutnog stanja.....	50
6.3.3.	Nedostaci korištene metodologije	53
7.	Zaključak	54
	Literatura	57
	Popis kratica	59

Popis tablica.....	64
Popis slika.....	65

1. Uvod

Kroz noviju povijest, mogućnosti povezivanja i razmjene informacija na daljinu prerasle su iz primitivnih tehnologija kao što su telegram i telefonija u sofisticirane i složene sustave koji omogućavaju ne samo komunikaciju, već i mogućnosti zabave, edukacije, rada na daljinu itd. Jedna najvažnijih prekretnica u razvoju komunikacijskih tehnologija su bežične komunikacijske mreže. Njihova pojava pokrenula je revoluciju u mobilnosti korisnika, omogućila pokrivenost i fleksibilnost koja je nezamisliva za fiksne mreže, smanjila troškove izgradnje i održavanja mreža te povećala produktivnost za mnogobrojne industrije.

Unatoč jasnim prednostima, bežične komunikacijske mreže imaju i svoje nedostatke. Među najizraženijima su nedostaci sigurnosti bežičnoga medija te njegove osjetljivosti na smetnje što uvelike utječe na kvalitetu bežične komunikacijske mreže. Ovaj završni rad ponajviše se bavi problematikom jedne od najkorištenijih bežičnih mreža, IEEE 802.11 i njenom implementacijom na Znanstveno učilišnom kampusu Borongaj.

Rad je podijeljen u 7 cjelina:

1. Uvod;
2. Vrste bežičnih mreža;
3. Karakteristike WLAN komunikacijskih mreža;
4. Karakteristike širenja elektromagnetskog vala;
5. Programi za mjerenje snage signala;
6. Rezultati ispitivanja kvalitete signala bežične mreže ZUK Borongaj;
7. Zaključak.

Drugo poglavlje bavi se podjelom bežičnih mreža s obzirom na njihov domet. Uz podjelu opisuju se značajke relevantnih mreža iz svake grupe.

Treće poglavlje prikazuje najvažnije karakteristike IEEE 802.11 bežične lokalne mreže. Opisani su arhitektura slojeva, karakteristike raznih standarda, topologija i opće mjere sigurnosti korištene navedenom u standardu.

S obzirom da bežične komunikacijske mreže koriste elektromagnetske valove kao medij prijenosa, u četvrtome poglavlju opisana su svojstva širenja elektromagnetskih valova. Prikazane su opće karakteristike elektromagnetskih valova, elektromagnetski spektar te su definirane pojave koje utječu na širenje elektromagnetskih valova.

U petome poglavlju opisuju se programski alati za analizu IEEE 802.11 mreže. Opisani alati pripadaju lakše dostupnima s obzirom na visoke cijene profesionalnih alata. Nakon opisa obavljena je usporedba alata te je odabran jedan za praktični dio rada.

Šesto poglavlje sadrži praktični dio završnoga rada. U njemu je definiran postupak mjerenja snage primljenoga signala IEEE 802.11 mreže Eduroam na području Znanstvenog učilišnog kampusa Borongaj te su prikazani rezultati mjerenja uključujući kratku analizu dobivenih rezultata. Ovaj rad završava sedmim poglavljem koje sadrži zaključna razmatranja te prijedloge za nastavak rada na ovoj temi.

2. Vrste bežičnih komunikacijskih mreža

Komunikacijsku mrežu možemo definirati kao grupu međusobno povezanih uređaja putem zajedničkog medija, [1]. U slučaju bežičnih komunikacijskih mreža, korišteni medij su elektromagnetski valovi. Međutim, unutar elektromagnetskog spektra postoji mnogo različitih tehnologija za primjenu u različitim slučajevima, razmjerima ili topologijama. Jedan od najčešćih načina za diferenciranje mreža je prema njihovom geografskom dometu. Uz podjelu prema geografskome dometu, bežične komunikacijske mreže mogu se podijeliti prema području primjene, propusnosti, prema usmjerenosti komuniciranja (od jedne točke prema jednoj točki ili od jedne točke prema više točaka) itd.

S obzirom na domet, bežične mreže se mogu klasificirati u četiri osnovne kategorije [2]:

- Bežične osobne mreže (eng. Wireless Personal Area Network - WPAN);
- Bežične lokalne mreže (eng. Wireless Local Area Network - WLAN);
- Bežične gradske mreže (eng. Wireless Metropolitan Area Network - WMAN);
- Bežične mreže širokog područja (eng. Wireless Wide Area Network - WWAN).

Tablica 1. Primjer podjele bežičnih mreža, [1]

Vrsta	Domet	Primjena	Popularni standardi
Bežične osobne mreže (WPAN)	Unutar dohvata korisnika	Zamjena žičnih medija za perifernu opremu	Bluetooth, Zigbee, NFC
Bežične lokalne mreže (WLAN)	Unutar objekta i njegove okolice	Bežično proširenje žične mreže	IEEE 802.11 (Wi-Fi)
Bežične gradske mreže (WMAN)	Unutar grada	Bežična međumrežna povezivost	IEEE 802.16 (WiMAX)
Bežične mreže širokog područja (WWAN)	Širom svijeta	Bežični mrežni pristup	Ćelijske mreže (UMTS, LTE, itd.)

Važno je napomenuti da ova osnovna podjela koja je i prikazana na Tablici 1. nije potpuna niti u potpunosti precizna. Definirana je s ciljem da se istaknu ključne razlike unutar svakog slučaja korištenja (eng. use case). Mnoge tehnologije i standardi počinju sa specifičnim načinom primjene te s prolaskom vremena stječu nove mogućnosti, veći domet ili propusnost zbog čega se može reći da nadilaze početne klasifikacije.

2.1. Bežična osobna mreža

Bežične osobne mreže predstavljaju grupu tehnologija koje se koriste za kratkodometne komunikacije na udaljenosti od nekoliko centimetara do 10 metara i u posebnim slučajevima do 100 metara [3]. Većina ovih tehnologija je dizajnirana s ciljem eliminiranja potrebe za velikim brojem kablova koji međusobno povezuju razne uređaje.

Neke od primjena WPAN-ova su: pametne kuće, industrijski sustavi upravljanja, servisi lociranja u stvarnome vremenu, sigurnosni sustavi, interaktivne igračke, praćenje inventara, pametna osjetila itd.

Većina normi vezanih za WPAN-ove razvijene se od strane Instituta inženjera elektrotehnike i elektronike (eng. Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE), točnije radne grupe 802.15 koja je definirala tri klase WPAN-ova. Definirane klase se razlikuju po brzini prijenosa podataka (eng. data rate), potrošnji baterije te kvaliteti usluge (eng. Quality of Service - QoS), [4]. Te tri klase su:

- WPAN-ovi male brzine prijenosa (eng. low data rate WPANs) koje karakterizira mala brzina prijenosa, mala kompleksnost i cijena te iznimno mala potrošnja baterije. Mreže ovoga tipa definirane su IEEE 802.15.4 standardom;
- WPAN-ovi srednje brzine prijenosa (eng. medium rate WPANs) čija je svrha pružanje alternative kablenskome povezivanju računala, mobitela i sl. sa potrošačkom elektronikom uz QoS koji je dovoljan za glasovne primjene. Primjer ovakve mreže je Bluetooth (IEEE 802.15.1);
- WPAN-ovi velike brzine prijenosa (eng. high rate WPANs) koji su dizajnirani za multimedijske aplikacije koje zahtijevaju vrlo visoku razinu QoS sa brzinama prijenosa većim od 20 Mbps. Definirani su IEEE 802.15.3 standardom.

Neke od najpopularnijih WPAN tehnologija su Bluetooth, ZigBee, IrDA, Z-Wave, Wireless USB, INSTEON i WHDI.

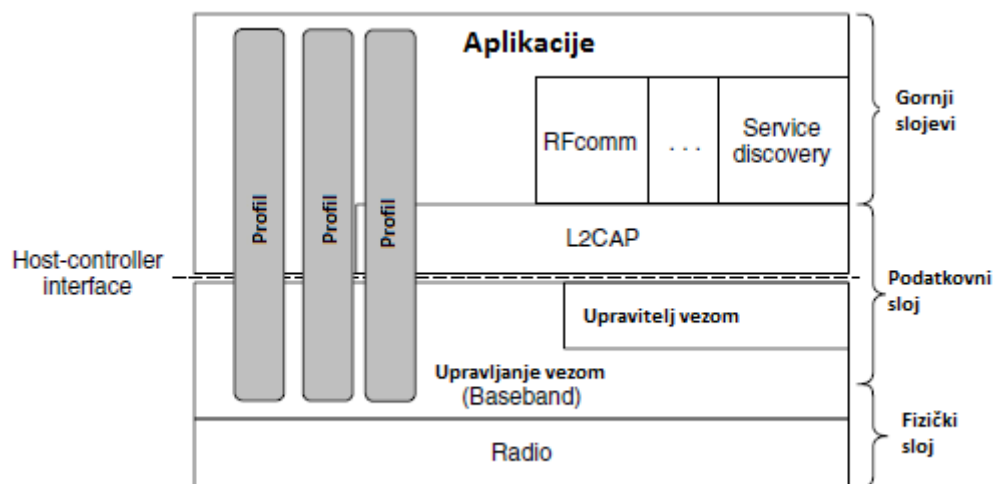
Bluetooth

Bluetooth je jedna od najpoznatijih WPAN tehnologija. Razvijen je 1994. godine u tvrtki Ericsson koja je uz pomoć četiri tvrtke (IBM, Intel, Nokia i Toshiba) formirala konzorcij (eng. Special Interest Group - SIG) u svrhu stvaranja standarda s ciljem pružanja alternative fizičkome povezivanju uređaja. Bluetooth je standardiziran pri IEEE kao 802.15.1.

Osnovna mreža u Bluetooth sustavu je Piconet [5] koji se sastoji od glavnog čvora (eng. master node), maksimalno sedam podređenih čvorova (eng. slave node) i do 255 čvorova na čekanju (eng. stand-by). Više Piconet-a može biti prisutno unutar jednog prostora te ih je moguće međusobno povezati. Međusobno povezani Piconet-i nazivaju se Scatternet. Unutar Piconet-a svi uređaji komuniciraju na jednom kanalu te frekvencijskoj širini koju regulira glavni čvor. Piconet podržava point-to-point te point-to-multipoint konekcije.

Bluetooth definira specifične načine primjene (aplikacije) koje se nazivaju profili te pruža različite složaje protokola za svaki profil. Ti profili služe kao nadgradnja osnovnim Bluetooth protokolima ovisno o vrsti podataka ili načinu komuniciranja između uređaja [5].

Protokoli Bluetooth-a su grupirani u slojeve kao što je prikazano na Slici 1. Na dnu se nalazi radio sloj koji se bavi radio prijenosom i modulacijom. Sloj upravljanja vezom (eng. Link control layer) definira kako glavni čvor kontrolira vremenske odsječke (eng. slots) te kako se odsječci grupiraju u okvire (eng. frame). Protokoli koji koriste Link control protokol su Upravitelj vezom (eng. Link manager) i L2CAP (eng. Logical Link Control Adaption Protocol). Upravitelj vezom upravlja uspostavljanjem logičkih kanala, uparivanjem, enkripcijom i QoS-om te se nalazi ispod *host controller interface* linije koja odvaja protokole implementirane na Bluetooth čipu (ispod) i protokole implementiranje na uređaju (iznad). L2CAP je zaslužan za uokvirivanje poruka varijabilne duljine i pružanje pouzdanosti te ga koriste mnogi protokoli kao npr. RFcomm i *Service discovery*. *Service discovery* protokol se koristi za pronalaženje servisa odnosno usluga drugih uređaja na mreži. RFcomm omogućuje emuliranje standardnog računalnog serijskog porta. Na vrhu se nalaze profili prikazani u vertikalnim kvadratima iz razloga što svaki definira dio protokolnog stoga za određenu svrhu. Npr., neki profili mogu sadržavati L2CAP ako imaju pakete za slanje ili ga preskočiti ako sadrže samo konstantan tok uzoraka audio signala (eng. audio samples). Putem protokola, Bluetooth omogućuje pronalaženje i međusobno povezivanje uređajima procesom koji se naziva uparivanje (eng. pairing).



Slika 1. Arhitektura Bluetooth protokola, [5]

Bluetooth uređaji rade u nelicenciranom 2,4 GHz spektru. te koriste 79 1 MHz frekvencijskih područja (2,402-2,480 GHz). Kako bi se minimaliziralo preslušavanje i interferencija, Bluetooth uređaji koriste tehniku koja se naziva frekvencijsko skakanje (eng. frequency hopping). Predajnik i prijemnik razmjenjuju paket na jednoj frekvenciji te zatim skaču na drugu te razmjene još jedan paket, postupak se ponavlja sve do završetka prijenosa. Postupak skakanja se ponavlja i do 1.600 puta po sekundi. Režimom frekvencijskog skakanja upravlja glavni čvor.

Bluetooth uređaji dijele se u tri klase ovisno o dometu. Te klase su: Klasa 1 (100 m), Klasa 2 (50 m) i Klasa 3 (10 m). Ovisno o verziji, brzine prijenosa variraju od 1 Mbps za Bluetooth v1.2 do 24 Mbps za v4.0.

Bluetooth pruža sigurnost putem autentifikacije i enkripcije. Autentifikacija je zasnovana na identifikaciji uređaja a ne korisnika korištenjem izazov-odgovor (eng. challenge-response) strategije kako bi se odredilo poznaje li novi uređaj tajni ključ koji mu omogućuje spajanje na Piconet. S obzirom na sporost procesora enkripcija se rijetko koristi, osim u posebnim slučajevima. Bluetooth standard definira tri enkripcijska moda: Mod 1 (ništa nije enkriptirano), Mod 2 (promet od glavnog čvora prema jednom podređenom čvoru je enkriptiran) i Mod 3 (sav promet je enkriptiran).

Bluetooth omogućuje podršku za tri osnovna načina primjene:

- Podatkovne i glasovne pristupne točke;
- Zamjena za fizički medij;
- Ad hoc umrežavanje.

2.2. Bežična lokalna mreža

Bežične lokalne mreže su fleksibilni komunikacijski sustavi koji koriste elektromagnetske valove za prijenos podataka na području prostora jedne zgrade i njene okolice. Često se koriste kao alternativa ili dodatak žičnim LAN-ovima te za povezivanje susjednih LAN-ova [6]. Unatoč postojanju tehnologije, WLAN-ovi su dugi niz godina bili izbjegavani. Razlog tome su bile visoke cijene instalacije, problemi sa sigurnošću, male prijenosne brzine te nužnost posjedovanja dozvole za rad u frekvencijskom području. Takva situacija je vladala sve do sredine devedesetih godina prošlog stoljeća.

Današnji WLAN-ovi posjeduju svojstva koja su prikladna za korištenje velikome broju korisnika. Mogućnosti mobilnosti omogućuju korisnicima mijenjanje fizičkoga položaja uz istovremenu mogućnost komuniciranja. Uz to, WLAN-ove je moguće primijeniti na onim mjestima gdje je realizacija ožičenja teško izvediva ili skupa što smanjuje vrijeme i troškove instalacije te ih čini ekonomičnijim rješenjem umrežavanja. WLAN-ovi također rade u nelicenciranim dijelovima spektra, 2,4 GHz i 5 GHz području.

Glede prijenosne tehnologije na fizičkom sloju bežičnih mreža, postoje dvije vrste WLAN-ova. To su: infracrveni (eng. Infrared - IR) WLAN-ovi i WLAN-ovi s radioprijenosom koje možemo dalje podijeliti na one koji koriste tehniku proširenog spektra (eng. Spread Spectrum - SS) i na uskopojasne mikrovalne WLAN-ove, [7].

WLAN-ovi se mogu podijeliti u dvije osnovne kategorije: infrastrukturni WLAN-ovi i neovisni (ad hoc) WLAN-ovi [7]. Neovisni WLAN-ovi (Slika 2. b) omogućuju povezivanje uređaja po načelu ravnopravnosti pri čemu se komunikacija vrši izravno između uređaja. Pogodni su za brzu i jednostavnu implementaciju umrežavanja no velika im je slabost ograničeno područje pokrivenosti elektromagnetskim zračenjem. Infrastrukturni WLAN-ovi (Slika 2. a) primjenom pristupne točke (eng. Access Point - AP) mogu povećati domet između bilo koja dva uređaja te omogućiti integraciju pokretnih uređaja u ožičeni LAN. U infrastrukturnom WLAN-u moguće je primijeniti centralizirani ili decentralizirani višestruki pristup [7]. U centraliziranome pristupu, komunikacija između uređaja u području pokrivanja jedne pristupne točke ide preko te pristupne točke za razliku od decentraliziranog pristupa gdje se vrši direktna komunikacija između uređaja.



Slika 2. Kategorije WLAN-ova: a) Infrastrukturni WLAN i b) neovisni WLAN

Izvor: <http://media.bestofmicro.com/Local-area-network-LAN-installation,Y-6-308382-13.jpg>

[Preuzeto: svibanj 2016.]

U WLAN-ovima se pojavljuju specifične smetnje što ih čini složenima za realizaciju. Te smetnje su: gubitak snage elektromagnetskog zračenja uslijed prostiranja (eng. path loss), višestazno prostiranje (eng. multipath propagation), iščezavanje signala uslijed zasjenjivanja (eng. shadow fading), kašnjenje signala uslijed prostiranja prijenosnim medijem i smetnje od drugih uređaja koji koriste 2,4 GHz područje.

Najpoznatiji WLAN standard i tehnologija je IEEE 802.11 skup standarda koji je poznat i pod komercijalnim nazivom Wi-Fi o kojem će biti više rečeno u sljedećem poglavlju. Uz IEEE 802.11 najpoznatije WLAN tehnologije su HiperLAN i HomeRF.

2.2.1. HiperLAN

HiperLan (eng. High-Performance Radio LAN) je europska alternativa IEEE 802.11 standardu prvi put objavljena kao standard 1995. godine od strane Europskog instituta za telekomunikacijske norme (eng. European Telecommunication Standards Institute - ETSI), [9]. Cilj HiperLAN-a je omogućiti brzi pristup raznim mrežama poput mobilnih mreža treće generacije, mrežama s asinkronim načinom prijenosa (eng. Asynchronous Transfer Mode - ATM), mrežama zasnovanim na IP protokolu te privatnim mrežama u WLAN sustavima uz naglasak na QoS.

HiperLAN je dizajniran za rad bez dodatne infrastrukture što znači da dva uređaja mogu razmjenjivati podatke bez posredovanja žične ili bežične mrežne opreme. Također moguće je koristiti treći uređaj za indirektnu komunikaciju između dva uređaja.

HiperLAN standard definira samo zajedničko zračno sučelje (eng. air interface) što uključuje fizički sloj za bežičnu komunikacijsku opremu. Također definira podslojeve

kontrola pristupa mediju (eng. Medium Access Control - MAC) i kontrola pristupa kanalu (eng. Channel Access Control - CAC) unutar sloja podatkovne veze OSI (eng. Open System Interconnection) referentnog modela.

Postoje dvije inačice HiperLAN-a:

- HiperLAN/1: omogućuje brzine prijenosa do 23 Mbps;
- HiperLAN/2: nadogradnja prijašnjeg standarda za brzinama prijenosa do 54 Mbps.

Obje inačice rade u 5 GHz frekvencijskom području.

2.2.2. HomeRF

HomeRF (eng. Home Radio Frequency) je bežična mrežna specifikacija i standard razvijen 1998. godine od strane Home Radio Frequency Working Group. To je konzorcij koji uključuje više od 100 tvrtki [8].

HomeRF omogućuje računalima, perifernoj opremi, bežičnim telefonima i ostaloj potrošačkoj elektronici bežično povezivanje i razmjenu podataka te glasovnog prometa unutar i u okolini kućanstva. HomeRF je zasnovan na SWAP-u (eng Shared Wireless Access Protocol) koji koristi klijent-poslužitelj model između kontrolne točke i glasovnih uređaja te peer-to-peer model između kontrolne točke i podatkovnih uređaja. SWAP je hibrid između IEEE 802.11 i DECT (eng. Digital Enhanced Cordless Telecommunication) standarda.

HomeRF radi u 2,4 GHz frekvencijskom području te koristi frekvencijsko skakanje sa 50 skokova po sekundi. Podržava do 127 uređaja u mreži sa maksimalnom dometom do 45 m. Brzine prijenosa su do 1,6 Mbps za HomeRF 1.0 i do 10 Mbps za HomeRF 2.0. Grupa zadužena za HomeRF prestala je sa radom 2003. godine.

2.3. Bežična gradska mreža

Bežične gradske mreže predstavljaju grupu tehnologija koje omogućuju bežično umrežavanje na većim geografskim prostorima kao što su npr. gradovi [3]. Primjena WMAN tehnologija ima dva osnovna cilja:

- Povećati domet postojećim žičnim mrežama iznad ograničenja jedne lokacije i to bez troškova gradnje i održavanja žičnih ili optičkih konekcija velikih brzina;
- Povećati mobilnost korisnika unutar gradskih područja.

Jedno od važnijih svojstava WMAN-ova je činjenica da omogućuju veze velikih brzina, uključujući pristup internetu, područjima bez ikakvog drugog načina povezivanja. Takav način povezivanja može pokrivati pojedina područja unutar nekoga gradskog područja, povezati udaljena gradska područja kao i udaljene ili izolirane lokacije koje nisu pokrivene od strane fiksnih komunikacijskih linija. Zbog toga, WMAN-ovi predstavljaju jedno od boljih rješenja za rješavanje problema zadnje milje (eng. last mile problem). Korištenje bežičnih tehnologija u rješavanju problema zadnje milje naziva se i fiksni wireless (eng. fixed wireless).

Tehnologije za WMAN-ove i rješenja za problem zadnje milje uključuju Free Space Optics (FSO), Local Multipoint Distribution Service (LMDS), Multichannel Multipoint Distribution Service (MMDS), HiperMAN te IEEE 802.16 WiMAX. Prednost ovih tehnologija je mali novčani trošak, relativno velika brzina instalacije, velika fleksibilnost te velika pouzdanost.

2.3.1. Free Space Optics

FSO je point-to-point, line-of sight širokopojasna tehnologija koja koristi svjetlosne signale u infracrvenom spektru i njihovo širenje u slobodnom prostoru za bežično slanje podataka [3]. FSO je jedna od alternativa za svjetlovođe. Brzine slanja su usporedive sa svjetlovodnim prijenosima, do 1,25 Gbps na udaljenosti od 6,4 km u full-duplex načinu rada. Moguće je i postići puno veće brzine i do 10 GBps ali na znatno manjim udaljenostima.

Za slanje i prijam signala koriste se laseri i diode koji razmjenjuju infracrvene zrake niske snage, neštetne ljudskom oku. S obzirom na činjenicu da FSO sustavi zahtijevaju optičku vidljivost (eng. line-of-sight - LOS), primopredajnici se postavljaju na višim katovima ili krovovima zgrada kako bi se osigurala optička vidljivost te je moguće i postavljanje i unutar zgrada iza prozora.

Prednosti FSO-a su niska cijena u usporedbi sa svjetlovodima, brzina postavljanja (nekoliko dana), velika brzina prijenosa, rad u nelicenciranom dijelu spektra te visoka sigurnost s obzirom da infracrveni signal nije lako presresti i dekodirati. Najveći nedostatak FSO-a su niske performanse pri djelovanju nepovoljnih vremenskih uvjeta poput atmosferskih turbulencija, padalina ili magle koja najviše utječe na optički prijenos. Najčešće primjene FSO-a su korištenje u lokalnoj petlji, povezivanje LAN-ova, backup svjetlovodnim sustavima te agregacija prometa (eng. backhaul) ćelijskim mrežama.

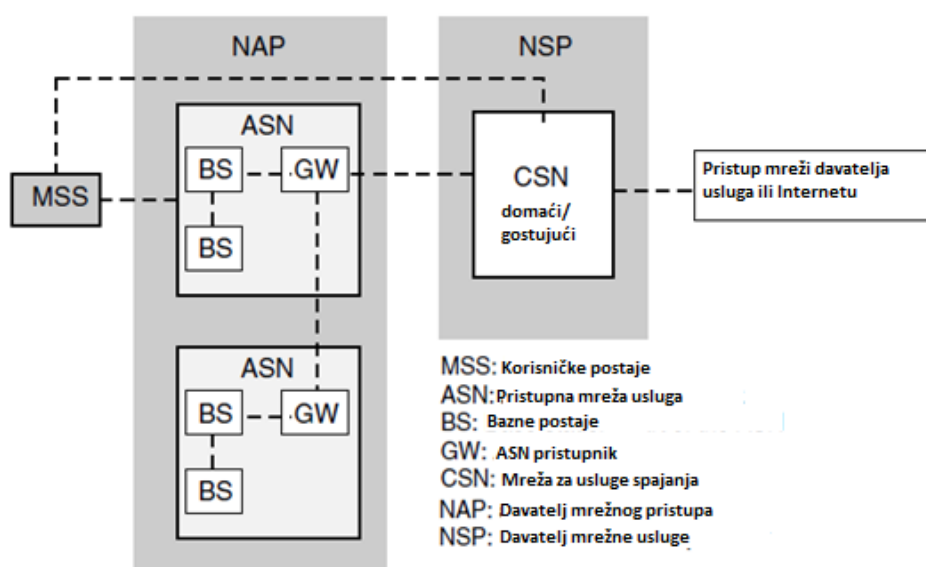
2.3.2. IEEE 802.16 WiMAX

IEEE 802.16 je grupa standarda, širokopojasna i bežična MAN tehnologija koja može raditi u LOS načinu rada i načinu rada bez prisustva izravne optičke vidljivosti (eng. Non-Line-Of-Sight - NLOS) ovisno o frekvenciji. Omogućuje raznolike komunikacijske usluge [3]. Iako je službeno ime za 802.16 WirelessMAN, češće se koristi komercijalno ime WiMAX (eng. Worldwide Interoperability for Microwave Access). IEEE je uveo 802.16 2000. godine s ciljem standardiziranja fiksnih širokopojasnih bežičnih konekcija u svrhu pružanja alternative svjetlovodnim mrežama, kabelskim mrežama, i digitalnim pretplatničkim linijama.

Osnovna arhitektura WiMAX-a prikazana na Slici 3. sastoji se od tri podsustava [10]:

- Korisničke postaje (eng. Subscriber Stations - SS);
- Pristupna mreža usluga (eng. Access Service Network - ASN);
- Mreža za usluge spajanja (eng. Connectivity Service Network - CSN).

Korisničke postaje mogu biti korisnički uređaji ili uređaji koji se nalaze na lokaciji korisnika za povezivanje korisničkih LAN mreža putem baznih postaja (eng. Base Station - BS) na pristupnu mrežu. ASN moduli međusobno povezuju bazne postaje te pružaju pristup (eng. gateway) prema CSN podsustavu. CSN podsustav sadržava registar domaćih i gostujućih korisnika te upravlja mobilnošću i korisničkim profilima. Također, CSN povezuje pristupnu mrežu s jezgrenom mrežom davatelja usluga.



Slika 3. Osnovna arhitektura WiMAX-a, [10]

Razlikuju se dva osnovna tipa WiMAX-a: fiksni WiMAX i mobilni WiMAX. Fiksni WiMAX je point-to-multipoint tehnologija za razliku od mobilnog koji je multipoint-to-multipoint tehnologija koja koristi ortogonalni frekvencijski raspodijeljeni višestruki pristup (eng. Orthogonal Frequency Division Multiple Access - OFDMA).

Slično kao i ostali IEEE 802 standardi, 802.16 definira fizički i MAC sloj, [3]. MAC sloj sastoji se od tri podsloja. Najniži podsloj omogućuje privatnost i sigurnost. Srednji podsloj je zadužen za funkcioniranje kontrole pristupa, alokacije frekvencijskih opsega, uspostavljanje veze, QoS i raspoređivanje podataka kroz fizički sloj. Najviši podsloj MAC-a omogućuje transformiranje dolazećih podataka u MAC pakete podataka. Fizički sloj upravlja prijenosom podataka koristeći jednu od tri moguće modulacije: Kvadraturnu faznu modulaciju (eng. Quadrature Phase-Shift Keying - QPSK), Kvadraturnu amplitudnu modulaciju 16-QAM ili Kvadraturnu amplitudnu modulaciju 64-QAM (eng. Quadrature Amplitude Modulation). Fizički sloj podržava polu dupleks, dupleks sa frekvencijskom podjelom (eng. Frequency Division Duplex - FDD) i dupleks s vremenskom podjelom (eng. Time Division Duplex - TDD). U 10-66 GHz licenciranom frekvencijskom području WiMAX podržava samo jedan mod prijenosa WirelessMAN-SC (eng. Single Carrier) koji se koristi za fiksne point-to-point konekcije. Ostali modovi dizajnirani su za rad u 2-11 GHz licenciranom i nelicenciranom frekvencijskom području. Kako bi omogućio i non-line-of-sight primjene, WiMAX podržava tri dodatna moda prijenosa: WirelessMAN-OFDM, WirelessMAN-OFDMA i WirelessHUMAN. WirelessMAN-OFDM koristi Frekvencijski multipleks ortogonalnih podnosilaca (eng. Orthogonal Frequency Division Multiplex) za podjelu frekvencijskog pojasa na podnosiocima te se koristi za fiksne, mobilne i isprepletene (eng. mesh) aplikacije. WirelessMAN-OFDMA koristi ortogonalni frekvencijski raspodijeljeni višestruki pristup za podjelu frekvencijskog kanala u 1.536 ortogonalnih podnosioca koji se zatim grupiraju u potkanale od kojih je po jedan dodijeljen svakom SS-u. To omogućuje BS-u komuniciranje sa više SS-ova u jednom prijenosu. WirelessHUMAN također koristi OFDM te je specifično dizajniran za rad u nelicenciranom 5 GHz frekvencijskom području.

Veličina područja pokrivenosti uvelike ovisi o korištenom frekvencijskom području. Domet u LOS načinu rada koristeći 10-66 GHz frekvencijsko područje iznosi do 50 km te 6-10 km u NLOS načinu rada koristeći 2-11 GHz frekvencijsko područje. Brzine prijenosa variraju ovisno o udaljenosti, širini prijenosnog kanala, modulaciji i načinu kôdiranja te iznose od 1 do 75 Mbps po baznoj stanici.

2.4. Bežične mreže širokog područja

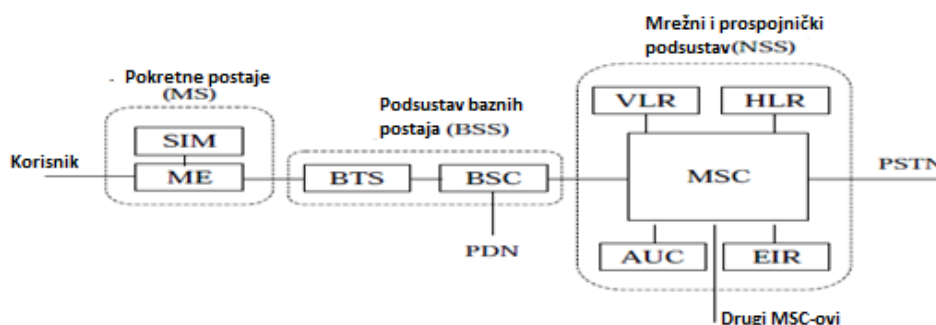
Bežične mreže širokog područja su mreže koje obuhvaćaju velika geografska područja poput npr. država ili čak i kontinenta [3]. WWAN tehnologije možemo podijeliti u dvije kategorije:

- Čelijski komunikacijski sustavi;
- Satelitski komunikacijski sustavi.

2.4.1. Čelijski komunikacijski sustavi

Čelijski komunikacijski sustavi (čelijske ili mobilne mreže) su izvorno dizajnirani u svrhu pružanja glasovnih komunikacija mobilnim korisnicima. Današnje čelijske mreže, uz glasovne komunikacije, pružaju i stalno povećavajući broj podatkovnih usluga te pristup internetu.

Osnovna arhitektura čelijskih mreža prikazana na Slici 4. sastoji se od nekoliko podsustava: pokretne postaje (eng. Mobile Stations - MS), podsustav baznih postaja (eng. Base Station Subsystem - BSS) i mrežni i prospojnički podsustav (eng. Network and Switching Subsystem - NSS) [10].



Slika 4. Osnovna arhitektura čelijskih mreža, [10]

MS-ovi služe kao sučelje za razmjenu informacija sa korisnikom te modificiranje informacija kako bi se mogle razmjenjivati sa BSS-om. Sastoje se od dva elementa: mobilne opreme (eng. mobile equipment - ME) odnosno terminalnog uređaja te modula za identifikaciju pretplatnika (eng. Subscriber Identity Module - SIM) u obliku kartice.

BSS vrši komunikaciju sa MS-om putem elektromagnetskih valova te komunikaciju sa žičnom infrastrukturom putem protokola. Sastoji se od baznih postaja (eng. Base

Transceiver Systems - BTS) te upravljačkih modula baznih postaja (eng. Base Station Controller - BSC).

NSS je odgovoran za mrežne operacije. Omogućuje komunikaciju s ostalim žičnim i bežičnim mrežama te podršku za registraciju i održavanje veza sa MS-ovima. NSS je najsloženiji element ćelijske mreže. Sastoji se od mobilne centrale (eng. Mobile Switching Centre - MSC), registra domaćih korisnika (eng. Home Location Register - HLR), registra gostujućih korisnika (eng. Visitor Location Register - VLR), autentifikacijskog centra (eng. Authentication center - AuC) i registra korisničke opreme (eng. Equipment Identity Register - EIR).

Telekomunikacijska industrija dijeli ćelijske tehnologije u 4 generacije označene kao 1G, 2G, 3G i 4G te međugeneracije označene kao 2.5G i 3.5G [12]. Prva generacija započinje sa radom krajem 1970-ih te je bila aktualna do kraja 1980-ih. Sustavi prve generacije koriste frekvencijski modulirane analogne signale za prijenos glasovnih komunikacija. Sustavi druge generacije započinju sa radom početkom 1990-ih te su aktivni i danas. 2G mreže koriste digitalni prijenos signala te omogućuju prijenos podataka sa brzinama između 9,6-14,4 kbps. Zajednička osobina mreža prve i druge generacije je to što koriste komutaciju kanala. 2.5G sustavi omogućuju veće brzine prijenosa podataka do 384 kbps (u teoriji) te vrše prijenos podataka putem komutacije paketa. Mreže treće generacije pojavljuju se početkom 21. stoljeća te omogućuju mrežnim operaterima pružanje većeg broja naprednih usluga poput audio i video strujanja (eng. streaming) veće kvalitete, video konferenciranje, brzi internet, IPTV itd. uz pružanje većeg mrežnog kapaciteta te brzina do 3,09 Mbps. U mrežama treće generacije je naglasak je na stvaranju globalnog rješenja i pružanje globalnog pristupa. Nadogradnja treće generacije mreža naziva se 3.5G. Sadrži tehnologije koje omogućuju još veće brzine prijenosa do 42 Mbps te strukturu koja je u potpunosti zasnovana na komutaciji paketa. Četvrta generacija započinje s radom 2008. godine te se zasniva na IP protokolu. Glavni fokus mreža četvrte generacije je pružanje multimedijских usluga visoke kvalitete sa vrlo velikim brzinama prijenosa do 1 Gbps.

2.4.2. Satelitski komunikacijski sustavi

Satelitski komunikacijski sustavi omogućuju povezivanje udaljenih mreža i sustava reflektiranjem signala sa Zemljine površine u point-to-point, point-to-multipoint ili multipoint-to-multipoint načinu rada [3]. Satelitski komunikacijski sustavi imaju velik broj

primjena u telekomunikacijama: TV distribucija, navigacija, pristup internetu, satelitska telefonija itd.

Satelitski prijenos signala se vrši u jednome od četiri frekvencijska pojasa:

- L pojas (1,53-2,7 GHz);
- C pojas (3,6-7 GHz);
- Ku pojas (11,7-12,7 GHz downlink i 14-17,8 GHz uplink);
- Ka pojas (17,3-31 GHz).

Sateliti omogućuju dvije kategorije servisa: potrošačku te poslovnu kategoriju. Kod servisa potrošačke kategorije, dostupna širina frekvencijskog pojasa se dijeli na sve korisnike. Servisi poslovne kategorije pružaju korisnicima dedicerane kanale sa dediceranom širinom frekvencijskog pojasa te velike brzine prijenosa.

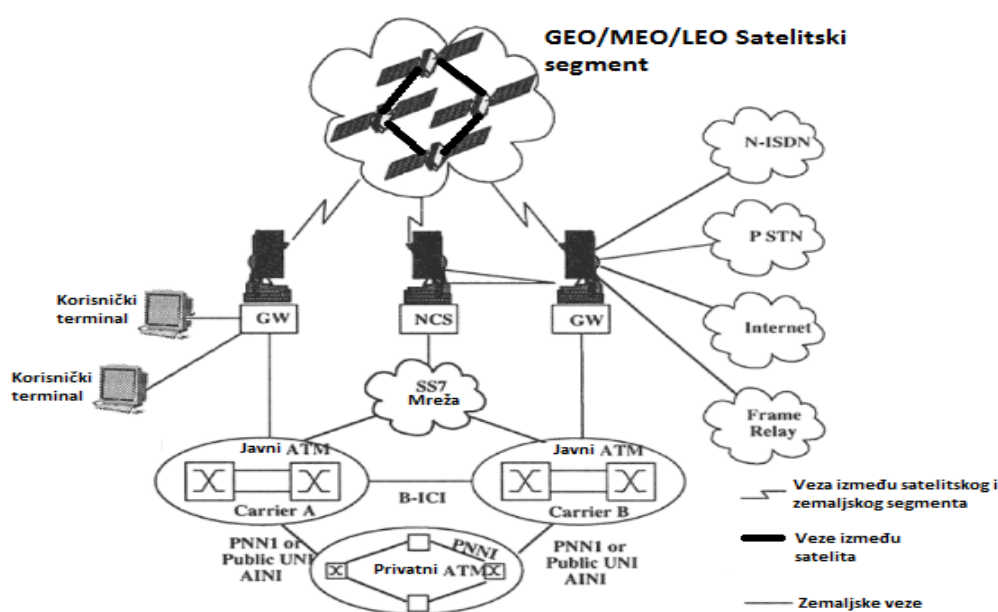
Nadalje, satelitski sustavi se mogu klasificirati ovisno o orbiti koju koriste: niska orbita oko Zemlje (eng. Low Earth Orbit - LEO), srednje visoka orbita oko Zemlje (eng. Medium Earth Orbit - MEO) i geostacionarna orbita oko Zemlje (eng. Geostationary Earth Orbit - GEO).

LEO sateliti kruže na visinama do 2.000 km. S obzirom na niske orbite, LEO sateliti imaju malo područje pokrivanja te je potreban velik broj satelita za pokrivanje cijele Zemljine površine. Dijele se na male i velike LEO satelite. Mali LEO sateliti pružaju usluge satelitske telefonije, usluge lociranja te usluge dojavljivanja (eng. pager services). Veliki LEO sateliti omogućuju širokopojasne usluge prijenosa govora i podataka. LEO sateliti imaju nisku latenciju do 40 ms.

MEO sateliti kruže na visinama od 2.000 do 35.786 km. S obzirom na veću visinu nego LEO sateliti, pokrivaju veće površine te je potreban znatno manji broj satelita za pokrivanje cijele zemljine površine. Latencija MEO satelita iznosi 50-150 ms.

GEO sateliti kruže na fiksnoj visini od 35.786 km. Brzina kretanja GEO satelita odgovara brzini rotacije Zemlje čineći ih fiksiranim nad danim područjem. S obzirom na veliku udaljenost od Zemlje, GEO sateliti mogu pružati usluge velikom području te je potreban vrlo mali broj satelita za pokrivanje čitavog planeta. Često se koriste za globalne komunikacije poput televizijskog odašiljanja a rjeđe za usluge koje zahtijevaju razmjenu informacija u stvarnome vremenu iz razloga što posjeduju vrlo visoku latenciju do 250 ms.

Arhitektura satelitskih komunikacijskih mreža prikazana na Slici 5. sastoji se od svemirskog dijela, zemaljskog segmenta te postaje za upravljanje mrežom (eng Network Control Station - NCS) [13]. Zemaljski segment se sastoji od korisničkih terminala i mrežnog pristupnika (eng. gateway - GW) koji je zaslužan za povezivanje sa svemirskim segmentom te može biti povezan i sa ostalim javnim ili privatnim mrežama. Upravljački segment vrši upravljanje te raspodjelu resursa za satelite. Svemirski segment sastoji se od satelita te veza između satelita kako bi se omogućila globalna povezivost putem skupine satelita ili individualnog satelita.

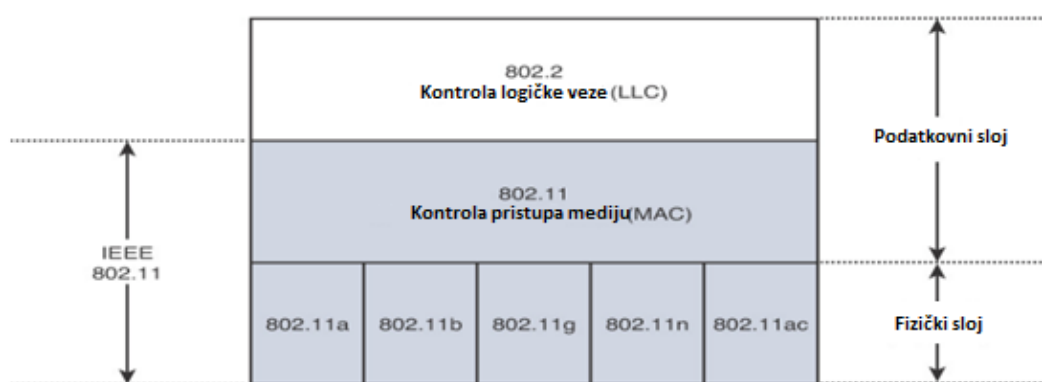


Slika 5. Arhitektura satelitskih sustava, [13]

Iako satelitski sustavi pružaju veliku fleksibilnost i mobilnost te pokrivaju velika područja, veliki nedostatak satelitskih sustava je cijena izrade i slanja sustava u orbitu te cijena korisničke opreme. Zatim, ukoliko se dogodi kvar, gotovo je nemoguće izvršiti popravke na sustavu. U usporedbi sa zemaljskim sustavima, latencija satelitskih sustava je znatno veća.

3. Karakteristike WLAN komunikacijskih mreža

IEEE 802.11, komercijalnog naziva Wi-Fi (eng. Wireless Fidelity) je dio IEEE 802 skupine standarda i predstavlja standard namijenjen pružanju bežične veze fiksnim, mobilnim i mobilnim stanicama u pokretu unutar lokalnih mreža. Kao i ostali standardi iz skupine 802, 802.11 (Slika 6.) definiran je na fizičkom sloju te na sloju podatkovne veze (MAC podsloju) OSI referentnog modela [18]. Koncepti opisani u ovome poglavlju uvelike se zasnivaju na 802.11n i 802.11ac generacijama standarda



Slika 6. 802.11 pruža funkcije vezane za sloj podatkovne veze i fizički sloj, [18]

Glavne značajke 802.11 standarda su:

- Podrška za asinkrone i vremenski ograničene dostavljačke usluge;
- Pružanje neprekidnosti usluge udaljenim područjima putem distribucijskih sustava;
- Podrška za više prijenosa signala velikih brzina;
- Prioritizacija dostave na temelju različitih zahtjeva za kvalitetom usluge;
- Multicast usluge;
- Usluge mrežnog upravljanja;
- Usluge autentifikacije i enkripcije;
- Kompatibilnost za prijašnjim verzijama standarda;
- Operabilnost u otvorenim i zatvorenim prostorima;
- Odašiljanje u 2,4 i 5 GHz frekvencijskom pojasevima.

3.1. IEEE 802.11 protokolni složaj

3.1.1. IEEE 802.11 MAC podsloj

802.11 standard specificira zajednički MAC podsloj čija je zadaća pružanje raznih funkcija koje omogućuju djelovanje 802.11-zasnivanih WLAN-ova. Općenito, MAC podsloj zadužen je za upravljanje i održavanje komunikacije između 802.11 uređaja na način da koordinira pristup zajedničkom radio kanalu te koristi protokole koji poboljšavaju komunikaciju putem bežičnoga medija [18].

Glavne funkcije MAC podsloja su:

- Dostava podataka;
- Povezivanje;
- Timing i sinkronizacija;
- Upravljanje napajanjem.

3.1.1.1 Dostava podataka

Dostava podataka između uređaja je primarna funkcija MAC podsloja. Dostava podataka uključuje pristup mediju, izmjenu podatkovnih okvira, oporavak od greški, agregaciju okvira, fragmentaciju, QoS, enkripciju i multicasting.

Pristup mediju

802.11 posjeduje stroga pravila za uređaje koje pokušavaju pristupiti bežičnome mediju iz razloga što je bežični medij zajednički resurs. Postoje tri načina pristupa mediju:

- Distribuirana koordinacijska funkcija (eng. Distributed Coordination Function - DCF);
- Centralizirana koordinacijska funkcija (eng. Point Coordination Function - PCF);
- Hibridna koordinacijska funkcija (eng. Hybrid Coordination Function - HCF).

DCF način pristupa koristi metodu višestrukog pristupa osluškivanjem medija sa izbjegavanjem sudara (eng. Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance - CSMA/CA). To je asinkroni način pristupa mediju. CSMA/CA zahtjeva od uređaja da sami odluče kada će pristupiti mediju na temelju prisutnosti ili nedostatka prometa na radio kanalu. DCF koristi kombinaciju fizičkih i virtualnih mehanizama kako bi odredio zauzetost medija. Ukoliko ti mehanizmi pokazuju da medij nije zauzet, uređaj može slati podatke.

PCF je pristupna metoda koja se zasniva na prozivanju (eng. polling) kako bi se utvrdilo može li određeni uređaj slati podatke. PCF omogućuje sinkroni pristup mediju.

HCF pristupna metoda predstavlja nadogradnju osnovnih DCF i PCF metoda u svrhu poboljšavanja QoS. Omogućuje upotrebu višestrukih razina prioritizacije i dostavu vremenski osjetljivih podataka

3.1.1.2 Povezivanje

Prije slanja podataka, klijentski uređaj mora se povezati na 802.11 mrežu. Taj proces uključuje pretraživanje mreža, autentifikaciju s mrežom, asocijaciju s pristupnom točkom i uvjetno implementaciju četverosmjernog rukovanja (ukoliko se koriste naprednije sigurnosne metode).

Pretraživanje mreža može biti aktivno ili pasivno. U pasivnom pretraživanju klijentski uređaj osluškuje sve kanale u potrazi za tzv. *beacon* okvirima koje oglašavaju pristupne točke. U aktivnom pretraživanju klijentski uređaj šalje tzv. *probe* okvire na koje ostali uređaji odgovaraju oglašavajući svoju prisutnost.

Autentifikacija s mrežom se može izvršiti na nekoliko načina: jednostavnom razmjenom autentifikacijskih okvira, korištenjem kriptografskog ključa, ili pomoću autentifikacijskih poslužitelja.

Nakon uspješne autentifikacije, potrebno je asociirati klijentski uređaj s pristupnom točkom. Svrha asocijacije je sinkronizacija klijentskog uređaja i pristupne točke kako bi mogli razmjenjivati informacije o vezi.

Četverosmjerno rukovanje koristi se uvjetno kada se koriste napredne sigurnosne metode. Svrha četverosmjernog rukovanja je određivanje zajedničkog ključa za enkripciju podataka.

3.1.1.3 Timing i sinkronizacija

802.11 definira nekoliko intervala razmaka (eng. Interframe Space Intervals - IFS) koji određuju kada uređaj smije slati određeni tip okvira. Tip korištenog IFS ovisi o korištenome okviru, odnosno određeni tipovi okvira imaju prioritet u odnosu na ostale.

Kao dodatnu mogućnost 802.11 podržava i *Request-To-Send/Clear-To-Send* (RTS/CTS) funkciju kako bi se poboljšala kontrola pristupa mediju. Ukoliko se koristi RTS/CTS, uređaj neće slati 802.11 podatkovne okvire prije nego što se izvrši rukovanje sa

pristupnom točkom, odnosno prije nego što pošalje RTS okvir pristupnoj točki te primi CTS okvir od pristupne točke. Ostali uređaji u blizini također primaju CTS okvir koji sadržava i vrijeme trajanja slanja (namijenjeno za izvorni uređaj) kako bi znali da u tome vremenu ne smiju pristupiti mediju.

3.1.1.4 Upravljanje napajanjem

Unutar 802.11 standarda definirano je opcija koja se naziva mod uštede energije (eng. Power Save Mode - PSM). S obzirom da mnogi današnji uređaji koji koriste 802.11 standard posjeduju ograničene baterije, PSM je važna opcija jer omogućuje uređajima izmjenu između aktivnog stanja i stanja mirovanja kako bi se uštedjela energija.

PSM funkcionira na način da klijentski uređaj javlja pristupnoj točki da ulazi u stanje mirovanja. Dok je klijentski uređaj u stanju mirovanja, pristupna točka sabire sve okvire namijenjene za klijentski uređaj te ih šalje klijentskome uređaju kada se vrati u aktivno stanje.

3.1.2. IEEE 802.11 fizički sloj

Arhitektura 802.11 fizičkoga sloja sastoji se dva podsloja [18]:

- *Physical Layer Convergence (PLCP);*
- *Physical Medium Dependent (PMD).*

PLCP je zadužen za enkapsulaciju MAC protokolnih podatkovnih jedinica sa MAC podsloja u okvire koji se zatim šalju putem PMD podsloja. PMD podsloj je zadužen za implementaciju sheme moduliranja, prijenos signala i prijam okvira.

Fizički sloj 802.11 obavlja tri važne funkcije [18]:

- Osluškiivanje medija (eng. Carrier Sense - CA);
- Funkcija prijenosa signala;
- Funkcija prijema.

802.11 definira nekoliko fizičkih slojeva [18]:

- Prošireni spektar skakanja frekvencija (eng. Frequency Hopping Spread Spectrum - FHSS);
- Prošireni spektar izravnim širenjem spektra (eng. Direct Sequence Spread Spectrum - DSSS);

- Frekvencijski multipleks s ortogonalnim podnosiocima (eng. Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM);
- Infracrveni fizički sloj (eng. Infrared physical - IR);
- Prošireni spektar izravnim širenjem spektra visokog stupnja (eng. High Rate Direct Sequence Spread Spectrum - HR-DSSS);
- Fizički sloj proširenog stupnja (eng. Extended Rate PHY - ERP) koji uključuje DSSS i OFDM zasebno i kombinirano;
- Fizički sloj visoke propusnosti (eng. High-Throughput PHY - HT);
- Fizički sloj vrlo visoke propusnosti 6-GHz (eng. Very High-Throughput 6-GHz PHY - VHT).

FHSS je imao neznatnu implementaciju u prvoj generaciji standarda a IR nije nikada implementiran. HR-DSSS predstavlja nadogradnju DSSS fizičkog sloja. HT i VHT su nadogradnje OFDM zasnovanog fizičkog sloja

3.1.2.1 Prošireni spektar skakanja frekvencija

FHSS funkcionira na način da modulira podatkovni signal sa signalom nosiocem koji skače sa frekvencije na frekvenciju kao funkcija vremena preko širokog pojasa frekvencija [20]. U 802.11 FHSS, signal nosilac skače u 2,4 GHz frekvencijskom pojasu između 2,4 i 2,483 GHz te se zadržava na određenoj frekvenciji dovoljno dugo za slanje podataka. Vrijeme zadržavanja na određenoj frekvenciji je konfigurabilan parametar.

3.1.2.2 Prošireni spektar izravnim širenjem spektra

U DSSS prijenosima signala modulirani signal se efektivno množi s pseudonasumičnim kôdom širenja (eng. spreading code, također poznat i kao chipping code) koji prijemnik mora demodulirati korištenjem istog kôda širenje kako bi mogao pratiti signal [21]. Korištenje kôda širenja poboljšava snagu ciljanoga signala te oslabljuje snagu onih signala koji ne koriste ispravan kôd širenja. To čini prijemnika otpornim na uskopojasne te širokopojasne smetnje.

3.1.2.3 Ortogonalna tehnika modulacije u frekvencijskoj domeni

U današnje vrijeme, većina implementiranih 802.11 standarda zasniva se na OFDM tehnologiji prijenosa signala. Osnovni dizajn OFDM prijenosa signala koristi veći broj uskopojasnih ortogonalnih podnosilaca koji neovisno i paralelno obavljaju prijenos podataka

umjesto jednog, širokopojasnog nosioca [21]. Mehanizam modulacije višestrukih ortogonalnih podnosioca postiže se pomoću inverzne diskretne Fourierove transformacije. Korištenjem OFDM sustava uvelike se smanjuje među-simbolna interferencija (eng. Inter-Symbol Interference - ISI).

3.1.2.4 Višestruki ulaz višestruki izlaz

Višestruki ulaz višestruki izlaz (eng. Multiple-Input Multiple-Output - MIMO) je tehnologija koja uključuje više antena na prijamniku i predajniku bežične komunikacije. MIMO tehnologija omogućava [21]:

- Povećavanje brzine prijenosa podataka putem prostornog multipleksiranja (eng. spatial multiplexing);
- Povećanje robusnosti prijenosa putem prostorne raznolikosti (eng. spatial diversity).

MIMO je prvi put implementiran u 802.11n standardu sa podrškom za do 4x4 MIMO te je proširen u 802.11ac standardu sa podrškom za do 8x8 MIMO i podrškom za više-korisnički (eng. Multi-User - MU) MIMO.

3.2. Standardi iz skupine 802.11

Originalni 802.11 standard ratificiran je 1997. te je podržavao brzine do 2 Mbps uz odašiljanje u 2,4 GHz području . Od tada pa do danas donesen je velik broj dopuna i izmjena standardu od kojih su najvažnije „a“, „b“, „g“, „n“ i „ac“. U Tablici 2. uspoređene su karakteristike navedenih standarda.

Tablica 2. Usporedba karakteristika standarda IEEE 802.11

	802.11	802.11a	802.11b	802.11g		802.11n	802.11ac
Godina	1997	1999	1999	2003		2010	2013
Pojas	2,4 GHz	5 GHz	2,4 GHz	2,4 GHz		2,4 GHz i 5 GHz	5 GHz
Širina kanala	20 MHz	20 MHz	20 MHz	20 MHz		20 MHz i 40 MHz	40 MHz, 80 MHz i 160 MHz
Broj nepreklapajućih kanala	3	Do 23	3	3		Varira	Varira
Način prijenosa signala	IR, FHSS, DSSS	OFDM	DSSS	DSSS	OFDM	DSSS, CCK, OFDM	OFDM
Propusnost (Mbps)	1-2	6-54	1-11	1-11	6-54	100+	1000+

3.3. IEEE 802.11 topologije

Glavna komponenta IEEE 802.11 mreže je postaja (eng. Station - STA). STA predstavlja uređaj s mogućnošću korištenja IEEE 802.11 standarda. To mogu biti npr. stolna ili prijenosna računala, AP ili pametni telefon.

IEEE 802.11 definira nekoliko topologija koje se nazivaju skupovi usluga (eng. service set) koje opisuju kako postaje mogu biti korištene u svrhu međusobne komunikacije. Te topologije su [17]:

- Osnovni skup usluga (eng. Basic Service Set - BSS);
- Prošireni skup usluga (eng. Extended Service Set - ESS);
- Neovisni skup osnovnih usluga (eng. Independent Basic Service Set - IBSS);
- Isprepleteni skup osnovnih usluga (eng. Mesh Basic Service Set - MBSS);

3.3.1. Komponente topologija

Pristupna točka

Pristupna točka je uređaj unutar bežične lokalne mreže koji služi kao sabirnica prometa za sve uređaje koji pokušavaju ostvariti bežičnu komunikaciju. Može biti samostalni uređaj koji se spaja na router ili integrirana u sami router. Pristupne točke su uređaji koji rade u polu-dupleks načinu rada te se "natječu" za korištenje bežičnog medija.

Pristupne točke mogu raditi u nekoliko konfiguracija. Osnovna konfiguracija koja se naziva *root mode* omogućuje pristupnoj točki djelovanje kao dio BSS-a. Mosna konfiguracija (eng. bridge mode) pretvara AP u bežični most. Mosna konfiguracija u radnog grupi (eng. workgroup bridge mode) omogućava AP-u djelovanje kao bežični agregator (eng. backhaul) za povezane ethernet klijentske uređaje. Ponavljačka konfiguracija (eng. repeater mode) pretvara AP u ponavljač odnosno pojačivač signala u svrhu poboljšanja dometa pristupne točke. Isprepletena konfiguracija (eng. mesh mode) pretvara AP u agregacijsku točku (eng. backhaul) za isprepletenu bežičnu mrežu. Konfiguracija za nadziranje (eng. monitor mode) omogućava AP-u praćenje radio okoliša i pronalaženje nepridruženih klijenata i neautoriziranih pristupnih točaka.

Klijentski uređaji

Klijentski uređaj je naziv za bilo koji STA koji se ne koristi u pristupnoj točki. To mogu biti razna računala, tableti, pisači i skeneri, pametni telefoni itd. Kao i pristupne točke, natječu se s ostalim uređajima za korištenje bežičnog medija. Kada je klijentski uređaj povezan za pristupnog točkom, kažemo da je pridružen (eng. associated).

Klijentski uređaji mogu raditi u dvije konfiguracije: infrastrukturni mod i ad hoc (peer-to-peer) mod. U infrastrukturnoj konfiguraciji, uređaju se omogućuje komunikacija putem pristupne točke, odnosno uređaju se omogućuje sudjelovanje u BSS i ESS topologiji te komunikacija s uređajima koji nisu dio 802.11 mreže. Druga konfiguracija, ad hoc mod, omogućava uređaju sudjelovanje u IBSS topologiji. U takvoj konfiguraciji klijentski uređaji komuniciraju međusobno bez prisutnosti AP-a.

Integracijski servis

Integracijski servis (eng. Integration Service - IS) pruža dostavu *MAC service data unit-a* između distribucijskog sustava (eng. Distribution System - DS) i LAN-a koji nije dio

802.11 standarda putem pristupne točke ili WLAN upravljača (eng controller). U praksi to je najčešće prijenos okvira između 802.11 i 802.3 (Ethernet) medija.

Distribucijski sustav

DS se koristi za povezivanje nekoliko BSS-ova kako bi se stvorio ESS. Sastoji se od dva glavna dijela:

- Medij distribucijskog sustava (eng. Distribution System Medium - DSM) koji predstavlja logički fizički medij koji povezuje pristupne točke kao što je npr ethernet. Više pristupnih točki može biti povezano na isti DSM;
- Servisi distribucijskog sustava (eng. Distribution System Services - DSS) su sustavni servisi integrirani u pristupnu točku u obliku programske podrške sa zadaćom pružanja inteligencije slične onoj koju pružaju klasični switchevi. Također su zaduženi za asocijaciju, ponavljanje asocijacije i disocijaciju klijentskih uređaja.

Bežični distribucijski sustav

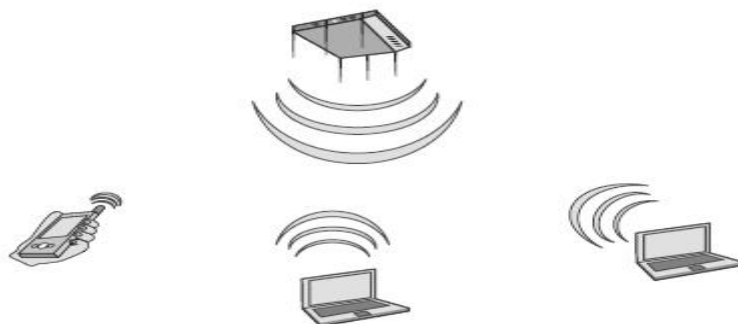
Bežični distribucijski sustav (eng. Wireless Distribution System - WDS) je mehanizam za bežičnu komunikaciju korištenjem formata okvira s četiri MAC adrese (adrese prijamnika i predajnika te adrese izvora i odredišta) s glavnom namjenom da preuzme ulogu logičkog fizičkog medija kao mrežnog backhaul-a. Primjeri korištenja Wi-Fi-a kao WDS su bežični mostovi i ponavljači te isprepletene (eng. mesh) bežične mreže.

Identifikator skupa usluga

Identifikator skupa usluga (eng. Service Set Identifier - SSID) je logičko ime koje se koristi za identifikaciju 802.11 bežične mreže. Navedene topologije koriste SSID radi omogućavanja identifikacije između postaja. SSID je podesiva postavka na pristupnim točkama i na klijentskim uređajima. Može sadržavati do 32 znaka te je osjetljiv na mala i velika slova. Većina pristupnih točaka podržava mogućnost skrivanja SSID-a u svrhu poboljšavanja sigurnosti.

3.3.2. Osnovni skup usluga

BSS je osnovna topologija 802.11 mreže. Kao što je vidljivo na Slici 7., sastoji se od jedne pristupne točke i jednog ili više klijentskih uređaja pri čemu se klijentski uređaji priključuju domeni AP-a te ostvaruju komunikaciju kroz nju.



Slika 7. Osnovni skup usluga, [17]

BSS je tipično ali ne i nužno povezan s DSM. Ako AP služi kao veza prema distribucijskom sustavu, klijentski uređaji mogu komunicirati preko AP-a s mrežnim resursima koji su dostupni na DSM. U tipičnom BSS-u, međusobna komunikacija između klijentskih uređaja mora biti izvedena preko AP-a. Za identifikaciju BSS-a koristi se 48 bitna (6 oktetna) MAC adresa koja se naziva identifikator osnovnog skupa usluga (eng. Basic Service Set Identifier - BSSID). Ukoliko postoje dva ili više BSS-a koja reklamiraju isti SSID, klijentski uređaj mora imati mogućnost razlikovanja između BSS-ova te kako bi eventualni roaming tekao glatko. Upravo zato koristi se BSSID.

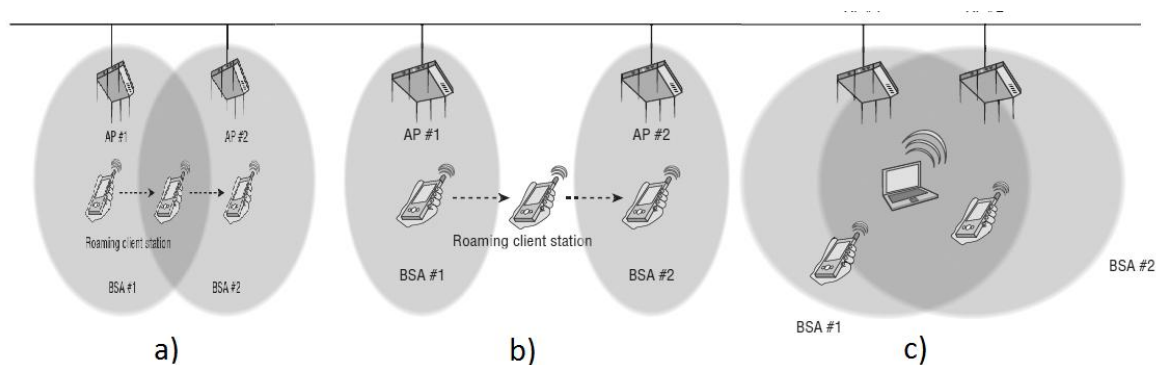
Područje koje pokriva AP u BSS-u naziva se područje osnovne usluge (eng. Basic Service Area - BSA). Veličina i oblik BSA ovisi o mnogo varijabli kao što su snaga odašiljanja AP-a, dobitak antene, fizička okolina itd. Klijentski uređaji mogu se kretati unutar toga područja i pri tome održavati vezu pod uvjetom da primljeni signal između postaja ostaje iznad praga indikatora snage primljenog signala (eng. Received Signal Strength indicator - RSSI). Klijentski uređaji se također mogu premještati između koncentričnih zona različitih prijenosnih brzina koje postoje unutar BSA. Taj se proces naziva prospajanje sa dinamičnim brzinama (eng. dynamic rate switching).

3.3.3. Prošireni skup usluga

ESS je kombinacija dva ili više BSS-ova povezanih DSM-om. Odnosno, to je kolekcija višestrukih AP-ova i njihovih asociranih klijenata koje ujedinjava jedan DSM.

Najčešći primjer ESS-a ima pristupne točke čije se ćelije pokrivanja djelomično preklapaju (Slika 8. a). Svrha takvog ESS-a je pružanje *roaminga* bez prekida u komunikaciji (eng. seamless roaming). Drugi česti slučaj je taj u kojemu se BSA-ovi ne preklapaju pri čemu će klijentski uređaj nakratko izgubiti vezi prije uspostavljanja veze sa susjednim BSS-

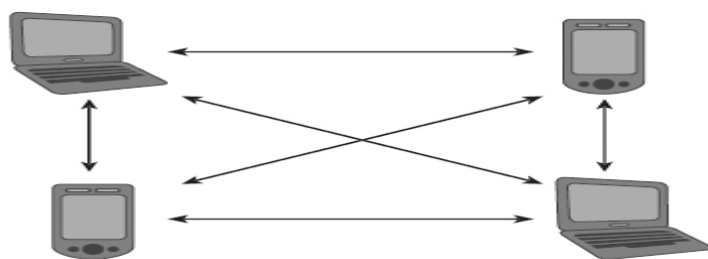
om (Slika 8. b). To se naziva nomadski *roaming* (eng. nomadic roaming). Treći slučaj korištenja ESS topologije je kolokacija (eng. collocation), (Slika 8. c). Svrha kolokacije je pružanje povećanog kapaciteta klijenata za područja s velikom gustoćom klijentskih uređaja.



Slika 8. Primjeri korištenja ESS-a: a) djelomično preklapanje, b) nomadski roaming, c) kolokacija, [17]

3.3.4. Neovisni skup osnovnih usluga

IBSS topologija (peer-to-peer ili ad hoc mreža) koja je prikazana na Slici 9. sastoji se samo od klijentskih uređaja na jednome fizičkome području bez prisustva AP-ova. Unutar IBSS-a svi uređaji razmjenjuju okvire direktno bez ikakvoga rutiranja okvira preko više uređaja. Svi uređaji natječu se za istovremeno za bežični medij i u određenom trenutku samo jedan uređaj smije slati podatke. Kako bi komunikacija bila uspješna, svi uređaji moraju odašiljati na istome frekvencijskom kanalu. Također, svi uređaji moraju dijeliti jedno SSID WLAN ime.



Slika 9. IBSS topologija, [17]

3.3.5. Isprepleteni skup osnovnih usluga

MBSS topologija sastoji se međusobno povezanih AP-ova koje rade u isprepletenoj konfiguraciji s ciljem pružanja bežične distribucije mrežnog prometa. Najčešće se koriste u situacijama gdje žični pristup mreži nije moguć.

U MBSS topologiji, jedan ili nekoliko AP-ova povezani su sa žičnom infrastrukturom a ostali AP-ovi koji nisu povezani na žičnu mrežu tvore bežični backhaul između onih koji jesu žično povezani. MBSS koristi bežični distribucijski sustav za backhaul komunikacije, najčešće u 5 GHz pojasu.

AP-ovi u MBSS-u funkcioniraju slično kao i routeri u žičnoj mreži:

- Otkrivaju susjedne AP-ove;
- Identificiraju najbolje rute prema žičnoj mreži;
- Formiraju veze sa susjedima;
- Dijelev informacije o stanju veze.

Usmjeravanje se vrši na temelju MAC adresa pomoću hibridnog protokola za bežične isprepletene mreže (eng. Hybrid Wireless Mesh Protocol - HWMP). HWMP je dinamički protokol za usmjeravanje na sloju 2 OSI modela koji je reaktivan i proaktivan.

3.4. Sigurnost u IEEE 802.11 standardu

S obzirom na nesigurnost bežičnog medija 802.11 standard definira i osnovne mjere sigurnosti. Te mjere su autentifikacija te podrška za enkripciju.

3.4.1. Autentifikacija

Autentifikacija predstavlja proces potvrđivanja ima li korisnički uređaj dozvolu za pristup mreži [3]. Autentifikacija je važna u bežičnim mrežama zbog otvorene prirode bežičnih prijenosa signala. 802.11 specificira dva osnovna načina za autentifikaciju klijentskih uređaja koji pokušavaju pristupiti mreži a to su: autentifikacija otvorenog sustava (eng. Open-System Authentication - OSA) i autentifikacija dijeljenim (zajedničkim) ključem (eng. Shared-Key Authentication - SKA) [22].

OSA je način autentifikacije gdje AP prihvaća MS-ove bez provjere njihova identiteta. Kako bi proces tekao ispravno, MS mora znati SSID mreže. OSA je podložan napadima i neautenticiranim pristupima te ne pruža nikakav oblik autentifikacije za AP.

SKA je kriptografska tehnika autentifikacije. To je jednostavna "izazov-odgovor" shema koja se temelji na tome zna li klijentski uređaj zajedničku tajnu. U toj shemi, AP generira nasumični izazov te ga šalje klijentskom uređaju. Klijentski uređaj zatim enkriptira izazov koristeći zajednički kriptografski ključ te ga vraća AP-u. AP dekriptira odgovor klijentskog uređaja te ako se vrijednost poklapa sa poslanim izazovom dopušta klijentskom uređaju pristup mreži. Ova metoda također ne pruža nikakvu vrstu autentifikacije za AP.

3.4.2. Povjerljivost

Povjerljivost je skup procesa usmjerenih prema tome da osiguraju neautoriziranim korisnicima razumijevanje bežičnih prijenosa. Povjerljivost se postiže enkripcijom podataka koja osigurava da samo oni korisnici kojima su podaci namijenjeni mogu dekodirati njihov sadržaj korištenjem enkripcijskog ključa. Vrijednost enkripcije proizlazi iz tajnosti ključeva te duljine samoga ključa. Najpoznatiji sigurnosni standardi korišteni u 802.11 su WEP, WPA i WPA2.

Wireless Equivalent Privacy (WEP) je opcionalna specifikacija originalnom 802.11 standardu namijenjena enkripciji podataka između bežičnih uređaja. WEP enkripcija može biti 64 bitna sa 40 bitnim ključem te 128 bitna sa 104 bitnim ključem, obje sa 24 bitnim inicijalizacijskom vektorom koji je dio ključa. Koristi RC4 algoritam za enkripciju podataka. U 2001. istražitelji sa raznih sveučilišta su otkrili slabosti WEP enkripcije i danas se ona rijetko koristi, najčešće u kućnim mrežama.

Wi-Fi Protected Access (WPA) i njegov nasljednik WPA2 su standardi udruženja Wi-Fi Alliance za mrežnu autentifikaciju i enkripciju. Uvedeni su kao odgovor na slabosti WEP-a. WPA također koristi RC4 algoritam za enkripciju podataka. Svaki paket, sesija i uređaj enkriptiraju se putem TKIP (eng. Temporal Key Integrity Protocol) koji je i zadužen za kontrolu ključeva. WPA se implementira u dva osnovna načina: WPA-PSK (eng. Pre-Shared Key) i WPA Enterprise. WPA-PSK se zasniva na konceptu kod kojega se ključ od 256 bita (lozinka) dijeli svim uređajima koji žele pristupiti mreži te se koristi u manjim mrežama. WPA Enterprise je korporativno rješenje koje zahtijeva postojanje dodatnih poslužitelja za

provođenje autentifikacije svakoga korisnika uz pružanje veće sigurnosti i lakše administracije.

WPA2 također podržava PSK i Enterprise implementacije te umjesto TKIP-a koristi CCMP (eng. Counter Mode Cipher Block Chaining Message Authentication Code Protocol) zajedno sa Naprednim standardom enkripcije (eng. Advanced Encryption Standard - AES) enkripcijskim algoritmom.

4. Karakteristike širenja elektromagnetskog vala

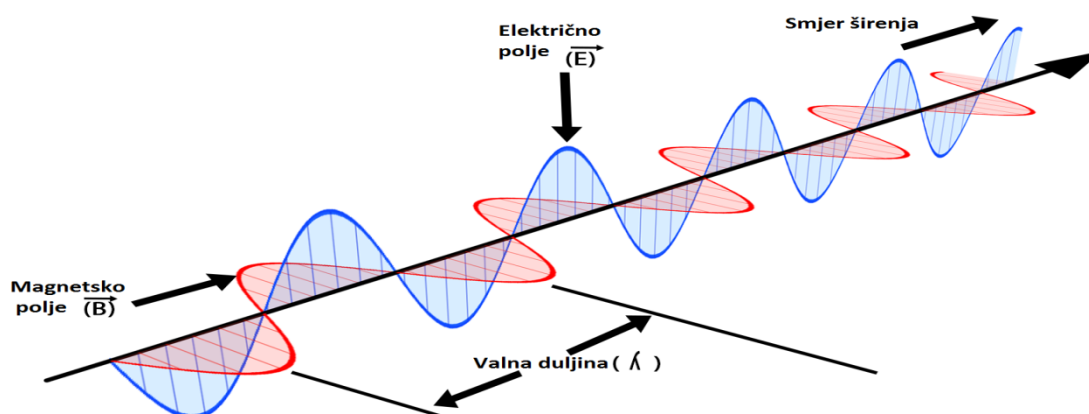
Elektromagnetski valovi posjeduju intrinzičnu važnost koja ih čini temeljem za sav život na Zemlji. Ovaj prirodni fenomen je također važan i kao osnova za svu radio opremu te se koristi kao prijenosni te modulacijski medij za prijenos informacija u telekomunikacijama.

Elektromagnetski val odnosno elektromagnetsko zračenje predstavlja pojavu kojom objašnjavamo širenje elektromagnetske energije u prostoru [14]. Sastoji se od oscilirajućeg električnog i magnetskog polja koja su međusobno okomita te okomita na smjer širenja vala (Slika 10.). Takav način širenja čini elektromagnetske valove transverzalnim valovima.

Svi elektromagnetski valovi putuju brzinom svjetlosti ($3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$) u vakuumu a njihova brzina u ostalim medijima ovisi o električnim i magnetskim svojstvima medija u kojemu se šire. Za širenje elektromagnetskoga vala nije potreban medij.

Elektromagnetski valovi podložni su pojavama kao što su apsorpcija, refrakcija, refleksija, difrakcija, disperzija i interferencija. Te pojave će biti objašnjene u zadnjemu potpoglavlju na primjeru radiovalova.

Elektromagnetski val



Slika 10. Širenje Elektromagnetskog vala

Izvor: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/25/Electromagnetic_waves.png

[Preuzeto: lipanj 2019.]

Elektromagnetske valove moguće je opisati sa nekoliko parametara [14]:

- Frekvencija;
- Valna duljina;
- Brzina širenja;
- Polarizacija;
- Amplituda.

Frekvencija predstavlja broj oscilacija vala u jedinici vremena i izražava se u hercima (Hz). Vrijednosti frekvencije elektromagnetskog vala mogu poprimiti vrijednosti od 0 do ∞ . Frekvencija je proporcionalna energiji koju posjeduje elektromagnetski val.

Valna duljina je udaljenost između dva uzastopna maksimuma ili dva uzastopna minimuma vala te se izražava u metrima (m). Valovi s većim valnim duljinama nose manju energiju nego valovi s manjim valnim duljinama. Što je manja valna duljina, veća je frekvencija a samim time i energija vala.

Brzina širenja definira brzinu kojom putuje EM energija te se izražava u metrima po sekundi (m/s). U vakuumu je jednaka brzini svjetlosti.

Polarizacija prikazuje smjer u kojemu titra vektor električnog polja. Osnovne vrste polarizacije su horizontalna, vertikalna te kružna.

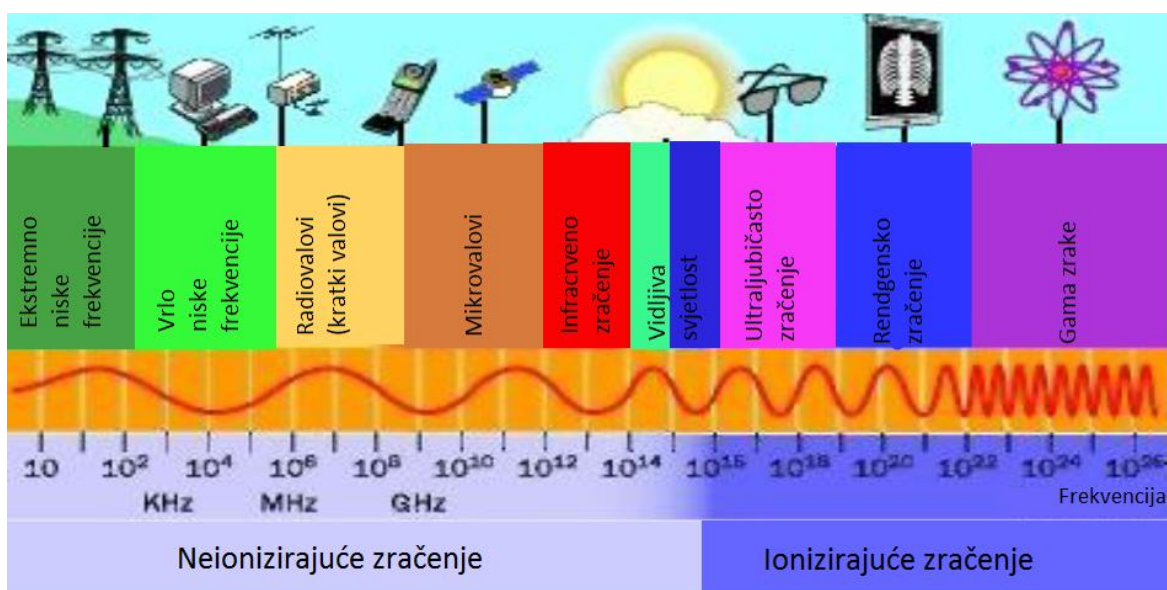
Amplituda je najveći otklon od ravnotežnog položaja vala odnosno amplituda predstavlja najveću snagu električnog i magnetskog polja vala. Veličina amplitude proporcionalna je s energijom vala te također može poprimiti vrijednosti od 0 do ∞ .

4.1. Elektromagnetski spektar

Elektromagnetski spektar (Slika 11.) predstavlja opseg frekvencija elektromagnetskog zračenja zajedno sa njihovim valnim duljinama te energijama [15]. Frekvencije i valne duljine koje pokriva spektar mogu u teoriji biti od 0 do ∞ te su obrnuto proporcionalne. Cijeli spektar je podijeljen u sedam grupa od onih s najmanjom do onih s najvećim frekvencijom i energijom odnosno obrnuto za njihove valne duljine. Osim njihovih frekvencija, valovi koji pripadaju određenim grupama se razlikuju i po načinu nastanka, načinu na koji međudjeluju s okolinom te primjeni.

Te grupe su:

- Radiovalovi;
- Mikrovalovi;
- Infracrveno zračenje;
- Vidljiva svjetlost;
- Ultraljubičasto zračenje;
- Rendgensko zračenje;
- Gama zrake.



Slika 11. Elektromagnetski spektar [14]

4.2. Načini širenja radiovalova

Širenje radiovalova (Slika 12.) u zemljinoj atmosferi može se izvršiti na nekoliko načina ovisno o frekvenciji radiovala [16]:

- Prostorni val;
- Izravni val;
- Reflektirani val;
- Površinski val.

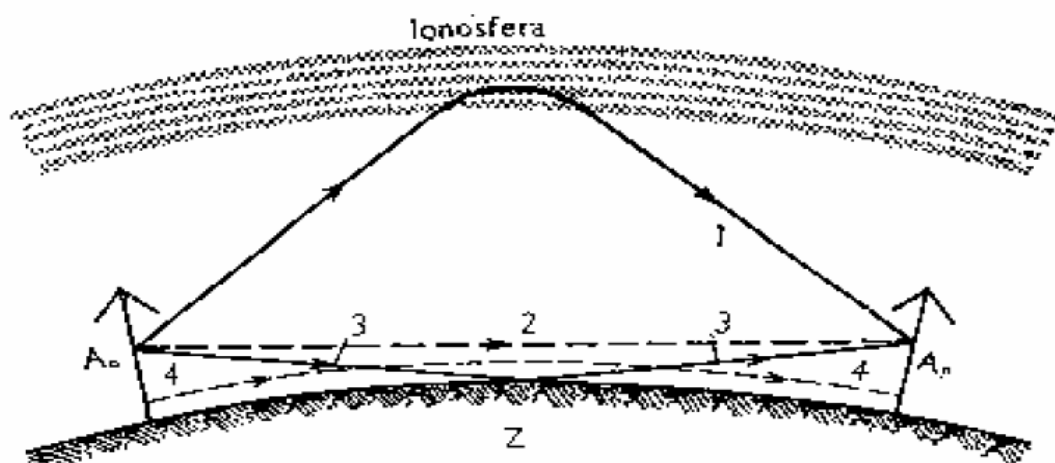
Prostorni val predstavlja val koji je usmjeren prema gornjim slojevima atmosfere pri čemu se pod određenim uvjetima odbija natrag prema površini zemlje. Niže frekvencije

odbijaju se od nižih dijelova atmosfere a više od viših ovisno o stupnju ionizacije. Frekvencijski spektar pogodan za širenje prostornog vala je 3-32 MHz.

Izravni valovi šire se pravocrtno od izvora do odredišta. Za uspješan prijam potrebna je "vidljivost" između točaka odnosno izvor i odredište moraju biti jedan drugome unutar radio horizonta. Za direktne valove upotrebljavaju se frekvencije iznad 40 MHz te se koriste u dvije vrste komunikacija: LOS i satelitskoj komunikaciji.

Reflektirani valovi su valovi koji se pri širenju od izvora do odredišta reflektiraju od površine zemlje. Takav val pristiže na odredište zajedno sa direktnim valom te postaje uzrok interferencije.

Površinski val je radioval koji se širi uz samu površinu zemlje. Prilikom širenja, umjesto da putuje ravnom linijom, val prati površinu Zemlje zbog induciranih struja u površini zemlje koje uzrokuju nagnjanje vala prema Zemljinoj površini. To omogućuje primanje prostornog vala daleko iznad radio horizonta. Širenje prostornim valom prikladno je za niže frekvencije do 5 MHz.



Vrste zračenih valova. 1 Prostorni val, 2 direktan val, 3 reflektirani val (od površine Zemlje), 4 površinski val; Z površina Zemlje, A_0 antena odašiljača, A_n antena prijemnika

Slika 12. Prikaz različitih načina širenja valova [16]

4.3. Pojave pri širenju radiovalova

Pri širenju radiovalova kroz zrak i ostale medije pojavljuju se različite pojave. Te pojave su: apsorpcija, refleksija, refrakcija, difrakcija, disperzija i interferencija [17].

Apsorpcija predstavlja pretvorbu elektromagnetske energije u drugi oblik, najčešće toplinsku energiju. Do pretvorbe dolazi uslijed interakcije između elektromagnetskog vala i medija na molekularnoj ili atomskoj razini. Apsorpcija je jedan od najvećih uzroka prigušenja signala te je proporcionalna frekvenciji vala. Njeni uzročnici su najčešće fizičke prepreke, padaline i atmosferski plinovi.

Refleksija je pojava koja se događa na granici između dva različita medija pri čemu se dio energije vala odbija natrag u medij iz kojega je došao. Intenzitet reflektiranog vala ovisi o kutu upada, polarizaciji i frekvenciji vala te svojstvima medija.

Refrakcija vala se također pojavljuje na granici između dva medija pri čemu se pri prolasku u drugi medij mijenja smjer širenja vala u odnosu na prvi medij. Također ovisi o frekvenciji vala i svojstvima medija i najčešće je uzrokovana atmosferskim prilikama.

Difrakcija ili ogib nastaje kao rezultat skretanja odnosno savijanja vala iza ruba prepreke koja se nalazi na putu vala. Stvaranje difrakcije je uvjetovano oblikom i veličinom prepreke te karakteristikama vala kao što su polarizacija, faza i amplituda. Područje iza prepreke može postati zona nepokrivenosti signalom ili primati degradirane signale.

Disperzija ili raspršivanje je rezultat kombinacije pojava refleksije, refrakcije, i difrakcije vala u mnogo smjerova. Do nje dolazi prilikom kontakta s neravnim ili grubim površinama te manjim objektima.

Interferencija je predstavlja pojavu međudjelovanja između više valova bliskih ili istih frekvencija. Razlikujemo konstruktivnu i destruktivnu interferenciju. Konstruktivna interferencija predstavlja kombinacija u kojem sudionici dijele fazu pa je rezultat takve interferencije val veće amplitude. Suprotno tome, destruktivna interferencija predstavlja kombinaciju valova suprotnih faza što daje kao rezultat val manje amplitude ili čak potpuno poništeni val.

5. Programi za mjerenje snage signala

Na tržištu postoje razni programski alati namijenjeni mjerenju snage primljenog signala bežičnih mreža. Ovisno o potrebi, navedeni alati dolaze u nekoliko oblika: besplatni programi, evaluacijske verzije profesionalnih programa te profesionalni programi.

Besplatni programi omogućuju amaterskim korisnicima analizu snage signala u manjim privatnim mrežama kao što su manje tvrtke, vlastiti dom ili neposredna okolina. Sadrže ograničene mogućnosti koje su dovoljne za analizu takvih slučajeva.

Evaluacijske verzije profesionalnih programa, odnosno tzv. trial verzije predstavljaju vremenski ili funkcionalno ograničene inačice profesionalnih programa namijenjene prikazivanju mogućnosti programa zainteresiranim strankama. Krajnji cilj pružanja ovakvih inačica je kupovina potpunog programskog alata.

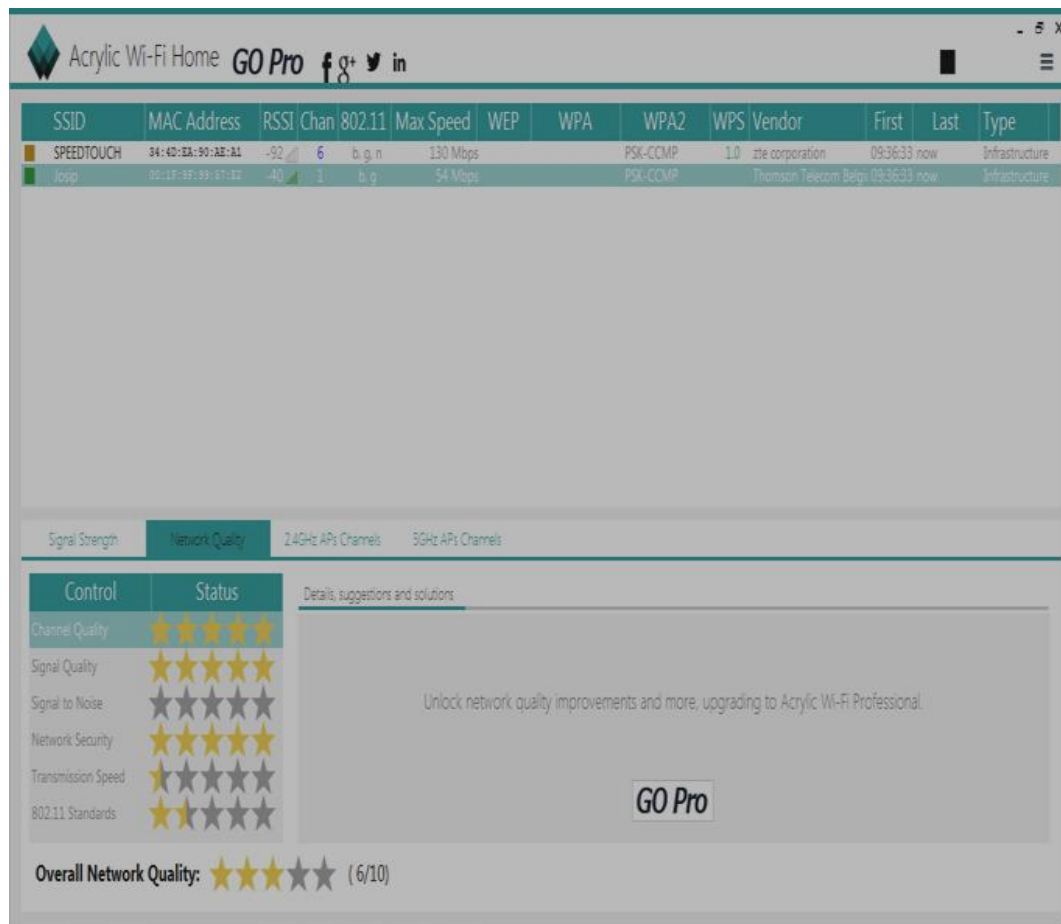
Profesionalni programi su verzije programa koje uključuju sve funkcionalnosti koje je izdavač programskog alata namijenio za to rješenje. Koriste se analizu većih bežičnih mreža te često uključuju tzv. *proprietary* opremu uz potpunu podršku za korisnika programa. Zbog takvih karakteristika, profesionalni programi mogu imati cijenu i do nekoliko tisuća dolara. Sljedeće cjeline opisati će nekoliko besplatno dostupnih te evaluacijskih verzija namijenjenih mjerenju snage primljenoga signala

5.1. Acrylic Wi-Fi Home

Acrylic Wi-Fi Home (Slika 13.) je programski alat razvijen u tvrtki Tarlogic Security SL. Ovaj programski alat je besplatna inačica profesionalne verzije namijenjene mrežnim analitičarima te administratorima u svrhu optimizacije performansi uredskih mreža.

Programski alat posjeduje nekoliko mogućnosti. Temeljni prozor prikazuje dostupne mreže i pristupne točke te njihove karakteristike. Karakteristike uključuju SSID, MAC adresu, snagu signala, korišteni kanal, koju verziju 802.11 standarda koriste, maksimalnu brzinu prijenosa, vrstu sigurnosti, proizvođača te osnovnu arhitekturu same mreže. Program omogućuje prikaz promjene snage primljenoga signala u stvarnome vremenu za sve dostupne pristupne točke na jednome grafu te graf za korištene 2,4 GHz i 5 GHz kanale.

S obzirom na prikupljene podatke, program omogućuje prikaz kvalitete mreže u jednostavnom sustavu ocjenjivanja od jedne do pet zvjezdica za kategorije kvaliteta kanala, kvaliteta signala, odnos signala i šuma, sigurnost, brzina prijenosa, korišteni standard te ukupne kvalitete mreže. Takav način ocjenjivanja olakšava razumijevanje izmjerenih parametara za nestručne amaterske korisnike.



Slika 13. Osnovno sučelje programa Acrylic Wi-Fi Home te prikaz kvalitete mreže

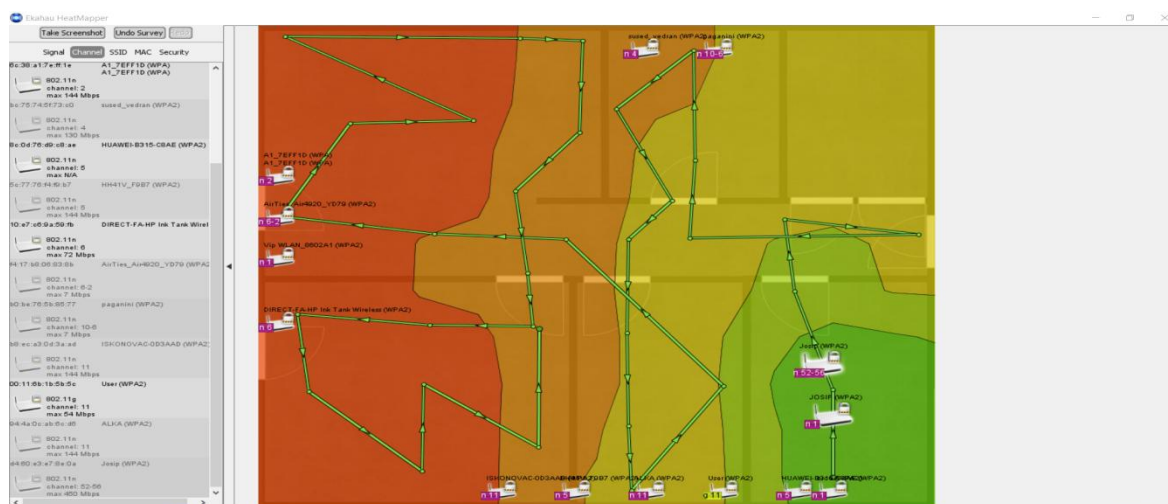
5.2. Ekahau HeatMapper

Ekahau HeatMapper (Slika 14.) je besplatni program tvrtke Ekahau napravljen na bazi profesionalnog programa Ekahau PRO. Namijenjen je grafičkom mjerenju i prikazivanju snage primljenoga signala na nekom prostoru.

Grafičko sučelje programa sastoji se od dva dijela. Lijevi dio grafičkog prikazuje sve pronađene pristupne točke i njihove karakteristike kao što su korišteni kanal, SSID i BSSID,

korišteni standard, sigurnost te maksimalna propusnost. Desni dio grafičkog sučelja namijenjen je mjerenju snage primljenoga signala.

Mjerenje se izvodi učitavanjem tlocrtne karte prostora nakon čega se korisnik kreće po prostoru te označava svoj položaj pri čemu program mjeri snagu signala u toj točki. Nakon što je mjerenje završeno program prikazuje u bojama dobivene rezultate snage signala te pretpostavljene približne lokacije pristupnih točki prema izmjerenim vrijednostima. Ne postoji skala koja prikazuje vrijednost signala, već je potrebno staviti strelicu miša na određenu boju kako bi se prikazala vrijednost. Odabirom jedne od pronađenih pristupnih točaka na način da se postavi strelica na nju, prikazuje se snaga primljenoga signala u svim dijelovima tlocrta samo za vrijednosti izmjerene za odabranu pristupnu točku.



Slika 14. Sučelje programa Ekahau HeatMapper

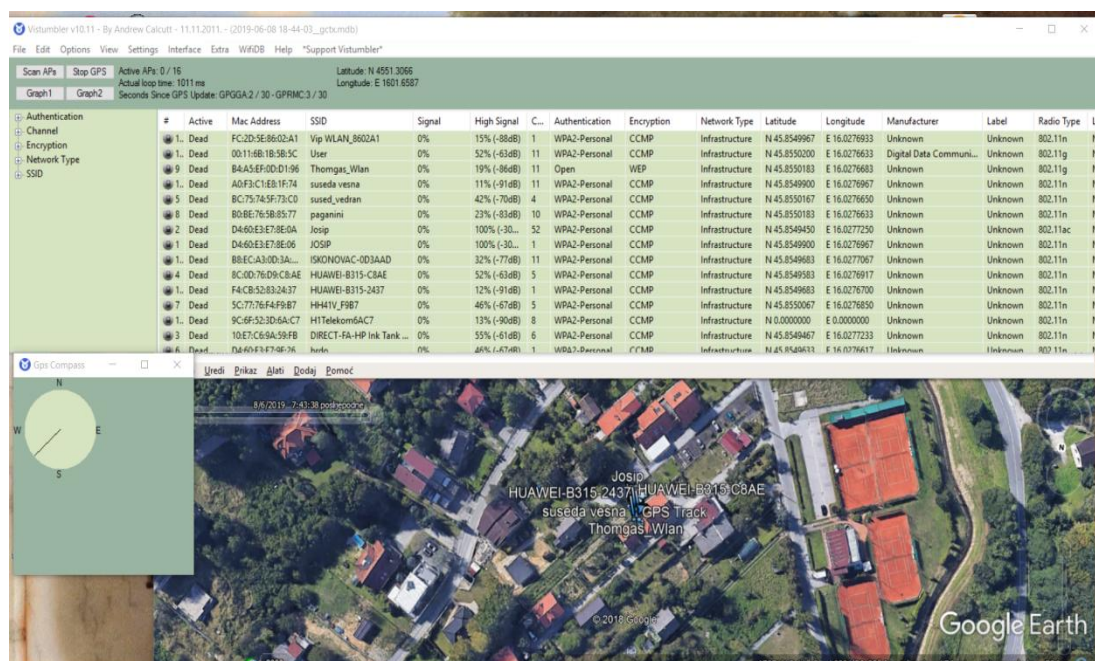
5.3. Vistumbler

Vistumbler je program otvorenog kôda (eng. open source) za analizu bežičnih mreža temeljen na sličnom alatu naziva NetStumbler. Program nudi nekoliko mogućnosti.

Osnovna funkcionalnost programa vidljiva na Slici 15. je prikaz karakteristika bežičnih mreža i njihovih pristupnih točaka. Ta funkcionalnost uključuje već spomenute SSID, BSSID, trenutnu aktivnost, snagu primljenog signala, korišteni kanal, autentifikaciju i enkripciju, osnovnu arhitekturu, verziju standarda kao i GPS koordinate pristupne točke. Navede karakteristike prikazane su tablično u glavnome prozoru. Uz glavni prozor, omogućeno je i hijerarhijsko prikazivanje bilo koje od karakteristika koje uključuje i pretraživanje radi specifičnih potreba.

Druga funkcionalnost ovoga programa je grafički prikaz snage primljenoga signala u odnosu na vrijeme za odabranu pristupnu točku. Grafički prikaz je omogućen u dva različita grafa.

Karakteristike pristupnih točki mogu biti učitane u online bazu podataka Vistumbler WifiDB gdje drugi korisnici mogu pristupiti učitanim podacima što je korisno za otkrivanje otvorenih mreža ili mreža sa slabijom sigurnošću. Nadalje, isti ti podaci mogu biti učitani u program Google Earth za grafički prikaz unesenih mreža.



Slika 15. Sučelje programa Vistumbler zajedno sa Google Earth prikazom

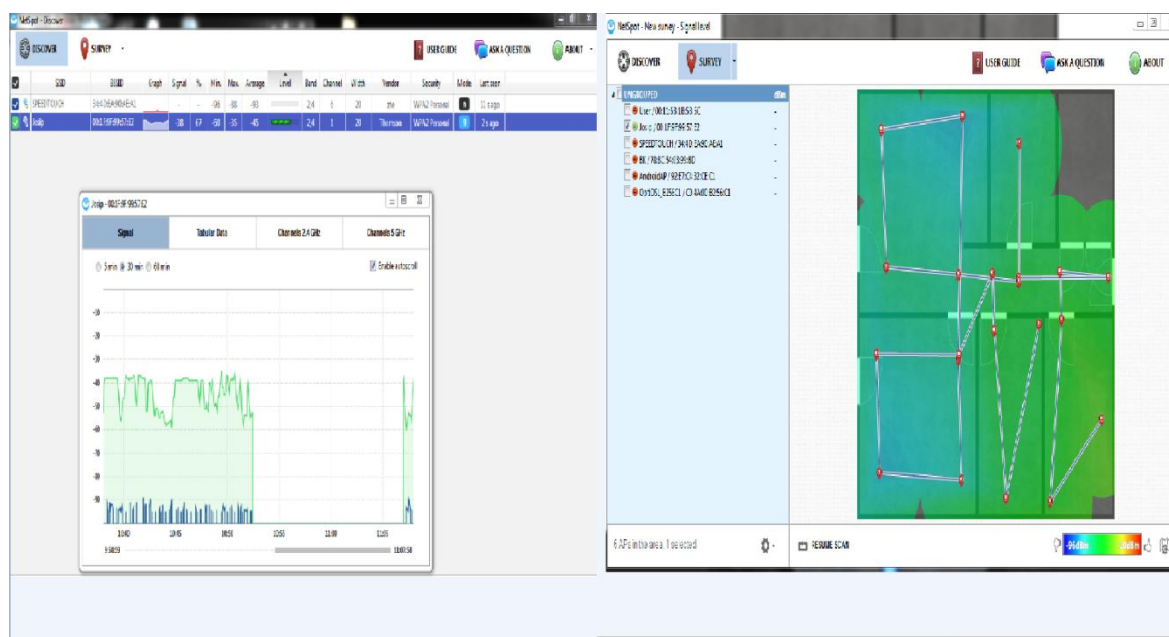
5.4. NetSpot

NetSpot je programski alat istoimene tvrtke. Kao i programski alati prikazani u prijašnjim potpoglavljima, NetSpot je besplatna inačica profesionalne i enterprise verzije. Profesionalna inačica namijenjena je za korištenje u manjim poslovnim okruženjima te enterprise u većim poslovnim okruženjima.

NetSpot posjeduje dva grafička sučelja rada: Discover i Survey (Slika 16.). U Discover načinu rada, program prikuplja detalje o okolnim pristupnim točkama te ih prikazuje u interaktivnoj tablici. Prikazani podaci uključuju SSID, BSSID, korišteno frekvencijsko područje, kanale, frekvencijski pojas, proizvođača, vrstu sigurnosti, verziju standarda i vrijeme zadnje interakcije s pristupnom točkom. Snaga primljenoga signala se

opisuje sa nekoliko vrijednosti: trenutna vrijednost, postotak od najveće vrijednosti, najmanja i najveća izmjerena vrijednost te prosjek. Detalji uključuju prikaz grafa snage primljenog signala u odnosu na vrijeme, popis mjerenja sa vrijednostima te grafove korištenih kanala.

Survey način rada omogućuje mjerenje snage na nekome prostoru te prikaz rezultata na dvodimenzionalnoj karti. Kako bi mjerenje bilo što točnije potrebno je učitati tlocrtni plan te odrediti dimenzije prostora. Nakon toga, korisnik se kreće po prostoru te mjeri snagu signala na proizvoljnim točkama. Razine snage primljenoga signala prikazane su skalom boja. Mjerenje je preciznije sa većim brojem točaka.



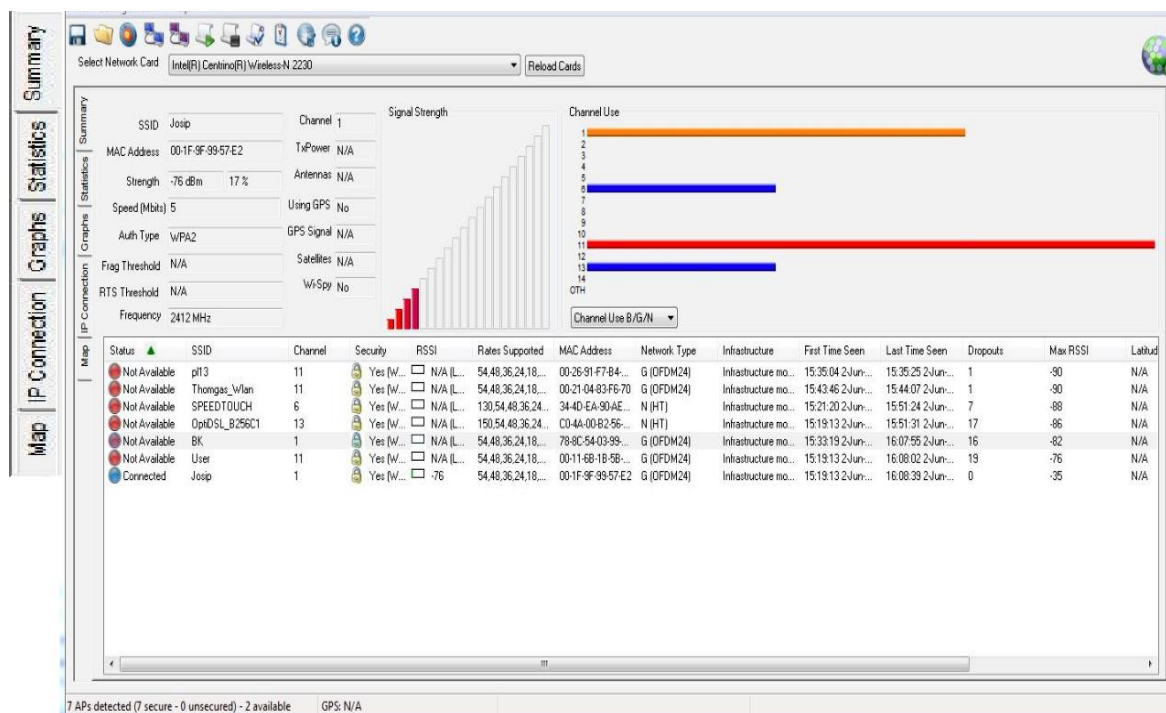
Slika 16. Prikaz Discovery (lijevo) te Survey (desno) sučelja programa

5.5. WirelessMon

WirelessMon je programski alat tvrtke Passmark Software. U izradi ovoga rada korištena je evaluacijska verzija. Sve radnje u programu obavljaju se pomoću četiri kartice uvećane na lijevom rubu Slike 17.

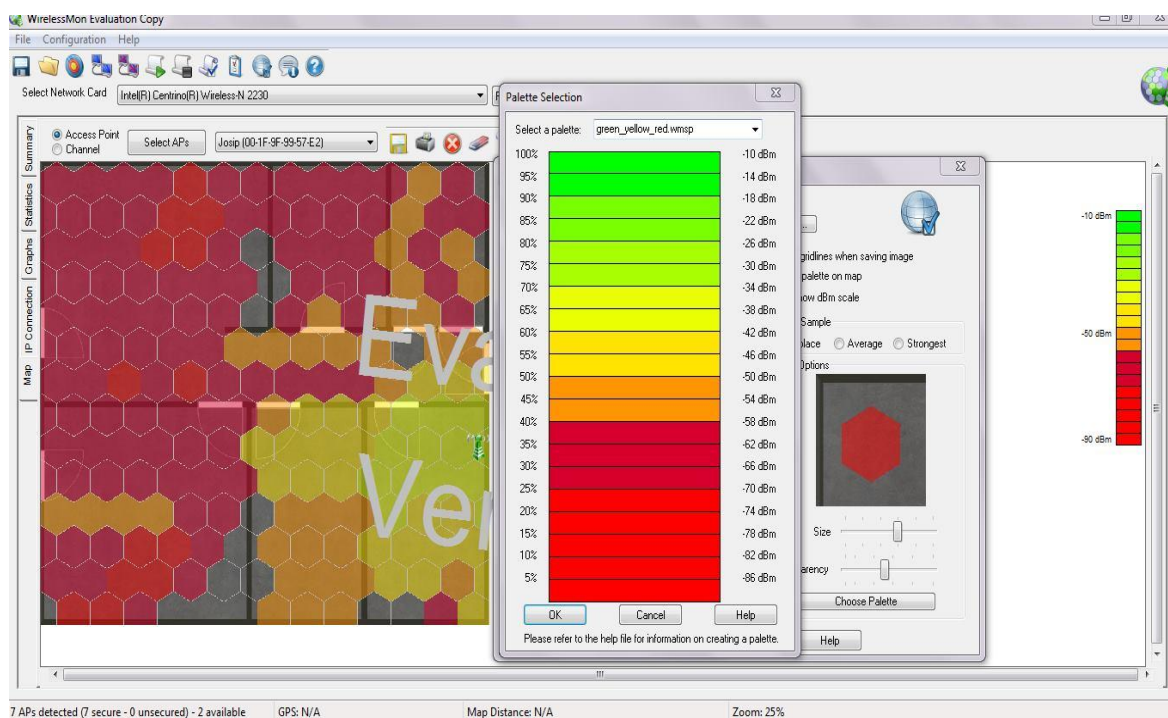
Kartica Summary prikazuje informacije o mrežama i pristupnim točkama uz grafički prikaz snage signala i korištenih kanala. Te informacije uključuju status, SSID, BSSID, korišteni kanal, trenutnu i najveću snagu primljenog signala, sigurnosne postavke, podržavane brzine, verziju standarda, osnovnu arhitekturu i GPS koordinate. Kartica Statistics sadrži statističke podatke o trenutnoj vezi ukoliko je uređaj povezan na mrežu. Graphs omogućuje prikaz grafova snage primljenoga signala te primljenih i poslanih

podataka u mjerenoj vremenu. IP Connection prikazuje informacije o mrežnoj kartici, IP podatke te informacije o količini prenesenih podataka i trenutnoj brzini. Kartica Map (Slika 18.) sadrži pregled snage primljenoga signala na nekom prostoru te omogućuje mjerenja u željenim točkama.



Slika 17. Osnovno grafičko sučelje programa WirelessMon i uvećani prikaz glavnih kartica

WirelessMon posjeduje vrlo dobre mogućnosti u pogledu izrade karte snage primljenoga signala. Izrada karte snage primljenoga signala moguća je učitavanjem tlocrta prostora koji želimo mjeriti te manualnim mjerenjem signala na odabranim točkama ili korištenjem GPS-a. Kada se koristi GPS, mjerenje se vrši na način da se prvo postave GPS koordinate tlocrtne karte i zatim program sam mjeri signal u GPS točkama prilikom kretanja u prostoru. Područje karte prekriveno je mrežom šesterokuta čija boja predstavlja jačinu signala. Šesterokuti su konfigurabilne veličine kako bi se omogućila preciznost mjerenja ovisno o korisničkim željama. S obzirom da količina šesterokuta može biti velika kako bi se postigla veća preciznost a samim time postaje teže izvršiti mjerenje za svaki šesterokut, program omogućuje interpolaciju neizmjenjenih šesterokuta ukoliko u blizini postoje šesterokuti za nekom vrijednošću signala.



Slika 18. Primjer karte snage primljenog signala korištenjem programa WirelessMON

5.6. Usporedba programskih alata

Kako bi bilo moguće ostvariti mjerenje signala na kampusu Borongaj potrebno je izabrati prikladni programski alat. U svrhu odabira alata, ustanovljeno je nekoliko kriterija od strane autora kako bi se omogućila međusobna usporedba prikazanih alata. Tablica 3. prikazuje ocjene po danim kriterijima. Kriteriji po kojima su ocjenjivani programski alati su: jednostavnost korištenja, informacije o snazi primljenoga signala, podrška za različite OS-ove, podrška za mrežnu opremu, izrada karte, dodatne mogućnosti, informacije o kanalima te cijena.

Jednostavnost korištenja je kriterij koji opisuje koliko je lako korisnicima koristiti programski alat te je ocjenjivan na subjektivnoj osnovi. Kriterij informacije o snazi primljenoga signala je zamišljen kao suma svih informacija o snazi primljenoga signala koje programski alat nudi. Podrška za različite OS-ove je mjera količine operativnih sustava koji podržavaju dani programski alati te je ocjenjivana na osnovi službenih podataka o podršci i prikupljenim iskustvima drugih korisnika putem raznih internetskih stranica. Podrška za mrežnu opremu odnosi se na podržavanje raznih NIC-ova (eng. network interface controller) te je ocjenjivana na osnovi službenih podataka i ponajviše iskustava drugih korisnika. Izrada karte se odnosi na mogućnost alata da prikaže vrijednost signala na karti nekoga područja te

dodatnim mogućnostima vezanim za izradu karte. Dodatne mogućnosti ocijenjene su na temelju ostalih opcija programa koje nisu vezane za svrhu ovoga rada, njihove količine i korisnosti. Kriterij informacije o kanalima opisuje količinu informacija o korištenim kanalima. Cijena programa ocijenjena je na osnovi vrijednosti koju korisnik mora platiti za korištenje programa.

Ocjene po kriterijima dane su u mjerilu od 0 do 5, gdje 0 predstavlja nedostatak mogućnosti a 5 najbolje zadovoljenje kriterija. Iznimka je cijena gdje 0 predstavlja veliku cijenu a 5 besplatnost alata. Važno je napomenuti da iako postoji određena količina objektivnosti u davanju ocjena programskim alatima, ocjene su uvelike dane na temelju subjektivnih procjena. Najveću ukupnu ocjenu dobio je programski alat WirelessMON te će se kao takav koristiti za praktični dio ovoga rada.

Tablica 3. Usporedba obrađenih programskih alata

Programski alat	Jednostavnost korištenja	Informacije o snazi signala	Podrška za različite OS-ove	Podrška za mrežnu opremu	Izrada karte	Dodatne Mogućnosti	Informacije o kanalima	Cijena	Ukupno
Acrylic Wi-Fi Home	5	3	4	3	0	2	3	5	26
Ekahau Heatmapper	5	2	4	3	3	1	3	5	26
Vistumbler	2	3	3	3	1	4	3	5	24
NetSpot	4	4	4	4	3	3	3	2	27
WirelessMon	3	4	4	4	4	4	3	3	29

6. Rezultati ispitivanja kvalitete signala bežične mreže ZUK Borongaj

6.1. Postupak mjerenja

Analizom dostupnih mjernih podataka u odabranom programskom alatu odlučeno je da će predmet mjerenja na lokaciji ZUK Borongaj biti snaga primljenoga signala (RSSI) na prometnicama, parkiralištima i ostalim vanjskim površinama sa većom koncentracijom studenata. Snaga primljenoga signala je mjerena za bežičnu lokalnu mrežu Eduroam. Mjerenje je izvedeno pasivnim skeniranjem.

S obzirom da programski alati sa mogućnošću izrade karte imaju prednost u prikazivanju signala, upravo je i takav korišten u postupku mjerenja. Za izradu karte pokrivenosti signalom korištena je satelitska karta ZUK Borongaj preuzeta pomoću Google Earth programa. Imena objekata od važnosti označena su crnim brojkama na vrhu objekta. Za bolju analizu napravljena su dva skupa mjerenja. Prvi skup 2016. godine, a drugi skup 2019. godine.

Izvorno mjerenje sastojalo se od ručnog mjerenja na prometnicama, parkiralištima te ostalim površinama koristeći prostorne orijentire poput drveća, bridova zgrada, približne sredine zgrada, ulaza u raskrižja, sredine raskrižja, rubova parkirališta, sredine parkirališta itd. Također uzet u obzir položaj šesterokuta u odnosu na predmet mjerenja. Mjerenje je ponovljeno dva puta tako da boja šesterokuta koja prikazuje snagu primljenoga signala predstavlja srednju vrijednost dva mjerenja. Bijele točke unutar šesterokuta i numerička snaga primljenog signala su naknadno dodani radi lakšega čitanja. Točke prikazuju točan položaj na kojemu je mjerenje obavljeno a numerička snaga primljenog signala najveću izmjerenu vrijednost.

Ponovljeno mjerenje napravljeno je pomoću USB GPS uređaja. Korišteni uređaj zasniiva se na U-blox 7 integriranome krugu čije je specifikacije moguće vidjeti na [19]. Za ovakvo mjerenje korištena je umjerena satelitska karta gdje su u programu postavljene GPS koordinate gornjega lijevog i donjega desnog kuta karte. Mjerenje je obavljeno kretanjem po ZUK Borongaju pri čemu je program automatski bilježio snagu primljenoga signala nekoliko puta za svaki šesterokut prema GPS položaju mjeritelja. I u ovome mjerenju boja šesterokuta

označava srednju vrijednost svih mjerenja na tome položaju. Također je naknadno dodana numerička snaga primljenoga signala približno u istim točkama kao i u izvornome mjerenju radi lakšega čitanja te usporedbe sa izvornim mjerenjem.

Za izvorno i za ponovljeno mjerenje koristila se interpolacija. Interpolacija je jedna od funkcija programskog alata WirelessMon koja omogućava proračunavanje vrijednosti signala za neizmjerene šesterokute ukoliko u blizini postoje šesterokuti sa izmjerenim vrijednostima.

6.2. Rezultati mjerenja

Mjerenje je izvedeno počevši od sjevernog dijela karte koji uključuje sve površine u ravнини i sjeverno od restorana te zatim nastavljeno na cesti ispod restorana prema objektu 210. Nakon mjerenja područja oko objekta 210 mjerena je zapadna cesta prema jugozapadnom izlazu iz kampusa te zatim južna cesta zajedno sa južnim izlazom. Nakon južne ceste mjerena je istočna cesta (desno od objekata 62, 63, i 64). Nastavljeno je prema parkiralištu između objekata 67, 62, i 63 zajedno sa njihovim pješačkim površinama te pješačkim površinama koje povezuju parkiralište i južnu cestu sa objektima 65 i 64. Zatim, mjerenje se nastavilo na cesti desno od objekata 71 i 72 prema pješačkim površinama između objekata 69, 70 i 71 i nakon toga prema parkiralištu između objekata 70, 71, 72 i njihovim pješačkim površinama. Mjerenje je završeno mjerenjem ceste lijevo od objekata 69 i 70. Redoslijed je prikazan na Slici. 19.



Slika 19. Redoslijed mjerenja na lokaciji ZUK Borongaj

Sljedeći niz slika prikazuje rezultate mjerenja. Slike od 20.-23. odnose se na izvorno mjerenje, a Slika 24. i Slika 25. na ponovljeno mjerenje.



Slika 20. Izmjerene vrijednosti na gornjem dijelu karte



Slika 21. Izmjerene vrijednosti na srednjemu dijelu karte



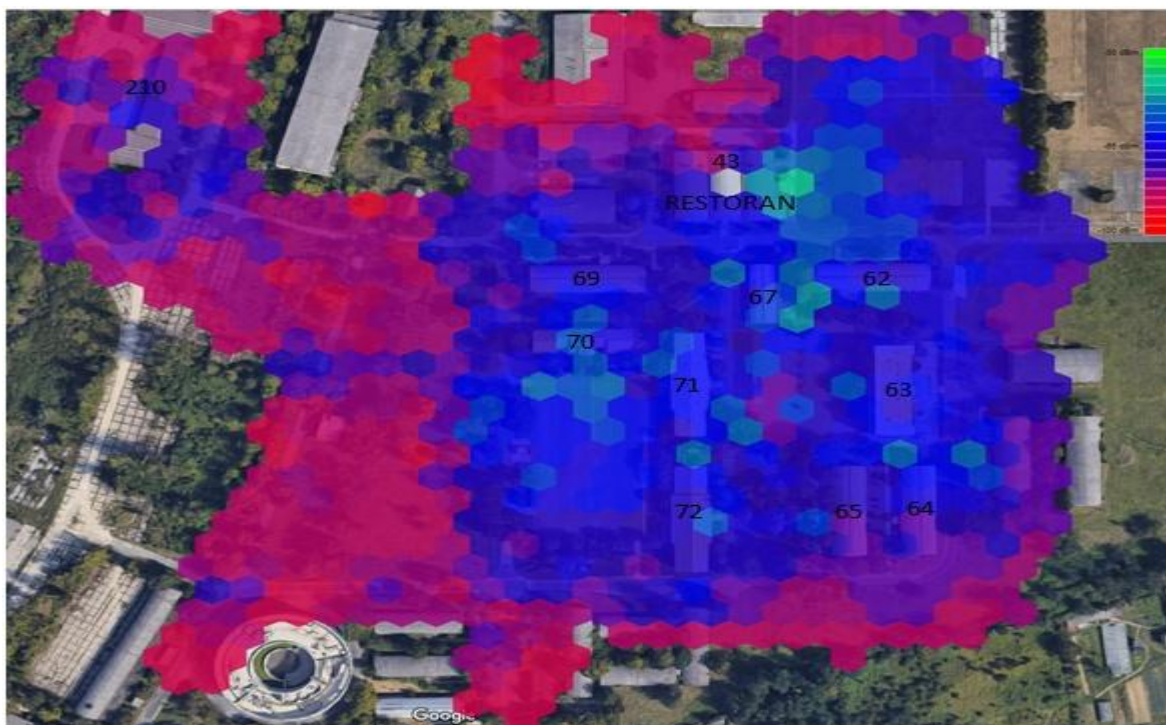
Slika 22. Izmjerene vrijednosti na donjem dijelu karte



Slika 23. Interpolirana karta vrijednosti izvornog mjerenja na lokaciji ZUK Borongaj



Slika 24. Ponovljeno mjerenje na ZUK Borongaj



Slika 25. Interpolirana karta za ponovljeno mjerenje na lokaciji ZUK Borongaj

6.3. Analiza i komentari rezultata

6.3.1. Usporedba izvornoga i ponovljenoga mjerenja

Rezultati izvornoga i ponovljenoga mjerenja se uvelike poklapaju. Značajnije razlike su uočljive na nekoliko mjesta.

Usporedivši Sliku 20. sa Slikom 24. Veće razlike uočene su u okolini restorana gdje zapadna strana bilježi pad a istočna i sjeveroistočna strana rast u odnosu na izvorno mjerenje. Veće vrijednosti u ponovljenome mjerenju su uočene i na cesti sjeverno od objekta 62 Hrvatskih studija.

Zatim Slika 21. i Slika 24., pješačke staze između objekata 69 i 71 pokazuju drastični pad u odnosu na izvorno mjerenje. Parkiralište Fakulteta prometnih znanosti na sjevernome dijelu sadrži bolje vrijednosti u odnosu na izvorno mjerenje te lošije na južnome dijelu. Cesta zapadno od parkirališta bilježi neznatno bolje vrijednosti u ponovljenome mjerenju. Neznatna poboljšanja uočena su i na cesti istočno od objekta 71 te južnome dijelu parkirališta istočno od navedene ceste. Na Slici 22. u odnosu na Sliku 24., vidljiv je i pad u snazi signala u ponovljenome mjerenju na pristupnoj cesti u sredini Slike 22.

Uzroci postojanja navedenih razlika mogu biti različiti. Jedan od mogućih razloga je promjena u snazi odašiljanja pristupnih točaka ili premještanje istih što mijenja načine širenja signala do klijentskoga uređaja. Također, prisutnost ili neprisutnost prepreka poput vegetacije, vozila itd. je jedan od vjerojatnijih faktora koji utječu na razlike s obzirom na vremenski razmak između mjerenja. Moguća je i promjena u količini uređaja koji djeluju u istome frekvencijskome pojasu kao i IEEE 802.11 što dovodi do smanjene ili povećane interferencije. Na kraju, s obzirom da je korištena različita računalna oprema za izvorno i ponovljeno mjerenje, moguća je i razlika i u načinu kako pojedini uređaj rukuje sa RSSI. RSSI je relativni index te različiti proizvođači koriste različite skale za njegove vrijednosti. Tu vrijednost programi za mjerenje snage primljenoga signala pretvaraju u decibele u odnosu na milivate (dBm).

6.3.2. Komentar trenutnog stanja

Ovo potpoglavlje odnosi se na ponovljeno mjerenje prikazano na Slici 24. Prilikom mjerenja otkrivene su 93 pristupne točke „n“ i „g“ standarda koje pripadaju Eduroam mreži. U Tablici 4. vidljive su opće preporuke MetaGeek-a za razinu snage primljenoga signala.

Tablica 4. Razine snage primljenoga signala [23]

Razina snage primljenog signala	Ocjena	Opis	Potrebno za
-30 dBm	Odličan	Najveća dostižna snaga primljenoga signala. Idealan slučaj u kojemu je klijent jako blizu AP-a.	Sve upotrebe
-67 dBm	Vrlo dobar	Minimalna potrebna snaga primljenoga signala za aplikacije koje zahtijevaju pouzdanu i pravodobnu dostavu paketa	VoIP/VoWiFi, strujanje (eng. streaming) videa
-70 dBm	Dobar	Minimalna snaga primljenoga signala za pouzdanu dostavu paketa	Osnovno surfanje, E-mail
-80 dBm	Loš	Minimalna snaga primljenoga signala za osnovnu konektivnost. Nepouzdana dostava paketa.	Osnovno povezivanje
-90 dBm	Neupotrebljiv	Bilo koja funkcionalnost je malo vjerojatna	Nije primjenjivo

Prema podjeli u Tablici 4. odabrana je točka podjele od -70 dBm za razlikovanje prihvatljivih i neprihvatljivih područja snage primljenoga signala. Minimalna zadovoljavajuća snaga primljenog signala od -70 dBm ili bolje prisutna je na nekoliko mjesta:

- Pješačka staza sjeveroistočno od restorana između igrališta;
- Križanje pokraj objekta 210;
- Istočna strana restorana;
- Cesta južno od restorana između križanja lijevo od objekta 69 i križanja desno od objekta 62;
- Lijevo parkiralište omeđeno objektima 70, 71, 72 i dio ceste koji je paralelan sa njim;
- Pješačka staza između objekata 71 i 72;
- Cesta istočno od objekata 71 i 72 do južnog križanja;

- Desno parkiralište omeđeno objektima 62, 63, 67 te sve pripadajuće pješačke površine;
- Cesta istočno od objekta 63 od sjevernog križanja do polovice objekta 64.

Ostale površine i prometnice prikazane na Slici 24. ne zadovoljavaju odabrani kriterij minimalne potrebne snage primljenoga signala koja omogućava pouzdanu bežičnu povezivost. Navedena dihotomija prikazana je na Slici 26. gdje su zelenom bojom označene površine koje zadovoljavaju a crvenom bojom one koje ne zadovoljavaju navedeni kriterij.



Slika 26. Prikaz područja prihvatljive i neprihvatljive snage primljenoga signala

U pogledu poboljšanja trenutnoga stanja, preporučljivo bi bilo raširiti područje pokrivanja prihvatljivom razinom signala na ona koja trenutno ne zadovoljavaju a sadrže veću koncentraciju studenata. Takva područja su pristupne staze za objekte 65 i 64, autobusna stanica južnog od objekta 72 te donji rub lijevoga parkirališta, pristupna staza između objekata 69 i 71, livada i pripadajuća igrališta istočno od restorana te cestovni prilaz objektu 210 zajedno sa njegovom okolicom.

Pokrivenost na navedenim područjima je moguće relativno jednostavno postići dodavanjem pristupnih točaka na odgovarajućim lokacijama. Takvo jednostavno dodavanje imalo bi minimalan utjecaj na postojeću mrežnu infrastrukturu. Uz dodavanje novih, preporučuje se izmjena postojećih pristupnih točaka što predstavlja drastičniju promjenu. Trenutno implementirane pristupne točke rade u „n“ i „g“ standardu te ukoliko se izmjene sa

pristupnim točkama „ac“ ili kombinirano „ac“ i „n“ standarda poboljšati će se područje pokrivanja i performanse bežične mreže Eduroam.

6.3.3. Nedostaci korištene metodologije

Prilikom analize bežične mreže Eduroam na lokaciji ZUK Borongaj korištena je metoda pasivnoga skeniranja kako bi se dobila snaga primljenoga signala na navedenoj lokaciji. Iako je snaga primljenoga signala važan parametar pri određivanju kvalitete mreže, ona nije jedini parametar koji određuje kvalitetu mreže. Za potpuno određivanje kvalitete mreže potrebna su dodatna mjerenja koja je teško ili nemoguće izvesti sa korištenom opremom, načinom mjerenja i razinom ovlasti u predmetnoj mreži.

Jedno od tih mjerenja je odnos signal-šum (eng. Signal-to-Noise-Ratio - SNR). SNR je razlika između primljenoga signala i pozadinskog šuma mjerena u decibelima (dB). Nepovoljni SNR uzrokuje korupciju podataka, smanjenje propusnosti i povećano kašnjenje. Zajedno sa SNR potrebno je izvesti i mjerenje propusnosti za svaku pristupnu točku na različitim udaljenostima te analizu interferencije među kanalima za susjedne pristupne točke. Uz propusnost i međukanalnu interferenciju preporučuje se i provjera preklapanja područja pokrivanja pristupnih točaka za *roaming* mogućnosti između susjednih pristupnih točaka.

7. Zaključak

Bežične komunikacijske mreže predstavljaju okosnicu današnjih telekomunikacijskih tehnologija. Njihova primarna svrha je zamjena za fizički medij pri povezivanju uređaja i najčešće se klasificiraju prema njihovom geografskom dometu. Bežične osobne komunikacijske mreže kao što je Bluetooth namijenjene su za kratkodometne komunikacije, najčešće kao zamjena žičnih medija za perifernu opremu. Bežične lokalne komunikacijske mreže poput HipeLAN-a, HomeRF-a i IEEE 802.11 koriste se za bežičnu komunikaciju na području jedne zgrade i njene okolice te pružaju dopunu ili nadogradnju žičnim lokalnim mrežama. Bežične gradske komunikacijske mreže kao što su Free Space Optics i IEEE 802.16 WiMAX omogućuju bežično umrežavanje na širem gradskom području uz pružanje velike mobilnosti, dometa, pristupa Internetu i rješenje za problem zadnje milje većem broju korisnika. Bežične komunikacijske mreže širokog područja, primarno ćelijski te satelitski komunikacijski sustavi omogućuju bežičnu povezivost na globalnoj razini.

IEEE 802.11 komercijalnog naziva Wi-Fi je najrašireniji standard za pružanje bežične veze fiksnim, mobilnim i mobilnim stanicama u pokretu. Od 1997. godine pa do danas izmijenile su se mnoge generacije standarda i sa svakom generacijom se poboljšavaju i proširuju njegove mogućnosti. IEEE 802.11 definiran je na podsloju kontrole pristupa mediju te na fizičkom sloju OSI modela. Podsloj kontrole pristupa mediju zadužen je za povezivanje, dostavu podataka, timing i sinkronizaciju te upravljanje napajanjem. Fizički sloj obavlja funkcije osluškivanja medija, te radnje vezane za prijenos i prijam podataka. Definirano je nekoliko fizičkih slojeva te se trenutne generacije zasnivaju na OFDM tehnologiji.

Standard IEEE 802.11 definira osnovne komponente koje sudjeluju u bežičnoj komunikaciji. Te komponente su pristupne točke, klijentski uređaji, integracijski servisi, distribucijski sustavi, bežični distribucijski sustavi i identifikatori skupa usluga. Uz komponente definirani su načini na koji one mogu ostvariti komunikaciju u obliku skupova usluga. Osnovni skup usluga predstavlja jednu pristupnu točku i pripadajuće klijentske uređaje, a prošireni skup usluga kombinaciju više povezanih osnovnih skupova usluga. Neovisni skup usluga predstavlja mrežu međusobno povezanih klijentskih uređaja bez pristupne točke, a isprepleteni skup mrežu međusobno bežično povezanih pristupnih točaka.

Unutar standarda definirane su osnovne mjere sigurnosti u obliku autentifikacije i enkripcije. Autentifikacija može biti u obliku autentifikacije otvorenog sustava ili autentifikacije dijeljenim ključem. U pogledu enkripcije postoji nekoliko mogućnosti među kojima su najčešće WEP, WPA i WPA2.

Kao prijenosni medij u bežičnim komunikacijskim mrežama koriste se elektromagnetski valovi. Sastoje se od oscilirajućih i međusobno okomitih električnih i magnetskih polja, okomitih na smjer širenja vala. Elektromagnetski valovi putuju brzinom svjetlosti u vakuumu, a njihova brzina u ostalim medijima ovisi o svojstvima medija. Podložni su pojavama kao što su apsorpcija, refrakcija, refleksija, difrakcija, disperzija i interferencija te se u atmosferi šire u obliku prostornog, izravnog, reflektiranog ili površinskog vala. Elektromagnetski valovi grupiraju se prema njihovim frekvencijama, valnim duljinama i energijama u elektromagnetski spektar. Te grupe su radiovalovi, mikrovalovi, infracrveno zračenje, vidljiva svjetlost, ultraljubičasto zračenje, rendgensko zračenje i gama zrake.

Za potrebe izrade praktičnoga djela završnoga rada opisano je 5 programskih alata: Acrylic Wi-Fi Home, Ekahau HeatMapper, Vistumbler, NetSpot i WirelessMon. Opisani programski alati pripadaju među pristupačnije s obzirom da se radi o besplatnim ili testnim (eng. trial) inačicama. Prema navedenim kriterijima napravljena je usporedba mogućnosti programskih alata te je odabran WirelessMon za praktični dio.

Analize bežične mreže Eduroam na lokaciji ZUK Borongaj obavljena je dva puta: 2016. i 2019. godine. Izvorno mjerenje sastojalo se od ručnog mjerenja u točkama od interesa te interpolacije izmjerenih vrijednosti. Ponovljeno mjerenje sastojalo se od automatskog mjerenja potpomognutim GPS uređajem, također uz interpolaciju. Izvorno i ponovljeno mjerenje se u velikom mjeri poklapaju. Za ona područja gdje se ne poklapaju, razlozi postojanja razlika u dobivenim rezultatima mogu biti razni. Mogući razlozi su promjena u preprekama između mjeritelja i pristupnih točaka, premještanje pristupnih točaka, promjena snage odašiljanja, promjena interferencijskih signala u okolini ili razlika u rukovanju sa RSSI s obzirom da je korištena različita računalna oprema za izvorno i ponovljeno mjerenje.

Trenutno izmjereno stanje mreže pokazuje zadovoljavajuću snagu primljenoga signala u područjima gdje postoji veća koncentracija studenata. Ta područja su istočna strana restorana, cesta uz restoran između objekata 69 i 62, cesta južno od restorana do kraja objekta 72, oba parkirališta, pješački put između objekata 71 i 72 te okolice objekata 67, 62 i 63. Za područja koja trenutno ne zadovoljavaju kriterij zadovoljavajuće snage signala a također sadrže veću koncentraciju studenata: igrališta istočno od restorana, južna autobusne stanice,

prilazi objektima 64 i 65, okolica i prilaz objektu 210, pješačke staze između objekata 69 i 71 itd. Preporučljivo bi bilo dodavanje pristupnih točaka na odgovarajućim lokacijama kako bi se postigla homogenost područja pokrivanja. Nadalje, tijekom mjerenja detektirane su 93 pristupne točke u „n“ i „g“ standardima. Prelaskom na „ac“ ili kombinaciju „ac“ i „n“ standarda postigla bi se veća pokrivenost te bolje performanse bežične mreže.

Za potpuniju analizu mreže potrebna su dodatna mjerenja koja zahtijevaju bolju opremu i veći pristup mreži. To su mjerenja odnosa signala i šuma, mjerenje propusnosti za sve pristupne točke na različitim udaljenostima, analiza međukanalne interferencije za susjedne pristupne točke te provjera roaming mogućnosti između pristupnih točaka.

Literatura

- [1] Grigorik I. High Performance Browser Networking. Sebastopol: O'Reilly Media Inc; 2013.
- [2] Bartz RJ. Certified Wireless Technology Administrator Official Study Guide Second Edition. Indianapolis: John Wiley & Sons Inc; 2012.
- [3] Olenawa JL. Guide to Wireless Communications Third Edition. Boston: Course Technology; 2012.
- [4] Gutiérrez JA, Callaway EH, Barrett RL. Low-Rate Wireless Personal Area Networks. New York: IEEE Press; 2004.
- [5] Tanenbaum AS, Wetherall DJ. Computer Networks Fifth Edition. Boston; Prentice Hall; 2011.
- [6] Hamidović H. WLAN-Bežične lokalne računalne mreže. Zagreb: Info Press; 2010.
- [7] Bažant A. Osnovne arhitekture mreža. Zagreb: Element; 2014.
- [8] http://www.cazitech.com/HomeRF_Archives.htm (pristupljeno lipanj 2019.)
- [9] Kale KV, Mehrotra SC, Manza RR. Advances in Computer Vision and Information Technology. New Delhi: International Publishing House Pvt Ltd; 2007.
- [10] Pahlavan K, Krishnamurthy P. Networking Fundamentals Wide, Local and Personal Area communications. Chichester: John Wiley & Sons Ltd; 2009.
- [11] Padarić D, Kukec M. WIMAX 802.16 standard. Tehnički glasnik [Internet]. 2009;3(1-2):54-57.
- [12] Comer DE. Computer Networks and Internets Fifth Edition. Upper Saddle River: Pearson Education Inc; 2009.
- [13] Tsang DHK, Kühn PJ. Broadband Communications Convergence of Network Technologies. New York: Springer Science+Business Media LLC; 2000.
- [14] Muštra M. Autorizirana predavanja iz Mobilnih komunikacijskih sustava. Zagreb: Fakultet Prometnih Znanosti; 2015.
- [15] Libretex libraries portal. Preuzeto sa:
[https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_\(Physical_and_Theoretical_Chemistry\)/Spectroscopy/Fundamentals_of_Spectroscopy/Electromagnetic_Radiation](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Spectroscopy/Fundamentals_of_Spectroscopy/Electromagnetic_Radiation) [Pristupljeno: lipanj 2019.]

- [16] Kezić D. Radni materijali iz Osnova Radiotehnike za Pomorske Nautičare. Split: Pomorski Fakultet u Splitu; 2008.
- [17] Coleman DD, Westcott DA. Certified Wireless Network Administrator Official Study Guide Fourth Edition. Indianapolis: John Wiley & Sons Inc; 2014.
- [18] Geier J. Designing and Deploying 802.11 Wireless Networks: A Practical Guide to Implementing 802.11n and 802.11ac Wireless Networks Second Edition. Indianapolis: Cisco Press; 2015.
- [19] U-blox 7 Receiver Description. Preuzeto sa:
https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/u-blox7-V14_ReceiverDescriptionProtocolSpec_%28GPS.G7-SW-12001%29_Public.pdf
[Pristupljeno: srpanj 2019.]
- [20] InformIT portal. Preuzeto sa:
<http://www.informit.com/articles/article.aspx?p=19825&seqNum=4> [Pristupljeno: srpanj 2019.]
- [21] Introduction to Wireless LAN Measurements. Preuzeto sa:
http://download.ni.com/evaluation/rf/Introduction_to_WLAN_Testing.pdf [Pristupljeno: srpanj 2019.]
- [22] Wireless Network Security blog. Preuzeto sa:
<http://wirelessnetworksecurity.blogspot.com/2013/02/security-features-of-80211-wireless-lans.html> [Pristupljeno: srpanj 2019.]
- [23] Metageek portal. Preuzeto sa: <https://www.metageek.com/training/resources/wifi-signal-strength-basics.html> [Pristupljeno: srpanj 2019.]

Popis kratica

AES	Napredni standard enkripcije (eng. Advanced Encryption Standard)
AP	Pristupna točka (eng. Access Point)
ASN	Pristupna mreža usluga (eng. Access Service Network)
ATM	Asinkroni način prijenosa (eng. Asynchronous Transfer Mode)
AuC	Autentifikacijski centar (eng. Authentication center)
BS	Bazna postaja (eng. Base station)
BSC	Upravljački modul baznih postaja (eng. Base Station Controller)
BSA	Područje osnovne usluge (eng. Basic Service Area)
BTS	Bazna postaja (eng. Base Transceiver System)
BSS	Podsustav baznih postaja (eng. Base Station Subsystem)
BSSID	Identifikator osnovnog skupa usluga (eng. Basic Service Set Identifier)
CA	Osluškivanje medija (eng. Carrier Sense)
CAC	Kontrola pristupa kanalu (eng. Channel Access control)
CCMP	(eng. Counter Mode Cipher Block Chaining Message Authentication Code Protocol)
CSMA/CA	Metoda višestrukog pristupa osluškivanjem medija sa izbjegavanjem sudara (eng. Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)
CSN	Mreža za usluge spajanja (eng. Connectivity Service Network)
DCF	Distribuirana koordinacijska funkcija (eng. Distributed Coordination Function)
DECT	(eng. Digital Enhanced Cordless Telecommunication)
DS	Distribucijski sustav (eng. Distribution System)

DSM	Medij distribucijskog sustava (eng. Distribution System Medium)
DSS	Servisi distribucijskog sustava (eng. Distribution System Services)
DSSS	Prošireni spektar izravnim širenjem spektra (eng. Direct Sequence Spread Spectrum)
EIR	Registar korisničke opreme (eng. Equipment Identity Register)
ERP	Fizički sloj proširenog stupnja (eng. Extended rate PHY)
ESS	Prošireni skup usluga (eng. Extended Service Set)
ETSI	Europski institut za telekomunikacijske norme (eng. European Telecommunication Standards Institute)
FDD	Dupleks sa frekvencijskom podjelom (eng. Frequency Division Duplex)
FHSS	Prošireni spektar skakanja frekvencija (eng. Frequency Hopping Spread Spectrum)
FSO	(eng. Free Space Optics)
GEO	Geostacionarna orbita oko Zemlje (eng. Geostationary Earth Orbit)
GW	Mrežni pristupnik (eng. Gateway)
HCF	Hibridna koordinacijska funkcija (eng. Hybrid Coordination Function)
HiperLan	(eng. High-Performance Radio LAN)
HLR	(eng. Home Radio Frequency)
HomeRF	(eng. Home Radio Frequency)
HR-DSSS	Prošireni spektar izravnim širenjem spektra visokog stupnja (eng. High Rate Direct Sequence Spread Spectrum)
HT	Fizički sloj visoke propusnosti (eng. High-Throughput PHY)
HWMP	Hibridni protokol za bežične isprepletene mreže (eng. Hybrid Wireless Mesh Protocol)
IBSS	Neovisni skup osnovnih usluga (eng. Independent Basic Service Set)

IEEE	Institut inženjera elektrotehnike i elektronike (eng. Institute of Electrical and Electronics Engineers)
IFS	Intervali razmaka (eng. Interframe Space Intervals)
IR	Infracrveni (eng. Infrared)
IS	Integracijski servis (eng. Integration Service)
ISI	Među-simbolna interferencija (eng. Inter-Symbol Interference)
L2CAP	(eng. Logical Link Control Adaption Protocol)
LEO	Niska orbita oko Zemlje (eng. Low Earth Orbit)
LMDS	(eng. Local Multipoint Distribution Service)
LOS	Optička vidljivost (eng. Line-Of-Sight)
MAC	Kontrola pristupa mediju (eng. Medium Access Control)
MBSS	Isprepleteni skup osnovnih usluga (eng. Mesh Basic Service Set)
ME	Mobila oprema (eng. Mobile Equipment)
MEO	Srednje visoka orbita oko Zemlje (eng. Medium Earth Orbit)
MIMO	Višestruki ulaz višestruki izlaz (eng. Multiple-Input Multiple-Output)
MMDS	(eng. Multichannel Multipoint Distribution Service)
MS	Pokretne postaje (eng. Mobile Stations)
MSC	Mobilna Centrala (eng. Mobile Switching Centre)
NCS	Postaja za upravljanje mrežom (eng. Network Control Station)
NIC	Mrežna kartica (eng. Network Interface Card)
NSS	Mrežni i prospojnički podsustav (eng. Network and Switching Subsystem)
NLOS	Bez prisustva izravne optičke vidljivosti (eng. Non-Line-Of-Sight)
OFDM	Frekvencijski multipleks ortogonalnih podnosilaca (eng. Orthogonal Frequency Division Multiplex)

OFDMA	Ortogonalni frekvencijski raspodijeljeni višestruki pristup (eng. Orthogonal Frequency Division Multiple Access)
OSA	Autentifikacija otvorenog sustava (eng. Open-System Authentication)
OSI	(eng. Open System Interconnection)
PCF	Centralizirana koordinacijska funkcija (eng. Point Coordination Function)
PLCP	(eng. Physical Layer Convergence)
PMD	(eng. Physical Medium Dependent)
PSK	Unaprijed dijeljeni ključ (eng. Pre-Shared Key)
PSM	Mod uštede energije (eng. Power Save Mode)
QAM	Kvadratura amplitudna modulacija (eng. Quadrature Amplitude Modulation)
QoS	Kvaliteta usluge (eng. Quality of Service)
QPSK	Kvadratura fazna modulacija (eng. Quadrature Phase-Shift Keying)
RSSI	Indikator snage primljenoga signala (eng. Received Signal Strength Indicator)
RTS/CTS	(eng. Request-to-Send/Clear-To-Send)
SC	Jedan nosilac (eng. Single Carrier)
SIM	Modul za identifikaciju pretplatnika (eng. Subscriber Identity Module)
SKA	Autentifikacija dijeljenim ključem (eng. Shared-Key Authentication)
SNR	Odnos signal-šum (eng. Signal-to-Noise-Ratio)
SS	Prošireni spektar (eng. Spread Spectrum)
SS	Korisničke postaje (eng. Subscriber Stations)
SSID	Identifikator skupa usluga (eng. Service Set Identifier)
STA	Postaja (eng. Station)
SWAP	(eng. Shared Wireless Access Protocol)

TDD	Dupleks sa vremenskom podjelom (eng. Time Division Duplex)
TKIP	(eng. Temporal Key Integrity Protocol)
VHT	Fizički sloj vrlo visoke propusnosti 6-GHz (eng. Very Hight-Throughput 6-GHz)
VLR	Registar gostujućih korisnika (eng. Visitor Location Register)
WDS	Bežični distribucijski sustav (eng. Wireless Distribution System)
WEP	(eng. Wireless Equivalent Privacy)
Wi-Fi	(eng. Wireless Fidelity)
WiMAX	(eng. Worldwide Interoperability for Microwave Access)
WLAN	Bežične lokalne mreže (eng. Wireless Local Area Network)
WMAN	Bežične gradske mreže (eng. Wireless Metropolitan Area Network)
WPA	(eng. Wi-Fi Protected Access)
WPAN	Bežične osobne mreže (eng. Wireless Personal Area Network)
WWAN	Bežične mreže širokog područja (eng. Wireless Wide Area Network)
ZUK	Znanstveno učilišni kampus

Popis tablica

Tablica 1. Primjer podjele bežičnih mreža	3
Tablica 2. Usporedba karakteristika standarda IEEE 802.11	23
Tablica 3. Usporedba obrađenih programskih alata	44
Tablica 4. Razine snage primljenoga signala	51

Popis slika

Slika 1. Arhitektura Bluetooth protokola.....	6
Slika 2. Kategorije WLAN-ova: a) Infrastrukturni WLAN i b) neovisni WLAN.....	8
Slika 3. Osnovna arhitektura WiMAX-a	11
Slika 4. Osnovna arhitektura ćelijskih mreža	13
Slika 5. Arhitektura satelitskih sustava.....	16
Slika 6. 802.11 pruža funkcije vezane za sloj podatkovne veze i fizički sloj.....	17
Slika 7. Osnovni skup usluga.....	26
Slika 8. Primjeri korištenja ESS-a: a) djelomično preklapanje, b) nomadski roaming, c) kolokacija	27
Slika 9. IBSS topologija.....	27
Slika 10. Širenje Elektromagnetskog vala	31
Slika 11. Elektromagnetski spektar	33
Slika 12. Prikaz različitih načina širenja valova	34
Slika 13. Osnovno sučelje programa Acrylic Wi-Fi Home te prikaz kvalitete mreže.....	37
Slika 14. Sučelje programa Ekahau HeatMapper	38
Slika 15. Sučelje programa Vistumbler zajedno sa Google Earth prikazom.....	39
Slika 16. Prikaz Discovery (lijevo) te Survey (desno) sučelja programa	40
Slika 17. Osnovno grafičko sučelje programa WirelessMon i uvećani prikaz glavnih kartica.....	41
Slika 18. Primjer karte snage primljenog signala korištenjem programa WirelessMON.....	42
Slika 19. Redoslijed mjerenja na lokaciji ZUK Borongaj	46
Slika 20. Izmjerene vrijednosti na gornjem dijelu karte	47
Slika 21. Izmjerene vrijednosti na srednjem dijelu karte.....	47
Slika 22. Izmjerene vrijednosti na donjem dijelu karte	48
Slika 23. Interpolirana karta vrijednosti izvornog mjerenja na lokaciji ZUK Borongaj	48
Slika 24. Ponovljeno mjerenje na ZUK Borongaj	49
Slika 25. Interpolirana karta za ponovljeno mjerenje na lokaciji ZUK Borongaj	49

Slika 26. Prikaz područja prihvatljive i neprihvatljive snage primljenoga signala 52



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj završni rad
isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na
objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz
necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj
visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu završnog rada
pod naslovom Ispitivanje kvalitete signala bežične komunikacijske
mreže

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom
repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

U Zagrebu, 30.8.2019

Student/ica:

Tomislav Gubrd
(potpis)