



UNIVERZITET U BANJOJ LUCI
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET



**ANALIZA MOGUĆNOSTI IMPLEMENTACIJE
LoRaWAN BEŽIČNE MREŽE NA PODRUČJU GRADA
BANJE LUKE**

MASTER RAD

Mentor:

Doc. dr Željko Ivanović

Kandidat:

Saša Verić

Banja Luka, 2019.



UNIVERSITY OF BANJA LUKA
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING



**ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF
IMPLEMENTATION OF LoRaWAN WIRELESS
NETWORK IN THE BANJA LUKA CITY AREA**

MASTER THESIS

Mentor:

Doc. dr Željko Ivanović

Candidate:

Saša Verić

Banja Luka, 2019.

Informacije o mentoru i master radu

Mentor: doc. dr Željko Ivanović, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Banjoj Luci

Naslov master teze: Analiza mogućnosti implementacije LoRaWAN bežične mreže na području grada Banje Luke

Rezime: U ovom radu su predstavljene LoRa i LoRaWAN tehnologije, koje se intenzivno koriste u IoT sistemima. Urađena su teoretska razmatranja i poređenja sa drugim sličnim tehnologijama. Analizirane su karakteristike LoRa prenosa kao što su CSS modulacija, bitska i simbolska brzina, frekvencijski opsezi, otpornost na smetnje, domet i ortogonalnost. Dat je osvrt i na demodulaciju, osjetljivost prijemnika i zahtijevane odnose signal-šum. Uz fizički sloj, LoRaWAN definiše i komunikacioni protokol na mrežnom sloju i arhitekturu sistema. LoRaWAN arhitekturu čine mrežni serveri, *gateway*-i i krajnji uređaji (A, B ili C klase). U radu je opisan i format LoRaWAN poruka, sigurnost u komunikaciji i frekvencijski planovi. U eksperimentalnom dijelu je testiran LoRa/LoRaWAN koncept pomoću uređaja američke firme *Multitech*. Urađena su mjerenja na području grada Banje Luke, pomoću *gateway*-a i testnog uređaja. Na mape grada su unesene tačke mjerenja i analizirani su jačina primljenog signala, brzine prenosa, margine i odnosi signal-šum. Mjerenja su vršena i u *indoor* scenariju unutar jedne poslovne zgrade. Na osnovu rezultata mjerenja i odgovarajućih grafičkih predstava izvedeni su zaključci o mogućnostima realizacije LoRaWAN bežične mreže na području grada Banje Luke i unutar stambeno-poslovnih objekata.

Ključne riječi: Internet of Things, LPWAN, LoRa, CSS modulacija, LoRaWAN

Naučna oblast: Inženjerstvo i tehnologija

Naučno polje: Elektrotehnika, elektronika i informaciono inženjerstvo

Klasifikaciona oznaka: T 180

Tip odabrane licence Kreativne zajednice: CC BY-NC

Komisija: doc. dr Slavko Šajić, predsjednik
doc. dr Željko Ivanović, mentor
doc. dr Mladen Knežić, član

Information about mentor and master thesis

Mentor: Dr Željko Ivanović, Asst. Prof., Faculty of Electrical Engineering, University of Banja Luka

Title of master thesis: Analysis of the Possibility of Implementation of LoRaWAN Wireless Network in the Banja Luka City Area

Abstract: This paper presents LoRa and LoRaWAN technologies, which are intensively used in IoT systems. Theoretical considerations and comparisons with other similar technologies were made. LoRa transmission characteristics such as CSS modulation, bit and symbol rates, frequency bands, interference resistance, range, orthogonality were analyzed. There is also a review of the demodulation, receiver sensitivity and the required signal-to-noise ratio. In addition to the physical layer, LoRaWAN also defines a communication protocol on the network layer and system architecture. LoRaWAN architecture consists of network servers, gateways and end devices (A, B or C class). The LoRaWAN message format, communication security and frequency plans are described in this paper. In the experimental part, the LoRa/LoRaWAN concept was tested using the devices of the American company Multitech. Measurements were performed in the area of Banja Luka, using a gateway and test device. The measurement points were entered on the city maps and the strength of the received signal, data rates, margin, signal-to-noise ratio were analyzed. Measurements were also performed in the indoor scenario within a single office building. On the basis of the results of measurements and corresponding graphic representations, conclusions about the possibilities of realization of the LoRaWAN wireless network in the area of Banja Luka and within residential and commercial buildings were made.

Keywords: Internet of Things, LPWAN, LoRa, CSS modulation, LoRaWAN

Scientific area: Engineering and Technology

Scientific field: Electrical engineering, electronics and information engineering

Classification code: T 180

Creative Commons licence type: CC BY-NC

Evaluation committee: Asst. Prof. Dr Slavko Šajić, Chairperson
Asst. Prof. Dr Željko Ivanović, Supervisor
Asst. Prof. Dr Mladen Knežić, Member

*Završni rad II ciklusa studija posvećujem roditeljima
Nadi i Slobodanu, sestri Sanji i djevojci Dragani*

Sadržaj

Lista tabela	iv
Lista slika	v
Zahvalnice	vii
1. Uvod	1
1.1 Predmet istraživanja	2
1.2 Cilj istraživanja i očekivani rezultati.....	3
1.3 Sadržaj rada	3
2. IoT	5
2.1 Definisanje IoT koncepta	7
2.2 Oblasti primjene	8
2.3 Pametni gradovi.....	12
2.3.1 Servisi u pametnom gradu	13
3. LPWAN tehnologije	16
3.1 Sigfox	17
3.2 Weightless SIG.....	18
3.3 Ingenu.....	19
4. LoRa	21
4.1 Prenos u proširenom spektru	22
4.1.1 Shannon-Hartley-eva teorema	22
4.1.2 Principi prenosa u proširenom spektru	23
4.2 Chirp Spread Spectrum	26
4.3 LoRa Spread Spectrum.....	29

4.3.1	Ortogonalnost LoRa signala	33
4.3.2	LoRa demodulacija (dekodovanje).....	36
4.3.3	Budžet linka	39
4.4	Ključne osobine LoRa modulacije.....	40
4.4.1	Skalabilan frekvencijski opseg	40
4.4.2	Konstantna amplituda / Mala potrošnja	41
4.4.3	Visoka robusnost.....	41
4.4.4	Otpornost na Doppler-ov efekat i na višestruko prostiranje (feding)	41
4.4.5	Povećan domet	41
4.4.6	Povećan kapacitet mreže.....	42
4.4.7	Lokalizacija.....	42
4.5	Format LoRa fizičkog okvira	42
4.5.1	Preambula	43
4.5.2	Opciono zaglavlje (PHDR – PHY Header)	43
4.5.3	Vrijeme prenosa paketa (Packet on-air time).....	44
5.	LoRaWAN	46
5.1	LoRaWAN MAC sloj.....	47
5.2	Mrežna arhitektura	48
5.3	Klase krajnjih uređaja.....	49
5.3.1	Klasa A.....	50
5.3.2	Klasa B.....	52
5.3.3	Klasa C.....	53
5.4	Format LoRaWAN poruka.....	54
5.4.1	PHYPayload.....	55
5.4.2	MHDR (MAC header) – MAC zaglavlje.....	56
5.4.3	MACPayload.....	57
5.4.4	Fport (Port Field)	57
5.4.5	FHDR (Frame header) – Zaglavlje okvira	57
5.4.6	FCtrl (Control Field).....	58

5.5	MAC komande	59
5.6	Sigurnost u LoRaWAN	60
5.7	Frekvencijski planovi	63
5.7.1	EU863-870	63
5.7.2	US902-928	64
6.	Eksperimentalni rezultati	65
6.1	MultiConnect®Conduit™ IP67 Base Station MTCDTIP-220A-868-OP	65
6.2	MTCAP-LEU1	68
6.3	MultiConnect® mDot™ Box MTDOT-BOX-G-868	69
6.4	Rezultati mjerenja na području grada Banje Luke	72
6.5	Rezultati mjerenja unutar poslovnog objekta	80
7.	Zaključak	84
8.	Bibliografija	87
9.	Prilog	90
9.1	Rezultati mjerenja na području grada Banje Luke	90
9.2	Tlocrti svih etaža poslovnog objekta sa označenim tačkama mjerenja	102
9.3	Rezultati mjerenja unutar poslovnog objekta	106
10.	Biografija	124

Lista tabela

Tabela 2.1 Zahtjevi za razne servise u pametnim gradovima [1]	15
Tabela 3.1 Pregled karakteristika nekoliko tehnologija za IoT [26].....	20
Tabela 4.1 Bitske brzine	32
Tabela 4.2 Osjetljivost SX1272/1273 primopredajnika za različite parametre LoRa signala	40
Tabela 4.3 Zahtijevani odnosi signal-šum (SNR) za odgovarajuće faktore proširenja	40
Tabela 5.1 Tip MAC poruke u zavisnosti od vrijednosti tri bita u MType polju	56
Tabela 5.2 MAC komande i njihov opis	60
Tabela 5.3 Frekvencijski planovi u zavisnosti od regiona u kome se koriste	63
Tabela 5.4 Moguće brzine prenosa za frekvencijske kanale u ISM opsegu 868 MHz.....	64
Tabela 6.1 Karakteristike bazne stanice (gateway-a) MTCDTIP-220A-868-OP [42]	66
Tabela 6.2 Fizičke karakteristike Indoor Gateway-a MTCAP-LEU1 [43].....	68
Tabela 6.3 Operacioni modovi rada uređaja MTDOT-BOX-G-868 [44].....	71

Lista slika

Slika 2.1 Porast broja IoT uređaja u svijetu	7
Slika 4.1 Proširivanje spektra direktnom sekvencom – DSSS tehnika [28]	24
Slika 4.2 Demodulacija (sužavanje spektra) DSSS signala [28]	25
Slika 4.3 Chirp signali u vremenskom domenu [32]	27
Slika 4.4 Spektrogram up-chirp i down-chirp signala [32]	27
Slika 4.5 Spektralna gustina snage chirp impulsa [31]	28
Slika 4.6 Osnovni i ciklično pomjeren LoRa chirp simbol [34]	31
Slika 4.7 LoRa simboli sa odgovarajućim cikličnim pomjerajima [34]	32
Slika 4.8 LoRa simboli koji nisu ortogonalni [35]	34
Slika 4.9 Ortogonalni LoRa simboli [35]	35
Slika 4.10 Kombinacije SF i BW koje su (nisu) ortogonalne [35]	35
Slika 4.11 Uprošćeni blok dijagram LoRa demodulacije [32]	36
Slika 4.12 Primjer LoRa poruke (4 preambulska, 2 sinhro i 4 simbola podataka) [36]	37
Slika 4.13 Dekodirana LoRa poruka (4 preambulska, 2 sinhro i 4 simbola podataka) [36]	37
Slika 4.14 Spektrogram dekodirane LoRa poruka sa 100 simbola podataka [36]	38
Slika 4.15 Vrijednost LoRa simbola nakon demodulacije	38
Slika 4.16 Format LoRa fizičkog okvira	42
Slika 4.17 Spektrogram fizičkog LoRa okvira [30]	44
Slika 5.1 LoRa protokol stek (aplikativni, MAC i fizički sloj)	47
Slika 5.2 Arhitektura LoRaWAN mreže [25]	49
Slika 5.3 Arhitektura LoRaWAN mreže uključujući i aplikativni server [38]	49
Slika 5.4 Klase LoRaWAN uređaja (zavisno od trajanja baterije i kašnjenja) [5]	50
Slika 5.5 Raspored transmisionog i prijemnih vremenskih slotova kod uređaja klase A [5]	51

Slika 5.6 Vremenski slotovi kod uređaja klase B [5].....	53
Slika 5.7 Vremenski slotovi kod uređaja klase C [5].....	54
Slika 5.8 Format LoRaWAN poruke (okvira)	55
Slika 5.9 Struktura korisnog dijela poruke (Payload).....	55
Slika 5.10 Struktura MAC zaglavlja.....	56
Slika 5.11 MAC Payload	57
Slika 5.12 Frame header - FHDR	57
Slika 5.13 FCtrl za uplink okvire.....	58
Slika 5.14 FCtrl za downlink okvire.....	58
Slika 5.15 OTAA procedura pridruživanja [40]	62
Slika 5.16 Uplink i downlink kanali za frekvencijski plan US902-928 [41].....	64
Slika 6.1 Izgled kućišta bazne stanice (gateway-a) MTCDTIP-220A-868-OP [42]	66
Slika 6.2 Web interfejs za upravljanje i konfiguraciju gateway-a MTCDTIP-220A-868-OP ...	67
Slika 6.3 Izgled Access Point-a MTCAP-LEU1.....	68
Slika 6.4 Izgled MTDOT-BOX uređaja (a) i oznake tastera, indikatora i konektora (b) [45]....	70
Slika 6.5 Micro Developer Kit (MDK), model: MTMDK-ST-MDOT [46].....	71
Slika 6.6 AT komande za testni uređaj MTDOT-BOX-G-868.....	72
Slika 6.7 Izgled bazne stanice sa antenom na telekomunikacionom tornju.....	73
Slika 6.8 Podešavanja bazne stanice u testnom scenariju.....	74
Slika 6.9 Tačke mjerenja na području grada sa prosječnim jačinama primljenog signala	76
Slika 6.10 Položaj tačaka mjerenja sa prosječnim jačinama signala na satelitskom snimku	77
Slika 6.11 Najudaljenija tačka mjerenja sa direktnom optičkom vidljivošću.....	78
Slika 6.12 Kompletno pokrivanje urbanog područja Banje Luke sa tri bazne stanice	79
Slika 6.13 Prosječne jačine signala po tačkama mjerenja na 3D modelu poslovnog objekta	81

Zahvalnice

Veliku zahvalnost dugujem, na prvom mjestu, svom mentoru prof. dr. Željku Ivanoviću na predloženoj temi za istraživanje koja se pokazala aktuelnom i sveobuhvatnom, kao i na nesebičnoj pomoći, strpljenju i aktivnom učešću u svim fazama izrade i pisanja ovog rada. Takođe mu se zahvaljujem na korisnim savjetima, prijateljskim razgovorima i podršci od samog početka saradnje.

Zahvaljujem se kompaniji Lanaco d.o.o. koja mi je ustupila opremu na korištenje i na taj način u značajnoj mjeri omogućila kompletiranje ovog istraživanja.

Zahvaljujem se svojim roditeljima i sestri koji su mi bili velika podrška tokom cijelog školovanja, pa tako i izrade master rada.

I na kraju, posebnu zahvalnost dugujem svojoj djevojci Dragani koja je bila neumorni izvor motivacije i podrške da ovaj master rad dovedem do kraja.

U Banjoj Luci, juna 2019. godine

Saša Verić

1. Uvod

Posljednjih nekoliko godina u toku je intenzivan razvoj i proučavanje komunikacija i veza među uređajima koje se ostvaruju bez uticaja ljudskog faktora, ili uz njegov minimalan uticaj. Ovaj vid komunikacije se u literaturi sreće pod nazivom M2M (eng. *Machine-to-Machine Communications*). Prema nekim predviđanjima ubrzo poslije 2020. godine u svijetu će postojati više od 20 milijardi takvih uređaja povezanih u mrežu globalnih razmjera koja često nosi naziv Internet stvari ili IoT (eng. *Internet of Things*) [1].

U posljednje vrijeme IoT koncept postaje veoma značajan ako se uzme u obzir širok spektar interesantnih i korisnih primjena kao što su: proizvodnja, prevoz, zdravstvena njega, telemedicina, ekologija i zaštita životne sredine, iskorištenje prirodnih resursa, očitavanje raznih pametnih brojila, pametne mreže u energetici, pametni gradovi, pametne kuće i sl. [2].

Pošto je u ogromnoj mjeri zasnovan na bežičnoj komunikaciji između uređaja IoT podstiče istraživanja novih komunikacionih tehnologija. Komunikacija bežičnih senzorskih stanica je važna zbog prenosa podataka do centara gdje se ti podaci prikupljaju, obrađuju i koriste. U fokus budućih istraživanja dopijevaju autonomni sistemi koji mogu da pokriju velike površine sa minimalnim ulaganjem u infrastrukturu, kao i sa minimalnom potrošnjom električne energije i koji imaju mogućnost integracije i povezivanja velikog broja različitih senzora [3].

Da bi se, u što većoj mjeri, odgovorilo na komunikacione zahtjeve postavljene radi projektovanja IoT sistema, pojavio se cijeli opseg novih protokola i tehnologija. LPWAN (eng. *Low Power Wide Area Network*) je pojam u kome je sadržan niz takvih tehnologija, odnosno mreža koje pokrivaju široko područje, pri čemu imaju malu potrošnju električne energije. Dakle, dug životni vijek i niske cijene uređaja, zatim pokrivenost, odnosno domet, predstavljaju osnovne

karakteristike LPWAN tehnologija koje su značajne za IoT sisteme. Primjer LPWAN su i LoRa (eng. *Long Range*) i LoRaWAN (eng. *Long Range Wide Area Network*) tehnologije [4].

LoRa je tehnologija razvijena od strane američkog *Semtech*-a, koji je postavio standard ove tehnologije i koji proizvodi njene komponente [5]. Dalji pravac razvoja LoRa tehnologije se definiše od strane neprofitne organizacije *LoRa Alliance* koja je osnovana na Mobilnom svjetskom kongresu 2015. godine. Glavna prednost LoRa tehnologije je veliki domet koji u velikoj mjeri zavisi od okruženja i prepreka. Jedan čvor u idealnim uslovima može da pokrije i do nekoliko stotina kvadratnih kilometara. Dodatna prednost LoRa tehnologije je njena otpornost na interferencije. U skladu s tim, LoRa se koristi za projektovanje uređaja male potrošnje, povezanih u WAN mreže za potrebe M2M komunikacija ili za IoT [6], [7].

Za razliku od autorski zaštićenog LoRa standarda, LoRaWAN je otvoren standard koji je razvijen od strane *LoRa Alliance* [4]. LoRaWAN, uz fizički sloj, definiše komunikacioni protokol na mrežnom sloju, kao i arhitekturu sistema, dok LoRa tehnologija definiše samo fizički sloj preko kojeg se ostvaruje komunikacija širokog dometa. Protokol i arhitektura zajedno imaju veliki uticaj na potrošnju (trajanje baterije), kapacitet mreže, kvalitet servisa, sigurnost i zaštitu, kao i moguće primjene ove tehnologije. Osnovni elementi jedne LoRaWAN mreže su krajnji uređaji (čvorovi), *gateway* i mrežni server [6], [8], [9].

Poznavanje LoRa fizičkog sloja, kao i LoRaWAN komunikacionog protokola i arhitekture sistema, otvara široke mogućnosti za projektovanje mreže kao infrastrukture za mnoge IoT aplikacije. Konkretno, moguć je veliki broj primjena iz oblasti pametnih gradova. Gradovi (urbane zone) imaju specifične uslove u smislu prostiranja radio-signala, pa je od suštinske važnosti optimizacija arhitekture mreže, mjerenje jačine signala, odnosno dometa.

1.1 Predmet istraživanja

Teoretskim razmatranjem i pregledom osnovnih karakteristika LoRa i LoRaWAN tehnologija sa aspekta formata fizičkih okvira, modulacije, mogućeg dometa, životnog vijeka baterije, kapaciteta mreže, kvaliteta servisa, sigurnosti i zaštite stiče se slika o mogućnostima primjene ovih tehnologija na području jednog grada, konkretno Banje Luke. Uoprednom analizom sa sličnim tehnologijama, kao što su *Sigfox*, *Ingenu* i druge, istaknute su osnovne

prednosti i nedostaci LoRa i LoRaWAN tehnologija. Mjerenjem jačine prijemnog signala i ucrtavanjem odgovarajućih linija i tačaka na mapi grada Banje Luke, grafički je prikazana pokrivenost LoRaWAN bežičnom mrežom. Za potrebe mjerenja iskorišten je *gateway MultiConnect®Conduit™ IP67 Base Station MTCDTIP-220A-868-OP* i krajnji čvor *MultiConnect® mDot™ Box MTDOT-BOX-G-868*. Za uspostavljanje i analizu LoRaWAN mreže unutar stambeno-poslovnih objekata iskorišten je *indoor gateway MTCAP-LEU1*. Navedenu opremu proizvodi američka firma *Multitech*.

1.2 Cilj istraživanja i očekivani rezultati

Cilj istraživanja je upoznavanje sa LoRa i LoRaWAN tehnologijama i njihovim karakteristikama, kao i upoređivanje sa drugim sličnim bežičnim tehnologijama. Cilj je i analiza mogućnosti implementacije LoRaWAN mreže na području grada Banje Luke, kao i izrada mape pokrivenosti signalom korištenjem LoRaWAN *gateway*-a. Takođe, cilj je i utvrđivanje pokrivenosti signalom unutar jednog poslovnog objekta.

Na ovaj način se dolazi do objedinjavanja dostupnih informacija o LoRa i LoRaWAN tehnologijama i pregleda njihovih karakteristika. Na osnovu toga, ali i poređenjem sa drugim tehnologijama, projektanti IoT sistema i aplikacija će imati dovoljno podataka i parametara koji omogućavaju primjenu LoRaWAN tehnologije na području grada Banje Luke, kao i unutar stambeno-poslovnih objekata. Mjerenjem jačine signala dobija se grafički prikaz pokrivenosti LoRaWAN bežičnom mrežom.

1.3 Sadržaj rada

U drugom poglavlju su navedene najprihvaćenije definicije IoT koncepta. Ukratko su predstavljeni osnovni elementi i osnovne karakteristike IoT sistema. Dat je i osvrt na veoma širok spektar primjena IoT sistema i aplikacija u praksi, kao i niz faktora koje je potrebno razmotriti ili ispuniti pri projektovanju takvih sistema i aplikacija.

Kao izuzetno popularan koncept IoT podstiče istraživanja na mnogim poljima, a posebno na polju bežičnih komunikacionih tehnologija. LPWAN kao pojam koji obuhvata čitav niz

komunikacionih tehnologija i protokola, a koji zadovoljavaju kriterijume IoT sistema i aplikacija, tema je trećeg poglavlja.

Četvrto poglavlje je rezervisano za glavne karakteristike LoRa tehnologije, odnosno za fizički sloj ove tehnologije. Dat je osvrt na način modulacije signala, format fizičkih okvira, domet komunikacionog linka, potrošnje električne energije, te otpornosti na interferencije. Predstavljena je i međusobna veza i zavisnost bitske brzine, frekvencijskog opsega i faktora proširenja kod LoRa modulacije.

U petom poglavlju je opisana LoRaWAN tehnologija, koja za razliku od LoRa tehnologije, pored fizičkog sloja, sadrži i definiciju komunikacionih protokola na mrežnom sloju kao i samu arhitekturu kompletnog sistema. Osnovni elementi te arhitekture su krajnji čvorovi, *gateway* i mrežni server.

Detaljnije upoznavanje sa LoRaWAN *gateway*-ima (bazna stanica i *gateway* za unutrašnju upotrebu) i testnim uređajem američke firme *Multitech* je prikazano u šestom poglavlju. Zatim su, na određenim fizičkim udaljenostima, izmjerene jačine signala, brzine prenosa podataka i na svojevrsan način je dokazan koncept LoRa tehnologije. Ucertavanjem odgovarajućih linija i tačaka na mapi grada Banje Luke i na osnovu geografskih položaja na kojima je vršeno mjerenje dobijaju se potrebne informacije za korištenje ovih uređaja, ali i same tehnologije na području istog grada. Na sličan način je urađeno testiranje unutar stambeno-poslovnih objekata.

Posljednje poglavlje rada rezervisano je za završni osvrt na prednosti i nedostatke LoRa i LoRaWAN tehnologija do kojih se došlo teorijskim razmatranjima, kao i za sumiranje zaključaka do kojih se došlo testiranjem i izvršenim mjerenjima na području grada Banje Luke, kao i unutar jednog poslovnog objekta.

2. IoT

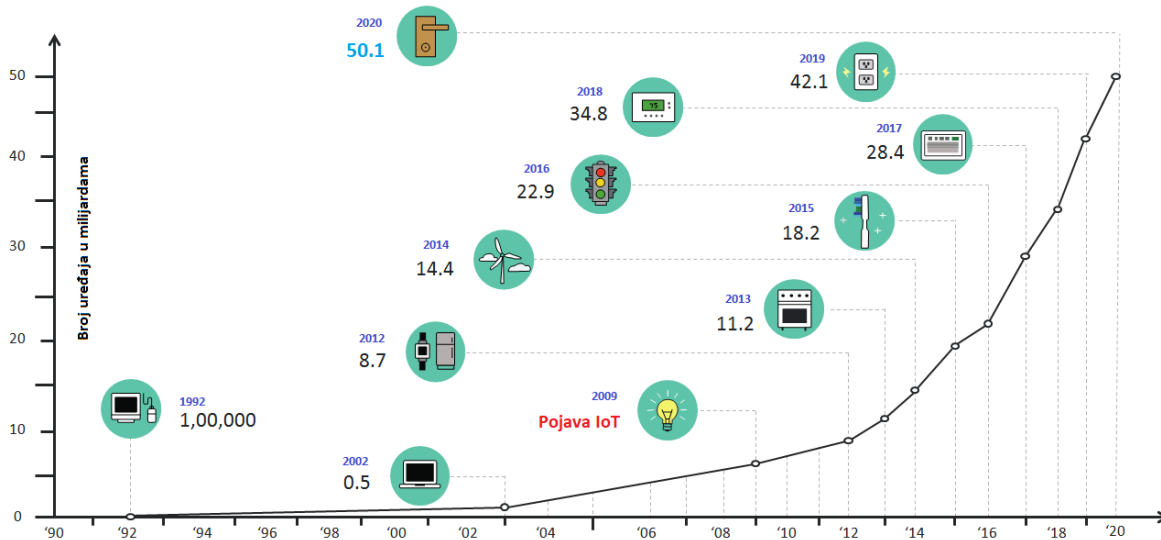
Sedamdesetih godina prošlog vijeka stvaranje modernog informatičkog društva doživljava pravu „eksploziju“. Kao posljedica toga, danas postoji Internet – globalna mreža u kojoj se prenos signala vrši digitalnim putem. Na samom početku Internet je korišten za komunikaciju međusobno udaljenih računara ili za razmjenjivanje elektronske pošte (eng. *e-mail*) među ljudima. Pored brojnih mogućih primjena Interneta, posljednjih 15 do 20 godina intenzivnim tempom se proučava i razvija komunikacija između uređaja, koja se ostvaruje bez uticaja ljudskog faktora ili sa njegovim minimalnim učešćem. Najčešće se ta komunikacija naziva M2M komunikacija. Očekuje se da će u svijetu krajem 2020. godine postojati preko 20 milijardi, a prema nekim predviđanjima i do 50 milijardi ovakvih uređaja. Ogromna većina tih uređaja će biti povezana u globalnu mrežu, koju najčešće nazivamo Internet uređaja (stvari) ili IoT [1].

Do prve upotrebe termina IoT došlo je 1999. godine u MIT Auto-ID centru. Tada je IoT podrazumijevao viziju okruženja u kojem se nalaze fizički objekti tagovani sa RFID (eng. *Radio-Frequency Identification*) transponderom sa jedinstvenom globalnom identifikacijom ID [10]. Odnosio se na stvari i njihove virtuelne predstave u strukturi sličnoj Internetu. U posljednje vrijeme IoT koncept postaje veoma važan ako se uzme u obzir širok spektar interesantnih i korisnih primjena, kao što su: proizvodnja, prevoz, zdravstvena njega, telemedicina, ekologija (recimo praćenje koncentracije gasova) i zaštita životne sredine, iskorištenje prirodnih resursa, očitavanje raznih pametnih električnih mjerača, pametne energetske mreže (eng. *smart grid*), pametne kuće (eng. *smart home*), pametni gradovi (eng. *smart city*) i sl. Detekcija događaja, heterogeni pristup i obrada informacija, primjena i servisi uz sigurnost i privatnost predstavljaju glavne komponente IoT sistema [2].

IoT, može se reći, predstavlja globalnu mrežnu infrastrukturu u kojoj su putem korištenja prikupljenih podataka i mogućnostima komunikacije spojeni fizički i virtuelni objekti. U ovu infrastrukturu su uključeni Internet, kao i druge mreže koje su u fazi razvoja. Infrastruktura će nuditi identifikaciju objekata, korištenje senzora i mogućnost povezivanja zasnovanu na razvoju nezavisnih kooperativnih servisa i aplikacija. Infrastrukturu će karakterisati visok stepen autonomnog prikupljanja podataka, javljanje o događajima, konektivnost i interoperabilnost [11].

Potencijal IoT koncepta gotovo da nema granice. Tako IoT aplikacije počinju da mijenjaju način na koji radimo i živimo, a pri tome štede vrijeme i resurse. IoT omogućava i nove pristupe za dalji razvoj i uvođenje inovacija. Takođe, omogućava upravljanje imovinom i razvoj novih modela poslovanja. Ostvarena je i komplementarnost sa računanjem u oblaku (eng. *Cloud Computing*), obradom velikih podataka (eng. *Big Data*) i budućim javnim mobilnim mrežama 5G [12]. Neki od faktora koji utiču na prodor IoT koncepta su: razvoj eko-sistema, odgovarajuće pravne norme i atmosfera povjerenja gdje su, pored ostalog, važni i aspekti identifikacije, privatnosti i sigurnosti.

Kao koncept IoT se bavi prisustvom žično ili bežično povezanih objekata, odnosno stvari u nekom okruženju. Svaki objekat ima adresu, pri čemu objekti mogu da komuniciraju, odnosno mogu da sarađuju u ostvarivanju odgovarajućih aplikacija i servisa u funkciji postizanja ciljeva koji su im zajednički. Na takav način dolazi do stvaranja „pametnog“ (eng. *smart*) svijeta, gdje realno, digitalno i virtuelno počinju da sarađuju u cilju dobijanja pametnog okruženja koje omogućava efikasnije korištenje niza djelatnosti, kao što su transport, iskorištenje energije i sl. Praktično, ovo predstavlja novu revoluciju u Internetu. Objekti imaju prepoznatljiv identitet i na osnovu međusobne interakcije i komunikacije sa ostalim objektima, sposobni su da donesu potrebne odluke u datim trenucima. Takođe, objekti mogu da pristupaju informacijama ili mogu da budu sastavni dijelovi kompleksnih servisa [13]. Drugim riječima, IoT je mreža koju čine fizički objekti sa ugrađenom komunikacionom tehnologijom, koja omogućava praćenje i međusobnu interakciju internih stanja objekata ili interakciju sa okolinom. Zbog toga se u upotrebu stavljaju efikasniji i bolji komunikacioni protokoli, senzori, zatim jeftinije komponente, procesori itd. U 2011. godini broj uređaja konektovanih na Internet je postao veći od broja ljudi na planeti. U literaturi je moguće pronaći nekoliko različitih procjena o broju povezanih uređaja u budućnosti [14]. Na slici 2.1 je prikazana jedna procjena rasta broja IoT uređaja u svijetu.



Slika 2.1 Porast broja IoT uređaja u svijetu

2.1 Definisane IoT koncepta

ITU (eng. *International Telecommunication Union*) i IERC (eng. *Internet of Things European Research Cluster*) definišu IoT kao dinamičku globalnu mrežnu infrastrukturu koja posjeduje mogućnosti samokonfigurisanja koje je zasnovano na upotrebi standardnih i interoperabilnih komunikacionih protokola. U toj infrastrukturi fizički i virtualni objekti posjeduju identitet, fizičke attribute i virtualnu personalnost, a putem inteligentnih interfejsa im je omogućena neprekidna integracija sa informacionom mrežom [15].

ITU grupa (eng. *ITU-T Study Group 13*) koja razvija i definiše standarde za NGN (eng. *Next Generation Networks*) definiše IoT kao globalnu infrastrukturu zasnovanu na trenutnim interoperabilnim informacijama i komunikacionim tehnologijama, kao i onim koje su u razvoju, a pri čemu ta infrastruktura omogućava upotrebu naprednih servisa tako što povezuje fizičke i virtualne objekte [16].

Poznate informaciono-komunikacione kompanije kao što su *Google, Apple i Cisco* već ulaze u biznis zasnovan na IoT. Slično i telekom operateri smatraju da će se i njihov „core“ biznis zasnivati na M2M i IoT. Jer, može se smatrati da IoT postaje mreža globalnog nivoa koja će spajati ljude, objekte i informacije (podatke). U upotrebu čak ulazi i sintagma Internet svega ili

IoE (eng. *Internet of Everything*). Ovdje treba biti oprezan i istaći da IoT ne podrazumijeva samo jednu tehnologiju, jer je to koncept koji podrazumijeva sveopšte povezivanje i funkcionisanje.

Na osnovu istraživanja grupe HLG-KET (eng. *High-Level Expert Group-Key Enabling Technologies*) neke od tehnologija kritičnih za budući razvoj IoT su [17]:

- Fotonika;
- Biotehnologija;
- Nanotehnologije;
- Mikro i nano elektronika;
- Napredni materijali;
- Napredni proizvodni sistemi.

Nabrojane tehnologije podržavaju razvoj IoT aplikacija, a dodatni razvoj omogućen je i globalnom primjenom IPv6 (eng. *Internet Protocol version 6*) protokola koji će biti zadužen za globalno adresiranje svih učesnika u IoT. Takođe, važno je vršiti smanjivanje gabarita IoT uređaja, kao i smanjenje njihove potrošnje.

2.2 Oblasti primjene

IERC smatra da IoT ima za cilj da stvori pametno okruženje i „samosvjesne“ stvari (proizvodi, prevoz, zgrade, kuće, energija, način života, zdravlje itd.) za primjene u ishrani, energetske efikasnosti, mobilnosti, digitalnom društvu i za primjene u zdravstvu [15].

Procjenjuje se da će ušteda u okviru proizvodnje i usluga iznositi i do 30%. Integracijom tehnologije i bržom analizom podataka dobiće se koordinisana i efikasnija sigurnost i tajnost na nivou gradova. Sigurnost se poboljšava i unutar zgrada. Pametni automobili će emitovati manje štetnih gasova. Smanjivanjem saobraćajnih gužvi i povećanjem dostupnosti usluga, znatno će biti olakšan život u gradovima. Ako se posmatra sigurnost, biometrika je već uveliko u fazi ugrađivanja u *smart* telefone, a ID i druge kartice takođe postaju nezaobilazne. Senzori više nisu „pametni“, nego postaju „inteligentni“ [2].

Razvojem novih tehnologija pojavljuju se i nove aplikacije, servisi i sami eko-sistemi. U oblastima poput zdravlja, industrije, korištenja energije, stambenih i poslovnih zgrada, transporta

i gradova, očekuje se najveća primjena IoT. U tom slučaju pored naziva svake od ovih oblasti može se dodati atribut „pametan“ (eng. *smart*) [18]. U nastavku, navedene su još neke oblasti primjene.

Pametna energetska mreža - Elektroenergetska mreža koja vrši integraciju informacionih tehnologija i obostrane komunikacije u cilju povećanja sigurnosti, pouzdanosti i ekonomičnosti korištenja električne energije, a pri čemu se vrši i redukcija GHG (eng. *Green House Gas*) pri generisanju električne energije, može se smatrati pametnom energetskom mrežom.

Briga o zdravlju (eng. *ehealth*) - Predviđa se da će primjena IoT u zdravstvenom sektoru biti jedan od glavnih pokretača na tehnološkom tržištu. Takođe, smatra se da će nekoliko stotina uređaja sa mogućnostima konekcije, a koji su vezani za zdravlje i brigu o zdravlju, biti u upotrebi do 2020. godine [15]. Često je u upotrebi termin *ehealth* koji obuhvata upotrebu informacionih i komunikacionih tehnologija u cilju olakšavanja i poboljšanja brige o zdravlju i medicinskih usluga. U suštini, radi se i o uvođenju odgovarajućih senzora koji mogu da prate vitalne organe pacijenata, rano otkrivanje kritičnih pojava i daljinsko pružanje određenih medicinskih tretmana.

Praćenje vode, hrane i odgovarajuća sigurnost - Organska hrana i voda spadaju u najvažnije prirodne resurse, a potrebe za njima postaju sve veće. Neki od istraživačkih izazova u ovoj oblasti su:

- Osigurano je praćenje vode i hrane na putu između proizvođača i korisnika pomoću jeftinih mehanizama od proizvođača do korisnika;
- Proces proizvodnje hrane i vode se smatra intelektualnom svojinom, pa se prema tome razvijaju i sigurni mehanizmi praćenja same proizvodnje;
- Sprečavanje unošenja falsifikovanih podataka tako što se osigura povjerenje i sigurna razmjena podataka između aplikacija i infrastrukture.

Kada je u pitanju monitoring vode, moguće je pratiti sljedeće:

- Kvalitet pitke vode;
- Curenje iz rezervoara za skladištenje;
- Upravljanje vodom u rezervoarima za skladištenje i praćenje potrošnje;
- Vlažnost zemljišta u voćnjacima i vinogradima;
- Mikroklima u staklenicima;

- Opšti uslovi na površinama sa sadnicama.

Mobilnost i transport - Ako se posmatra mogućnost povezivanja vozila na Internet, jasno je da se mogućnosti u transportu i saobraćaju drastično povećavaju, a takođe se pojavljuje i novi termin: IoV (eng. *Internet of Vehicles*). Jedan od izazova u takvim novim eko-sistemima (CPS i autonomna vozila) jeste prisustvo i ponašanje čovjeka, posebno sa aspekta sigurnosti i predvidljivosti. Akcenat je potrebno staviti i na ponašanje vozača u ovakvom mješovitom saobraćaju (ljudi i autonomno vođena vozila) [19].

Neki od predloženih koraka u ovom kontekstu su sljedeći:

- Uvođenje standarda za napone napajanja za odgovarajuće elektronske ploče;
- Projektovanje i proizvodnja komponenti koje se koriste u bidirekcionim operacijama i fleksibilnom naplaćivanju ukoliko se električna vozila koriste i za skladištenje energije;
- IoT je praktično nerazdvojni dio upravljanja vozilom i sistemom. Podaci prikupljeni pomoću senzora šalju se putem Interneta u servisne centre;
- Mogućnost IoT da upravlja i kontroliše saobraćaj. Upravljanje vozilima radi izbjegavanja saobraćajnih gužvi i optimizacije korištenja energije;
- Autonomno upravljanje i „komunikacija“ sa saobraćajnom infrastrukturom. Interakcija između vozila V2V (eng. *Vehicle-to-Vehicle*) i vozila i okoline V2I (eng. *Vehicle-to-Infrastructure*). Između ostalog, vožnja se prilagođava specifičnostima same saobraćajnice. Takođe, danas je u toku razvoj prototipova vozila koja imaju autonomno upravljanje, kao i njihovo testiranje.

Pametna industrija i pametne fabrike - Neki interesantni servisi iz ovih oblasti su:

- Praćenje rezervoara sa vodom, uljem i gasom;
- Upravljanje slobodnim prostorom i težinom robe (u skladištima);
- Praćenje nivoa gasa i curenja u hemijskim fabrikama i u rudnicima ili u njihovoj okolini;
- Predviđanje kvarova i popravke;
- Analiza i monitoring otrovnih gasova i količine kiseonika u hemijskim postrojenjima;
- Regulisanje temperature u industrijskim medicinskim frižiderima;
- Monitoring količine ozona (npr. kod sušenja mesa);
- Lociranje unutar prostorija (UWB, ZigBee, tagovi (NFC, RFID));

- Daljinsko upravljanje i monitoring parametara značajnih za poljoprivredu.

Praćenje stanja u okruženju - Veoma je važno pratiti stanje okruženja u kojem čovjek živi i radi, tako da korištenje IoT ima jako veliki značaj i u ovom aspektu. Neki od primjera su:

- Detektovanje požara (šumski požari);
- Monitoring nivoa zagađenosti vazduha;
- Predviđanje klizišta i lavina;
- Predviđanje pojave zemljotresa;
- Zaštita biljnog i životinjskog svijeta;
- Praćenje i predviđanje meteoroloških prilika;
- Praćenje stanja na morskim površinama i obalama.

Prodaja i logistika - IoT može da ponudi dodatna efikasna rješenja u sferama prodaje i logistike, na primjer tako što uputi pravim osobama potrebne informacije u pravom trenutku i na pravom mjestu. Iskustvo o tome šta korisnik danas traži u digitalnom okruženju igra jednu od ključnih uloga. Na osnovu toga prodavci se adaptiraju ukusima i prioritetima kupaca. Korištenje povezanih pametnih uređaja pruža takve mogućnosti.

Pametne kuće - Pojavom M2M, a kasnije i IoT dolazi do pojave i izgradnje tzv. pametnih kuća. Razni pametni mjerači i brojlila u kućama postoje već decenijama. Ti uređaji su najčešće bili vezani za klimatizaciju i obezbjeđivanje napajanja energijom. Dakle, većina tih uređaja je radila samostalno, bez međusobne saradnje. Zbog toga, ove kuće su se mogle nazvati pametnim, ali ne i inteligentnim. Takođe, ugrožena je bila i sigurnost i privatnost, jer su napravljeni od strane različitih proizvođača [20].

Unutar pametnih kuća moguće je povećati efikasnost ako se koriste funkcije daljinskog aktiviranja i isključivanja aparata, klimatizacije i alarmnih sistema. U ovom slučaju na kućnoj mreži nalazi se veliki broj povezanih senzora i aktuatora. Realizacija svega ovoga mora da bude takva, da bi sa korisničke strane korištenje bilo što je moguće lakše.

Postoji cijeli niz aplikacija koje mogu da pronađu svoju primjenu unutar pametnih kuća, a neke od njih su: [18]:

- Kontrola pristupa prostorijama i detekcija ljudi u neautorizovanim prostorijama;

- Detektovanje tečnosti u osjetljivim dijelovima radi sprečavanja pucanja i korozija;
- Kontrola klime – mjerenje temperature, svjetlosti, zagađenja i sl.;
- Pametni termostati koji na osnovu korisničkog ponašanja tokom vremena mogu da „nauče“ kako da regulišu klimatizaciju;
- Pametni požarni i alarmni sistemi – mogu da mjere dim i CO, a mogu da daju različite alarme (npr. govorni alarmi);
- Detektovanje provala tako što se vrši provjera da li su otvoreni prozori i vrata;
- Detektovanje pokreta pomoću infracrvenih senzora;
- Pametno navodnjavanje.

Pametna kuća je jedan od najboljih primjera u kojem različite tehnologije i poslovni procesi ostvaruju saradnju. Uređaji koji su zasnovani na takvim tehnologijama su već na tržištu, a neki od primjera takvih uređaja su: pametni šporeti/terne, pametni frižideri, usisivači sa daljinskim upravljanjem itd. Takođe, moguća je ugradnja automatskog osvjetljavanja, implementacija dodatne sigurnosti, vođenje računa o kućnim ljubimcima, kao i omogućavanje dodatnog komfora i zabave (uključivanje TV i izbor programa).

Pametne kuće je moguće uključiti kao gradivne elemente u strukturu pametnih gradova na višem nivou. Ali, treba imati u vidu da su servisi unutar pametnih kuća jako specifični u zavisnosti od korisničkih potreba, a s druge strane radi se o malim i ograničenim površinama u odnosu na površinu jednog grada.

2.3 Pametni gradovi

Koncept pametnih gradova predstavlja jednu od najinteresantnijih pojava u novije vrijeme. U literaturi su prisutne brojne definicije pametnog grada, a jedna od njih je da pametan grad podrazumijeva integraciju tehnologije u strategijski pristup za ekonomski razvoj, održivost i dobro građana [21]. Takođe, moguće je pronaći i definiciju da su pametni gradovi oni gradovi u kojima je omogućeno prikupljanje, analiza i raspodjela informacija, a čime se transformišu servisi koji su na raspolaganju građanima, povećava efikasnost i omogućava donošenje boljih odluka na nivou uprave grada [22]. Ako se uzmu u obzir svi različiti aspekti može se smatrati da je pametan grad „sistem sistema“. Strogo gledajući, pametne kuće i zgrade se mogu smatrati

elementima pametnog grada. Međutim, zahtjevi za njih mogu biti specifičniji nego za grad posmatran kao cjelinu. S druge strane, postoje i zajednički problemi i zahtjevi koji su zastupljeni u pametnim gradovima i u pametnim kućama (zgradama) istovremeno (npr. buka, zagađenje, grijanje i sl.).

Svaki pametni grad ima za cilj da građanima obezbijedi što kvalitetniji život. Za ispunjenje ovog cilja pametni grad koristi raspoložive tehnologije, ali i one nove koje se tek pojavljuju. Danas oko 50% stanovništva svijeta živi u gradskim sredinama, a smatra se da će oko 2050. godine taj procenat iznositi i do 70%. Iako će gradovi zauzimati malih 2-3% površine planete, proizvođaće oko 75-80% GHG (eng. *Green House Gas*) [1]. Razvojem pametnih gradova i tehnologija građani će očekivati kvalitetniji život i veću dostupnost informacija o okruženju. U cilju povećanja efikasnosti i održivosti tog razvoja u budućim pametnim gradovima moraće da se razvijaju i odgovarajući postupci i rješenja.

Potrebni je obratiti pažnju na činjenicu da će unutar pametnih gradova postojati velike i ekstremno guste bežične mreže LSHDN (eng. *Large-Scale Highly Dense Networks*) [23]. Samim tim, treba očekivati i veoma dinamičan saobraćaj između velikog broja uređaja sa ograničenom snagom. U ovim mrežama se prvo vrši praćenje događaja, potom prosljeđivanje odgovarajućih podataka, detekcija pojave odgovarajućeg događaja i upravljanje podacima. Upravljanje podacima uključuje agregaciju i replikaciju podataka. Čvorovi u mreži su bežični primopredajnici koji u sebi imaju ugrađene i senzore (u engleskoj literaturi se ovakvi čvorovi sreću pod nazivom *mote*, što predstavlja skraćeni oblik od *remote*).

Među brojnim postojećim pristupima unutar ICT, IoT koncept se posebno izdvaja. Kao posljedica tokom posljednjih godina, IoT i pametni gradovi postaju sve više povezani. Lokalne i nacionalne uprave žele da promovišu ICT rješenja vezana za administraciju, a s druge strane, pametni gradovi predstavljaju pogodnu podlogu za mnoga IoT rješenja.

2.3.1 Servisi u pametnom gradu

IoT omogućava razne servise u pametnom gradu, a neki od njih su navedeni u nastavku.

Pametni saobraćaj - Za saobraćaj se može reći da predstavlja važan problem u gradu. Ovo se odnosi na omogućavanje veće mobilnosti svim učesnicima efikasnim upravljanjem saobraćajem na gradskoj teritoriji. Za efikasno upravljanje nisu dovoljne samo dobro planirane saobraćajnice, već i brzo djelovanje u zavisnosti od trenutne situacije. Neki od relevantnih servisa su:

- Monitoring saobraćaja. Pomoću fisknih kamera, senzora, kao i podataka sa samih vozila, moguće je uočavati zagušenja i detektovati incidente u saobraćaju;
- Pametni parking. Usmjerenje vozača do najbližeg slobodnog parkinga najpogodnijim putem. U nekim gradovima u Španiji (Sant Ander, Barselona) ovo je već implementirano;
- Pametna svjetlosna signalizacija. Pored ostalog, preporučuje vozačima optimalnu brzinu, te omogućava veću mobilnost ovlaštenim vozilima u slučaju nezgoda ili drugih opasnosti.

Ekologija - Klimatske promjene na planeti su jako vidljive u posljednje vrijeme i u skladu s tim se definišu i sklapaju sporazumi na globalnom nivou. IoT može da odigra značajnu ulogu i u ovoj oblasti, a neki od servisa su:

- Pametna rasvjeta. Adaptacija jačine osvjetljenja i potrošnje u javnoj rasvjeti na osnovu trenutnog broja vozila i pješaka;
- Upravljanje otpadom. Pod ovim se podrazumijeva pražnjenje kontejnera za otpad onda kada je to potrebno, a informacija o tome se dobija sa senzora ugrađenih u kontejnere;
- Optimizacija u potrošnji energije. U ovu svrhu se koriste pametna brojila i mjerači unutar pametnih energetske mreža;
- Praćenje životne sredine. Kvalitet vazduha u gradu se vrši pomoću uređaja sa ugrađenim sensorima. Dok su javne mjerne stanice fiksno locirane, ovi uređaji imaju ugrađene jeftine senzore čija lokacija može da se mijenja. S obzirom da posjeduju GPS (eng. *Global Positioning System*) i GPRS (eng. *General Packet Radio Service*) konektivnost mogu da se postavljaju na vozila i tako pokrivaju veću površinu grada sa mjerenjima. Na osnovu rezultata mjerenja moguće je praviti kompletne mape zagađenja vazduha za jedan grad.

Dodatni servisi koji mogu da utiču na kvalitet života (eng. QoL – *Quality of Life*) su:

- Monitoring nivoa buke;

- Monitoring kvaliteta (zagađenosti) vazduha;
- Automatizacija (javnih) zgrada.

U tabeli 2.1 su prikazani zahtjevi za nekoliko različitih servisa kao što su primjena, domet i pokrivanje, broj uređaja, tolerancija u kašnjenju i brzina rada. Zahtjevi se razlikuju za različite vrste servisa, pa je iz tog razloga potrebno razmatrati korištenje različitih pogodnih tehnologija.

Tabela 2.1 Zahtjevi za razne servise u pametnim gradovima [1]

Aplikacija	Pokrivanje	Domet (m) Broj uređaja	Tolerisano kašnjenje	Brzina rada
Praćenje saobraćaja	potpuno	oko 1000 oko 1000	minuti	mala
Pametno parkiranje	lokalno	oko 100 oko 100	sekunde	srednja/velika
Saobraćajna signalizacija	potpuno	oko 10 oko 1000	sekunde	srednja/velika
Osvjetljenje	potpuno	oko 1000 oko 1000	sekunde	mala
Upravljanje otpadom	potpuno	oko 1000 oko 1000	minuti	mala
Pametna mreža	potpuno	oko 10 oko 100	minuti	srednja/velika
Praćenje buke	potpuno	oko 1000 oko 1000	minuti	mala
Praćenje kvaliteta vazduha	potpuno	oko 1000 oko 1000	minuti	mala
Automatizacija kuće	lokalno	oko 10 oko 10	sekunde	mala

U narednim poglavljima biće dat pregled nekoliko tehnologija, koje, između ostalog, mogu da budu primijenjene u različite svrhe, odnosno za različite servise u pametnim gradovima, ali i za druge IoT aplikacije.

3. LPWAN tehnologije

Da bi se, u što većoj mjeri, ispunili komunikacioni zahtjevi IoT sistema, pojavio se čitav niz novih protokola i tehnologija. LPWAN (eng. *Low Power Wide Area Network*) je pojam koji obuhvata mreže koje pokrivaju široko područje, a pri čemu imaju malu potrošnju [4]. LPWAN ima za cilj da pokrije područje prenosa podataka na velikim udaljenostima koje se uporedive sa onima u mrežama mobilne tehnologije i bežičnih čvorova (nodova) male potrošnje u M2M sistemima. Mogućnosti koje LPWAN tehnologije pružaju za IoT sisteme su povećanje pokrivenosti i upotreba uređaja sa malom potrošnjom energije na velikim udaljenostima. Uz dug životni ciklus i niske cijene uređaja, pokrivenost, odnosno domet, predstavljaju najznačajnije karakteristike LPWAN tehnologija. Dakle, LPWAN predstavlja termin za grupu tehnologija sa sljedećim ključnim karakteristikama [24]:

- Dug životni vijek baterija (često i preko 10 godina);
- Pokrivanje i povezanost širokog područja;
- Niska cijena integrisanih kola i mreže;
- Ograničen kapacitet prenosa podataka.

U suštini, LPWAN tehnologije dopunjavaju postojeće mobilne ćelijske mreže i tehnologije kratkog dometa, omogućavajući širokopojsne komunikacije sa nižim troškovima i bolje karakteristike potrošnje energije.

Početkom 2013. godine termin LPWAN čak nije ni postojao. Činjenica je da LPWAN od tada postaje jedan od najbržih aspekata razvoja IoT. Istraživanja predviđaju da će do 2024. godine postojati nekoliko milijardi LPWAN konekcija. Mnoge od LPWAN tehnologija su u početnoj i

ranoj fazi razvoja, a LoRa, LoRaWAN, *Sigfox* i *Ingenu* su samo neke od postojećih LPWAN platformi sa najvećim prodorom na tržištu [24], [25].

U tekstu koji slijedi, predstavljeno je nekoliko LPWAN tehnologija. Predstavljene su njihove osnovne karakteristike koje se odnose na frekvencijske opsege, način modulacije, domet, broj prenesenih poruka, brzinu prenosa podataka, potrošnju, budžet linka i slično.

3.1 Sigfox

Sigfox je francuska kompanija koja je osnovana 2009. godine, a čije je sjedište u gradu *Labège*. Ova kompanija proizvodi IoT mrežnu opremu i uređaje namijenjene isključivo za velike domete, odnosno pokrivanje širokih područja. Istovremeno, *Sigfox* je i naziv za tehnologiju [3]. *Sigfox* koristi UNB (eng. *Ultra Narrow Band*) tehnologiju unutar ćelijskog sistema u kojem je moguće povezivati krajnje uređaje (nodove) [2]. Slično kao i kod LoRa tehnologije, u pitanju su krajnji uređaji koji zahtijevaju prenos malih količina podataka na većim rastojanjima, pri čemu je potrošnja energije jako mala.

Spektar radio linka *Sigfox* tehnologije je podijeljen na 400 kanala širine od po 100 kHz, u ISM opsezima (868 MHz za Evropu i 915 MHz za Ameriku). Veličina korisnog dijela poruke je maksimalno 12 bajta, dok maksimalna bežična brzina iznosi 100 b/s. U toku jednog dana moguće je poslati maksimalno 140 poruka. Što se dometa tiče, on u ruralnim sredinama iznosi približno 30-50 km, a u urbanim sredinama 3-10 km. Životni vijek krajnjih *Sigfox* uređaja može da bude i do 20 godina sa dvije AA baterije. Razlog leži u tome što su ovi uređaji aktivni samo onda kada trebaju da pošalju poruku, a poslije toga se vraćaju „na spavanje“ (eng. *sleep mode*). Ostvarena je i bezbjedna komunikacija na svim nivoima, jer se koriste privatni ključevi za šifrovanje kod krajnjih uređaja. S druge strane, *Sigfox* kao platforma jedina prepoznaje jedinstvene identifikatore krajnjih uređaja. Bazne stanice uspostavljaju VPN (eng. *Virtual Private Network*) veze sa serverima i koriste SSL (eng. *Secure Sockets Layer*) sertifikate.

U SAD 2014. godine je izgrađena prva IoT *Sigfox* mreža. Ubrzo poslije toga svoju teritoriju *Sigfox* mrežom pokrivaju Francuska (sa 1200 baznih stanica), Španija (sa 1300 baznih stanica), Holandija i deset gradova Velike Britanije. Samo u Moskvi je, u cilju prikupljanja informacija o mjestima za parkiranje, instalirano 11000 nodova. *Sigfox* mreže su zastupljene i u drugim

krajevima svijeta kao što su Bliski Istok, Azija i Afrika. Zapravo, izgradnja sopstvene IoT skalabilne mreže velikog kapaciteta, male potrošnje, jednostavne ćelijske infrastrukture, bazirane na topologiji zvijezde, predstavlja osnovnu strategiju ove kompanije. Kompanija ne proizvodi krajnje uređaje, već vrši prodaju licenci za korištenje *Sigfox* mrežne arhitekture [2].

3.2 Weightless SIG

Weightless SIG (eng. *Special Interest Group*) je organizacija koja se bavi standardima i čiji je cilj upravljanje aktivnostima u standardizaciji mreža sa malom snagom, ali koje pokrivaju velike površine LPWA (eng. *Low-Power Wide-Area*). U *uplink*-u se koristi FDMA pristup, a u *downlink*-u DSSS. Dva moguća načina rada u *uplink*-u su uskopojasna NB-FDMA (eng. *Narrow Band FDMA*) čija je širina kanala 200 kHz i širokopojasna WB-FDMA (eng. *Wide Band FDMA*) čija je širina kanala 6 ili 8 MHz.

Sloj linka podataka omogućava sljedeće funkcije:

- Osnovni opseg (eng. *Baseband*) u kojem se vrši multipleksiranje i demultipleksiranje, te upravljanje slanjem i primanjem podataka za instalirane uređaje;
- Donji sloj linka (eng. *Lower Link Layer*) u kojem se upravlja potvrdama prijema i retransmisijama, kao i fragmentiranjem i defragmentiranjem podataka;
- Gornji sloj linka (eng. *Upper Link Layer*) vrši šifrovanje podataka, njihovo segmentiranje kao i komuniciranje sa servisnim slojem;
- RRM (eng. *Radio Resource Manager*) vrši upravljanje radio resursima na MAC sloju, a uključena je i konfiguracija mreže.

Ako se poredi sa *Sigfox*-om, može se primijetiti da na sloju linka podataka *Weightless SIG* posjeduje više funkcionalnosti. Danas su aktuelna tri različita prijedloga ovog sistema. Prvi od njih, *Weightless-W*, radi u nelicenciranom dijelu spektra, a uključeni su i slobodni opsezi između 470 i 790 MHz. *Weightless-N* je standardna verzija koja je namijenjena za jeftine aplikacije u kojima se prenos vrši samo u jednom smjeru. Ona koristi NB-FDMA u opsegu ispod 1 GHz. *Weightless-P* je treća verzija koja se još uvijek razvija i koja će imati zadatak da obezbijedi

pouzdanost, kao i performanse slične onima kod ćelijskih sistema, ali uz znatno manja finansijska ulaganja.

3.3 Ingenu

Ingenu (prethodni naziv *On-Ramp*) spada u osnivače IEEE (eng. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) 802.15.4k radne grupe koja se bavi standardizacijom, a koja trenutno radi na proširenju IEEE 802.15.4 PHY i MAC sloja za podršku LECIM (eng. *Low Energy Critical Infrastructures*). Između ostalog, istraživanja su usmjerena na praćenje kritičnih infrastruktura, pametne mreže (pametna mjerenja), praćenje kretanja objekata i sl. Tehnologija je zasnovana na RPMA (eng. *Random Phase Multiple Access*) protokolu koji radi u nelicenciranom 2,4 GHz opsegu. Jedna bazna stanica može da pokrije nekoliko stotina kvadratnih kilometara sa kapacitetom od nekoliko desetina hiljada uređaja [1].

Fizički sloj *Ingenu* tehnologije koristi DSSS pristup. Primjena DSSS pristupa kod ove tehnologije je prilično ekstremna. *Ingenu* ima jedan od najvećih budžeta linka od svih LPWAN tehnologija, koji može da ide i do 177 dB. Jedna od glavnih prednosti je i demodulacija do 1000 poruka u isto vrijeme (višestruki pristup ili dio MA-*Multiple Access* u pojmu RPMA).

RPMA koristi kanal od 1 MHz i dijeli ga na vremenske slotove koji se nazivaju okvirima. Ovi okviri su veoma dugi u poređenju sa tradicionalnim ćelijskim okvirima koji se često mjere u desetinama milisekundi, a ne u sekundama. Pošto je RPMA dizajniran za ove male transakcije podataka, *Ingenu* je odabrao TDD (eng. *Time Division Multiplex*) pristup. RPMA precizno „razumije“ uslove u *uplink* kanalu, tj. koliko interferencija je prisutno, mjerenjem *downlink* kanala neposredno prije slanja poruke. Ovo je moguće zbog fundamentalne pojave poznate pod nazivom „reciprocitet kanala“, koji važi samo za TDD pristupe gdje je frekvencija *uplink* kanala istovjetna sa frekvencijom *downlink* kanala. Čak i male promjene u frekvenciji mogu imati veoma različite uslove u kanalu. Ako su uslovi loši, RPMA povećava faktor širenja i snagu emitovanja, a ako su dobri, dolazi do smanjenja istih.

U tabeli 3.1 je prikazana uporedna analiza nekoliko tehnologija koje mogu da se koriste za IoT aplikacije. Akcenat je na fizičkom sloju i fizičkim karakteristikama kao što su frekvencijski opsezi, modulacija, brzine prenosa, snaga, budžeti linka, kompleksnost, mobilnost i slično.

Tabela 3.1 Pregled karakteristika nekoliko tehnologija za IoT [26]

Tehnologija	LoRaWAN	SigFox	RPMA/ Ingenu	LTE Cat-1 2016 (Rel-8)	LTE Cat-M1 2017 (Rel13)	LTE Cat-M2 NB-IoT 2018 Rel13+
Karakteristika						
Frekvencijski opseg	433/470/780 /868/915 MHz ISM	868 /915 MHz ISM	2.4 GHz ISM	Licencirani spektar (700 MHz-2.5GHZ+)	Licencirani spektar (700 MHz-2.5GHZ+)	Licencirani spektar (700 MHz-2.5GHZ+)
Modulacija	DSSS (CSS)	UNB / GFSK - BPSK	RPMA	OFDMA	OFDMA	OFDMA
Prijemni opseg	125, 250, 500 kHz	100 Hz (EU) / 600 Hz (SAD)	1 MHz	20 MHz	1.4 MHz	200 KHz
Maksimalna brzina prenosa (Data Rate)	293 b/s – 50 kb/s	100 b/s (EU) / 600 b/s (SAD)	<i>Downlink:</i> 624 kb/s <i>Uplink:</i> 156 kb/s	10 Mb/s	380 kb/s	<i>Downlink:</i> ~250 kb/s <i>Uplink:</i> 22 kb/s
Maksimalan broj poruka po danu	Neograničen (neki operateri ili provajderi mogu definisati limite)	<i>Uplink:</i> 140 poruka po danu <i>Downlink Broadcast:</i> 4 poruke po danu	Neobjavljen podatak	Neograničen	Nepoznato	Nepoznato
Maksimalna izlazna snaga	14-30 dBm	14-22 dBm	21 dBm	do 46 dBm	23 dBm	20 dBm
Budžet linka	153-161 dB	149-161 dB	168-172 dB sa diverzitetijem	140 dB+	155 dB+ u <i>downlink</i> -u	160 dB+
Komunikacioni kanal	Polu dupleks	Ograničeni polu dupleks	Polu dupleks	Puni dupleks	Polu dupleks	Polu dupleks
Iskorištenost snage (efikasnost)	Veoma velika	Veoma velika	Velika	Mala	Srednja	Velika
Kompleksnost	Veoma mala	Veoma mala	Srednja	Velika	Srednja	Mala
Koegzistencija	Da	Ne	Neobjavljeno	Da	Da	Da
Mobilnost	Da	Da	Ne	Da	Da	Ograničena na režim mirovanja

4. LoRa

LoRa™ (eng. *Long Range*) je autorski zaštićena tehnologija razvijena od strane američkog *Semtech*-a, koji je postavio osnovne standarde tehnologije i koji i dalje proizvodi komponente za nju. Dalji pravac razvoja LoRa tehnologije se definiše od strane neprofitne organizacije *LoRa Alliance* koja je osnovana na Mobilnom svjetskom kongresu u martu 2015. godine (eng. *Mobile World Congress 2015*) [25].

LoRa Alliance je otvoreno, neprofitno udruženje koje je od svog osnivanja poraslo na više od 500 članova, postajući jedno od najvećih i najbrže rastućih udruženja u tehnološkom sektoru. Njegovi članovi blisko sarađuju i razmjenjuju iskustva kako bi promovisali i usmjerili uspjeh LoRaWAN protokola kao vodećeg otvorenog globalnog standarda za sigurno povezivanje IoT LPWAN operatora. Sa tehničkom fleksibilnošću za rješavanje širokog spektra IoT aplikacija, kako statičkih tako i mobilnih, i programa sertifikacije koji garantuju interoperabilnost, LoRaWAN je već primijenjen od strane glavnih operatera mobilne mreže na globalnom nivou, uz kontinuirano široku ekspanziju u 2019. godini, a i u budućnosti. Među članovima su i tehnološki lideri kao što su *IBM*, *Cisco*, *HP*, *Foxconn*, *Semtech* i *Sagemcom*, kao i vodeće proizvodne kompanije kao što su *Schneider*, *Bosch*, *Diehl* [7].

LoRa je fizički sloj ili bežična modulacija koja se koristi za kreiranje komunikacionog linka velikog dometa. Mnogi postojeći bežični sistemi koriste digitalnu frekvencijsku modulaciju FSK (eng. *Frequency Shift Keying*) na fizičkom sloju zato što se na taj način obezbjeđuje mala potrošnja. LoRa se zasniva na CSS (eng. *Chirp Spread Spectrum*) modulaciji, koja kao i FSK, obezbjeđuje nisku potrošnju, ali obezbjeđuje veći domet komunikacije. CSS modulacija se koristila u vojnim i svemirskim komunikacijama u proteklih nekoliko decenija upravo zbog

moćnosti komunikacije na velikim udaljenostima i otpornosti na interferencije. LoRa je prva implementacija ove modulacije, koja ima nisku cijenu i komercijalnu upotrebu. Glavna prednost LoRa tehnologije je veliki domet. On je opravdan činjenicom da jedan čvor u idealnim uslovima može da pokrije čitav grad ili nekoliko stotina kvadratnih kilometara. Domet u velikoj mjeri zavisi od okruženja i prepreka. Međutim, LoRa i LoRaWAN tehnologije imaju budžet linka (i do 170 dB) koji je veći od drugih standardnih komunikacionih tehnologija. Dodatne prednosti LoRa tehnologije su otpornost na fading i *Doppler*-ov efekat [6]. Kao takva, LoRa se koristi za projektovanje uređaja male potrošnje, povezanih u WAN mreže za potrebe komunikacije među mašinama (M2M) ili za IoT [27].

LoRa modulacija se koristi u nelicenciranim frekvencijskim opsezima koji su dostupni širom svijeta. To su tzv. ISM (eng. *Industrial, Scientific and Medical*) opsezi. Na primjer, u Evropi se koriste 863-870 MHz, u Americi 902-928 MHz, u Australiji 915-928 MHz, u Kini 779-787 MHz i 470-510 MHz opsezi. Frekvencijski planovi biće navedeni u narednim poglavljima.

4.1 Prenos u proširenom spektru

4.1.1 Shannon-Hartley-eva teorema

Praktično, ne postoje razmatranja o tehnikama prenosa u proširenom spektru bez kratkog osvrta na *Shannon-Hartley*-evu teoremu.

U teoriji informacija, *Shannon-Hartley*-eva teorema predstavlja maksimalnu brzinu kojom informacija može da bude prenesena kroz komunikacioni kanal određenog opsega u prisustvu šuma:

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad 4.1$$

Gdje su:

C = kapacitet kanala (b/s);

B = opseg kanala (Hz);

S = prosječna snaga primljenog signala (W);

N = prosječna snaga šuma ili smetnji (W);

S/N = odnos signal-šum (SNR – eng. *Signal to Noise Ratio*) izražen kao linearni odnos snaga.

Preuređivanjem jednačine tako što se logaritam po bazi 2 zamijeni prirodnim logaritmom, dobijamo:

$$\frac{C}{B} = 1,433 \cdot \frac{S}{N} \quad 4.2$$

Kod prenosa u proširenom spektru odnos signal-šum je mali, čak je često snaga signala ispod praga šuma. Ako se pretpostavi da je nivo šuma takav da je $S/N \ll 1$, posljednja jednačina se može napisati kao:

$$\frac{C}{B} \approx \frac{S}{N} \quad 4.3$$

Ili:

$$\frac{N}{S} \approx \frac{B}{C} \quad 4.4$$

Iz posljednje jednačine može se zaključiti da ako se želi prenijeti informacija bez greške kroz kanal fiksnog odnosa signal-šum, potrebno je samo povećati frekvencijski opseg signala [28].

4.1.2 Principi prenosa u proširenom spektru

Kao što je već pomenuto, povećanjem opsega signala, moguće je vršiti kompenzaciju odnosa signal-šum u radio-kanalu [28].

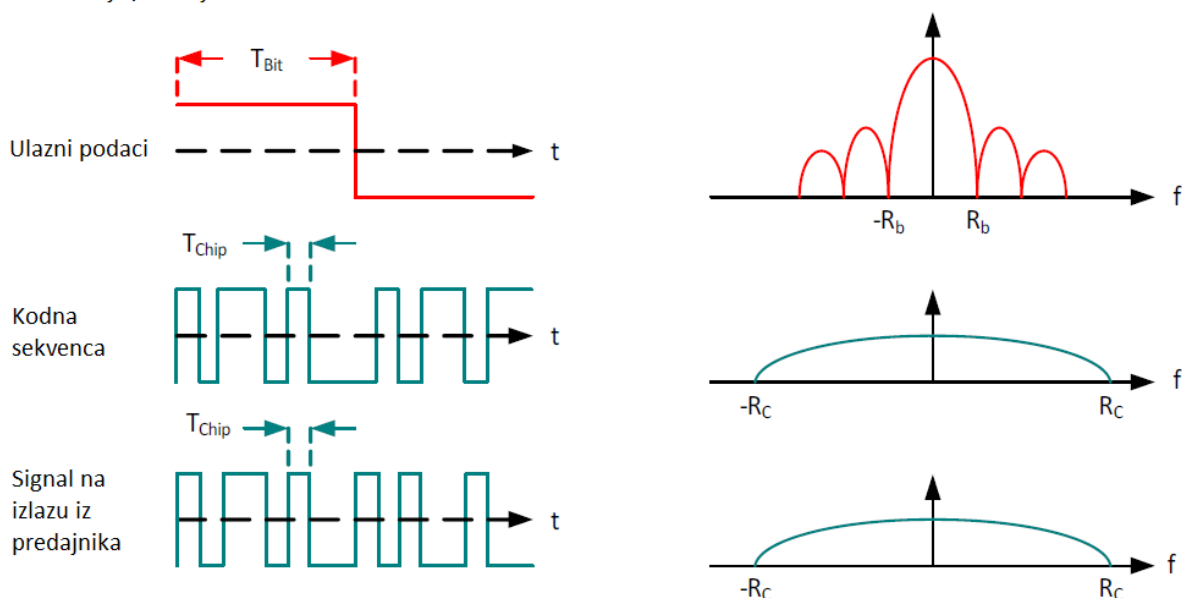
Klasični radio-komunikacioni sistemi imaju širinu radio-kanala približno jednaku širini spektra informacionog signala. Radio-komunikacioni sistemi sa prenosom u proširenom spektru imaju širinu radio-kanala koja je 100 ili više puta veća od širine spektra informacionog signala. Proširenje spektra ostvaruje se korištenjem kodne sekvence koja je najčešće binarna sekvenca i

koja je pseudoslučajna, ali ona je takva da se može reprodukovati od strane ovlašćenog korisnika. Pseudoslučajni kôd omogućava pojedinim korisnicima sistema sa proširenim spektrom identifikaciju i selektivno pozivanje.

Signale sa prenosom u proširenom spektru (eng. *Spread Spectrum*) karakteriše znatno veći prenosni propusni opseg od minimalno potrebnog opsega učestanosti za prenos poruke. Snaga signala ostaje ista, ali se proširuje na znatno širi opseg [29].

Kod DSSS (eng. *Direct Sequence Spread Spectrum*) sistema, proces modulacije se odvija tako što se vrši multiplikacija signala podataka sa signalom za „proširivanje“ spektra ili tzv. kodnom ili *chip* sekvencom. *Chip* sekvenca ima znatno veću brzinu i na taj način se vrši proširivanje opsega osnovnog signala podataka. Ovdje treba imati na umu da se termin *chip* koristi da bi se razlikovali kraći kodovani biti od dužih nekodovanih bita informacionog signala. Ovo je prikazano na slici 4.1 [28].

Modulacija / Širenje

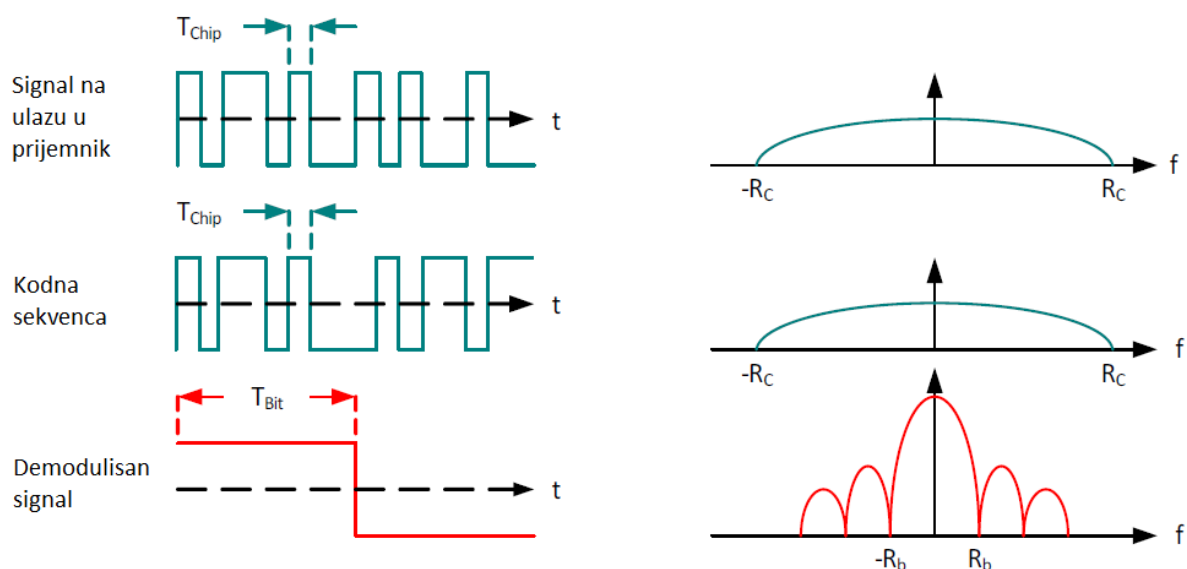


Slika 4.1 Proširivanje spektra direktnom sekvencom – DSSS tehnika [28]

Na prijemniku signal podataka se dobija ponovnim množenjem signala sa lokalno generisanim replikama kodne sekvence koja se koristi za proširivanje spektra. Ovaj proces multiplikacije u prijemniku efikasno kompresuje „prošireni“ signal nazad u njegov neprošireni (originalni) frekvencijski opseg, kao što je prikazano na slici 4.2. Treba napomenuti da ista *chip*

sekvenca ili kôd koja je korištena u predajniku mora da se koristi i u prijemniku da bi se informacija prenijela ispravno.

Demodulacija / Sužavanje



Slika 4.2 Demodulacija (sužavanje spektra) DSSS signala [28]

Stepen ili faktor proširenja za direktnu sekvencu je zavisan od broja *chip*-ova po bitu – odnos brzine *chip* sekvence i brzine bitske sekvence je predstavljen kao procesno pojačanje G_p i uglavnom se izražava u decibelima (dB):

$$G_p = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{R_c}{R_b} \right) [dB] \quad 4.5$$

Gdje je:

R_b = bitska brzina (b/s) i

R_c = brzina sekvence (chip/s).

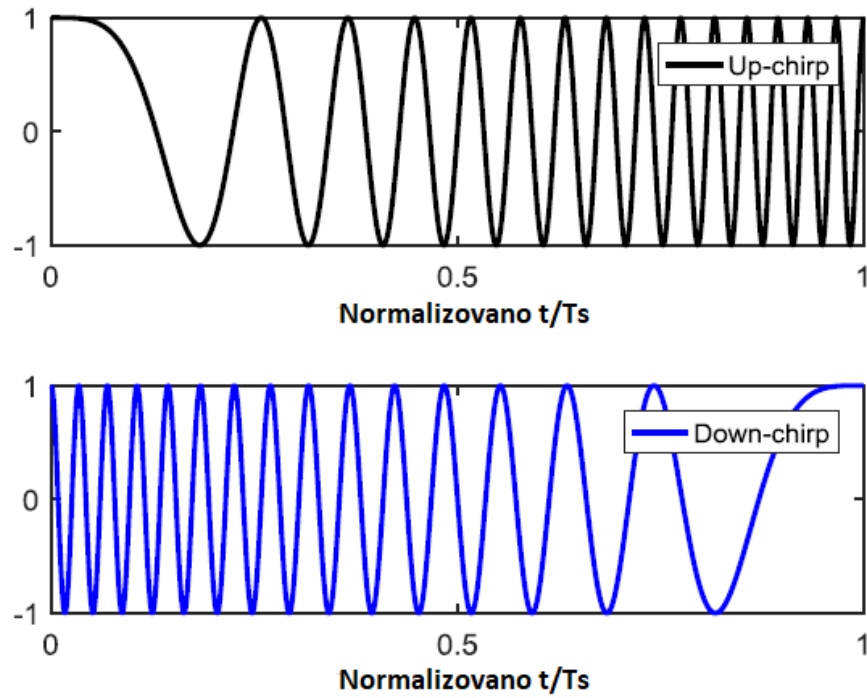
Pored toga što obezbjeđuje procesno pojačanje za željeni prenos (koje omogućava prijemniku da korektno izdvoji signal podataka čak i kada odnos signal-šum ima negativnu

vrijednost), vrši se i redukovanje ometajućih signala na strani prijemnika. Signali smetnji se šire izvan željenog opsega same informacije i lako ih je ukloniti jednostavnim filtriranjem.

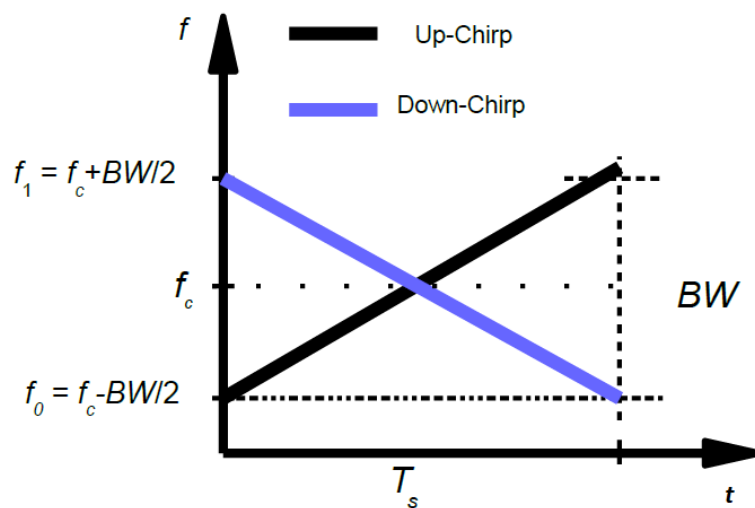
DSSS je široko rasprostranjen u komunikacionim aplikacijama. Međutim, izazovi postoje u smanjivanju cijene, kao i u ograničavanju potrošnje uređaja i mreže. Često, kao što je to slučaj sa GPS (eng. *Global Positioning System*) ili DSSS fizičkim slojem standarda IEEE 802.15.4k, sistem zahtijeva veoma precizne i skupe referentne satove. Pored toga, što je duža sekvenca za proširivanje spektra, potrebno je više vremena da prijemnik izvrši korelaciju duž cijele kodne sekvence, bilo sekvencijalnim traženjem kroz samu sekvencu ili projektovanjem više paralelnih korelatora. Ovo naročito predstavlja nedostatak za uređaje sa ograničenom snagom koji ne mogu biti stalno uključeni i zato je potrebno da se brzo sinhronizuju više puta [28].

4.2 Chirp Spread Spectrum

CSS (eng. *Chirp Spread Spectrum*) je modulacija razvijena za potrebe radarskih aplikacija 40-ih godina prošlog vijeka. Tradicionalno je korištena u vojnim i sigurnim komunikacijama. Posljednjih dvadesetak godina došlo je do povećane upotrebe ove modulacione tehnike u brojnim aplikacijama za prenos podataka zahvaljujući njenim relativno niskim zahtjevima za snagom i otpornostima na fading, *Doppler*-ov efekat i različite vrste ometajućih signala. CSS PHY je usvojen od strane IEEE za LR-WPAN (eng. *Low-Rate Wireless Personal Area Networks*) standard 802.15.4 za aplikacije koje zahtijevaju veći domet i veću mobilnost od onih koji se postižu kod O-QPSK (eng. *Offset Quadrature Phase-Shift Keying*) DSSS PHY tehnike [28]. Pojam *chirp* potiče od engleske konstrukcije *Compressed High Intensity Radar Pulse* [30]. CSS modulacija koristi *chirp* signale koji imaju linearnu promjenu frekvencije u vremenu i konstantnu amplitudu. Frekvencija *chirp* signala, može da se mijenja od minimalne ka maksimalnoj i to je tzv. *up-chirp*, ili od maksimalne ka minimalnoj, to je tzv. *down-chirp* (slika 4.3). Razlika između donje i gornje granice frekvencije *chirp* signala predstavlja frekvencijski opseg [31]. Spektrogram *up-chirp* i *down-chirp* signala dat je na slici 4.4. Na ovoj slici sa f_c je označena centralna frekvencija ili frekvencija nosioca, sa BW je označen frekvencijski opseg *chirp* signala, dok je T_s trajanje simbola.



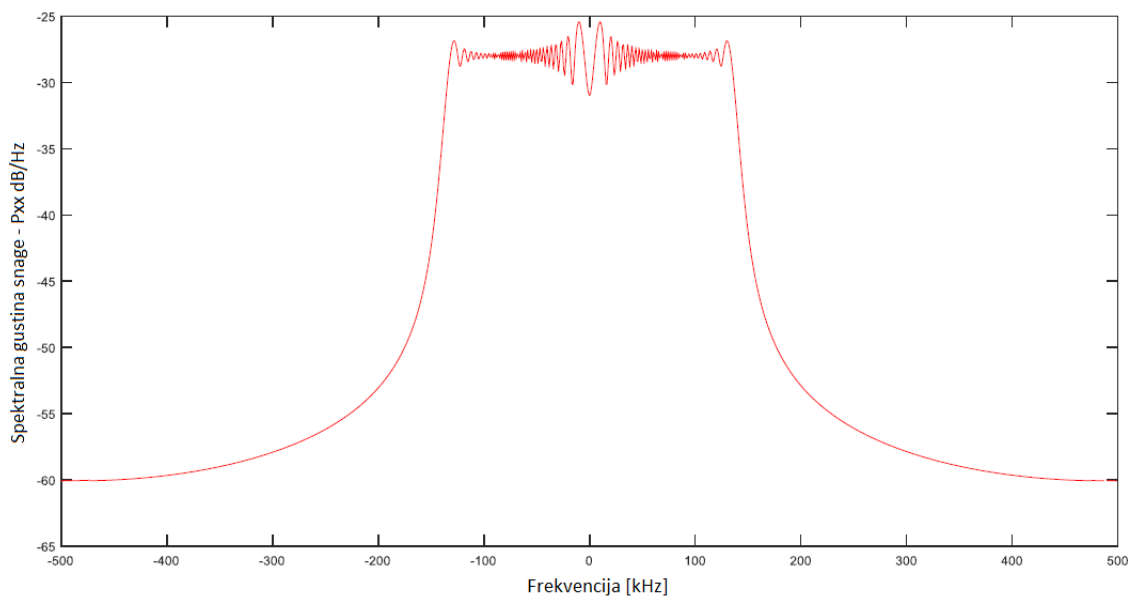
Slika 4.3 Chirp signali u vremenskom domenu [32]



Slika 4.4 Spektrogram up-chirp i down-chirp signala [32]

Glavne karakteristike *chirp* impulsa su:

- Visoka robusnost: Zahvaljujući visokom proizvodu BT ($Bandwidth \times Time$) *chirp* impulsi su veoma otporni na smetnje;
- Konstantna uniformna spektralna gustina snage. Na slici 4.5 je prikazana spektralna gustina snage za opseg od 125 kHz;
- Otpornost na višestruko prostiranje: Zahvaljujući širokopojasnim impulsima, CSS je veoma otporna na višestruku propagaciju signala;
- Mala potrošnja energije: CSS omogućava projektantima da biraju i analogne implementacije koje često imaju manju potrošnju energije;
- Malo kašnjenje: CSS ne zahtijeva sinhronizaciju. Nove bežične konekcije se uspostavljaju veoma brzo;
- Otpornost na *Doppler*-ov efekat: *Doppler*-ov efekat izaziva pomjeraj frekvencije *chirp* impulsa, koji uzrokuje zanemarljiv pomjeraj osnovnog signala na vremenskoj osi;
- Otpornost na smetnje unutar opsega: Skalabilno procesno pojačanje omogućava odabir odgovarajućeg nivoa otpornosti protiv ometajućih signala unutar frekvencijskog opsega;
- Poboljšana osetljivost prijemnika: Zbog vremenskog i frekvencijskog pomaka koji je ekvivalentan između predajnika i prijemnika [31].



Slika 4.5 Spektralna gustina snage *chirp* impulsa [31]

4.3 LoRa Spread Spectrum

Semtech-ova LoRa modulacija se bavi nedostacima DSSS sistema, odnosno otklanja ih kako bi se obezbijedila niska cijena, mala potrošnja, ali iznad svega robusna alternativa svim tradicionalnim tehnikama prenosa u proširenom spektru [28].

LoRa modulacija je CSS modulacija koja koristi *chirp* signale koji imaju linearnu promjenu frekvencije u vremenu. Osnovna prednost ovog metoda modulacije je ta što su vremenski i frekvencijski *offset* između prijemnika i predajnika ekvivalentni, što značajno umanjuje kompleksnost projektovanja prijemnika. Frekvencijski *offset* između predajnika i prijemnika može da iznosi i do 20% opsega signala bez uticaja na performanse dekodiranja. Ovo pomaže pri smanjenju cijene LoRa predajnika, pošto kristali koji su ugrađeni u njih, ne moraju da se izrađuju sa ekstremnom tačnošću. Frekvencijski opseg *chirp* signala je ekvivalentan frekvencijskom opsegu samog signala [4].

Željeni signal podataka je „čipovan“ na višu brzinu i modulisan u tzv. *chirp* signale. Relacije između željene bitske brzine, zatim simbolske brzine i brzine *chirp* signala su predstavljene u nastavku.

Prvo, predstavimo sve veličine. Ako sa T_b i T_s označimo trajanje bita i simbola, respektivno, onda važe sljedeće relacije za bitsku, odnosno simbolsku brzinu:

$$R_b = \frac{1}{T_b} [b/s] \quad 4.6$$

$$R_s = \frac{1}{T_s} [simbol/s] \quad 4.7$$

gdje je sa R_b označena bitska brzina, a sa R_s simbolska brzina. Nekoliko parametara je značajno za podešavanje LoRa modulacije, a to su:

- propusni opseg ili *Bandwidth (BW)* – razlika između maksimalne i minimalne frekvencije prenosa (LoRa koristi 3 *Bandwidth*-a: 125, 250 i 500 kHz),
- faktor proširenja ili *Spreading Factor (SF)* – logaritam po bazi 2 od broja čipova po simbolu (ili broj bita potrebnih za kodovanje jednog simbola); kod LoRa tehnologije

može iznositi od 7 do 12. Dakle, faktor proširenja SF definiše dvije fundamentalne vrijednosti:

- broj čipova u svakom simbolu je 2^{SF} ;
 - broj bita pomoću kojh se vrši kodovanje jednog simbola je SF ;
- kodna brzina ili *Code Rate (CR)* – iznos *Forward Error Correction (FEC)* polja, kod LoRa tehnologije je $4/(4+n)$ gdje $n \in \{1,2,3,4\}$ [25].

Iz prethodnog slijedi da je:

$$SF = \frac{T_s}{T_b} = \frac{R_b}{R_s} \quad 4.8$$

Odnosno:

$$R_b = SF \cdot R_s \quad 4.9$$

Pošto je:

$$BW = \frac{1}{T_c} \quad 4.10$$

(gdje je T_c trajanje *chip-a*) i

$$T_s = 2^{SF} \cdot T_c = \frac{2^{SF}}{BW} \quad 4.11$$

Na kraju se dobija bitska brzina:

$$R_b = SF \cdot \frac{BW}{2^{SF}} \quad 4.12$$

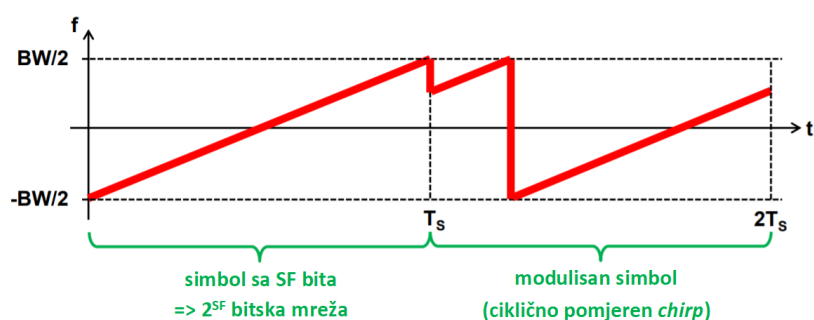
Usljed šuma i smetnji u procesu modulacije i demodulacije dolazi do pojave grešaka. Iz tog razloga vrši se dodavanje koda za ispravljanje grešaka *Forward Error Correction* – FEC koji omogućava oporavak dijelova informacija ugroženih od strane smetnji i šuma. Za FEC je iskorišten *Hamming-ov kôd* [31]. Kod LoRa modulacije se koriste kodne brzine (5,4), (6,4), (7,4), (8,4) ili $CR = 4/(4+n)$ gdje $n \in \{1,2,3,4\}$. Dakle, bitska brzina, kada se doda uticaj ovog kodiranja iznosi:

$$R_b = SF \cdot \frac{BW}{2^{SF}} \cdot CR \quad 4.13$$

Svaki LoRa simbol je „rasprostranjen“ na cijelom frekvencijskom opsegu. *Chirp*-ovi koji nose informaciju su ustvari ciklični pomjeraji osnovnog *up-chirp*-a ili *down-chirp*-a. Početna frekvencija svakog simbola (*chirp*-a) može imati jednu od 2^{SF} pozicija. Ako se sa cs označi ciklični pomjeraj, a sa sv vrijednosti simbola, onda se ciklični pomjeraj može matematički izraziti kao [32]:

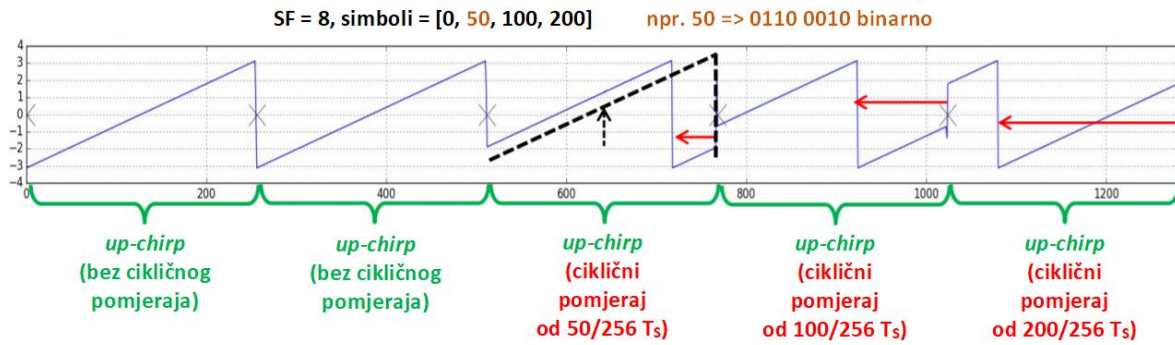
$$cs = \frac{sv}{2^{SF}} \cdot T_s \quad 4.14$$

Određivanjem početne pozicije moguće je dobiti izvornu kodnu riječ. Treba napomenuti da se povećavanjem faktora širenja povećava brzina prenosa podataka smanjuje [31], [33]. Na slici 4.6 je prikazan osnovni LoRa *chirp* simbol, kao i jedan ciklično pomjeren *chirp*.



Slika 4.6 Osnovni i ciklično pomjeren LoRa *chirp* simbol [34]

Na slici 4.7 su prikazani LoRa simboli za slučaj $SF = 8$ što znači da je moguće da ciklični pomjeraj osnovnog *chirp* signala bude na nekoj od 256 pozicija jer je $2^{SF} = 2^8 = 256$. Na slici je isprekidanom crnom linijom označen osnovni *chirp*, čijim se pomjeranjem ulijevo za 50 pozicija dobije modulisani simbol 50. I ostali simboli se dobijaju pomjeranjem ulijevo (crvena strelica na slici). Konkretno, prikazani su pomjeraji, odnosno simboli 0, 50, 100, 200.



Slika 4.7 LoRa simboli sa odgovarajućim cikličnim pomjerajima [34]

Iz prethodnih relacija mogu se izvesti određeni zaključci. Kod LoRa modulacije brzina čipa zavisi samo od propusnog opsega: brzina čipa je jednaka širini propusnog opsega (jedan čip po sekundi po Hertz-u propusnog opsega). Ovo daje nekoliko posljedica na modulaciju: povećanje faktora proširenja SF za jedan će podijeliti frekvencijski raspon čipa sa 2 (pošto 2^{SF} čipova pokriva cijeli frekvencijski opseg) i množi trajanje simbola sa 2, takođe. Međutim, bitska brzina se neće podijeliti sa 2, jer će se u svakom simbolu prenijeti još jedan bit. Osim toga, simbolska brzina i bitska brzina za dati faktor proširenja su proporcionalne frekvencijskom opsegu, tako da dupliranje frekvencijskog opsega će efektivno duplirati brzinu prenosa. [25].

U tabeli 4.1 su prikazane bitske brzine za frekvencijski opseg od 125 kHz za različite faktore proširenja SF uz brzinu zaštitnog kodovanja $CR = 4/5$. Napomenimo ovdje da se kod LoRa uređaja brzina prenosa podataka vrlo često označava sa DR (eng. *Data Rate*) i označava se rednim brojevima od 0 do 7 (kao u tabeli).

Tabela 4.1 Bitske brzine

Data Rate	Konfiguracija		Bitska brzina [b/s]
	Modulacija (SF)	Opseg [kHz]	
0	SF12	125 kHz	290
1	SF11	125 kHz	540
2	SF10	125 kHz	980
3	SF9	125 kHz	1760
4	SF8	125 kHz	3125
5	SF7	125 kHz	5470
6	SF7	250 kHz	11000
7	FSK		50000

4.3.1 Ortogonalnost LoRa signala

Signali koji su modulirani u različite *chirp* signale su uvijek ortogonalni. Različite brzine prenosa *chirp*-a mogu se postići korištenjem različitih faktora proširenja i/ili frekvencijskog opsega. Na ovaj način je moguće vršiti emitovanje i prijem LoRa signala kroz isti kanal bez interferencije. LoRa može imati faktore proširenja SF od 7 do 12 i tri frekvencijska opsega: 125, 250 i 500 kHz. Ovdje treba napomenuti da nisu sve kombinacije faktora proširenja i frekvencijskih opsega ortogonalne [35]. Posmatrajmo sljedeće relacije za simbolsku brzinu R_s i brzinu *chirp*-a R_{chirp}

$$R_s = \frac{BW}{2^{SF}} \quad 4.15$$

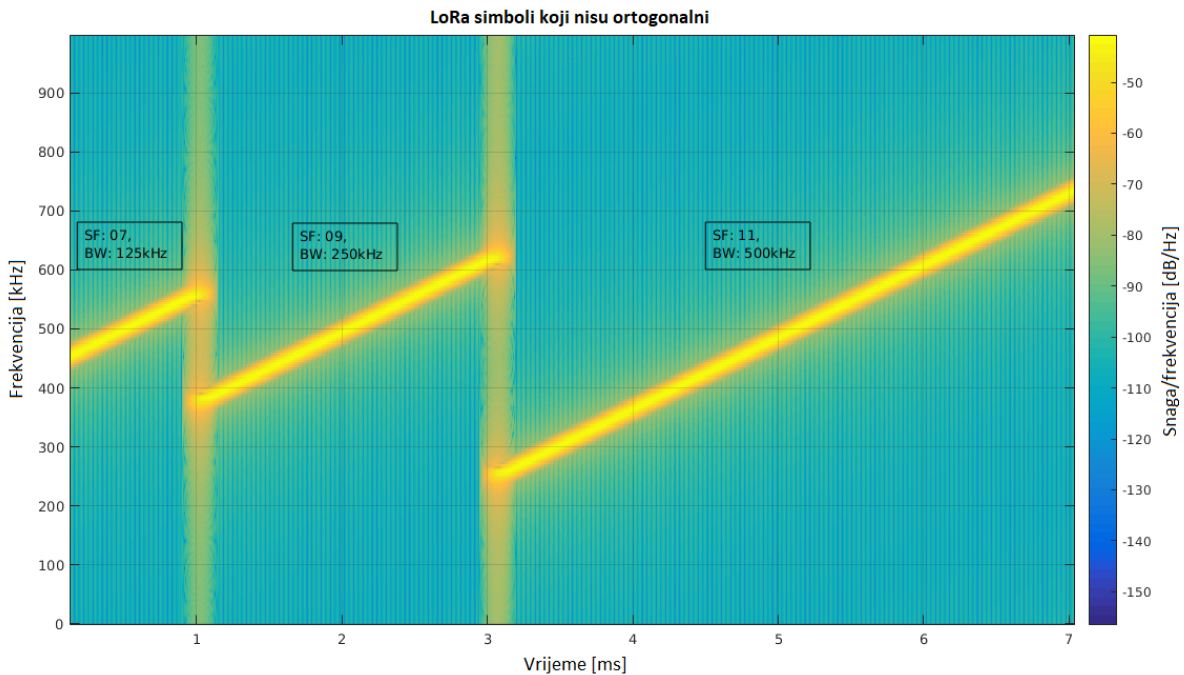
i

$$R_{chirp} = BW \cdot R_s = BW \cdot \frac{BW}{2^{SF}} \quad 4.16$$

Ako se izračuna brzina R_{chirp} za sljedeća tri slučaja:

- 1) $SF = 7$ i $BW = 125$ kHz
- 2) $SF = 9$ i $BW = 250$ kHz
- 3) $SF = 11$ i $BW = 500$ kHz

može se vidjeti da je identična. Prema tome, ove kombinacije nisu ortogonalne. Ovi *chirp* signali su prikazani na slici 4.8. Nagib linija na slici predstavlja ortogonalnost. U prethodnom slučaju su u pitanju signali koji nisu ortogonalni jer je nagib sve tri linije isti.



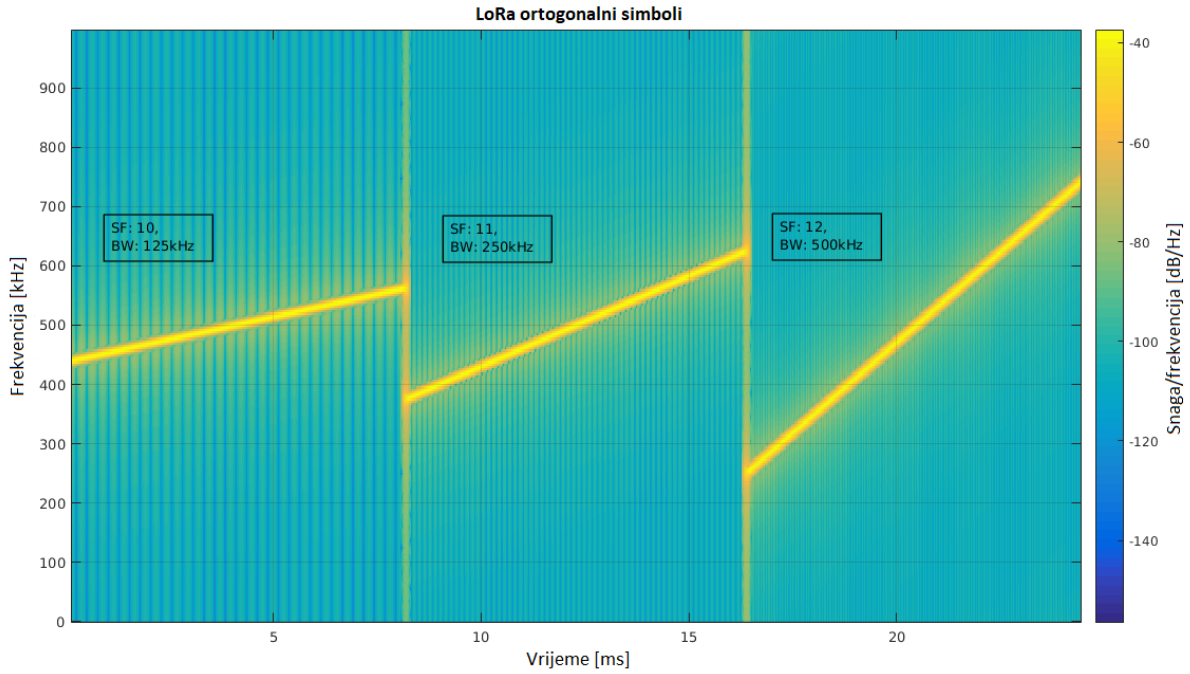
Slika 4.8 LoRa simboli koji nisu ortogonalni [35]

Sljedeće tri kombinacije:

- 1) $SF = 10$ i $BW = 125$ kHz
- 2) $SF = 11$ i $BW = 250$ kHz
- 3) $SF = 12$ i $BW = 500$ kHz

su ortogonalne i mogu se koristiti za prenos kroz isti kanal. Na slici 4.9 su prikazani i njihovi nagibi koji sada nisu identični.

Na kraju, na slici 4.10 su sumirane sve kombinacije faktora proširenja i frekvencijskih opsega sa naznakama koje su ortogonalne, a koje nisu. Na istoj slici 'x' predstavlja kombinacije koje nisu ortogonalne.



Slika 4.9 Ortogonalni LoRa simboli [35]

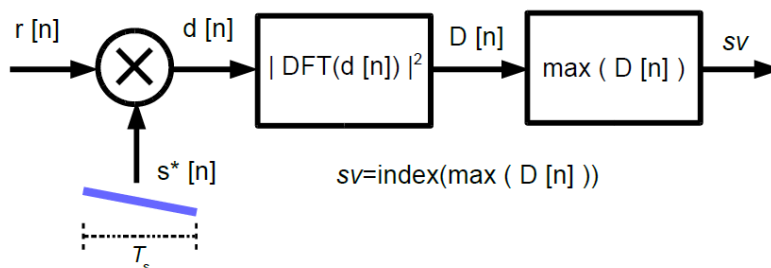
Faktor proširenja (SF) i opseg (BW) u kHz

SF	07	08	09	10	11	12	07	08	09	10	11	12	07	08	09	10	11	12				
BW	125	125	125	125	125	125	250	250	250	250	250	250	250	500	500	500	500	500	500			
07	125	x							x										x			
08	125		x							x										x		
09	125			x							x											
10	125				x							x										
11	125					x																
12	125						x															
07	250						250			x										x		
08	250						250		x												x	
09	250	x					250			x											x	
10	250		x				250				x											x
11	250			x			250					x										
12	250				x		250						x									
07	500						500							x								
08	500						500								x							
09	500						500		x							x						
10	500						500			x							x					
11	500	x					500				x										x	
12	500		x				500					x										x

Slika 4.10 Kombinacije SF i BW koje su (nisu) ortogonalne [35]

4.3.2 LoRa demodulacija (dekodovanje)

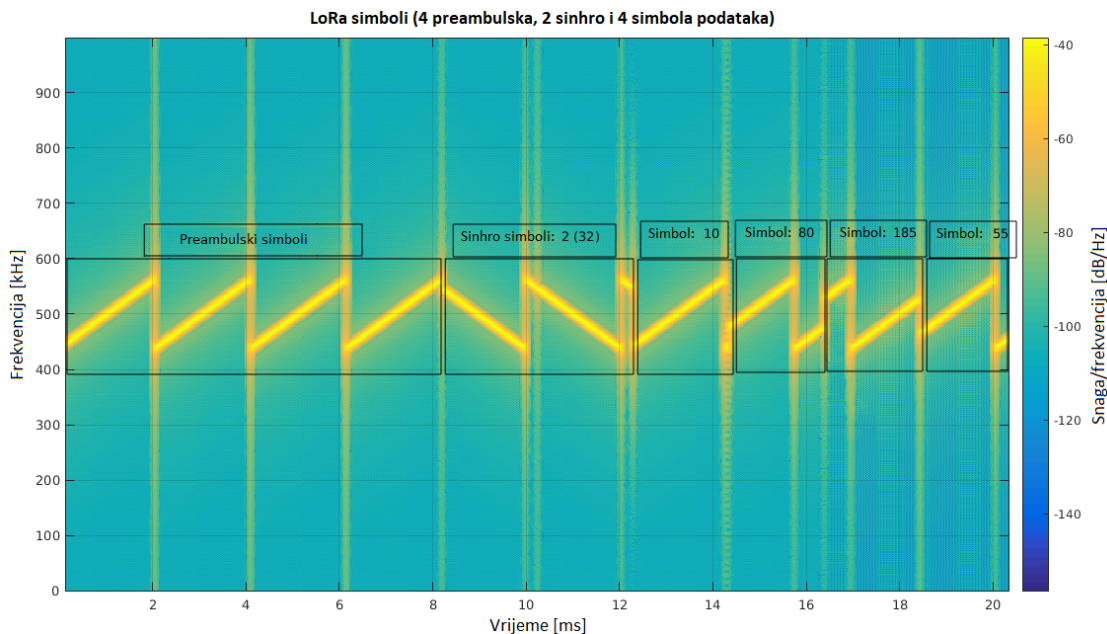
Prilikom kodovanja kod LoRa modulacije ustvari se vrši ciklični pomjeraj osnovnog LoRa *chirp* signala. Prema tome, ako se izvrši množenje primljenog frekvencijski pomjerenog LoRa *chirp*-a i inverznog *chirp*-a, dobija se signal sa konstantnom frekvencijom, sa specifičnom frekvencijom koja je karakteristična za prenosni signal. Sada, ako se primijeni FFT/DFT (eng. *Fast Fourier Transform/Discrete Fourier Transform*) preko cijelog simbola, onda će pik sa najvećom energijom predstavljati preneseni simbol. Ovo je moguće prikazati uprošćenim blok dijagramom koji je prikazan na slici 4.11.



Slika 4.11 Uprošćeni blok dijagram LoRa demodulacije [32]

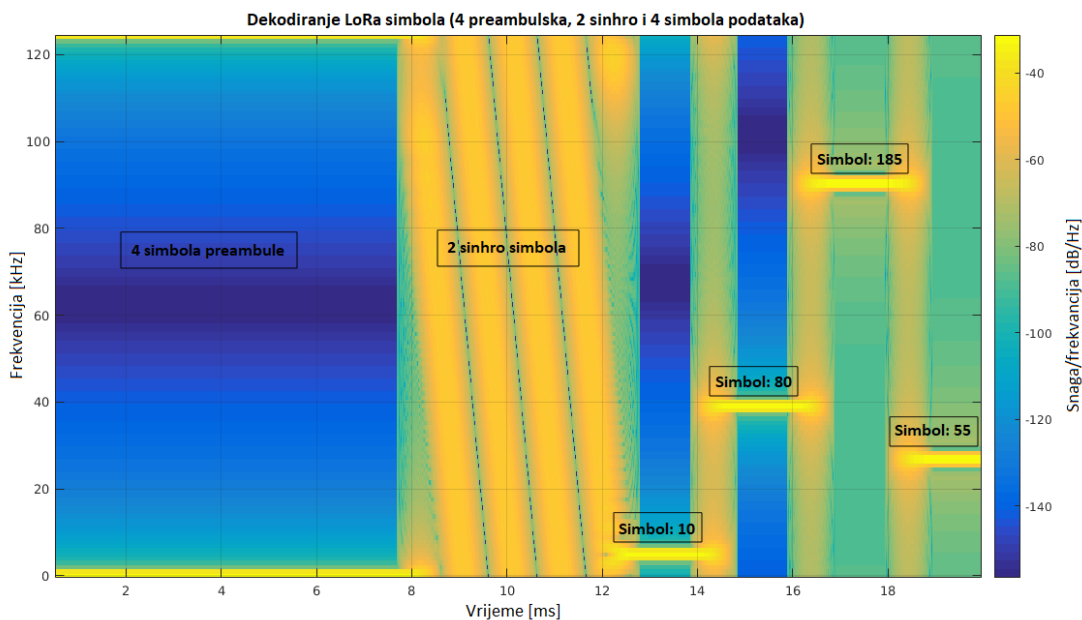
Dakle, primljena sekvenca $r[n]$ se na prijemniku množi sa sekvencom osnovnih *down-chirp* simbola sa nultim cikličnim pomjerajem $s^*[n]$ (“*” kazuje da se radi u kompleksno konjugovanoj matrici) pri čemu se dobija sekvenca $d[n]$. Zatim se vrši DFT i proračun modula matrice koji se označavaju sa $D[n]$. Maksimalni indeksi niza $D[n]$ predstavljaju vrijednosti simbola sv .

Na osnovu sljedećeg primjera se najbolje mogu razumjeti detalji. Pretpostavimo da emitujemo LoRa poruku koja ima 4 preambulska simbola, 2 sinhro simbola (32) i 4 simbola samih korisnih podataka (10, 80, 185, 55). Uzmimo faktor proširenja $SF = 8$. Na slici 4.12 je prikazan izgled te poruke. S obzirom da je faktor proširenja $SF = 8$, to znači da se vrši prenos 8 bita po simbolu koji može da uzme vrijednost od 0 do 255. Kompletan *chirp* je podijeljen na 256 podioka i početna frekvencija predstavlja simbol. Na primjer za simbole '0' ili '255' *chirp* simbol je isti kao preambulski, dok je, recimo, za simbol '128' početna frekvencija tačno na sredini.



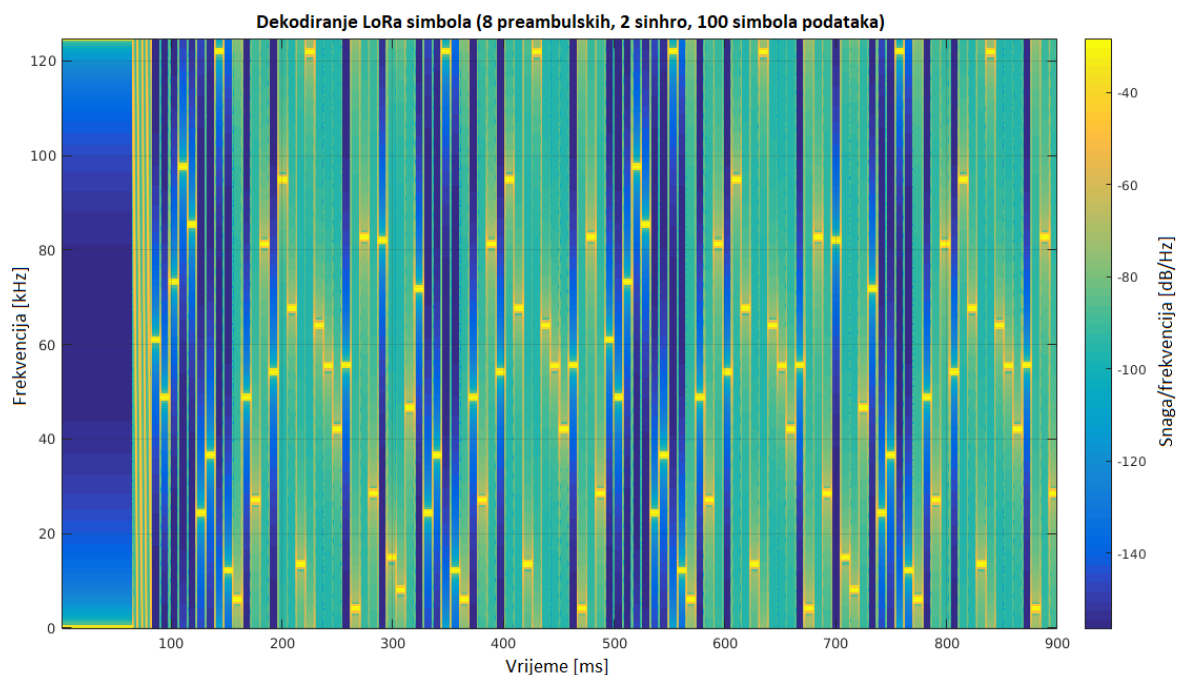
Slika 4.12 Primjer LoRa poruke (4 preambulska, 2 sinhro i 4 simbola podataka) [36]

Sada se na prijemniku vrši množenje sa inverznim *chirp* signalom. Na slici 4.13 je prikazan odgovarajući spektrogram. Nakon množenja, jasno se vide simboli preambule, sinhro simboli i simboli samih podataka. Primljeni simboli imaju konstantnu frekvenciju. Frekvencija (y-osa) predstavlja simbol, a dužina simbola (x-osa) predstavlja vrijeme prenosa simbola (eng. *time-in-the-air*).



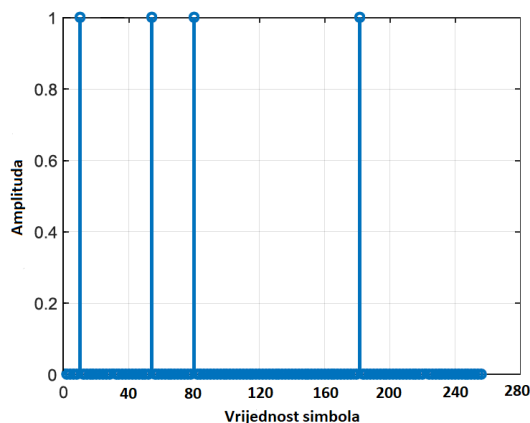
Slika 4.13 Dekodirana LoRa poruka (4 preambulska, 2 sinhro i 4 simbola podataka) [36]

Na sljedećoj slici 4.14 je prikazan spektrogram za slučaj kada se vrši prenos 100 simbola podataka [36].



Slika 4.14 Spektrogram dekodirane LoRa poruka sa 100 simbola podataka [36]

Sada, nakon množenja primljenog simbola sa inverznim *chirp*-om, koristi se FFT/DFT da se ispita koji frekvencijski pik ima najvišu energiju. Dakle, primjenjuje se FFT u 256 tačaka, dobija se frekvencijski pik sa najvišom energijom, što u prevodu znači i početnu frekvenciju samog simbola, odnosno to podrazumijeva i saznavanje kodne riječi. Na slici 4.15 su prikazani simboli 10, 55, 80 i 185 nakon izvršene FFT/DFT.



Slika 4.15 Vrijednost LoRa simbola nakon demodulacije

4.3.3 Budžet linka

Budžet linka bežičnog sistema ili mreže je suma svih dobitaka (pojačanja) i gubitaka (slabljenja) od predajnika, preko kanala prostiranja signala, do ciljnog prijemnika. Ovi dobitci i gubici uključuju sistemske dobitke i gubitke koji se odnose na antene, uspostavljanje mreže, kao i gubitke koji se odnose na propagaciju signala kroz sam kanal (bilo da se radi o modeliranju ili mjerenju podataka) [5].

Budžet linka veze bežične mreže može se izraziti kao:

$$P_{Rx}[dBm] = P_{Tx}[dBm] + G_{system}[dB] - L_{system}[dB] - L_{channel} - L_M[dB] \quad 4.17$$

Gdje su:

P_{Rx} – nivo snage na strani prijemnika,

P_{Tx} – emitovana snaga na predajniku,

G_{system} – sistemski dobitci i pojačanja kao što su oni kod direkcionihih antena,

L_{system} – gubici vezani za sistem kao što su linije napajanja, antene, nesavršenost sistema i sl.,

$L_{channel}$ – gubici zbog propagacije signala u samom kanalu, izračunavaju se putem širokog spektra modela kanala ili iz empirijskih podataka,

L_M – ostali gubici (margine smetnji, neusklađenost polarizacije i slično).

Da bi se izvršila pravilna demodulacija signala na prijemniku, potrebno je uvesti termin osjetljivosti prijemnika koja predstavlja minimalni nivo snage na prijemniku pri kojem je moguće izvršiti demodulaciju za određeni odnos signal-šum (SNR). Osjetljivost LoRa uređaja zavisi od faktora proširenja SF i frekvencijskog opsega modulisanog signala. U tabeli 4.2 je prikazana osjetljivost $SX1272/1273$ primopredajnika za različite parametre LoRa signala.

Tabela 4.2 Osjetljivost SX1272/1273 primopredajnika za različite parametre LoRa signala

Faktor proširenja SF	Osjetljivost [dBm] za BW=125 kHz	Osjetljivost [dBm] za BW=250 kHz	Osjetljivost [dBm] za BW=500 kHz
SF7	-124	-122	-116
SF8	-127	-125	-119
SF9	-130	-128	-122
SF10	-133	-130	-125
SF11	-135	-132	-128
SF12	-137	-135	-129

Drugi važan faktor za korektnu demodulaciju primljenih paketa jeste odnos signal-šum SNR. U sljedećoj tabeli (tabela 4.3) su prikazani zahtijevani odnosi signal-šum (SNR) za odgovarajuće faktore proširenja.

Tabela 4.3 Zahtijevani odnosi signal-šum (SNR) za odgovarajuće faktore proširenja

Faktor proširenja (SF)	SNR [dB]
SF12	-20
SF11	-17.5
SF10	-15
SF9	-12.5
SF8	-10
SF7	-7.5

Možemo primijetiti da se povećanjem faktora proširenja za jedan, smanjuje zahtijevani odnos signal-šum za 2.5 dB. Na osnovu ovih podataka može se zaključiti da je najpovoljniji faktor proširenja SF12, jer je tada najnepovoljniji odnos-signal šum pri kojem je moguće izvršiti demodulaciju LoRa signala.

4.4 Ključne osobine LoRa modulacije

4.4.1 Skalabilan frekvencijski opseg

LoRa modulacija je skalabilna i po pitanju frekvencijskog opsega i po pitanju frekvencije. Može se koristiti i za uskopojasno frekvencijsko skakanje, ali i u aplikacijama koje koriste

direktne sekvence za proširenje spektra. Za razliku od postojećih uskopojasnih i širokopojasnih modulacionih šema, LoRa se vrlo lako može prilagoditi na bilo koji način rada sa samo nekoliko jednostavnih promjena u registru konfiguracije.

4.4.2 Konstantna amplituda / Mala potrošnja

Slično kao kod FSK, LoRa je modulaciona šema sa konstantnom anvelopom što znači da se karakteristike kao što su niska cijena i mala potrošnja mogu koristiti bez dodatnih modifikacija. Pored toga, zahvaljujući procesnom pojačanju, izlazna snaga predajnika može se smanjiti u poređenju sa konvencionalnim FSK vezama, dok se dobija isti ili bolji budžet linka.

4.4.3 Visoka robusnost

Zahvaljujući visokom BT proizvodu ($BT > 1$) i njihovoj asinhronoj prirodi, LoRa signal je veoma otporan na interferencije unutar i van frekvencijskog opsega.

4.4.4 Otpornost na Doppler-ov efekat i na višestruko prostiranje (fading)

Doppler-ov efekat ili pomjeraj uzrokuje mali pomjeraj u LoRa impulsu što daje relativno zanemarljiv pomjeraj na vremenskoj osi signala u osnovnom opsegu. Tolerancija na ovaj frekvencijski pomjeraj ili *offset* ublažava potrebe za preciznim referentnim satovima u prijemnicima. *Chirp* signal je relativno širokopojasni i na taj način LoRa nudi otpornost na višestruka prostiranja (fading), čineći ovu tehnologiju idealnom za upotrebu u urbanim i prigradskim zonama gdje su ove smetnje prisutne.

4.4.5 Povećan domet

Za fiksnu izlaznu snagu i propusnost, budžet linka LoRa modulacije prevazilazi budžet linka kod konvencionalne FSK modulacije. Kada se uzmu u obzir dokazana robusnost na

interferencije i mehanizmi za borbu protiv efekata fedinga, ovo poboljšanje budžeta linka se može posmatrati kao četiri ili više puta povećanje dometa.

4.4.6 Povećan kapacitet mreže

Semtech LoRa modulacija koristi ortogonalne faktore proširenja što omogućava da se više „proširenih” signala prenosi istovremeno i na istom kanalu bez degradacije osetljivosti prijemnika. Modulirani signali sa različitim faktorima proširenja ciljnom prijemniku predstavljaju šum i mogu se tretirati kao takvi.

4.4.7 Lokalizacija

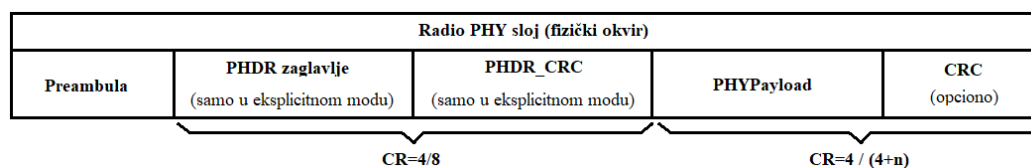
Jedna od ključnih osobina LoRa modulacije je linearna razlika ili zavisnost između frekvencijskih i vremenskih grešaka. LoRa je idealna modulacija za radarske aplikacije, odnosno za mjerenje rastojanja i za lociranje u realnom vremenu.

4.5 Format LoRa fizičkog okvira

Iako LoRa modulacija može da se koristi za prenos proizvoljnih okvira, format fizičkog okvira je specificiran i implementiran u *Semtech*-ovim predajnicima i prijemnicima. Propusni opseg i faktor proširenja su konstantni za cijeli okvir [4]. LoRa okvir se sastoji od tri elementa:

- Preambula,
- Opciono zaglavlje (zavisno od toga da li je uključen eksplicitni ili implicitni mod),
- Korisni podaci (eng. *Payload*) [5].

Ovo je prikazano na sljedećoj slici (slika 4.16).



Slika 4.16 Format LoRa fizičkog okvira

4.5.1 Preambula

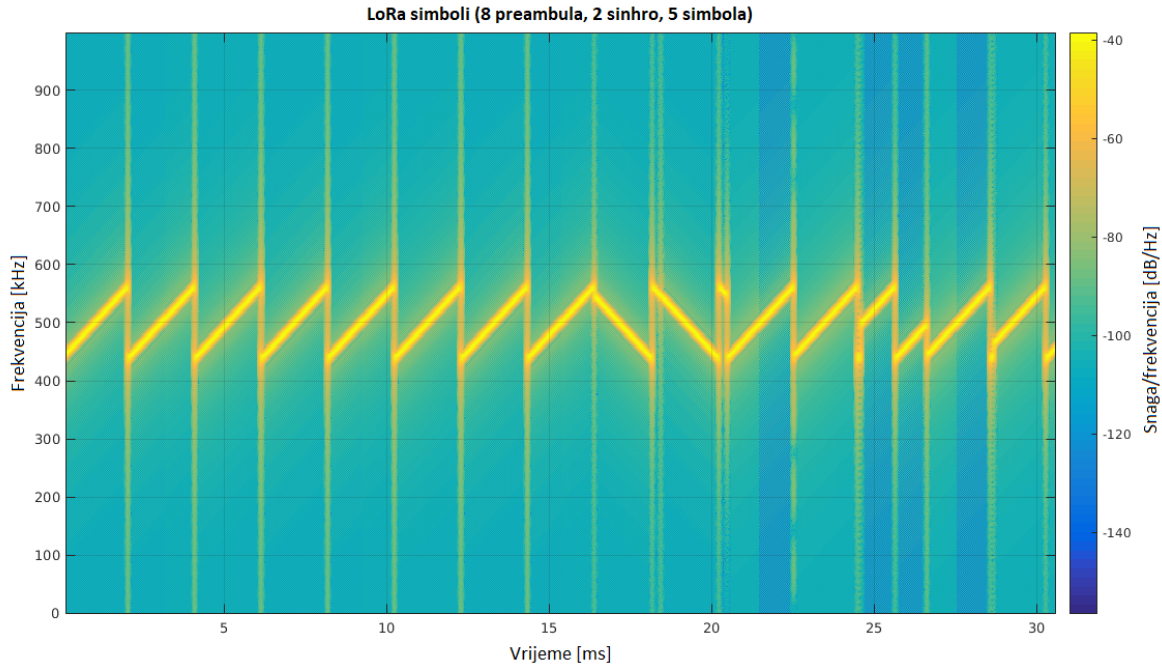
LoRa okvir počinje sa uvodnom sekvencom - preambulom (eng. *Preamble*). Preambula se sastoji od niza *up-chirp* simbola (ukupno osam) koji pokrivaju cijeli frekvencijski opseg. Posljednja dva *up chirp*-a koduju sinhro riječ. Sinhro riječ se sastoji od jednog bajta i omogućava razlikovanje različitih LoRa mreža koje koriste iste frekvencijske opsege. Uređaj konfigurisan tako da ima odgovarajuću sinhro riječ, prestaće da „osluškuje“ prenos ukoliko se dekodovana sinhro riječ iz primljenog signala ne poklapa sa njegovom. Zatim slijede dva cijela i jedna četvrtina *down-chirp*-a, ili 2.25 simbola. Oni se koriste za vremensku sinhronizaciju. Ukupno trajanje preambulske sekvence može da bude između 10.25 i 65539.25 simbola [25].

4.5.2 Opciono zaglavlje (*PHDR – PHY Header*)

U zavisnosti od izabranog načina rada, na raspolaganju su dva tipa zaglavlja.

Eksplisitni mod rada - je podrazumijevani način rada i u tom slučaju zaglavlje se prenosi sa CR (eng. *Coding Rate*) od 4/8. U ovom zaglavlju se čuva informacija o veličini *Payload*-a i da li je prisutan 16-bitni CRC za *Payload* na kraju okvira. Informacija o veličini *Payload*-a je smještena u jedan bajt, ograničavajući veličinu *Payload*-a na 255 bajtova. Takođe, zaglavlje ima svoj CRC da omogući prijemniku da odbaci nevažeća zaglavlja [25], [5].

Implicitni mod rada - U određenim scenarijima, kada su veličina *Payload*-a, CR i prisustvo CRC-a unaprijed poznati, može se znatno smanjiti vrijeme prenosa koristeći implicitni mod rada. U ovom modu zaglavlje se uklanja iz okvira. Takođe, dužina *Payload*-a, CR i prisutnost CRC-a se moraju ručno konfigurisati sa obe strane radio veze [5]. Spektrogram fizičkog okvira izgleda kao na slici 4.17.



Slika 4.17 Spektrogram fizičkog LoRa okvira [30]

4.5.3 Vrijeme prenosa paketa (*Packet on-air time*)

Ukupno vrijeme prenosa paketa se može izračunati na način:

$$t_{packet} = t_{preamble} + t_{payload} \quad 4.18$$

gdje je: $t_{preamble}$ vrijeme potrebno da se prenese preambula, dok je $t_{payload}$ vrijeme koje je potrebno da se prenesu korisni podaci (*Payload*).

$$t_{preamble} = (n_{preamble} + 4.25) \cdot T_s \quad 4.19$$

$$t_{payload} = n_{payload} \cdot T_s \quad 4.20$$

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \quad 4.21$$

gdje je $n_{preamble}$ konfigurabilan parametar koji ukazuje na dužinu preambule, 4.25 (2 ekstra preambulska simbola + 2.25 simbola koji označavaju tzv. SFD – *Start Frame Delimiter*) je broj simbola koji je potreban da označi početak *Payload*-a i $n_{payload}$ je broj simbola u *Payload*-u i T_s je vrijeme trajanja svakog simbola.

$$n_{payload} = 8 + \max \left(\left[\frac{PL - 4SF + 28 + 16CRC - 20H}{4(SF - 2DE)} \right] \cdot (CR + 4), 0 \right) \quad 4.22$$

Gdje $[]$ označava cjelobrojnu vrijednost i gdje je:

PL – broj bajtova u *Payload*-u,

SF – faktor proširenja,

H – jednako nuli kada se koristi eksplicitni mod ili jedinici kada se koristi implicitni mod,

DE – jednako jedinici kada je uključena optimizacija pri malim brzinama i nuli kada je isključena,

CR – kodna brzina od 1 do 4 ($CR+4, 4$).

5. LoRaWAN

LoRaWAN (eng. *Long Range Wide Area Network*) je bežična telekomunikaciona mreža koja treba da obezbijedi komunikaciju krajnjih uređaja (nodova) na većim udaljenostima, ali pri malim bitskim brzinama. To je jedna od prvih komercijalno dostupnih, virtuelizovanih bežičnih mrežnih tehnologija. Budući da nodovi imaju ograničene izvore energije (krajnji uređaji se uglavnom napajaju nepunjivim baterijama), snaga je veoma važan faktor. Ove mreže obezbjeđuju bidirekzione komunikacije, mobilnost i lokalizaciju servisa [2].

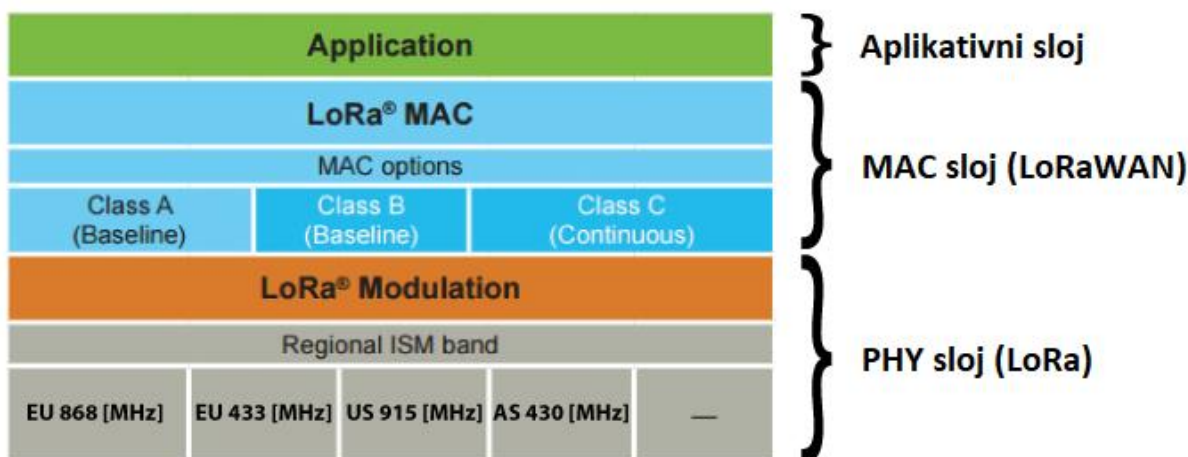
Za razliku od LoRa standarda koji je autorski zaštićen, LoRaWAN je otvoren standard koji je razvijen od strane *LoRa Alliance* [4]. LoRaWAN, uz fizički sloj, definiše i komunikacioni protokol na mrežnom sloju i arhitekturu sistema, za razliku od LoRa tehnologije koja definiše samo fizički sloj koji omogućava komunikaciju širokog dometa. Protokol i arhitektura zajedno imaju veliki uticaj na životni vijek baterija, kapacitet mreže, kvalitet servisa, sigurnost i zaštitu, kao i moguće primjene ove tehnologije [8]. LoRaWAN je, u suštini, MAC protokol za WAN mreže, kojeg je kao takvog, moguće mapirati na drugi i treći sloj OSI modela. Razvijen je tako da koristi LoRa fizički sloj (PHY) [9].

LoRaWAN mreže su obično postavljene u topologiju zvijezda-zvijezda u kojoj *gateway*-i prosljeđuju poruke između krajnjih uređaja i centralnog mrežnog servera. *Gateway*-i su povezani sa mrežnim serverom putem standardnih IP veza, dok krajnji uređaji koriste *single-hop* LoRa ili FSK komunikaciju sa jednim ili više *gateway*-a. Sve komunikacije su generalno dvosmjerne, iako se očekuje da *uplink* komunikacija od krajnjih uređaja ka mrežnom serveru podrazumijeva dominantniji saobraćaj. Komunikacija između krajnjih uređaja i *gateway*-a se odvija na različitim frekvencijskim kanalima i različitim brzinama prenosa podataka. Izbor brzine prenosa podataka je kompromis između opsega komunikacije i trajanja poruke, a komunikacije sa različitim

brzinama prenosa ne ometaju jedni druge. Pored komunikacija od tačke do tačke, koje su bidirekzione, podržane su i tzv. multikast komunikacije. Na taj način moguća je i bežična udaljena nadogradnja softvera ili slanje drugih poruka. Prosječan domet je približno 10 do 15 km u ruralnim oblastima i 3 do 5 km u urbanim sredinama (tu postoji mnogo više ometajućih signala). Brzine prenosa variraju od 0,3 kb/s do 50 kb/s (najveća u Evropi do 50 kb/s). Da bi se maksimalno povećalo trajanje baterije krajnjih uređaja i ukupni kapacitet mreže, LoRaWAN mrežna infrastruktura može upravljati brzinom prenosa podataka i RF izlazom za svaki krajnji uređaj pojedinačno pomoću tzv. ADR algoritma (eng. *Adaptive Data Rate*) [2], [37].

5.1 LoRaWAN MAC sloj

Kao što je već pomenuto, LoRaWAN, uz fizički sloj, definiše i komunikacioni protokol na mrežnom sloju i arhitekturu sistema, za razliku od LoRa tehnologije koja definiše samo fizički sloj. LoRaWAN je, u suštini, MAC protokol za WAN mreže. Na slici 5.1 je prikazan LoRa protokol stek (eng. *stack*) koji se sastoji od aplikativnog sloja, MAC sloja i fizičkog ili PHY sloja.



Slika 5.1 LoRa protokol stek (aplikativni, MAC i fizički sloj)

Podaci sa aplikativnog sloja i MAC komande potrebne za uspostavljanje konekcije između krajnjeg uređaja i *gateway*-a se prenose kao MAC Payload (korisni dio poruke), a zatim MAC sloj konstruiše MAC okvir pomoću tog MAC Payload-a. Na MAC sloju se definiše i klasa krajnjih uređaja.

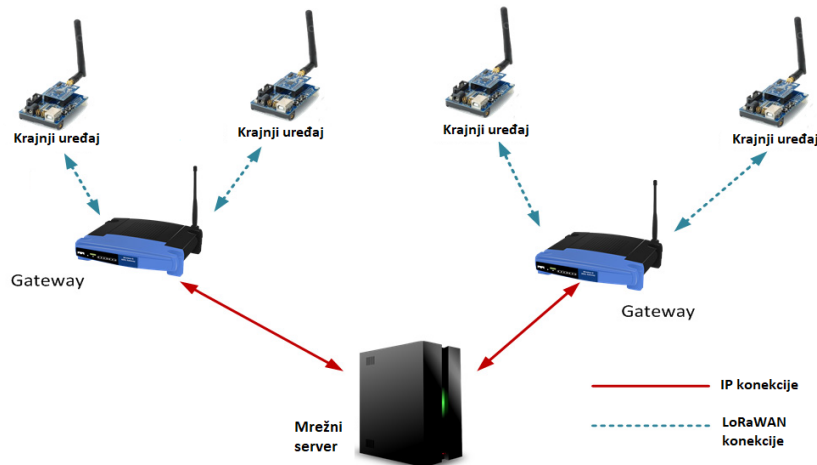
Na kraju, fizički sloj koristi MAC okvir kao korisni dio poruke (PHY Payload) i konstruiše fizički okvir dodajući preambulu, PHY zaglavlje i zaštitni kôd za to zaglavlje, kao i zaštitni kôd za cijeli okvir. Konačni okvir se emituje u eter na odgovarajućem RF nosiocu. RF parametri, uključujući frekvencije, opsege, nivoe snage, modulaciju i osnovni RF protokoli su enkapsulirani u attribute fizičkog (LoRa) sloja.

5.2 Mrežna arhitektura

LoRaWAN mreže su obično postavljene u topologiju zvijezda-zvijezda u kojoj *gateway*-i prosljeđuju poruke između krajnjih uređaja i centralnog mrežnog servera. Dakle, arhitekturu jedne LoRaWAN mreže sačinjavaju sljedeće komponente:

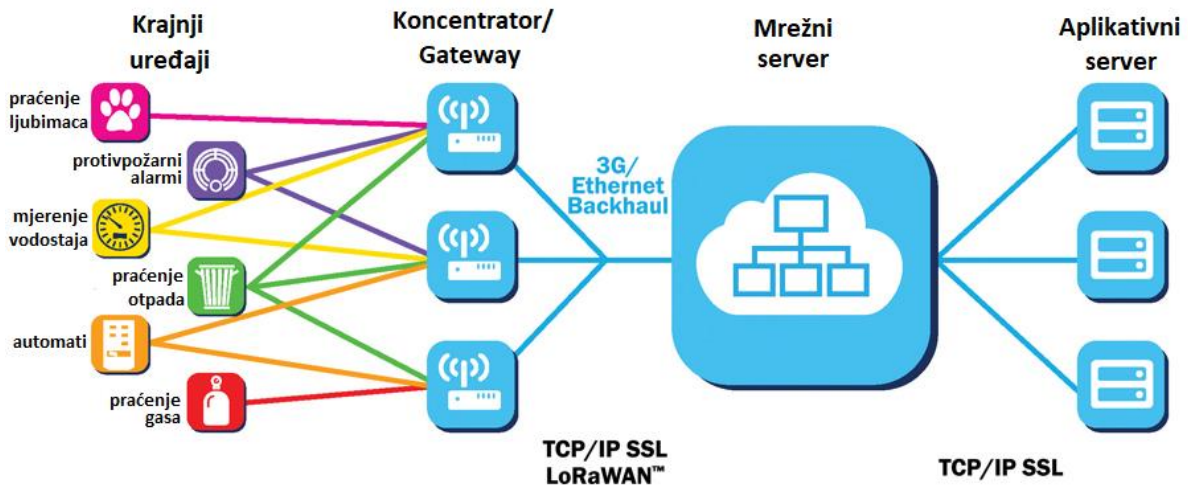
- Krajnji uređaj (eng. *End-Device*): Uglavnom senzori male potrošnje koji komuniciraju sa *gateway*-om koristeći LoRa modulaciju.
- *Gateway*: Posredni uređaji koji primaju pakete iz krajnjih uređaja i prosljeđuju ih ka mrežnom serveru putem standardnih IP konekcija koje mogu da budu *Ethernet* ili neka druga mreža. U LoRa okruženju može da postoji više *gateway*-a i paketi podataka mogu da budu primljeni ili prosljeđivani od strane više od jednog *gateway*-a.
- Mrežni server (eng. *Network Server*): Server koji upravlja mrežom. Mrežni server eliminiše duple pakete, raspoređuje potvrde, i prilagođava brzine prenosa podataka.

Za razliku od tradicionalnih ćelijskih mreža, krajnji uređaji nisu povezani sa određenim *gateway*-om kako bi imali pristup mreži. *Gateway* služi jednostavno kao veza i prosljeđuje pakete, koje dobija od krajnjih uređaja, do mrežnog servera. Prema tome, krajnji uređaj je povezan sa mrežnim serverom koji je odgovoran za otkrivanje duplih paketa, odabira odgovarajućeg *gateway*-a za slanje odgovora (ukoliko postoji), odnosno za slanje paketa ka krajnjim uređajima [25]. Na osnovu prethodnog opisa, moguće je steći sliku o arhitekturi LoRaWAN mreže, koja je prikazana na slici 5.2.



Slika 5.2 Arhitektura LoRaWAN mreže [25]

Takođe, u cilju interakcije sa korisnicima i odgovarajuće upotrebe prikupljenih podataka, u LoRaWAN mreži svoju ulogu zauzima i aplikativni server, što je detaljnije prikazano na slici 5.3.



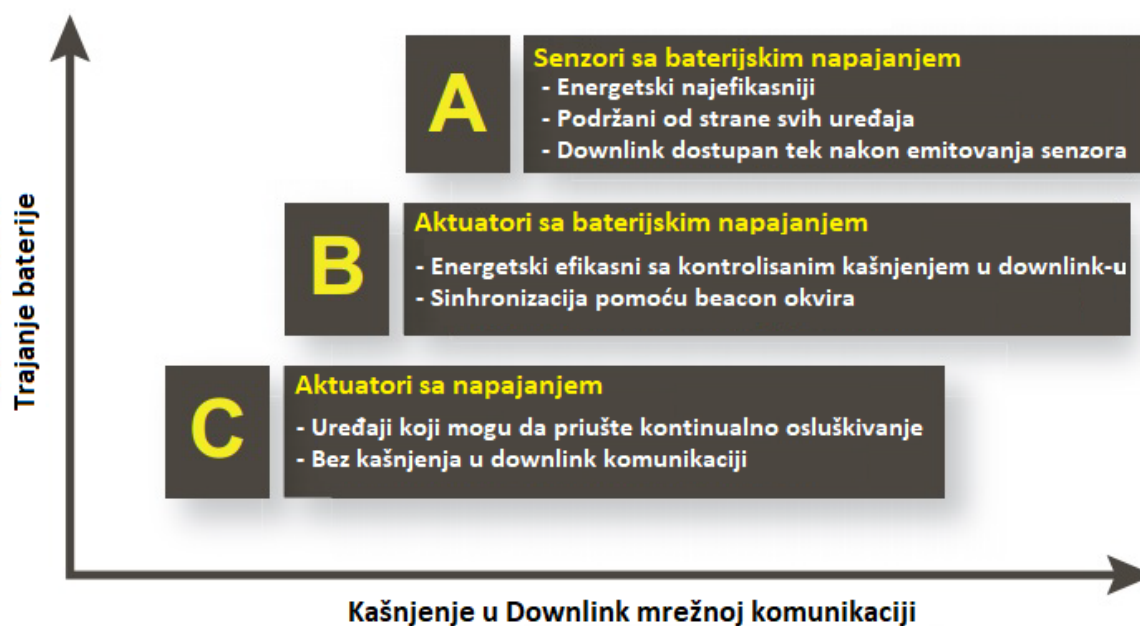
Slika 5.3 Arhitektura LoRaWAN mreže uključujući i aplikativni server [38]

5.3 Klase krajnjih uređaja

Klase krajnjih uređaja su uvedene da bi zadovoljile veoma raznovrsne potrebe IoT aplikacija. Ove klase su definisane uzimajući u obzir kašnjenje u direktnom (*downlink*) smjeru, odnosno u smjeru od *gateway*-a ka krajnjem uređaju i životni vijek baterije. Drugim riječima,

radi se o pronalaženju kompromisa između kašnjenja i trajanja baterija. Na slici 5.4 je prikazan ovaj odnos.

Već je pomenuto ranije da je LoRaWAN tehnologija razvijena za tipove uređaja koji šalju male količine podataka nekoliko puta dnevno (recimo, neki senzori), a ne za aplikacije koje podrazumijevaju velike protoke (npr. audio i video zapis). Dakle, postoje tri klase LoRaWAN krajnjih uređaja, a to su: klasa A, klasa B i klasa C.

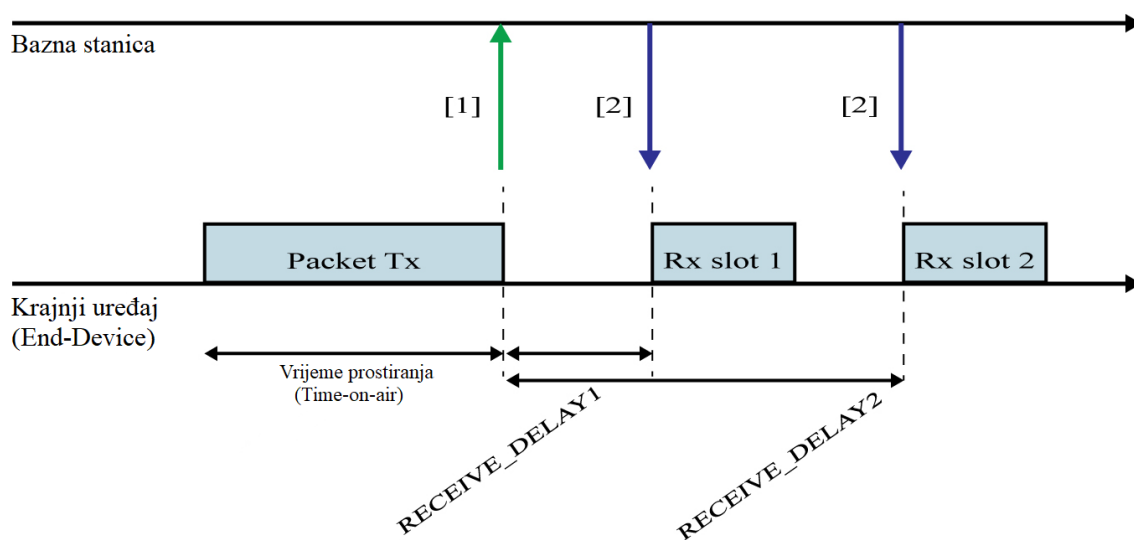


Slika 5.4 Klase LoRaWAN uređaja (zavisno od trajanja baterije i kašnjenja) [5]

5.3.1 Klasa A

Krajnji uređaji klase A podržavaju dvosmjernu komunikaciju između uređaja i *gateway*-a (servera). *Uplink* poruke (od uređaja do servera) mogu se poslati u bilo kom trenutku (slučajno). Sam transmisioni slot rezervisan od strane krajnjeg uređaja zavisi od njegovih potreba za komunikacijom. Uređaj zatim otvara dva prijemna prozora (eng. *receive windows*) u određeno vrijeme (na primjer nakon 1s i 2s) poslije emitovanja *uplink* poruke. Ako server ne odgovori ni u jednom od ovih prozora, sljedeća prilika će biti nakon sljedećeg emitovanja *uplink* poruke sa

uređaja. Server može da odgovori bilo u prvom prozoru za prijem ili u drugom prijemnom prozoru. Uređaji klase A imaju najmanju potrošnju, ali i nude najmanju fleksibilnost u smislu prijema *downlink* poruka. Ova klasa, podržana od strane svih LoRaWAN krajnjih uređaja, se koristi uglavnom za prenos u *uplink* smjeru, kao što je prikupljanje podataka sa senzora za temperaturu, kvalitet vazduha, razna mjerenja, nadgledanja i slično. Na slici 5.5 je prikazan raspored transmisionog i prijemnih vremenskih slotova.



Slika 5.5 Raspored transmisionog i prijemnih vremenskih slotova kod uređaja klase A [5]

Sa [1] je označena situacija kada je emitovana poruka od strane krajnjeg uređaja i tada sve bazne stanice, koje se nalaze u krugu dometa, primaju poruku ili paket. U trenutku [2] mrežni server bira najbolju baznu stanicu da odgovori krajnjem uređaju u slučaju da primljeni paket zahtijeva potvrdu ili odgovor. Krajnji uređaji mogu da prime odgovor samo u dva tzv. prijemna prozora (*Rx slot 1* i *Rx slot 2*) koji se otvaraju odmah pri emitovanju neke poruke. Ukoliko server želi da pošalje još neki paket, moraće da sačeka otvaranje prijemnih prozora, nakon emitovanja sljedećeg paketa samog krajnjeg uređaja.

Prvi prijemni prozor *Rx slot 1* koristi isti frekvencijski kanal koji se koristi u *uplink*-u, a brzina prenosa podataka u prvom prijemnom prozoru je funkcija brzine prenosa podataka koja

se koristi za *uplink*. Prijemni prozor *Rx slot 1* se otvara za RECEIVE_DELAY1 sekundi nakon završetka *uplink* modulacije (+/- 20 mikrosekundi). Odnos između brzina prenosa podataka u *uplink*-u i u prvom prijemnom prozoru zavisi od regionalnih specifikacija.

Drugi prijemni prozor *Rx slot 2* koji koristi fiksnu, konfigurabilnu frekvenciju i brzinu prenosa podataka, otvara se za RECEIVE_DELAY2 sekundi nakon završetka *uplink* modulacije (+/- 20 mikrosekundi). Na primjer, za EU863-870 regulaciju, podrazumijevani parametri su 869.525 MHz i DR0 (SF12, 125 kHz).

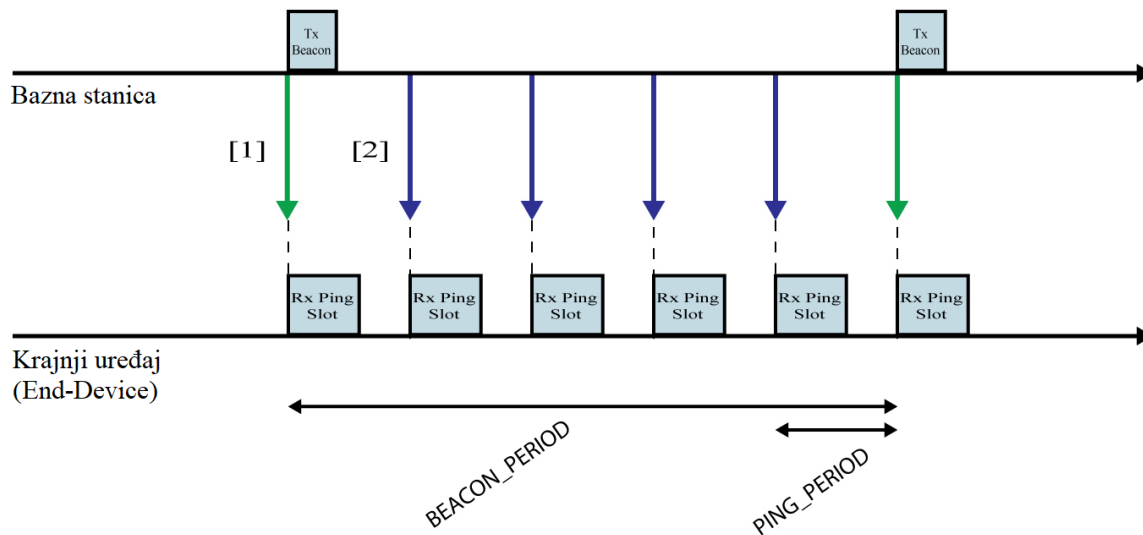
5.3.2 Klasa B

Uređaji klase B dopunjavaju karakteristike uređaja klase A tako što otvaraju dodatne prijemne prozore u planiranom vremenu. Za ovu klasu uređaja je neophodna sinhronizacija pomoću *beacon* okvira sa *gateway*-a da bi server dobio informaciju kada je krajnji uređaj spreman za prijem [25].

Ova klasa može biti korisna za uređaje koji se napajaju pomoću baterije gdje su primijenjeni dvosmjerni senzori, npr. pri očitavanju senzora sa povremenim upravljanjem ili konfiguracijom, senzori alarma sa garantovanom isporukom alarma i slično.

U trenucima označenim sa [1] na slici 5.6 svi *gateway*-i sinhrono sa mrežnim serverom moraju da šalju *broadcast beacon* signal ili paket obezbjeđujući tako vremensku referencu za sve krajnje uređaje.

Krajnji uređaji periodično otvaraju prijemne prozore koji se nazivaju i *ping slot*-ovi (u trenucima označenim sa [2] na slici 5.6). Ovi prozori mogu da se iskoriste od strane mrežne infrastrukture da bi se inicirala komunikacija u *downlink* smjeru.



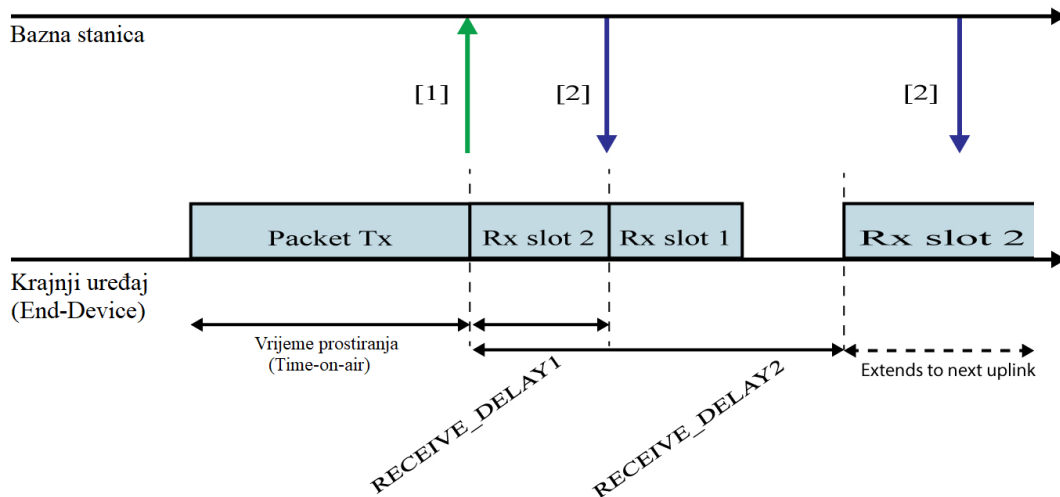
Slika 5.6 Vremenski slotovi kod uređaja klase B [5]

5.3.3 Klasa C

Kod ovih uređaja moguća je dvosmjerna komunikacija sa maksimalnim vremenom primanja paketa. Uređaji ove klase primaju pakete skoro u kontinuitetu sa servera (osim kada šalju pakete) i samim tim imaju najveću potrošnju energije [25].

Krajnji uređaji klase C imaju mnogo veću potrošnju nego uređaji klase A ili klase B, ali zato oni imaju najmanja kašnjenja u *downlink* komunikaciji servera sa krajnjim uređajima. Ova klasa može biti korisna za uređaje sa napajanjem u kojima je u svakom trenutku potrebna *downlink* komunikacija: industrijska kontrola, kontrola u realnom vremenu za pumpe, ventile, stambene kapije, kontrola osvjjetljenja, stanje motora automobila, praćenje automobila i slično.

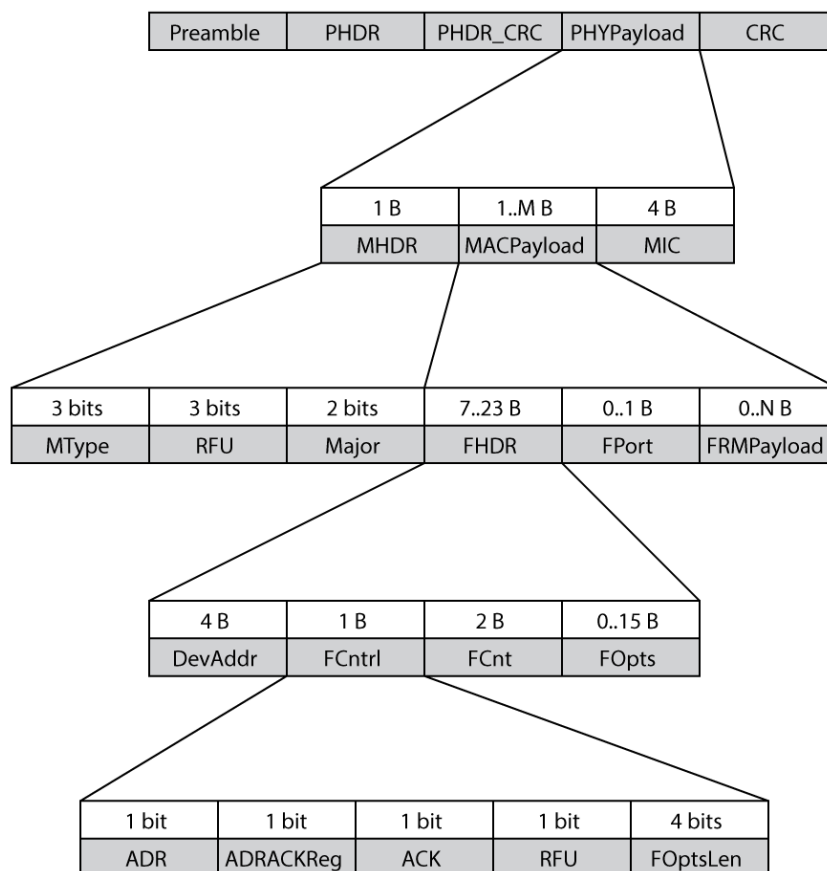
Klasa C primjenjuje iste prijemne prozore kao i klasa A sa razlikom da se drugi prijemni prozor ne zatvara do početka ponovnog emitovanja paketa samog krajnjeg uređaja. To je na slici 5.7 označeno sa [1]. Kratak prozor za osluškivanje se otvara između kraja emitovanja krajnjeg uređaja i otvaranja prvog prijemnog slota *Rx slot 1*. Gateway-i mogu da komuniciraju sa krajnjim uređajima u bilo kom trenutku [2].



Slika 5.7 Vremenski slotovi kod uređaja klase C [5]

5.4 Format LoRaWAN poruka

U prethodnim poglavljima je opisan format fizičkog ili LoRa okvira, čiji je izgled prikazan na slici 4.16. Kako LoRaWAN definiše komunikacioni protokol i MAC sloj, a svi ti podaci se nalaze u korisnom dijelu poruke sa fizičkog sloja, sa sljedeće slike 5.8 se može vidjeti struktura LoRaWAN poruke.



Slika 5.8 Format LoRaWAN poruke (okvira)

5.4.1 PHYPayload

Struktura PHY Payload-a ili korisnog dijela poruke na fizičkom nivou je data na sljedećoj slici 5.9. Sastoji se od MAC zaglavlja (MHDR), MAC korisne poruke (MACPayload) i MIC polja. MIC predstavlja kod integriteta kriptovane poruke i izračunava se na osnovu polja MHDR, FHDR, FPort i FRMPayload.

PHYPayload		
1 Byte	1..M Bytes	4 Bytes
MHDR	MACPayload	MIC

Slika 5.9 Struktura korisnog dijela poruke (Payload)

5.4.2 MHDR (MAC header) – MAC zaglavlje

MAC zaglavlje je prikazano na slici 5.10 i ono specificira tip poruke u polju MType (eng. *Message Type*), Major polje specificira format poruka razmijenjenih u proceduri pridruživanja (eng. *join procedure*). RFU su tri bita koja su rezervisana za buduću upotrebu (eng. *Reserved for Future Usage*).

MHDR		
Bit# 7 to 5	Bit# 4 to 2	Bit# 1 to 0
MType	RFU	Major

Slika 5.10 Struktura MAC zaglavlja

MType (Message Type) je polje koje označava tip MAC poruke. LoRaWAN razlikuje šest tipova MAC poruka: zahtjev za pridruživanje (eng. *Join Request*), prihvatanje pridruživanja (eng. *Join Accept*), nepotvrđeni podaci u *up* smjeru (eng. *Unconfirmed Data Up*), nepotvrđeni podaci u *down* smjeru (eng. *Unconfirmed Data Down*), potvrđeni podaci u *up* smjeru (eng. *Confirmed Data Up*) i potvrđeni podaci u *down* smjeru (eng. *Confirmed Data Down*). Tri bita u polju MType određuju tip MAC poruke prema sljedećoj tabeli 5.1.

Tabela 5.1 Tip MAC poruke u zavisnosti od vrijednosti tri bita u MType polju

MType vrijednost	Opis
000	Join Request
001	Join Accept
010	Unconfirmed Data Up
011	Unconfirmed Data Down
100	Confirmed Data Up
101	Confirmed Data Down
110	RFU
111	Proprietary

5.4.3 MACPayload

MAC Payload ili MAC korisni dio poruke, često nazvan i „okvir podataka“, sadrži zaglavlje okvira (FHDR – eng. *Frame Header*), poslije kog slijedi opciono polje porta (FPort – eng. *Field Port*) i na kraju opciono polje FRMPayload. Ovo je prikazano na sljedećoj slici 5.11.

MACPayload		
7..23 Bytes	0..1 Bytes	0..N Bytes
FHDR	FPort	FRMPayload

Slika 5.11 MAC Payload

5.4.4 Fport (Port Field)

Ako polje FRMPayload nije prazno, polje porta (FPort), mora da bude prisutno. Ukoliko je prisutno, ako je vrijednost FPort polja jednaka nuli, to znači da FRMPayload sadrži samo MAC komande. Vrijednosti FPort polja od 1 do 223 (0x01 .. 0xDF) su aplikaciono specificirane. Vrijednosti 224..255 (0xE0..0xFF) polja FPort su rezervisane za buduća aplikativna proširenja.

5.4.5 FHDR (Frame header) – Zaglavlje okvira

Struktura polja FHDR je prikazana na slici 5.12. Polje FHDR sadrži 32-bitnu adresu krajnjeg uređaja (DevAddr), kontrolni oktet okvira (FCntrl), 2 bajta brojača okvira (FCnt) i do 15 bajtova koji se koriste za transport MAC komandi (FOpts).

FHDR			
4 Bytes	1 Byte	2 Bytes	0..15 Bytes
DevAddr	FCntrl	FCnt	FOpts

Slika 5.12 Frame header - FHDR

5.4.6 FCtrl (Control Field)

Na sljedećim slikama (5.13 i 5.14) su prikazana kontrolna polja (FCtrl) za *uplink* i *downlink* okvire. Značenje pojedinih bita u ovom polju su data u daljem tekstu.

FCtrl				
Bit# 7	Bit# 6	Bit# 5	Bit# 4	Bit# 3 to 0
ADR	ADRACKReq	ACK	RFU	FOptLen

Slika 5.13 FCtrl za uplink okvire

FCtrl				
Bit# 7	Bit# 6	Bit# 5	Bit# 4	Bit# 3 to 0
ADR	ADRACKReq	ACK	FPending	FOptLen

Slika 5.14 FCtrl za downlink okvire

ADR i ADRACKReq - LoRa mreža omogućava krajnjim uređajima da pojedinačno koriste bilo koju od mogućih brzina prenosa podataka. Ovu osobinu koristi LoRaWAN za prilagođavanje i optimizaciju brzine prenosa krajnjih uređaja. Ovo se naziva ADR (eng. *Adaptive Data Rate*) algoritam i kada je omogućen, mreža vrši optimizaciju i koristi se najveća moguća brzina prenosa podataka. Ako je ADR bit podešen, mreža će kontrolisati brzinu prenosa podataka krajnjeg uređaja pomoću odgovarajućih MAC komandi. Ako ADR bit nije setovan, mreža neće pokušavati da kontroliše brzinu prenosa podataka na krajnjem uređaju bez obzira na kvalitet primljenog signala. ADR bit može biti uključen ili isključen od strane krajnjeg uređaja ili mreže na zahtjev. Međutim, kad god je to moguće, ADR šemu bi trebalo omogućiti jer se na taj način povećava životni vijek baterije krajnjih uređaja i kao i sam kapacitet mreže.

ACK - Kada prima potvrđenu poruku, prijemnik treba da odgovori okvirom podataka koji ima setovan ACK bit ili bit potvrde (eng. *Acknowledgement*). Ako je pošiljalac krajnji uređaj, mreža će poslati potvrdu koristeći jedan od prijemnih prozora otvorenih od strane krajnjeg uređaja poslije nakon emitovanja. Ako je pošiljalac *gateway*, krajnji uređaj šalje potvrdu po

sopstvenom nahodjenju. Potvrde se samo šalju u odgovoru na posljednju primljenu poruku i nikad se ne reemituju.

FOptsLen - FOptsLen biti označavaju stvarnu dužinu polja FOpts koje je uključeno u sam okvir. Ako je polje FOptsLen 0, to znači da polje FOpts nije prisutno. Ukoliko je FOptsLen polje različito od 0, port 0 ne može da se koristi (FPort polje mora ili da bude različito od 0 ili da ne bude prisutno uopšte).

FPending - FPending bit se koristi samo u *downlink* komunikaciji i pokazuje da *gateway* ima još podataka za slanje i stoga traži od krajnjeg uređaja da otvori drugi prijemni prozor što je prije moguće.

5.5 MAC komande

Za administraciju mreže, skup MAC komandi može da se razmjenjuje isključivo između mrežnog servera i MAC sloja na krajnjim uređajima. Komande na MAC sloju nikad nisu vidljive u aplikaciji, aplikativnom serveru ili u aplikaciji koja je pokrenuta na krajnjem uređaju.

Pojedinačni okvir podataka može da sadrži bilo kakav niz MAC komandi, bilo da se prenose pomoći FOpts polja ili kada se prenose kao poseban okvir podataka, u polju FRMPayload, pri čemu je polje FPort podešeno na nulu. MAC komande koje se prenose pomoću polja FOpts uvijek se šalju bez enkripcije i ne mogu da premašuju 15 okteta. MAC komande koje se šalju kao FRMPayload uvijek su enkriptovane AES algoritmom i ne smiju da premašuju dužinu FRMPayload-a. U tabeli 5.2 su prikazane dostupne MAC komande.

Tabela 5.2 MAC komande i njihov opis

CID (identifikator komande)	Komanda	Emitovana od strane:		Kratak opis
		Krajnji uređaj	Gateway	
0x02	LinkCheckReq	x		Koristi se od strane krajnjeg uređaja da bi se validirala njegova konekcija na mrežu.
0x02	LinkCheckAns		x	Odgovor na LinkCheckReq komandu. Sadrži procjenu snage primljenog signala pokazujući krajnjem uređaju kvalitet prijema.
0x03	LinkADRReq		x	Zahtjeva od krajnjeg uređaja da promijeni brzinu prenosa podataka, snagu ili frekvencijski kanal.
0x03	LinkADRAns	x		Potvrda na LinkADRReq
0x04	DutyCycleReq		x	Podešavanje maksimalnog ukupnog radnog ciklusa (duty-cycle) uređaja
0x04	DutyCycleAns	x		Potvrda na DutyCycleReq
0x05	RXParamSetupReq		x	Podešavanje parametara prijemnih prozora (slotova)
0x05	RXParamSetupAns	x		Potvrda na RXParamSetupReq
0x06	DevStatusReq		x	Zahtijeva status krajnjeg uređaja
0x06	DevStatusAns	x		Vraća status krajnjeg uređaja (nivo baterije i margine demodulacije)
0x07	NewChannelReq		x	Kreira ili modifikuje radio-kanal
0x07	NewChannelAns	x		Potvrda na NewChannel Request
0x08	RXTimingSetupReq		x	Podešavanje tajminga prijemnih prozora (slotova)
0x08	RXTimingSetupAns	x		Potvrda na RXTimingSetupReq
0x80 .. 0xFF	Rezervisane	x	x	Rezervisane za komande autorizovanih vlasničkih mreža

5.6 Sigurnost u LoRaWAN

Sigurnost u LoRaWAN (eng. *Security*) je osmišljena tako da odgovara opštim LoRaWAN projektnim kriterijumima: mala potrošnja energije, mala složenost implementacije, niska cijena i visoka skalabilnost. Kako su uređaji postavljeni na terenu na duži vremenski period (u pitanju su godine), sigurnost mora da bude projektovana u skladu sa budućim potrebama. Fundamentalne osobine koje su podržane u LoRaWAN sigurnosti su uzajamna autentifikacija, zaštita integriteta i povjerljivost. Uzajamna autentifikacija se uspostavlja između krajnjih uređaja i LoRaWAN mreže kao dio procedure pridruživanja mreži (eng. *join procedure*). Ovo garantuje da se samo originalni i ovlašćeni uređaji mogu pridružiti autentičnim mrežama. LoRaWAN MAC i aplikativne poruke se potvrđuju, imaju zaštićen integritet, a takođe su i enkriptovane. Ova zaštita,

kombinovana sa uzajamnom autentifikacijom, obezbjeđuje da saobraćaj koji dolazi od legitimnog uređaja nije izmijenjen, nije razumljiv za prislušivače, niti može biti snimljen pa ponovo reprodukovano. LoRaWAN bezbjednost se dalje primjenjuje kroz *end-to-end* šifrovanje ili enkripciju korisnog dijela podataka koji se razmjenjuju između krajnjih uređaja i aplikativnih servera. LoRaWAN je jedna od rijetkih IoT mreža koja implementira *end-to-end* enkripciju.

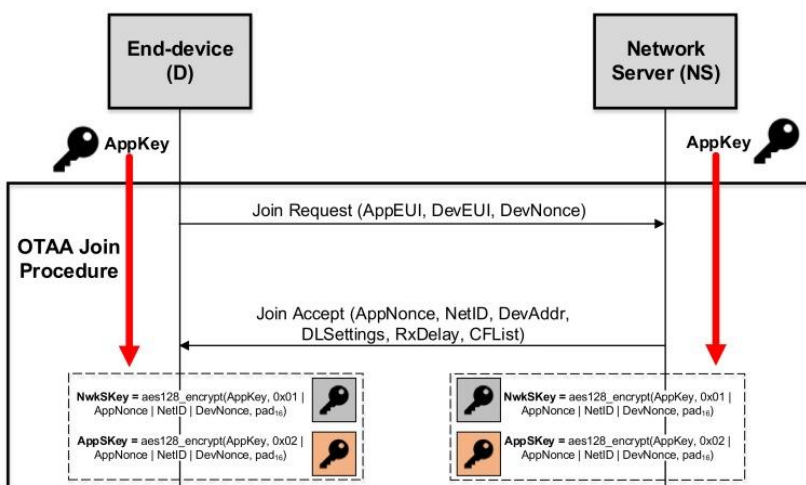
LoRaWAN koristi dva sloja sigurnosti: jedan za mrežu i jedan za sloj aplikacije. Sigurnost mrežnog sloja osigurava autentičnost uređaja u mreži. Sigurnost aplikacijskog sloja osigurava da operator mreže nema pristup podacima aplikacija krajnjeg korisnika [39].

Sa sigurnosne perspektive, LoRaWAN primjenjuje kriptografski mehanizam zasnovan na AES-128 (eng. *Advanced Encryption Standard*) koji radi u režimu brojača (CTR). Zasnovan je na ključu koji je prethodno dijeljen (eng. *pre-shared key*), iz kojeg su izvedeni još dva dodatna ključa za osiguranje sesije [39]. Prije obavljanja ovog postupka izvođenja, krajnji uređaji moraju biti aktivirani kako bi se omogućilo povezivanje na specifičnu LoRaWAN mrežu. U suprotnom, mrežni server odbacuje prenesene okvire. Da bi krajnji uređaj bio aktiviran, on mora da posjeduje: adresu krajnjeg uređaja (eng. *Device Address - DevAddr*), ključ mrežne sesije (eng. *Network Session Key - NwkSKey*) i ključ aplikacione sesije (eng. *Application Session Key - AppSKey*). U zavisnosti od usvojene procedure pridruživanja (eng. *join procedure*), ovi podaci se mogu ručno unijeti na uređaj ili se mogu dobiti putem radio-veze.

U slučaju ručnog unošenja na uređaj, koji se još naziva i ABP metod (eng. *Activation by Personalization*) podaci o autentifikaciji su hard-kodirani u uređaj prije nego što on započne komunikaciju sa mrežom. Prema tome, nije potrebna procedura pridruživanja. Ovi podaci povezuju krajnji uređaj sa određenom LoRaWAN mrežom, jer sadrže LoRaWAN mrežni identifikator (*NwkId*), mrežnu adresu (*NwkAddr*) uređaja i kriptografske ključeve sesije (*NwkSKey* i *AppSKey*). Stoga, krajnjem uređaju nije dozvoljeno da komunicira sa ostalim LoRaWAN mrežama dok ove vrijednosti ostaju iste [39], [40].

Što se tiče drugog načina aktiviranja uređaja, koji se još naziva i aktiviranje putem radio-veze ili *Over-The-Air Activation (OTAA)*, svaki krajnji uređaj obavlja dobro definisanu proceduru pridruživanja u cilju dobijanja potrebnog kriptografskog materijala kako bi se omogućilo sigurno povezivanje sa određenom mrežom. Slika 5.15 prikazuje pregled ovog načina aktivacije. Da bi pokrenuo proces pridruživanja, krajnji uređaj mora posjedovati sljedeće

podatke: identifikator krajnjeg uređaja (64-bitiski *DevEUI*), aplikacijski identifikator (64-bitiski *AppEUI*) i aplikacioni ključ (*AppKey* - 128 bita). *DevEUI* jedinstveno identifikuje krajnji uređaj, dok *AppEUI* identifikuje entitet koji je u stanju da obradi zahtjev za pridruživanje od krajnjeg uređaja. *AppKey* je AES-128 ključ koji se koristi za kriptografski potpisivanje zahtjeva za pridruživanje. Zbog toga, kao početni korak, krajnji uređaj šalje poruku o pridruživanju koja sadrži *AppEUI*, *DevEUI* i *DevNonce* (što je jedinstvena, slučajno generisana, dvobajtna vrijednost koja se koristi za sprečavanje napada ponavljanja). Ove tri vrijednosti su potpisane sa 4-bajtnim MIC (eng. *Message Integrity Code*) pomoću *AppKey* ključa od uređaja. Server prihvata prijave za pridruživanje samo na uređajima sa poznatim vrijednostima *DevEUI* i *AppEUI* dok validira MIC koristeći *AppKey*. Podaci sadržani u ovoj prvoj poruci omogućavaju izvođenje ili izračunavanje dva 128-bitna ključa, i to: ključ mrežne sesije (eng. *Network Session Key* - *NwkSKey*) i ključ aplikacione sesije (eng. *Application Session Key* - *AppSKey*).



Slika 5.15 OTAA procedura pridruživanja [40]

Konačno, ako je proces uspješno i tačno završen, mrežni server odgovara uz poruku za pridruživanje/prihvatanje kako bi zatvorio ovu transakciju i potvrdio autentifikaciju krajnjeg uređaja. Ova poruka je već šifrovana koristeći *AppKey*. Ova dva ključa sesije (*NwkSKey* i *AppSKey*) su jedinstveni za svaki uređaj i za svaku sesiju. LoRaWAN ne pruža mehanizam za ažuriranje ovih ključeva. Zbog toga je potrebno da krajnji uređaj ponovo sprovede novi proces aktivacije radi osvježavanja potrebnih podataka. Čak i u ovom slučaju, novi ključevi sesije su uvijek izvedeni iz statičkog i prethodno dijeljenog *AppKey* ključa [40].

5.7 Frekvencijski planovi

LoRaWAN specifikacija se blago razlikuje od regiona do regiona na osnovu različitih raspodjela regionalnog spektra i regulatornih zahtjeva [6]. U sljedećoj tabeli 5.3 su prikazani uobičajeni skraćeni nazivi frekvencijskih planova u zavisnosti od regiona u kojima se ti frekvencijski planovi koriste.

Tabela 5.3 Frekvencijski planovi u zavisnosti od regiona u kome se koriste

Frekvencijski plan	Region (zemlje) u kojima se koristi	Uobičajeni naziv
EU863-870	Evropa	EU868
US902-928	SAD, Kanada, J. Amerika	US915
CN779-787	Kina	CN779
EU433	Evropa	EU433
AU915-928	Australija	AU915
CN470-510	Kina	CN470
AS923	Japan, Malezija, Singapur, Indonezija, Tajland, Tajvan, Vijetnam	AS923
KR920-923	Južna Koreja	KR920
IN865-867	Indija	IN865
RU864-870	Rusija	RU864

U daljem tekstu, dat je pregled frekvencijskog plana koji se koristi u Evropi i Sjedinjenim Američkim Državama, odnosno EU863-870 (EU868) i US902-928 (US915).

5.7.1 EU863-870

U Evropi se, dakle, koristi ISM opseg 868 MHz, odnosno od 863 do 870 MHz. Opseg je podijeljen na 10 kanala, od kojih se na njih 8 može ostvariti promjenljiva brzina (*DR*) od 0.3 b/s do 5.5 kb/s, zatim se preko jednog vrši prenos na brzini od 11 kb/s i na kraju, jedan je rezervisan za FSK modulaciju i brzinu od 50 kb/s. U tabeli 5.4 je prikazan raspored kanala sa njihovim centralnim frekvencijama i mogućim brzinama prenosa i to u *uplink* prenosu.

Što se tiče prenosa u *downlink*-u, kod većine proizvođača je sljedeća situacija: od prvog do devetog *uplink* kanala je *RX1* prozor, dok se za *RX2* koristi kanal 869.525 MHz i brzina SF12BW125 (ove postavke postoje samo u *downlink*-u).

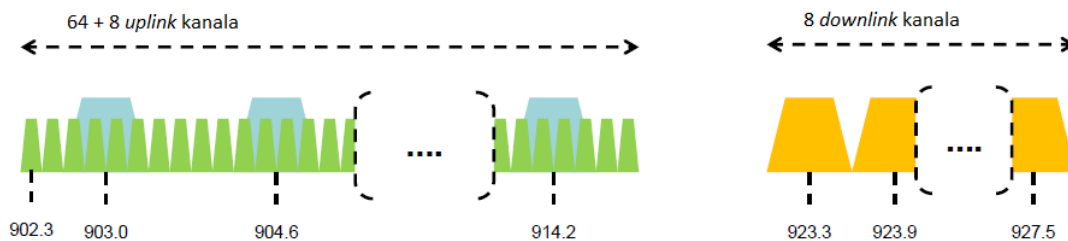
Tabela 5.4 Moguće brzine prenosa za frekvencijske kanale u ISM opsegu 868 MHz

Frekvencijski kanal	Moguće brzine prenosa
868.1 MHz	SF7BW125 do SF12BW125
868.3 MHz	SF7BW125 do SF12BW125 i SF7BW250
868.5 MHz	SF7BW125 do SF12BW125
867.1 MHz	SF7BW125 do SF12BW125
867.3 MHz	SF7BW125 do SF12BW125
867.5 MHz	SF7BW125 do SF12BW125
867.7 MHz	SF7BW125 do SF12BW125
867.9 MHz	SF7BW125 do SF12BW125
868.8 MHz	FSK

5.7.2 US902-928

ISM opseg koji se koristi u Sjedinjenim Američkim Državama, Kanadi i nekim zemljama Južne Amerike je od 902 do 928 MHz.

U *uplink* prenosu 64 kanala, koji su označeni sa 0 do 63, koriste LoRa modulaciju sa širinom opsega (*Bandwidth*) od 125 kHz, sa brzinama koje variraju od DR0 do DR3 i brzinom kodovanja od 4/5, krenuvši od 902.3 MHz do 914.9 MHz sa inkrementima od 200 kHz. U *uplink*-u se koristi još 8 dodatnih kanala (označeni od 64 do 71) koji koriste LoRa opseg 500 kHz i brzinu DR4. Kanali su na frekvencijama od 903 do 914.2 MHz, sa inkrementalnim pomacima od 1.6 MHz.



Slika 5.16 Uplink i downlink kanali za frekvencijski plan US902-928 [41]

Što se tiče *downlink*-a, koristi se 8 kanala koji su označeni od 0 do 7 na brzinama koje variraju od DR8 do DR13, na LoRa opsegu od 500 kHz. Kanali se nalaze na frekvencijama od 923.3 MHz do 927.5 sa inkrementima od 600 kHz. I *uplink* i *downlink* kanali su prikazani na slici 5.16 [41].

6. Eksperimentalni rezultati

Za potrebe dokazivanja LoRa i LoRaWAN koncepta iskorištena je oprema američke firme *Multitech*. Ispitivane su mogućnosti korištenja LoRa i LoRaWAN tehnologija na otvorenom području grada Banje Luke pomoću odgovarajućih uređaja. Na sličan način je izvršena i analiza u zatvorenom prostoru, odnosno unutar jednog poslovnog objekta. Akcenat ispitivanja je stavljen na brzine prenosa podataka, snagu koja je potrebna za prenos, kao i na odgovarajuće odnose signal-šum. Na osnovu izvršenih mjerenja i prikupljenih podataka, na jedan pregledan način su prikazani parametri koji mogu značajno olakšati projektovanje raznih IoT sistema i aplikacija. Što se tiče analize na području grada Banje Luke, iscrtane su i odgovarajuće tačke na mapama sa podacima vezanim za brzinu, snagu i odnose signal-šum. Za mjerenja na području grada iskorištena je bazna stanica, odnosno *gateway MultiConnect®Conduit™ IP67 Base Station MTCDTIP-220A-868-OP* i krajnji čvor *MultiConnect® mDot™ Box MTDOT-BOX-G-868*. Za uspostavljanje i analizu LoRaWAN mreže unutar stambeno-poslovnih objekata iskorišten je *indoor gateway MTCAP-LEUI*. U nastavku će biti nešto više riječi o svakom od ovih uređaja.

6.1 MultiConnect®Conduit™ IP67 Base Station MTCDTIP-220A-868-OP

MultiConnect®Conduit™ IP67 Base Station MTCDTIP-220A-868-OP je robusno IoT *gateway* rješenje, posebno projektovano za razvoj vanjskih (eng. *outdoor*) privatnih ili javnih LoRa mreža. Ovo je veoma skalabilno i sertifikovano IP67 rješenje koje je sposobno da se odupre najtežim uslovima i faktorima, uključujući vlagu, prašinu, vjetar, kišu, snijeg i ekstremnu toplotu, podržavajući LoRaWAN aplikacije u gotovo svakom okruženju. Ovo rješenje može da podrži hiljade LoRaWAN krajnjih uređaja, uključujući i *MultiConnect® mDot™* i *xDot™* uređaje.

Dizajnirana za jednostavno montiranje, ova bazna stanica uključuje LoRa karticu (*LoRa MultiConnect® mCard™*), IP67 kućište, LoRa antenu radi poboljšanja vanjskog dometa i pruža mogućnosti izbora 4G-LTE ili *Ethernet* veze sa serverom ili *cloud*-om (*backhaul* veza). Može se montirati na postojeći telekomunikacioni toranj, individualni stalak ili zidni nosač [42]. Izgled kućišta ove bazne stanice je prikazan na slici 6.1.



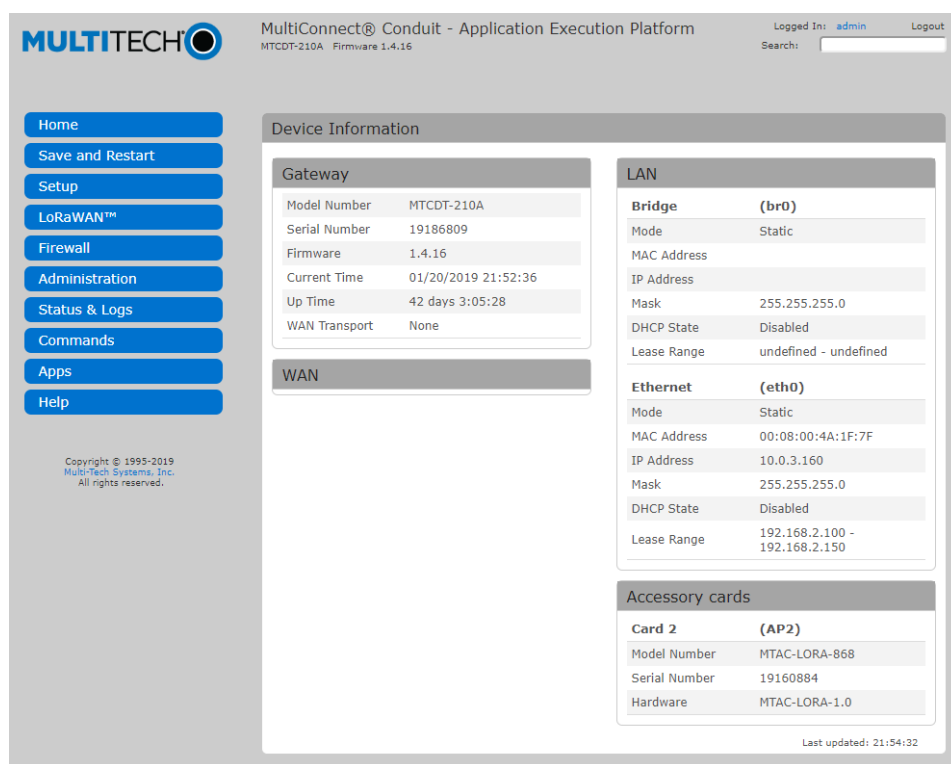
Slika 6.1 Izgled kućišta bazne stanice (gateway-a) MTCDTIP-220A-868-OP [42]

Neke od fizičkih karakteristika bazne stanice su date u tabeli ispod (tabela 6.1).

Tabela 6.1 Karakteristike bazne stanice (gateway-a) MTCDTIP-220A-868-OP [42]

Karakteristika	Vrijednosti
LoRa radio-frekvencija	868 MHz
Storidž	Micro SD
Ulazno napajanje	Power over Ethernet (PoE) 48Vdc
Konektori	
Ethernet	1 RJ-45 Ethernet 10/100 port (PoE)
Serijski	USB Micro-B
Antenski	Cell 3 dBi (2), LoRa 3 dBi (1), GPS (1)
SIM	Micro SIM
Fizički opis	
Dimenzije (L×W×H)	262 mm × 91 mm × 257 mm
Masa	2.75 kg
Tip kućišta	Aluminijumsko
Ambijentalne karakteristike	
Radna temperatura	-40° do +70° C
Temperatura skladištenja	-40° do +85° C
Relativna vlažnost	20% do 90%, bez kondenzacije

Na samom uređaju je ugrađena Linux platforma. Pored mogućnosti pristupa i upravljanja kroz *Linux (bash)* komande, uređaj posjeduje i grafički *web* interfejs za konfiguraciju i menadžment tzv. *Application Execution Platform – AEP* (slika 6.2).



Slika 6.2 Web interfejs za upravljanje i konfiguraciju gateway-a MTCDTIP-220A-868-OP

Još neke od karakteristika su da ovaj uređaj može da radi u modu mrežnog servera ili u modu prosljeđivanja paketa (eng. *packet forwarder*), zatim mogućnost rada kao DHCP server ili klijent. Takođe, može da ima funkcije sigurnosnog *firewall*-a sa mogućnostima NAT-a (eng. *Network Address Translation*) kao i mogućnost statičkog rutiranja. U sebi ima ugrađeno okruženje za razvoj aplikacija *Node-RED*. Podržava i programske jezike kao što su: *C*, *C++*, *Python*, *Javascript*, *node.js*, *bash*. Ima mogućnost daljinskog pristupa, a vrlo lako se vrši ažuriranje *firmware*-a kroz *web* interfejs (trenutna verzija *firmware*-a je 1.4.16). Moguće je izvući sistemsku i mrežnu statistiku.

6.2 MTCAP-LEU1

MTCAP-LEU1 MultiConnect® Conduit™ je pristupna tačka (eng. *Access Point*), koja iskorištava snagu LoRaWAN protokola i omogućava konekciju velikog broja IoT uređaja unutar zgrada, odnosno stambeno-poslovnih objekata. Zahvaljujući integriranim antenama jednostavan je za implementaciju i može se montirati na zidove i plafone. Proširujući LoRa veze u komercijalnim zgradama kao što su hoteli, kongresni centri, kancelarije i maloprodajni objekti obezbeđuje pokrivenost u prostorijama u koje signali sa ćelijskih baznih stanica (koje se obično nalaze na krovovima) ne mogu da prodru [43]. Jedan takav *Access Point* prikazan je na slici ispod (slika 6.3).



Slika 6.3 Izgled Access Point-a MTCAP-LEU1

Tabela 6.2 Fizičke karakteristike Indoor Gateway-a MTCAP-LEU1 [43]

Karakteristika	Vrijednosti
LoRa radio-frekvencija	868 MHz
Storidž	Micro SD
Ulazno napajanje	100-240 VAC 50/60 Hz 0.4A adapter na 5 VDC 2.5A – ulaz
Konektori	
Ethernet	1 RJ-45 Ethernet 10/100 port
SIM	Micro SIM
Fizički opis	
Dimenzije (L×W×H)	165 x 133 x 32 mm
Masa	1.36 kg
Tip kućišta	PC-ABS
Ambijentalne karakteristike	
Radna temperatura	-10° do +60° C
Temperatura skladištenja	-40° to +85° C
Relativna vlažnost	20% do 90%, bez kondenzacije

Neke od fizičkih karakteristika, kao što su: dimenzije, masa, konektori, radna temperatura i slično su prikazane u prethodnoj tabeli (tabela 6.2).

Na uređaju je ugrađen otvoreni *source Linux* softver, tačnije *mLinux* softver. Izvršavanjem odgovarajućih komandi, moguće je izvršiti konfiguraciju servisa potrebnih za funkcionisanje ovog uređaja. Uređaj je moguće konfigurisati tako da radi kao klasični *packet forwarder*. Tada uređaj vrši prosljeđivanje paketa ka mrežnom LoRa serveru, čiji parametri su takođe uneseni u odgovarajući konfiguracioni fajl. Takođe, moguće je izvršiti takvu konfiguraciju da uređaj sam bude LoRa mrežni server, što je u ovom radu iskorišteno u svrhu testiranja.

6.3 MultiConnect® mDot™ Box MTDOT-BOX-G-868

MultiConnect® mDot™ Box MTDOT-BOX-G-868 je prenosivi, ručni LoRa krajnji uređaj koji služi za dokazivanje LoRa koncepta, a idealan je za mjerenja i ispitivanja na lokacijama na kojim se želi uspostaviti LoRaWAN mreža ili projektovati određeni IoT sistem. Uz pomoć ovog uređaja korisnici mogu brzo i lako dobiti i analizirati podatke kako bi razmotrili ponašanje LoRa tehnologije na bilo kojoj lokaciji ili lokacijama značajnim za korisničke IoT aplikacije. Veoma je jednostavan za korištenje bez potrebe za komplikovanim konfigurisanjem [44].

Ovaj uređaj u sebi sadrži LoRaWAN programabilni modul, koji se nalazi u ručnom kućištu, čije napajanje je obezbijeđeno pomoću baterije od 9V. Uređaj posjeduje LCD ekran na kojem se prikazuje meni, a takođe se na ekranu prikazuju i podaci o statusu senzora. Navigaciju kroz meni korisnik vrši pomoću dva kontrolna tastera (SW1 i SW2). Indikacija o statusu mreže, GPS-a kao i senzora koji su ugrađeni u njega se vrši preko dvije LED diode. U uređaj je ugrađeno pet senzora, i to za:

- temperaturu (°C);
- osvijetljenost (lx);
- pritisak (kPa);
- zatim je ugrađen altimetar (mjerenje nadmorske visine);
- akcelerometar (u odnosu na ubrzanje *g*);
- GPS (ali samo za uređaj, sa internom antenom).

Na slici 6.4 je prikazan izgled samog uređaja zajedno sa USB modulom preko kojeg se vrši programiranje uređaja (a) i oznaka osnovnih tastera, indikatora i konektora na uređaju (b).

Klikom na dugme, *MTDOT-BOX* uređaj može da prikaže mnogo korisnih informacija kao što su lokacija, faktor širenja, propusni opseg, indikator jačine primljenog signala RSSI (eng. *Received Signal Strength Indicator*), datum i vrijeme aktivnosti i nivo korištene snage na samim lokacijama na kojima se planira koristiti LoRa tehnologija. Kao što mu i sama oznaka kaže (*MTDOT-BOX-G-868*), ovaj uređaj se koristi u EU868 opsegu i radi na 868 MHz. Uz testni uređaj koristi se antena sa oznakom *AN868-915A-1HRA* čiji je dobitak 3 dBi. Treba napomenuti da ovaj uređaj pripada A klasi LoRaWAN uređaja.



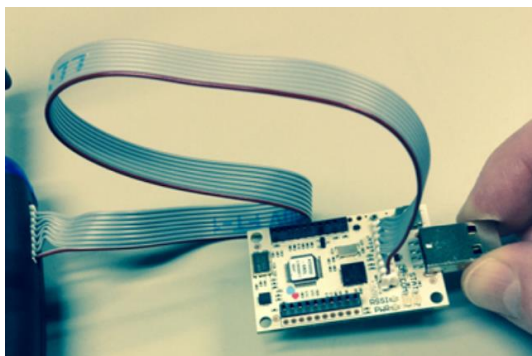
Slika 6.4 Izgled *MTDOT-BOX* uređaja (a) i oznake tastera, indikatora i konektora (b) [45]

MTDOT-BOX je projektovan tako da može da radi sa bilo kojim LoRaWAN *gateway*-em, uključujući i *MultiConnect@Conduit*TM. Uređaj može da radi u tri operaciona moda, što je prikazano u tabeli 6.3.

Tabela 6.3 Operacioni modovi rada uređaja MTDOT-BOX-G-868 [44]

Operacioni mod	Opis
<i>Site Survey Single</i>	U ovom modu rada korisnik može da testira vezu sa <i>gateway</i> -em kombinujući različite brzine prenosa i različite nivoe snage. Pojedinačnim kombinacijama se dodjeljuju indeksi, tako da se oni kasnije mogu referencirati. Rezultat pojedinačnog istraživanja, uključujući i njegov indeks čuva se u fajlu sa podacima.
<i>Site Survey Sweep</i>	U ovom modu rada veza sa <i>gateway</i> -em se testira na opsegu nivoa snage i brzina prenosa podataka. Nizovi ovih parametara su indeksirani i pomoću njih je moguće izvršiti referenciranje. Rezultat niza istraživanja, uključujući i indeks čuva se u fajlu sa podacima. Korisnik može da definiše minimum i maksimum nivoa snage i brzine prenosa.
<i>Demo</i>	U Demo modu podaci sa senzora se prikazuju na LCD ekranu u realnom vremenu. Podaci sa senzora se takođe šalju na <i>gateway</i> periodično u vremenskim intervalima koje korisnik definiše, ili se slanje aktivira pritiskom tastera, u zavisnosti od toga kako je korisnik odabrao.

Ukoliko se žele promijeniti podešavanja uređaja, odnosno reprogramirati sam uređaj, moguće je to uraditi pomoću *Micro Developer Kit (MDK)* čipa, model: *MTMDK-ST-MDOT* koji se na uređaj povezuje preko konektora sa 8 pinova, a na računar preko USB interfejsa što je prikazano na slici ispod (slika 6.5).



Slika 6.5 *Micro Developer Kit (MDK)*, model: *MTMDK-ST-MDOT* [46]

Reprogramiranje samog uređaja se vrši pomoću tzv. AT komandi koje su ugrađene u uređaj. Kako izgledaju AT komande, prikazano je na slici 6.6.

```

at
OK
?
Command      Name          Description
AT           Attention     Attention
ATI          Request Id    Request Identification
AT&F        Reset Factory Defaults  Reset current configuration to factory defaults
AT&W        Save Configuration  Save configuration to flash memory
AT&V        Display Settings  Displays current settings and status
AT+FREQ     Frequency Band  Configured Frequency Band 'EU868', 'AU915' or 'US915'
AT+FSB     Frequency Sub-band  Set the frequency sub-band for US 915, (

```

Slika 6.6 AT komande za testni uređaj MTDOT-BOX-G-868

6.4 Rezultati mjerenja na području grada Banje Luke

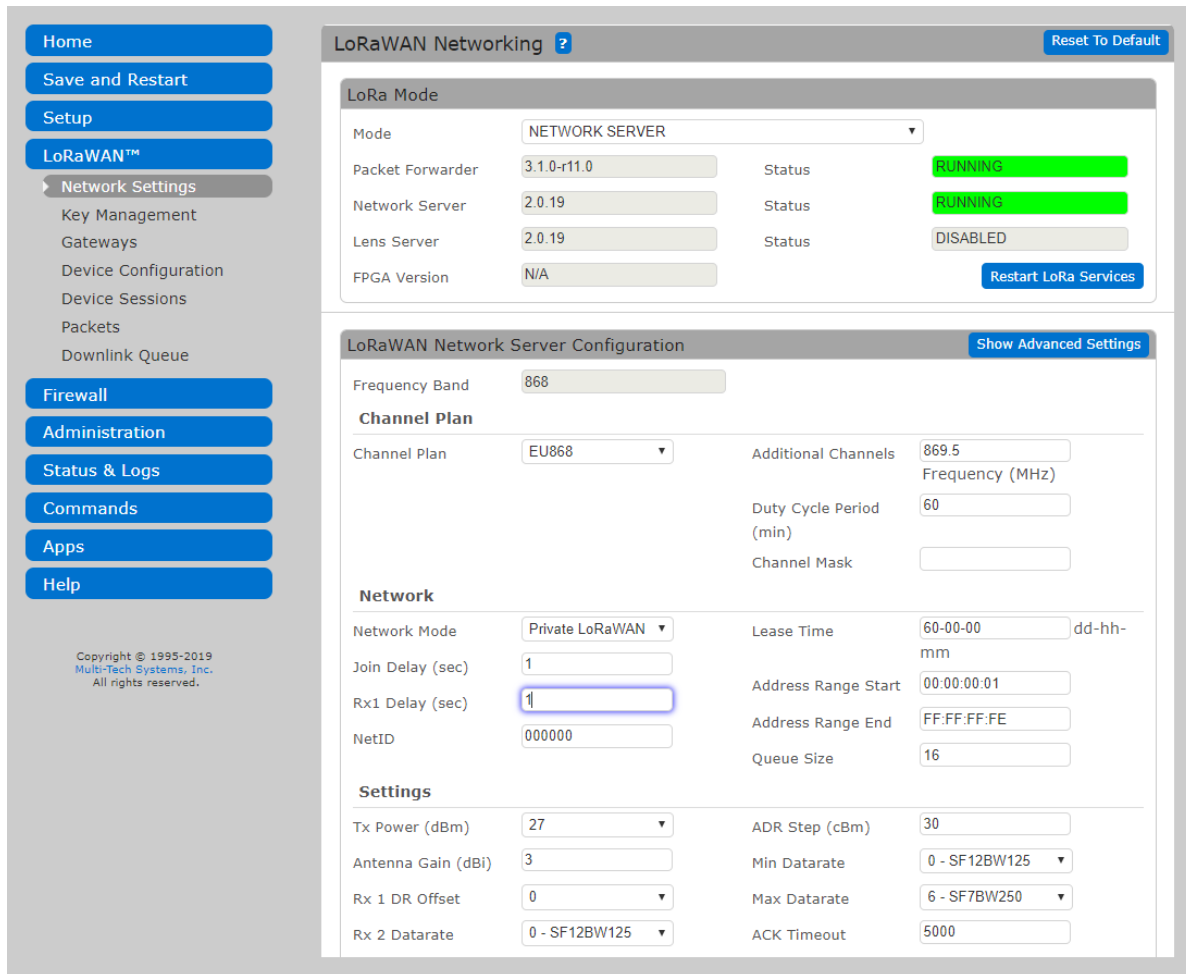
Za testiranje LoRa/LoRaWAN koncepta na vanjskom (*outdoor*) okruženju, odnosno na urbanom području grada Banje Luke iskorištena su dva prethodno opisana uređaja: bazna stanica (*gateway*) *MTCDTIP-220A-868-OP* i testni uređaj *MTDOT-BOX-G-868*. Pomoću testnog uređaja mjerena je jačina signala kojeg emituje *gateway*, margina i odnosa signal-šum na širem području grada, na različitim udaljenostima od bazne stanice. Tačke mjerenja su odabrane tako da se nalaze u urbanijem području grada posmatrajući okolinu položaja bazne stanice. Odabrane su po tri tačke koje se nalaze na udaljenostima od 500m, 1000m, 1500m i 2000m vazdušne linije od bazne stanice, potom četiri tačke koje se nalaze u rasponu udaljenosti od dva do tri kilometra, te šest tačaka koje se nalaze u rasponu udaljenosti od tri do četiri kilometra od bazne stanice. Zatim je odabrana i najudaljenija tačka koja ima direktnu optičku vidljivost (Banj brdo, Banja Luka), koja je na udaljenosti 5.75 km od bazne stanice. Za sve tačke, kao i za položaj bazne stanice su ustanovljene geografske koordinate, odnosno geografska širina i dužina. Koordinate su ustanovljene pomoću android aplikacije *My GPS Coordinates* i web sajta <https://www.whatsmygps.com>.

Bazna stanica *MTC DTIP-220A-868-OP* se nalazi na telekomunikacionom tornju na krovu tehnološkog centra kompanije Lanaco d.o.o. Visina na kojoj se nalazi bazna stanica od podnožja zgrade je oko 40m. Geografske koordinate na kojoj se nalazi bazna stanica su: geografska širina: 44° 46' 20.59" N (eng. *North* – sjever) i geografska dužina: 17° 13' 25.92" E (eng. *East* – istok). Na slici 6.7 je prikazan izgled bazne stanice na telekomunikacionom tornju. Na slici se može vidjeti da je na odgovarajući konektor preko koaksijalnog kabla povezana i eksterna LoRa antena, dobitka 3 dBi.



Slika 6.7 Izgled bazne stanice sa antenom na telekomunikacionom tornju

U mjernom scenariju bazna stanica ima sljedeća podešavanja. Uređaj radi u modu mrežnog servera, dakle, pokrenuti su servisi i za *packet forwarder* i za *network server*. Frekvencijski plan je u skladu sa evropskim, tj. podešen je EU868 frekvencijski plan. Maksimalna izlazna snaga je 27 dBm, sa dobitkom antene od 3 dBi. Minimalna brzina je DR0 (SF12BW125 ili 0.29 kb/s), a maksimalna brzina je DR6 (SF7BW250 ili 11 kb/s). Mrežni mod je *Private LoRaWAN*, što znači da je sinhro riječ (eng. *sync word*) 0x12. Sva ova podešavanja se mogu vidjeti na sljedećoj slici što je ustvari prikaz *web* grafičkog interfejsa sa same bazne stanice (slika 6.8).



Slika 6.8 Podešavanja bazne stanice u testnom scenariju

Mjerenja su vršena pomoću testnog uređaja u *Site Survey Sweep* modu, odnosno kombinovanjem nivoa snage emitovanja testnog uređaja i brzina prenosa. Izlazni nivoi snage testnog uređaja su: 2 dBm, 8 dBm, 14 dBm i 20 dBm, dok su brzine: DR0 (0.29 kb/s), DR1 (0.54 kb/s), DR2 (0.98 kb/s), DR3 (1.76 kb/s), DR4 (3.125 kb/s), DR5 (5.47 kb/s) i DR6 (11 kb/s). Za svaku tačku su dobijene informacije o jačini primljenog signala sa *gateway*-a (RSSI), margini (govori o tome koliko signal još može da bude slabiji, a da bi se uspješno izvršila demodulacija) i na kraju, o odnosu signal-šum (SNR).

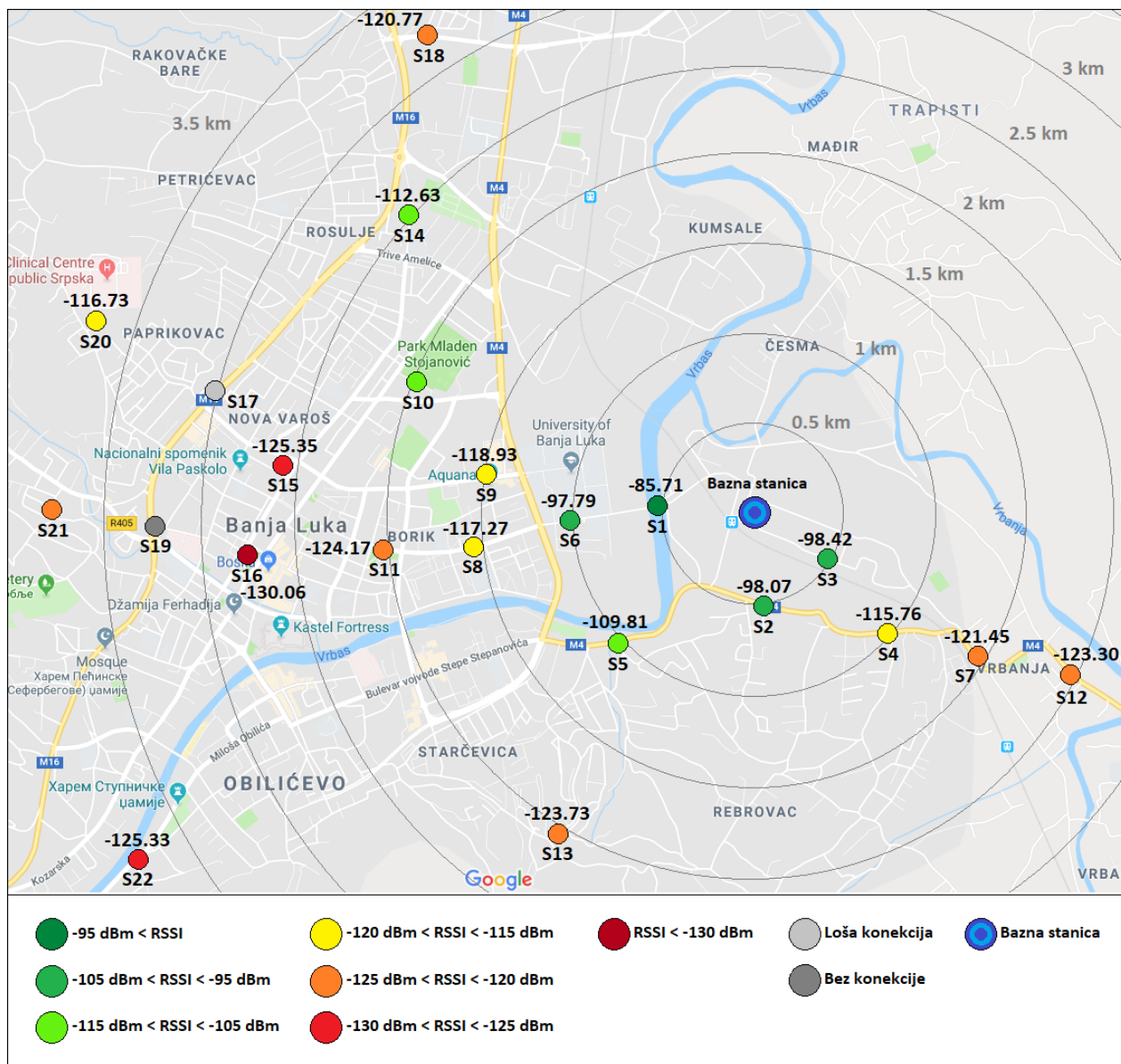
Rezultati mjerenja na svim tačkama su detaljno prikazani u prilogu ovog rada. Tačke su označene sa S1, S2, S3 i tako dalje, jer se tako indeksiraju na samom testnom uređaju u *Site Survey Sweep* modu. U tabelama u prilogu su prikazani, pored oznake tačke, njena udaljenost od bazne stanice, kao i njene geografske koordinate. Zatim su prikazani nivoi snage primljenog

signala, margine i odnos-šum za sve pomenute kombinacije izlazne snage testnog uređaja i brzina (faktora proširenja) prenosa. Ono što je važno napomenuti jeste da za svaku tačku, osim za onu sa oznakom S19, postoji bar jedna kombinacija izlazne snage testnog uređaja i brzine, po kojoj je moguća LoRa komunikacija između *gateway*-a i testnog uređaja. Dakle, u tački S19 uopšte nije moguće izvršiti uparivanje testnog uređaja i bazne stanice. Takođe, tačka S17 se može smatrati „kritičnom“ jer postoji samo jedna kombinacija izlazne snage testnog uređaja i brzine po kojoj je moguća Lora komunikacija sa baznom stanicom. Oblast u kojoj se nalaze ove dvije tačke se nalazi na takvom položaju da se između nje i same bazne stanice nalazi veliki broj prepreka za prostiranje LoRa signala, pa je za očekivati da je i slabljenje signala veliko.

Sa ciljem sticanja slike o jačini signala na području grada izvršeno je izračunavanje prosječne jačine primljenog signala na svim tačkama. Zatim su na mape koje su skinute sa *Google Maps* unesene sve tačke mjerenja sa prosječnim vrijednostima jačine primljenog signala. Tačke su obojene nijansama zelene, žute, narandžaste i crvene u skladu sa jačinom signala. Veza jačine signala i boje tačke je predstavljena odgovarajućom legendom. Sve ovo je prikazano na slikama 6.9 i 6.10. Na slici 6.9 su prikazane tačke mjerenja ucrtane na mapu dijela grada Banje Luka, dok je na slici 6.10 u pitanju satelitski snimak preuzet takođe sa *Google Maps*. Na slici 6.9 se jasnije vide označene tačke i na joj su ucrtane koncentrične kružnice koje predstavljaju udaljenosti od bazne stanice, dok se na slici 6.10 bolje vidi raspored objekata, odnosno zgrada i eventualnih prepreka za prostiranje LoRa signala. Na slikama su prikazane oznake tačaka i prosječna jačina signala u datoj tački koja je obojena odgovarajućom nijansom.

Detaljnim razmatranjem rezultata mjerenja (tabele u prilogu) i slika 6.9 i 6.10, može se izvući nekoliko važnih zaključaka. S obzirom da se radi o urbanom dijelu grada Banje Luke, praktično samom centru, pristuan je veliki broj prepreka i ometajućih faktora za prostiranje signala, a najviše u vidu zgrada, solitera, kuća i ostalih objekata. I pored svih ovih negativnih faktora LoRaWAN konekcija je prisutna u svim posmatranim tačkama, za nekoliko kombinacija snage testnog uređaja i brzine, osim u pomenutoj tački S19. Takođe, „kritična“ tačka S17 ima konekciju za samo jednu kombinaciju snage testnog uređaja i brzine prenosa, pa se na neki način može smatrati neupotrebljivom u smislu implementacije ili postavljanja određenog krajnjeg uređaja na toj lokaciji. Poznajući sam grad, ali i posmatrajući satelitski snimak, jasno se može vidjeti zašto su ove dvije tačke u takvom statusu. Definitivno postoji najveći broj objekata koji

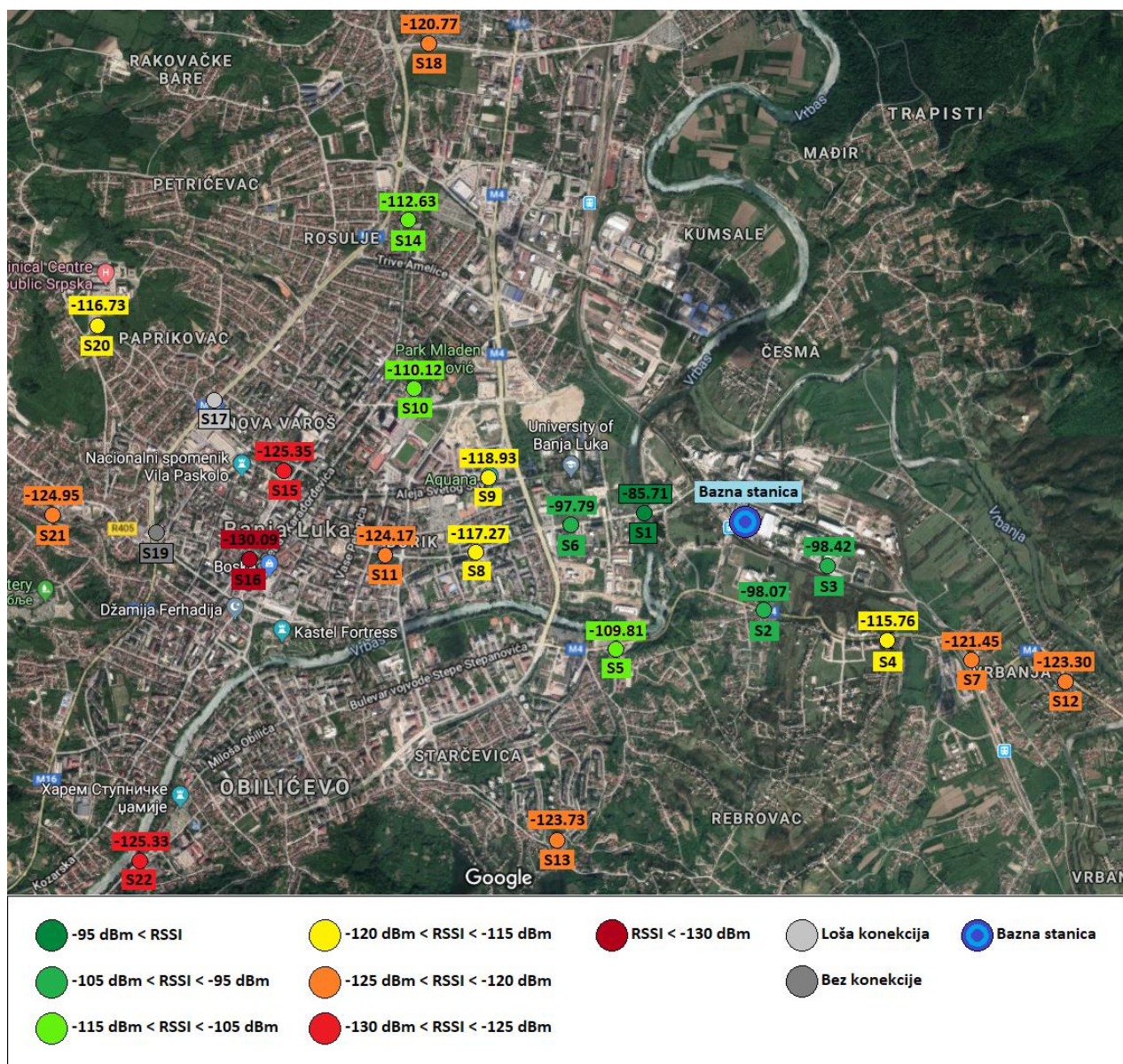
se nalaze na liniji prostiranja signala sa bazne stanice, u odnosu na ostale tačke mjerenja. Takođe, i sama udaljenost iznosi preko tri kilometra, što je na neki način i potvrda navoda o dometu LoRa signala u gusto urbanim područjima.



Slika 6.9 Tačke mjerenja na području grada sa prosječnim jačinama primljenog signala

Što se tiče ostalih tačaka, može se primijetiti da su u najpovoljnijem statusu tačke koje su označene nijansama zelene. One su ujedno i najbliže baznoj stanici, praktično nemaju neuspješne

konekcije i imaju najviše nivoe snage primljenog signala (S1, S2, S3, S5, S6). Takva je situacija i sa tačkama S10 i S14, iako su udaljene više od nekih drugih tačaka (njihova udaljenost je 2 km i 2.54 km, respektivno). Razlog leži u jako malom broju objekata na, uslovno posmatrajući, vazdušnoj liniji između tih lokacija i bazne stanice.

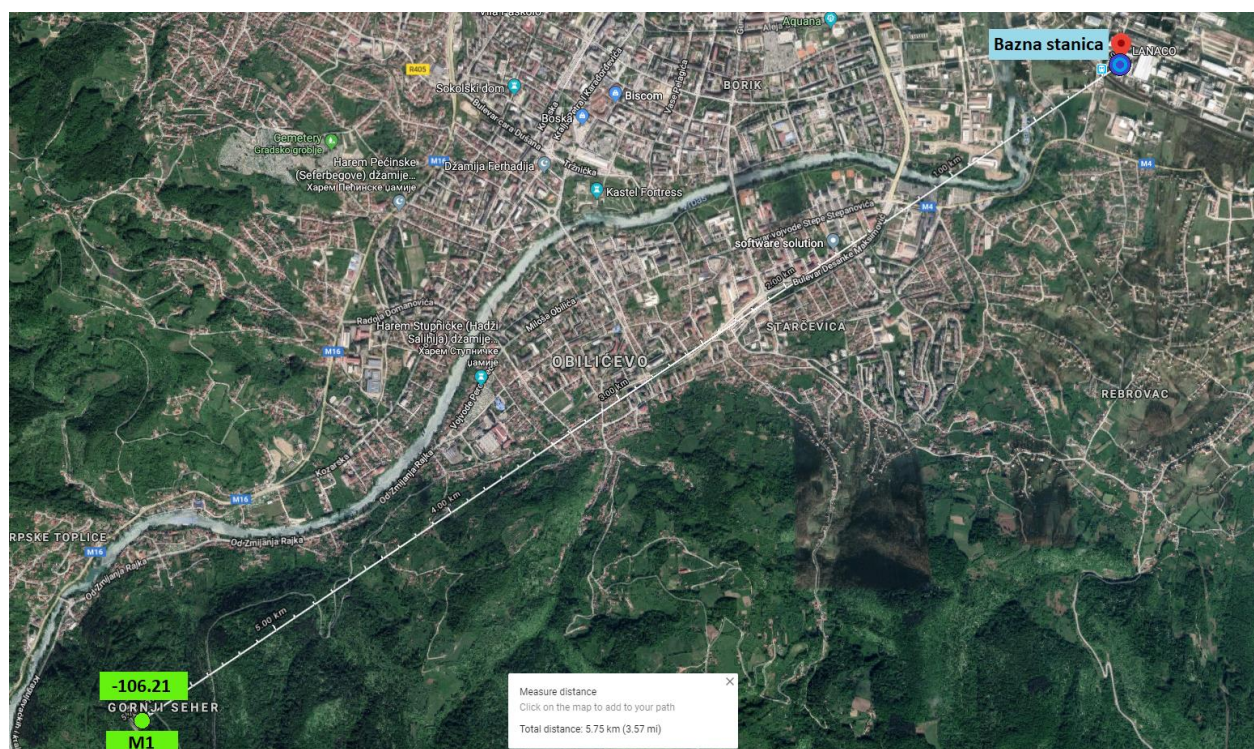


Slika 6.10 Položaj tačaka mjerenja sa prosječnim jačinama signala na satelitskom snimku

S druge strane, uglavnom je prosječna jačina primljenog signala u opadajućem trendu ako se povećava udaljenost od bazne stanice. Međutim, tu se javljaju nepravilnosti. Na primjer,

lokacije S18, S20 i S21 imaju viši nivo prosječne snage primljenog signala od tačaka S15 i S16 koje se nalaze na manjem rastojanju od bazne stanice. Objašnjenje leži u tome da je gustina objekata na liniji S18 – bazna stanica jako mala, a što se tiče tačaka S20 i S21, one se nalaze na uzvišenjima, pa imaju znatno manji broj prepreka na liniji prostiranja signala. S druge strane, tačke S15 i S16 nalaze se u samom jezgru urbane zone grada, pa je očekivana višestruka propagacija signala, kao i slabljenje usljed mnogobrojnih prepreka. Tačke S15, S16 kao i S22 (udaljenost 3.95 km), očekivano, imaju i veliki broj neuspješnih konekcija. Značajno je pomenuti lokacije S7 i S8 koje imaju veliki broj neuspješnih konekcija. Razlog vjerovatno leži u tome što se na liniji prostiranja signala nalaze visoki objekti.

Pored prethodne 22 tačke mjerenja, izabrana je i tačka sa direktnom optičkom vidljivošću, a sa najvećim rastojanjem od bazne stanice. Ta tačka se nalazi na Banj brdu, čija je nadmorska visina oko 430m. Vazдушna udaljenost od bazne stanice je oko 5.75 km (slika 6.11). Ovdje odmah treba istaći da je LoRa komunikacija ostvarena bez neuspješnih konekcija, a prosječna jačina signala spada u red povoljnijih (zeleni nijansa) i iznosi -106.21 dBm.

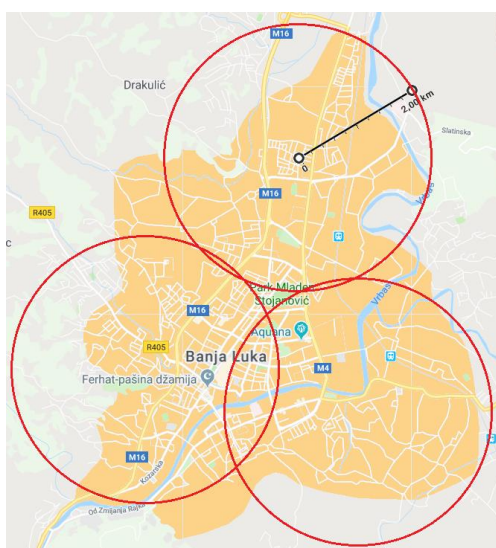


Slika 6.11 Najudaljenija tačka mjerenja sa direktnom optičkom vidljivošću

Nameću se dva zaključka. Prvi je da ovaj rezultat potvrđuje navode o dometu LoRa signala. Dakle, na udaljenosti od gotovo 6 km LoRa signal je prisutan, stabilan i sa jako dobrim nivoom snage. Drugi zaključak je da je najveća prepreka za LoRa signale ipak urbana zona grada, odnosno prisutnost mnogobrojnih prepreka i višestrukog prostiranja.

Na osnovu prethodno iznesenog postavlja se pitanje o mogućnosti pokrivanja cijelog urbanog područja grada. S obzirom da LoRaWAN posjeduje adaptivne algoritme prenosa i s obzirom da je na većini testiranih lokacija prisutan zadovoljavajući LoRa signal, može se reći da bi jedan *gateway*, poput *MTC DTIP-220A-868-OP*, mogao dati odgovor na veliki broj IoT aplikacija. Ta primjena bi bila još više poboljšana kada bi se *gateway* postavio na neku od centralnih lokacija urbane gradske zone. Takođe, primjena u slučaju jednog *gateway*-a bi se odnosila na one IoT aplikacije u kojima nije potreban intenzivan saobraćaj ili one u kojima nije potrebna obimna komunikacija u realnom vremenu. Dakle, primjena bi se odnosila na one sa manjom količinom prenesenih informacija i manje puta u toku dana, recimo, na ispitivanje kvaliteta vazduha, mjerenje nivoa buke, mjerenje količine otpada u kontejnerima i slično.

S druge strane, postavljanjem još jednog, ili eventualno dva ovakva *gateway*-a, dobilo bi se jako kvalitetno pokrivanje cijele urbane zone grada Banje Luke čija površina iznosi oko 30.6 km² (izračunato na sajtu: https://www.mapdevelopers.com/area_finder.php). Ako se posmatra domet jednog *gateway*-a od „samo“ dva kilometra, u okviru kojih imamo jako dobru LoRa komunikaciju, dobilo bi se pokrivanje kompletnog urbanog dijela grada (slika 6.12).



Slika 6.12 Kompletno pokrivanje urbanog područja Banje Luke sa tri bazne stanice

U ovom slučaju, može se razmatrati i primjena u smislu intenzivnijeg i frekventnijeg prenosa podataka, tipa upravljanja rasvjetom, praćenja slobodnih mjesta na javnim parkinzima i slično.

6.5 Rezultati mjerenja unutar poslovnog objekta

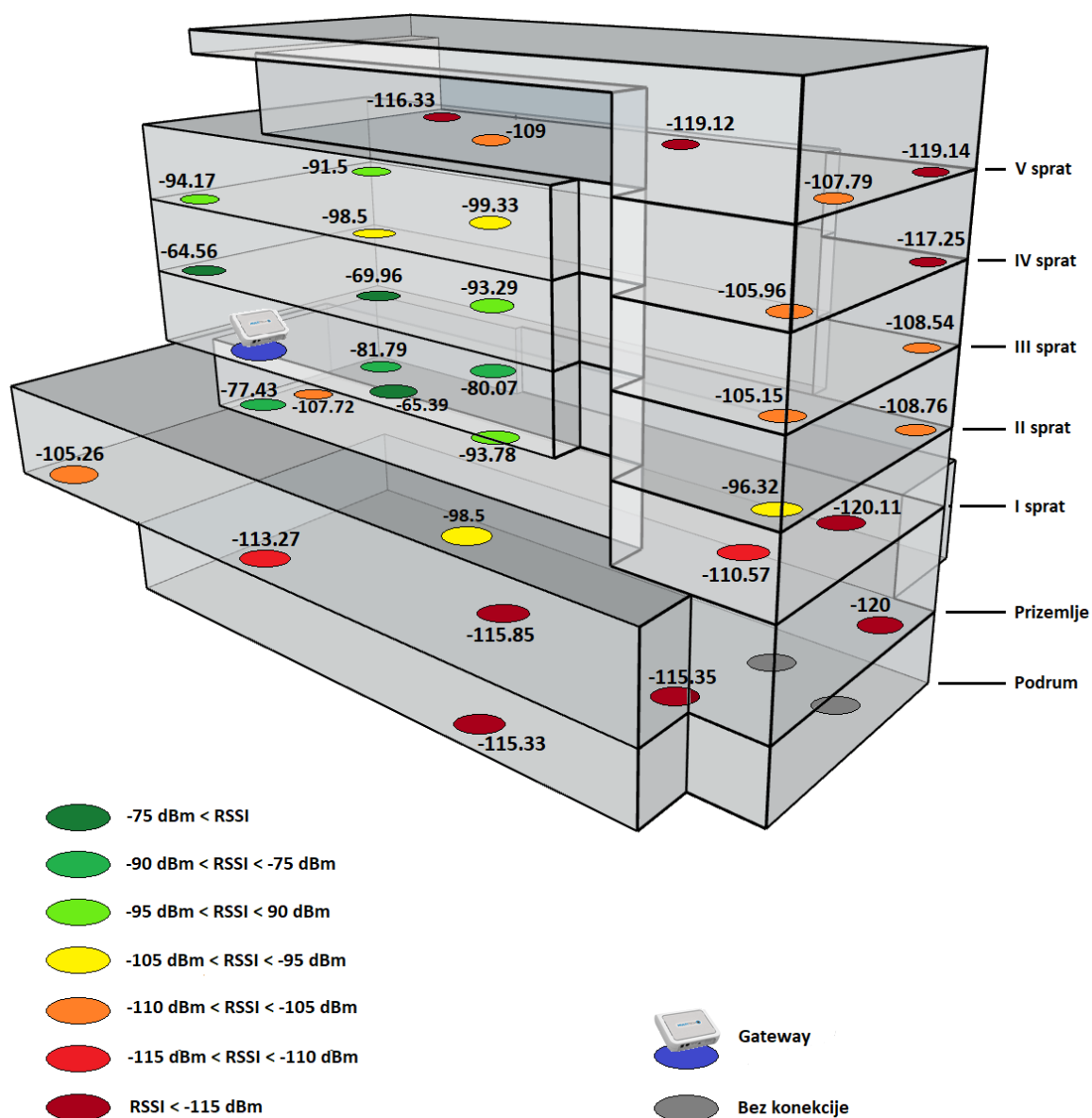
Za testiranje LoRa/LoRaWAN koncepta unutar jednog poslovnog objekta iskorištena su dva, prethodno opisana, uređaja: *indoor gateway MTCAP-LEUI* i testni uređaj *MTDOT-BOX-G-868*. Pomoću testnog uređaja je vršeno mjerenje jačine signala kojeg emituje *gateway*, margine i odnosa signal-šum unutar poslovnog objekata, odnosno tehnološkog centra kompanije Lanaco d.o.o. u Banjoj Luci. Tehnološki centar se sastoji od glavnog i sporednog objekta, a mjerenja su vršena u glavnom objektu. Glavni objekat se sastoji iz sedam etaža, i to: podruma, prizemlja i pet spratova. Ukupna neto površina ovog objekta iznosi 4 634 m² (bruto površina: 5244 m²).

Za postupak mjerenja je odabrano po pet tačaka na svakoj etaži. Tačke su odabrane tako da bi se dobilo pokrivanje što veće površine na svim etažama. Mjerenja su vršena pomoću testnog uređaja u *Site Survey Sweep* modu, odnosno kombinovanjem nivoa snage emitovanja testnog uređaja i brzina prenosa. Izlazni nivoi snage testnog uređaja su: 2 dBm, 8 dBm, 14 dBm i 20 dBm, dok su brzine: DR0 (0.29 kb/s), DR1 (0.54 kb/s), DR2 (0.98 kb/s), DR3 (1.76 kb/s), DR4 (3.125 kb/s), DR5 (5.47 kb/s) i DR6 (11 kb/s). Dakle, za svaku tačku su dobijene informacije o jačini primljenog signala sa *gateway*-a (RSSI), margini (govori o tome koliko signal još može da bude slabiji, a da bi se upsješno izvršila demodulacija) i na kraju, o odnosu signal-šum (SNR).

Indoor Gateway MTCAP-LEUI je postavljen na drugom spratu, a na njemu je pokrenut servis koji obavlja i ulogu LoRaWAN mrežnog servera. Maksimalna izlazna snaga je 26 dBm, a frekvencijski plan je EU868. Na slikama u prilogu rada su prikazani grubo skicirani tlocrti svih etaža sa označenim tačkama mjerenja, kao i tačan položaj *gateway*-a na drugom spratu.

Rezultati mjerenja u svim tačkama su detaljno prikazani u tabelama u prilogu ovog rada. Ono što je važno napomenuti jeste da za svaku tačku, osim za dvije u podrumu (PO-4 i PO-5), postoji bar jedna kombinacija izlazne snage testnog uređaja i brzine, po kojoj je moguća LoRa komunikacija između *gateway*-a i testnog uređaja.

Sa ciljem sticanja slike o jačini signala u zgradi sa prostornog aspekta izvršeno je izračunavanje prosječne jačine primljenog signala na svim tačkama. Zatim je pomoću softvera *SketchUp 2019* skiciran grubi 3D model objekta u kojem je vršeno mjerenje. Na kraju, na modelu su ucrtane i sve tačke mjerenja sa prosječnim vrijednostima izmjerene jačine primljenog signala. Tačke su obojene nijansama zelene, žute, narandžaste i crvene u skladu sa jačinom signala. Veza jačine signala i boje je predstavljena odgovarajućom legendom. Sve ovo je prikazano na slici 6.13.



Slika 6.13 Prosječne jačine signala po tačkama mjerenja na 3D modelu poslovnog objekta

Posmatrajući sliku, lako se stiče utisak da je na lijevoj strani objekta znatno bolja situacija što se tiče snage signala (zelene nijanse su na lijevoj strani) iz prostog razloga što se i sam *gateway* nalazi na drugom spratu na lijevoj strani objekta. Ovo se može ispraviti tako što će se *gateway* postaviti na lokaciju koja je najbliže centru i po vertikali i po horizontali. U tom slučaju bi se dobila uniformnija raspodjela jačine signala u cijelom objektu, ukoliko je to potrebno. Takođe, može se razmotriti i upotreba dva *gateway*-a sa kojim bi se, u slučaju ovog objekta, dobila potpuna pokrivenost sa znatno smanjenim neuspjelim pokušajima uspostavljanja konekcije. Isto tako, treba imati u vidu da LoRaWAN posjeduje tzv. ADR algoritme kojim se podešava odgovarajuća brzina prenosa u komunikaciji, tako da bi i jedan *gateway* mogao da odgovori na veliki broj IoT zahtjeva. Mogućnosti primjene i spektar IoT aplikacija koje se mogu uvesti su jako široki. Neki od primjera su praćenje temperature i vlažnosti vazduha u kancelarijama, praćenje ispravnosti aparata za gašenje požara i slično.

Na osnovu detaljnog pregleda rezultata mjerenja iz priloga, pogleda na 3D prikaz rezultata mjerenja i osvrta na fizičke karakteristike zgrade može se izvući nekoliko zaključaka. S obzirom da se radi o poslovnom objektu novije generacije, pristuan je veliki broj prepreka i ometajućih faktora za prostiranje signala, i to u vidu betonskih i metalnih konstrukcija, velikog broja instalacija (niskonaponske i visokonaponske mreže), cijevi, ventilacije, tehničkih soba sa postrojenjima (veliki dio postrojenja se nalazi u podrumu), *wireless* signala i slično. I pored svih ovih negativnih faktora LoRaWAN konekcija je prisutna u svim posmatranim tačkama, za bar jednu kombinaciju snage testnog uređaja i brzine, osim u pomenutim tačkama u podrumu PO-4 i PO-5. Objašnjenje nepostojanja konekcije u ove dvije tačke leži u tome da se nalaze na gotovo najvećim mogućim udaljenostima od *gateway*-a, a zatim i u prisutnosti velikog broja prepreka i postrojenja.

Što se tiče ostalih tačaka, može se primijetiti da je najveći broj neuspješnih konekcija tamo gdje je i prosječna jačina primljenog signala najmanja. Takođe, ove tačke leže i na najvećim udaljenostima od *gateway*-a. Tako, na primjer, u tačkama PR-4, I-4, V-3, V-4 postoji veliki broj neuspjelih pokušaja konekcija, a istovremeno ove tačke imaju i najmanje prosječne nivoe snage primljenog signala. Najmanja pojedinačna izmjerena jačina snage signala je -128 dBm u tački V-3, za kombinaciju izlazne snage testnog uređaja $P=14$ dBm i brzine $DR=1$. Najveća izmjerena snaga primljenog signala je u tački II-3, za kombinaciju izlazne snage testnog uređaja $P=14$ dBm

i brzine DR=5 i u tački III-3, za kombinaciju izlazne snage testnog uređaja P=8 dBm i brzine DR=6. Takođe, na pojedinim tačkama se mogu primijetiti određene nepravilnosti u smislu da je konekcija za neku brzinu uspješna za niži nivo snage, dok je za za istu brzinu neuspješna za viši nivo snage. Ovo se može objasniti višestrukom propagacijom signala.

7. Zaključak

Intenzivnim razvojem IoT sistema i aplikacija posljednjih godina i predviđanjima da se do 2020. godine u svijetu očekuje preko 20 milijardi konekcija IoT uređaja, podstaknuta su mnogobrojna istraživanja na polju komunikacionih tehnologija. U tom pogledu bežične tehnologije zauzimaju vrlo značajnu ulogu. LoRa i LoRaWAN bežične tehnologije su široko prisutne u IoT aplikacijama.

LoRa, kao fizički sloj patentiran od strane američkog *Semtech*-a, koristi CSS modulaciju da obezbijedi veći domet komunikacije sa vrlo malom izlaznom snagom. Visoka robusnost, konstantna amplituda, otpornost na fading i *Doppler*-ov efekat, skalabilnost i povećan kapacitet mreže su takođe karakteristike LoRa prenosa. LoRaWAN kao otvoren standard koji je razvijen od strane *LoRa Alliance*, uz fizički sloj, definiše i komunikacioni protokol na mrežnom sloju i arhitekturu sistema, koju čine mrežni serveri, *gateway*-i i krajnji uređaji (klasa A, B ili C). LoRaWAN je MAC protokol za WAN mreže, kojeg je kao takvog, moguće mapirati na drugi i treći sloj OSI modela. Ove tehnologije se koriste u ISM frekvencijskim opsezima širom svijeta.

Karakteristike LoRa i LoRaWAN tehnologija su testirane u praksi pomoću uređaja američke *Multitech*. Ispitivanja su vršena na *outdoor* i *indoor* okruženju. Korišteni su: *gateway* za vanjsku LoRaWAN mrežu *MTC DTIP-220A-868-OP*, *gateway* za *indoor* upotrebu *MTCAP-LEU1* i testni uređaj *MTDOT-BOX-G-868*.

Na urbanom području grada Banje Luke su izvršena mjerenja u preko 20 tačaka. Tačke su od bazne stanice udaljene 500, 1000, 1500 i 2000 metara, ali i u rasponima od dva do tri, zatim i od tri do četiri kilometra. Izvršeno je i mjerenje na najudaljenijoj tački od 5.75 km koja ima direktnu optičku vidljivost. Pomoću testnog uređaja *MTDOT-BOX-G-868* izmjerene su jačine primljenog signala, margine i odnosi signal-šum za različite kombinacije brzina i izlaznih snaga

testnog uređaja. Da bi se lakše stekla slika o jačini signala na području grada izračunate su prosječne jačine primljenog signala na svim tačkama. Zatim je izvršena vizuelizacija prosječnih jačina signala na mapama i satelitskim snimcima grada. I pored velikog broja prepreka i ometajućih faktora za prostiranje signala LoRaWAN konekcija je prisutna u svim posmatranim tačkama, za nekoliko kombinacija snage testnog uređaja i brzine, osim u dvije kritične tačke. Jedna od ove dvije tačke nema konekciju uopšte, dok druga ima konekciju za samo jednu kombinaciju brzine prenosa i izlazne snage. Obe ove tačke se nalaze na takvom položaju da je između njih i bazne stanice prisutan najveći broj prepreka (zgrade, kuće i sl.). Posmatrajući ostale lokacije mjerenja zaključuje se da se one mogu smatrati upotrebljivim u smislu postavljanja krajnjih uređaja pri projektovanju IoT aplikacija. Nepravilnosti u smislu viših prosječnih nivoa snage na udaljenijim tačkama se mogu objasniti prisutnošću većim brojem prepreka i višestrukog prostiranja. Situacija u najudaljenijoj tački, koja ima direktnu optičku vidljivost je takva da je na udaljenosti od gotovo 6 km prisutan LoRa signal sa jako dobrim nivoom snage, čime su potvrđeni navodi o dometu. Takođe, zaključak je da najnepovoljniji uticaj na LoRa signale ima urbana zona grada sa mnogobrojnim preprekama i višestrukim prostiranjima.

S obzirom da LoRaWAN posjeduje adaptivne algoritme prenosa i s obzirom da je na većini testiranih lokacija prisutan zadovoljavajući LoRa signal, može se reći da bi jedan *MTC DTIP-220A-868-OP gateway* mogao dati odgovor na veliki broj IoT aplikacija. Ta primjena bi bila još više poboljšana kada bi se *gateway* postavio na neku od centralnih lokacija urbane gradske zone. Primjena u slučaju jednog *gateway*-a bi se odnosila na one aplikacije sa manjom količinom prenesenih informacija i manjom učestalošću u toku dana, recimo, na ispitivanje kvaliteta vazduha, mjerenje nivoa buke, mjerenje količine otpada u kontejnerima i sl. Dalje posmatrajući, postavljanjem još jednog, ili eventualno dva ovakva *gateway*-a na pažljivo odabrana mjesta, dobilo bi se jako kvalitetno pokrivanje cijele urbane zone grada Banje Luke (30.6 kvadratnih kilometara) uz mogućnost primjene za IoT aplikacije sa nešto intenzivnijim saobraćajem.

Testiranje LoRa/LoRaWAN *indoor* koncepta izvršeno je unutar poslovnog objekta koji se sastoji iz sedam etaža, ukupne neto površine 4 634 m². Pomoću testnog uređaja je vršeno mjerenje jačine signala kojeg emituje *indoor gateway*, margine i odnosa signal-šum na pet tačaka po svakoj etaži. Kombinovanjem nivoa snage emitovanja testnog uređaja i brzina prenosa za svaku tačku ustanovljeno je da u samo dvije tačke (u podrumu) nije moguće ostvariti konekciju

testnog uređaja i *indoor gateway*-a. Objašnjenje nepostojanja konekcije u ove dvije tačke leži u tome da se nalaze na gotovo najvećim mogućim udaljenostima od *gateway*-a, a zatim i u prisutnosti velikog broja prepreka i postrojenja koja se nalaze u podrumu. Što se tiče ostalih tačaka mjerenja, konekcija postoji za bar jednu kombinaciju izlazne snage i brzine prenosa testnog uređaja. Radi lakšeg sticanja slike o jačini LoRa signala u zgradi, izvršeno je izračunavanje prosječne jačine primljenog signala, a zatim i vizuelizacija u smislu u smislu tlocrta svih etaža objekta i 3D modela cijelog objekta sa unesenim prosječnim jačinama signala. Najveći broj neuspješnih konekcija je zastupljen tamo gdje je i prosječna jačina primljenog signala najmanja. Takođe, ove tačke leže i na najvećim udaljenostima od *gateway*-a. Nepravilnosti na pojedinim tačkama u smislu da je konekcija za neku brzinu uspješna za niži nivo snage, dok je za istu brzinu neuspješna za viši nivo snage se mogu objasniti višestrukom propagacijom signala. Na lijevoj strani objekta znatno je bolja situacija što se tiče snage signala zato što se *gateway* nalazi na drugom spratu na lijevoj strani objekta. Postavljanjem *gateway*-a na lokaciju koja je najbliže centru i po vertikali i po horizontali dobila bi se uniformnija raspodjela jačine signala u cijelom objektu. Takođe, upotrebom dva *gateway*-a dobila bi se potpuna pokrivenost sa znatno smanjenim brojem neuspjelih pokušaja uspostavljanja konekcije. S obzirom da LoRaWAN posjeduje algoritme za podešavanje brzina prenosa u toku rada, čak i jedan *gateway* može da odgovori na veliki broj zahtjeva pri projektovanju IoT sistema. Praćenje temperature i vlažnosti vazduha u kancelarijama, zatim praćenje ispravnosti aparata za gašenje požara i slično, su samo neki od primjera moguće upotrebe u ovom poslovnom objektu.

Što se tiče daljeg pravca istraživanja, on je određen ispitivanjem i testiranjima za slučaj postojanja dodatnih *gateway*-a i na vanjskom i u unutrašnjem okruženju, ali i određivanjem konkretnih aplikacija i primjena u oblasti IoT-a i pametnih gradova. Dodatnu pažnju bi trebalo usmjeriti na implementaciju i povezivanje LoRaWAN mrežnih servera radi upravljanja *gateway*-ima, odnosno upravljanja paketima poruka koje bi se razmjenjivale u slučaju velikog broja krajnjih uređaja (senzora) na području jednog grada i/ili unutar stambeno-poslovnih objekata. Takođe, postavljanjem konkretnih krajnjih uređaja (senzora), zatim slanjem podataka preko *gateway*-a do servera, obrađivanje i upotreba tih podataka kroz prethodno razvijene korisničke aplikacije i upotreba cijelog sistema od strane krajnjeg korisnika je krajnji cilj istraživanja i implementacije LoRa/LoRaWAN tehnologija.

8. Bibliografija

- [1] D. Drajić, "Pametni gradovi", Beograd: Akademska misao, 2018.
- [2] D. Drajić, "Uvod u IoT (Internet of Things)", Beograd: Akademska misao, Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet, 2017.
- [3] D. Dobrilović, M. Malić, D. Malić i Ž. Stojanov, „Analiza performansi LoRa tehnologije kod mobilnih senzorskih stanica u urbanim okruženjima,“ *XXXV Simpozijum o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju – PosTel 2017*, 5. i 6. decembar 2017.
- [4] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen and W. Townsley, "A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things," *Sensors*, vol. 16, no. 9, 2016.
- [5] E. Ruano, "LoRa™ protocol Evaluations, limitations and practical test," May 2016.
- [6] LoRa® Alliance, "LoRaWAN™ What is it? A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™," *Technical Marketing Workgroup 1.0*, November 2015.
- [7] <https://www.lora-alliance.org/about-lora-alliance>.
- [8] LoRa® Alliance, "NB-IoT vs LoRa™ Technology," *A White Paper by Hardy Schmidbauer prepared for the LoRa Alliance™*, September 2016.
- [9] <https://www.thethingsnetwork.org/wiki/LoRaWAN/Home>.
- [10] P. Magrassi and T. Berg, "A World of Smart Objects," *Gartner research report R-17-2243*, August 2002.
- [11] <https://www.trendmicro.com/vinfo/us/security/definition/internet-of-things>.
- [12] B. S. P. Lin, F. J. Lin and L. P. Tung, "The Roles of 5G Mobile Broadband in the Development of IoT, Big Data, Cloud and SDN," *Communications and Network*, no. 8, pp. 9-21, 2016.

- [13] O. Vermesan and P. Friess, "Internet of Things: Converging Technologies for Smart Environments and Integrated Ecosystems", Aalborg: River Publishers.
- [14] <https://www.yumpu.com/en/document/view/26748318/the-internet-of-things-a-study-in-hype-reality-disruption-and-growt>.
- [15] O. Vermesan, P. Friess, P. Guillemin and et.al., Internet of Things - Global Technological and Societal Trends, Aalborg: River Publishers, 2011.
- [16] Internet of Things Global Standards Initiative, <https://www.itu.int/en/ITU-T/gsi/iot/Pages/default.aspx>.
- [17] IERC European Research Council for the IoT, "Key Enabling Technologies," *Final Report of the HLG-KET*, June 2011.
- [18] O. Vermesan and P. Friess, "Internet of Things - From Research and Innovation to Market Deployment", Aalborg: River Publishers Series in Communications, 2014.
- [19] O. Vermesan and et.al., "Internet of Energy – Connecting Energy Anywhere Anytime" in Advanced Microsystems for Automotive Applications 2011: Smart System for Electric, Safe and Networked Mobility, Berlin: Springer, 2011.
- [20] K. Pretz, "Building Smarter Homes," *The Institute*, vol. 29, pp. 4-5, December 2015.
- [21] <https://pdfs.semanticscholar.org/656e/4fb0564d96407161d9e541a9ca15375d6c60.pdf>.
- [22] I. A. T. Hashem and et.al., "The Role of Big Data in Smart City," *Int'l. J. Info. Mgmt*, vol. 36, no. 5, pp. 748-758, 2016.
- [23] A. Asadi and et.al., "On the Efficient Utilization of Radio Resources in Extremely Dense Wireless Networks," *IEEE Communication Magazine*, vol. 53, no. 1, pp. 245-246, 2015.
- [24] LoRa® Alliance, "LPWA Technologies, Unlock New IoT Market Potential," *A White Paper prepared for the LoRa® Alliance*, November 2015.
- [25] S. Verić, „Pregled rješenja za realizaciju LoRa bežične mreže,“ u *17th International Symposium INFOTEH-JAHORINA*, 2018.
- [26] <https://www.multitech.com/technology/lorawan>.
- [27] N. Jovanović, "IoT sistemi na primeru LoRa mreže u Kruševcu", Čačak: Fakultet tehničkih nauka, Informacione tehnologije 2014/2015.
- [28] Semtech, "AN1200.22, LoRa™ Modulation Basics," May 2015.
- [29] M. Šunjevarić, "Osnovi radio komunikacija sa radio tehnikom", Beograd: Studio Line, 2004.

- [30] <http://www.sghoslya.com/p/lora-is-chirp-spread-spectrum.html>.
- [31] G. Stratidakis, "Study and implementation of LoRa Physical Layer", Master Thesis, Piraeus: University of Piraeus, 2018.
- [32] F. A. V. Fialhoab, "Wireless Communication Based on Chirp Signals for LoRa IoT Devices," *i-ETC: ISEL Academic Journal of Electronics*, vol. 4, 2018.
- [33] <https://electronics.stackexchange.com/questions/278192/understanding-the-relationship-between-lora-chips-chirps-symbols-and-bits>.
- [34] <https://home.zhaw.ch/~rumc/wcom2/unterlagen/wcom2chap3CSS.pdf>.
- [35] http://www.sghoslya.com/p/lora_6.html.
- [36] http://www.sghoslya.com/p/lora_9.html.
- [37] LoRa® Alliance, "LoRaWAN™ 1.0.3 Specification," July 2018.
- [38] <http://ftm.futureelectronics.com/2017/05/future-electronics-the-conversion-of-street-lights-into-intelligent-sensor-hubs-why-and-how-to-do-it/>.
- [39] <https://smartmakers.io/en/security-in-lorawan-applications/>.
- [40] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6021899/>.
- [41] LoRa® Alliance, "LoRaWAN™ 1.0.3 Regional Parameters," July 2018.
- [42] <https://www.multitech.com/documents/publications/data-sheets/86002197.pdf>.
- [43] <https://www.multitech.com/documents/publications/data-sheets/86002187.pdf>.
- [44] <https://www.multitech.com/documents/publications/data-sheets/86002178.pdf>.
- [45] <https://www.multitech.com/documents/publications/hardware-guides/s000706.pdf>.
- [46] <https://www.multitech.com/documents/publications/manuals/s820007511.pdf>.

9. Prilog

9.1 Rezultati mjerenja na području grada Banje Luke

U prvom dijelu ovog priloga, tj. u narednim tabelama se nalaze detaljni rezultati mjerenja na području grada Banje Luke. Položaj tačaka u kojima je vršeno mjerenje je prikazan na slikama (mapama) u radu, a u tabelama su prikazani sljedeći podaci: oznaka tačke mjerenja, geografske koordinate tačke, brzina, faktor širenja SF, frekvencijski opseg BW, snaga emitovanja testnog uređaja, snaga primljenog signala (RSSI) u tački mjerenja, margina i odnos signal-šum (SNR).

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
S1 (500m) Koordinate: N: 44° 46' 23.21" E: 17° 12' 59.75"	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	-82	21	7
			P=8	-83	14	7.2
			P=14	-84	13	7.2
			P=20	-82	14	7
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	-83	16	7.5
			P=8	-84	17	7.2
			P=14	-84	16	7
			P=20	-69	16	6.5
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-83	20	8.2
			P=8	-84	21	7
			P=14	-84	21	8
			P=20	-83	22	7.5
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-84	20	8.2
			P=8	-83	24	7.7
			P=14	-84	24	6.7
			P=20	-83	24	8
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-86	25	6.7
			P=8	-90	22	7.5
			P=14	-87	25	6.7
			P=20	-91	27	8.2
DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-95	26	10	
		P=8	-93	29	10.5	
		P=14	-94	28	10.7	
		P=20	-83	26	10	
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-95	28	7	
		P=8	-92	29	6.5	
		P=14	-93	28	6	
		P=20	-82	30	6	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
S2 (500m) Koordinate: N: 44° 46' 5.11" E: 17° 13' 28.14"	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	-98	12	7.2
			P=8	-98	14	7.2
			P=14	-104	11	6
			P=20	-102	14	6.7
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	-102	16	7.5
			P=8	-98	14	6.7
			P=14	-110	14	6
			P=20	-101	16	6.5
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-95	19	7.7
			P=8	-113	17	4.2
			P=14	-105	20	6.7
			P=20	-100	20	8.2
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-105	17	7
			P=8	-105	20	8
			P=14	-94	24	9
			P=20	-85	24	8.2
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-95	24	8.2
			P=8	-97	27	8.2
			P=14	-96	24	7.5
			P=20	-88	24	6.7
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-97	27	8
			P=8	-97	20	7.7
			P=14	-96	26	9.7
			P=20	-86	26	9.2
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-86	28	6.2	
		P=8	-100	26	6.5	
		P=14	-95	29	7.2	
		P=20	-98	29	6.7	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
S3 (500m) Koordinate: N: 44° 46' 13.23" E: 17° 13' 46.48"	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	-96	13	6.7
			P=8	-97	11	6.2
			P=14	-96	14	7
			P=20	-96	13	7.5
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	-99	16	7.2
			P=8	-100	17	7.2
			P=14	-86	17	6.7
			P=20	-100	16	6.7
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-97	20	8
			P=8	-97	21	7.2
			P=14	-87	20	8.2
			P=20	-100	22	7.5
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-100	20	8.5
			P=8	-97	21	6
			P=14	-90	23	8.7
			P=20	-102	24	7.5
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-103	22	6.5
			P=8	-99	24	7.5
			P=14	-100	27	8.5
			P=20	-103	23	6.5
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-103	28	8.7
			P=8	-105	26	9
			P=14	-105	28	9.5
			P=20	-103	28	7.2
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-104	24	6.2	
		P=8	-104	27	6.2	
		P=14	-94	28	6.7	
		P=20	-93	26	6.7	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
S4 (1000m) Koordinate: N: 44° 46' 0.72" E: 17° 14' 3.42"	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	-112	1	1.2
			P=8	-113	8	2
			P=14	-113	12	2.2
			P=20	-113	11	2.5
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-115	12	3
			P=14	-115	14	3.2
			P=20	-110	13	6.2
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-116	8	3.5
			P=8	-114	16	4
			P=14	-117	18	4.2
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-119	8	1
			P=8	-117	16	2.7
			P=14	-119	18	-0.2
			P=20	-116	20	4
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-117	13	2.7
			P=8	-118	16	2
			P=14	-115	22	3.7
			P=20	-117	21	2.7
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-118	19	2.5
			P=14	-128	15	-6.5
			P=20	-116	26	4.7
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-108	17	5.2	
		P=8	-113	19	2	
		P=14	-119	25	2.2	
		P=20	-116	27	3.2	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
S5 (1000m) Koordinate: N: 44° 45' 57.77" E: 17° 12' 51.92"	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	-109	2	4.7
			P=8	-111	9	3.7
			P=14	-110	4	4.2
			P=20	-112	12	3.7
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	-119	3	0.2
			P=8	-114	11	4.5
			P=14	-108	16	6.5
			P=20	-97	17	6.7
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-109	16	7
			P=8	-109	19	6.2
			P=14	-109	20	6.7
			P=20	-109	20	5
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-110	18	7.7
			P=8	-111	21	7.2
			P=14	-109	24	6.2
			P=20	-109	23	5.7
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-113	20	7.2
			P=8	-111	20	7.5
			P=14	-111	24	6
			P=20	-99	23	7.2
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-111	21	7.7
			P=8	-111	25	8.7
			P=14	-111	26	7.5
			P=20	-109	28	6.7
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-112	23	5.5	
		P=8	-111	26	5.2	
		P=14	-111	28	4.7	
		P=20	Failed	Failed	Failed	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
S6 (1000m) Koordinate: N: 44° 46' 20.88" E: 17° 12' 38.78"	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	-97	13	7.2
			P=8	-98	13	6.7
			P=14	-99	14	6.7
			P=20	-98	12	7.5
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	-99	16	7
			P=8	-99	15	7
			P=14	-99	17	7
			P=20	-88	17	8
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-100	20	7.7
			P=8	-97	21	7.7
			P=14	-97	21	8.2
			P=20	-87	21	8
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-98	22	7.5
			P=8	-99	20	8
			P=14	-98	24	8.5
			P=20	-102	24	6.2
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-100	24	8.5
			P=8	-99	22	8.2
			P=14	-101	25	8.7
			P=20	-91	24	7.5
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-91	25	6.7
			P=8	-104	26	8.7
			P=14	-103	27	8.7
			P=20	-91	26	8.7
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-91	26	6.2	
		P=8	-107	24	5.7	
		P=14	-102	29	5.7	
		P=20	-103	29	6	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
S7 (1500m) Koordinate: N: 44° 45' 54.52" E: 17° 14' 23.79"	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-114	1	3.5
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	-123	13	-3.2
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	-116	14	1
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-124	8	-4
			P=8	-121	16	-1.2
			P=14	-123	21	-2.5
			P=20	-127	16	-6
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-115	9	3	
		P=8	-121	17	-2.2	
		P=14	-127	19	-6.2	
		P=20	-125	19	-4.7	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
S8 (1500m) Koordinate: N: 44° 46' 16.70" E: 17° 12' 16.28"	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	-108	3	2.2
			P=8	-115	12	-3
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	-104	17	4.7
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	-126	15	-10
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-108	10	2.5
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-121	17	-6.7
			P=14	-109	22	3.7
			P=20	-121	21	-5.5
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-122	14	-6.7	
		P=8	-123	19	-7.2	
		P=14	-109	24	2.5	
		P=20	-122	24	-7	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
S9 (1500m) Koordinate: N: 44° 46' 28.47" E: 17° 12' 18.54"	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	-116	0	-3.5
			P=8	-115	5	0
			P=14	-115	9	-0.7
			P=20	-116	6	-1.2
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	-118	3	0
			P=8	-120	6	-1.2
			P=14	-119	13	-1.2
			P=20	-117	12	1.2
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-119	6	0.5
			P=8	-117	4	2
			P=14	-121	13	-2.5
			P=20	-117	15	1.5
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-118	10	1.2
			P=8	-117	2	1
			P=14	-125	12	-5.5
			P=20	-118	18	0.2
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-118	12	1
			P=8	-125	12	-5.7
			P=14	-126	15	-5.7
			P=20	-118	22	1.7
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-119	15	1.5
			P=8	-119	10	1.7
			P=14	-116	21	1.7
			P=20	-118	22	3.2
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-119	17	0.7	
		P=8	-124	15	-3.7	
		P=14	-117	22	2.5	
		P=20	-123	23	-4	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
S10 (2000m) Koordinate: N: 44° 46' 45.19" E: 17° 12' 2.72"	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	-119	0	-4
			P=8	-112	6	1.2
			P=14	-112	12	1.7
			P=20	-113	6	0.7
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	-116	10	-2
			P=8	-113	12	2
			P=14	-100	15	7.5
			P=20	-111	15	5
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-113	12	4.7
			P=8	-113	16	2.7
			P=14	-97	20	7
			P=20	-113	19	3.2
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-116	14	-0.5
			P=8	-115	17	3
			P=14	-116	19	0
			P=20	-113	22	4.2
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-115	15	2.5
			P=8	-109	23	4.2
			P=14	-112	24	4.5
			P=20	-113	21	3.5
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-113	18	4.5
			P=8	-110	26	5.5
			P=14	-97	27	6
			P=20	-97	27	5.7
	DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-115	20	1.5
			P=8	-113	25	2
			P=14	-99	27	5.7
			P=20	-98	28	5.5

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
S11 (2000m) Koordinate: N: 44° 46' 15.19" E: 17° 11' 53.22"	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-122	0	-5.7
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-126	5	-6
			P=14	-127	9	-7.2
			P=20	-123	10	-4.5
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-124	0	-4.7
			P=8	-126	6	-6
			P=14	-130	7	-10
			P=20	-130	10	-9.5
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-131	0	-10
			P=8	-125	7	-5.5
			P=14	-114	11	2.5
			P=20	-125	15	-5
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-126	6	-6.2
			P=8	-124	8	-4.5
			P=14	-116	16	2.7
			P=20	-126	15	-6.7
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-123	11	-3
			P=8	-125	12	-5
			P=14	-124	15	-5.7
			P=20	-124	20	-3.7
	DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-132	6	-11
			P=8	-124	17	-4.7
			P=14	-116	18	2.2
			P=20	-117	21	2

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
S12 (2000m) Koordinate: N: 44° 45' 52.68" E: 17° 14' 48.05"	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-124	25	-8
			P=14	-123	4	-6.7
			P=20	-123	25	-6.2
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-125	3	-5
			P=14	-124	9	-4.2
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-128	25	-8
			P=8	-112	7	5.5
			P=14	-125	11	-5.2
			P=20	-130	4	-9.2
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-128	0	-8.2
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	-128	12	-7.5
			P=20	-125	11	-5.5
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-127	9	-5.5
			P=14	-111	19	6.5
			P=20	-129	13	-8.5
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-125	5	-5.7
			P=8	-124	14	-3.2
			P=14	-135	9	11.1
			P=20	-111	14	5.2
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-126	10	-5.2	
		P=8	-127	14	-6.5	
		P=14	-114	23	4.5	
		P=20	-112	21	5	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
S13 (2.07 km) Koordinate: N: 44° 45' 23.66" E: 17° 12' 37.34"	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-121	25	-5.5
			P=14	-121	4	-6.2
			P=20	-121	6	-6
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-125	2	-8.7
			P=14	-112	10	3.7
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-127	2	-9
			P=14	-125	11	-7.7
			P=20	-125	12	-7.2
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	-125	14	-7.5
			P=20	-124	14	-7.2
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-132	2	-12
			P=8	-129	7	-10
			P=14	-126	16	-8
			P=20	-123	18	-5.7
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-113	10	2.7
			P=8	-129	11	-11
			P=14	-123	20	-5
			P=20	-123	22	-6
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-115	8	-0.2	
		P=8	-131	13	-12	
		P=14	-125	22	-6.7	
		P=20	-127	22	-8.7	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
S14 (2.53 km) Koordinate: N: 44° 47' 15.15" E: 17° 11' 58.70"	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-112	6	1.5
			P=14	-112	12	2
			P=20	-110	11	-1.7
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	-113	9	3.5
			P=8	-113	13	4.2
			P=14	-114	15	3.7
			P=20	-114	15	3.2
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-114	10	4
			P=8	-112	16	4.2
			P=14	-104	18	8
			P=20	-114	19	4
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-115	14	3.5
			P=8	-113	19	3.2
			P=14	-115	21	4.2
			P=20	-116	20	3.2
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-115	16	3.7
			P=8	-115	20	3
			P=14	-107	22	7.7
			P=20	-114	23	3.5
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-115	14	3.7
			P=8	-114	22	4
			P=14	-115	26	4.5
			P=20	-105	25	6.7
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-115	22	2.5	
		P=8	-115	25	3.2	
		P=14	-115	26	3.2	
		P=20	-105	27	7	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
S15 (2.58 km) Koordinate: N: 44° 46' 30.67" E: 17° 11' 28.98"	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	-119	7	-1.5
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-125	2	-5.7
			P=8	-122	7	-3.7
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	-128	9	-8
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-123	4	-3
			P=8	-127	8	-7.2
			P=14	-130	9	-10
			P=20	-118	10	0.5
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-125	5	-5
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	-125	15	-4.5
			P=20	-128	13	-7
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-119	17	0.5
			P=14	-131	16	-10
			P=20	-133	16	-12
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed	
		P=8	-129	14	-8.2	
		P=14	-122	24	-2.7	
		P=20	-127	16	-6.7	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
S16 (2.8 km) Koordinate: N: 44° 46' 14.26" E: 17° 11' 18.42"	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	-119	7	-1.2
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	-130	11	-11
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-132	1	-12
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	-134	9	9.9
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-131	10	11.6
			P=14	-132	13	-12
			P=20	-129	14	-9.5
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-128	9	-9.7	
		P=8	-132	12	-11	
		P=14	-133	16	-12	
		P=20	-131	17	-11	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
S17 (3.05 km) Koordinate: N: 44° 46' 43.05" E: 17° 11' 9.75"	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed	
		P=8	Failed	Failed	Failed	
		P=14	Failed	Failed	Failed	
		P=20	-129	8	-10	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
S18 (3.25 km) Koordinate: N: 44° 47' 48.45" E: 17° 12' 3.34"	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	-117	1	-2.7
			P=8	-114	5	-0.7
			P=14	-115	9	-1
			P=20	-123	2	-7.5
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	-123	25	-4.2
			P=8	-120	8	-2
			P=14	-120	10	-2.7
			P=20	-115	12	2.2
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-122	9	-3
			P=14	-127	11	-7
			P=20	-122	14	-3.5
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-124	3	-4
			P=8	-119	13	-2.2
			P=14	-119	17	0.5
			P=20	-119	13	-0.7
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-123	15	-2.5
			P=14	-123	18	-2.7
			P=20	-115	19	4.2
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-119	13	0.5
			P=8	-117	19	0.7
			P=14	-121	19	-1.5
			P=20	-123	20	-3.7
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-125	15	-4.5	
		P=8	-125	18	-4.7	
		P=14	-123	22	-3	
		P=20	-127	24	-7.5	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
S19 (3.34 km) Koordinate: N: 44° 46' 19.99" E: 17° 10' 53.82"	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	x	x	x
			P=8	x	x	x
			P=14	x	x	x
			P=20	x	x	x
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	x	x	x
			P=8	x	x	x
			P=14	x	x	x
			P=20	x	x	x
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	x	x	x
			P=8	x	x	x
			P=14	x	x	x
			P=20	x	x	x
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	x	x	x
			P=8	x	x	x
			P=14	x	x	x
			P=20	x	x	x
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	x	x	x
			P=8	x	x	x
			P=14	x	x	x
			P=20	x	x	x
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	x	x	x
			P=8	x	x	x
			P=14	x	x	x
			P=20	x	x	x
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	x	x	x	
		P=8	x	x	x	
		P=14	x	x	x	
		P=20	x	x	x	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
S20 (3.8 km) Koordinate: N: 44° 46' 56.89" E: 17° 10' 39.93"	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	-111	8	0.2
			P=8	-121	6	-7.7
			P=14	-114	15	-2.2
			P=20	-114	5	-2
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-120	6	-6.5
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	-119	15	-5.5
			P=20	-116	18	-2.2
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-119	9	-4.5
			P=8	-114	17	-2
			P=14	-119	18	5.2
			P=20	-121	14	-6
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-119	12	-4
			P=8	-117	18	-3.5
			P=14	-104	19	5
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-117	18	-4
			P=8	-116	21	-3.7
			P=14	-120	22	6.2
			P=20	-124	19	-9
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-119	14	-4.7	
		P=8	-118	22	-4	
		P=14	-102	22	5.2	
		P=20	-124	22	-9.7	

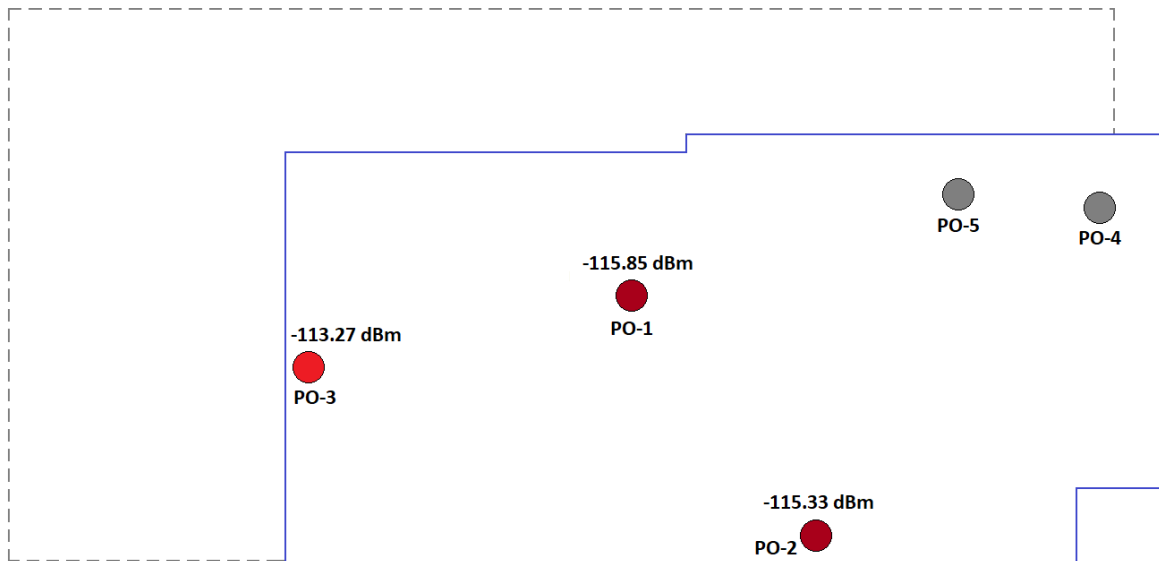
Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
S21 (3.88 km) Koordinate: N: 44° 46' 23.80" E: 17° 10' 28.57"	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-127	0	-7.2
			P=14	-113	8	4.2
			P=20	-126	6	-5.2
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-127	2	-6.5
			P=14	-128	8	-6
			P=20	-113	14	5.2
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-125	1	-5.2
			P=8	-125	5	-5.2
			P=14	-129	5	-8.7
			P=20	-130	10	-9.5
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-129	4	-7
			P=8	-131	7	-9
			P=14	-128	14	-7.2
			P=20	-115	19	4.2
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-125	8	-4.7
			P=8	-129	10	-8
			P=14	-129	17	-8.5
			P=20	-122	23	-2.5
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-126	10	-4.5	
		P=8	-130	11	-9.5	
		P=14	-127	19	-6.5	
		P=20	-115	24	3.7	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
S22 (3.95 km) Koordinate: N: 44° 45' 18.95" E: 17° 10' 48.56"	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-127	0	-8
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-122	4	-3
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	-128	7	-8
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-128	5	-8.5
			P=14	-123	16	-4.2
			P=20	-118	14	1
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-124	13	-5.2
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	-121	19	-2
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-119	3	3
			P=8	-132	8	-11
			P=14	-125	16	-4.7
			P=20	-123	19	-3.5
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed	
		P=8	-134	9	12.6	
		P=14	-130	16	-9.2	
		P=20	-126	20	-6.7	

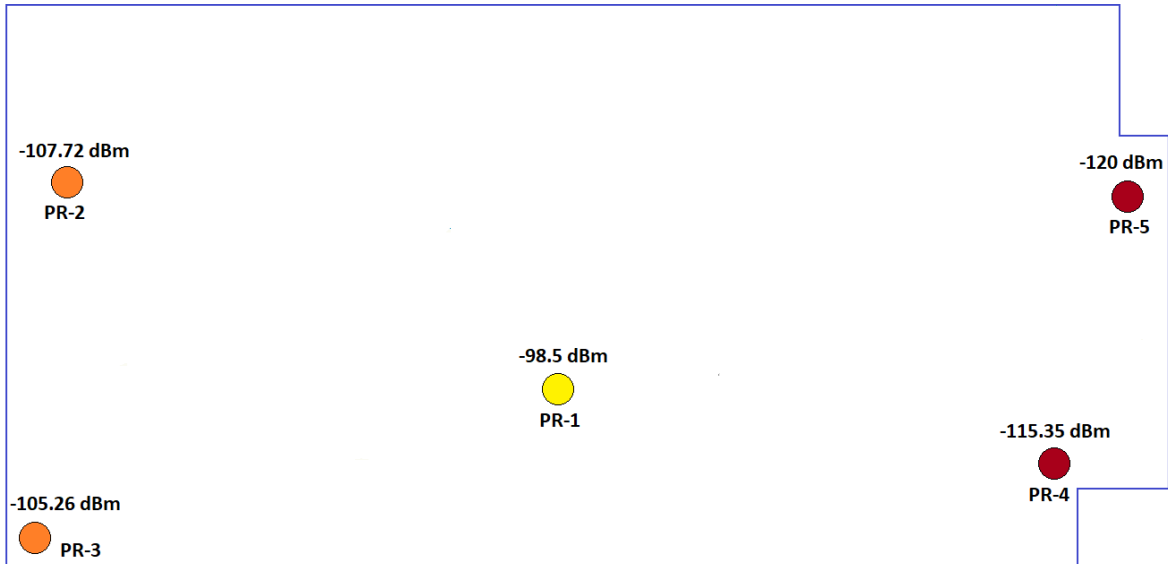
Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
M1 (5.75 km) Koordinate: N: 44° 44' 38.46" E: 17° 9' 47.92"	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	-105	9	6
			P=8	-107	12	6.5
			P=14	-107	13	5.7
			P=20	-103	13	6.7
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	-104	15	7
			P=8	-107	16	6.5
			P=14	-109	17	6.2
			P=20	-110	15	6.5
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-108	16	7
			P=8	-109	18	5.7
			P=14	-108	21	7.5
			P=20	-107	20	7.2
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-107	21	7
			P=8	-107	22	8.2
			P=14	-109	23	5.5
			P=20	-108	22	7.5
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-103	21	7.7
			P=8	-110	23	6
			P=14	-111	24	7
			P=20	-98	25	7
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-98	24	5.7
			P=8	-107	26	4.7
			P=14	-109	26	7.5
			P=20	-99	25	6.5
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-109	23	3.2	
		P=8	-108	27	4.7	
		P=14	-107	28	4.7	
		P=20	-100	27	6.2	

9.2 Tlocrti svih etaža poslovnog objekta sa označenim tačkama mjerenja

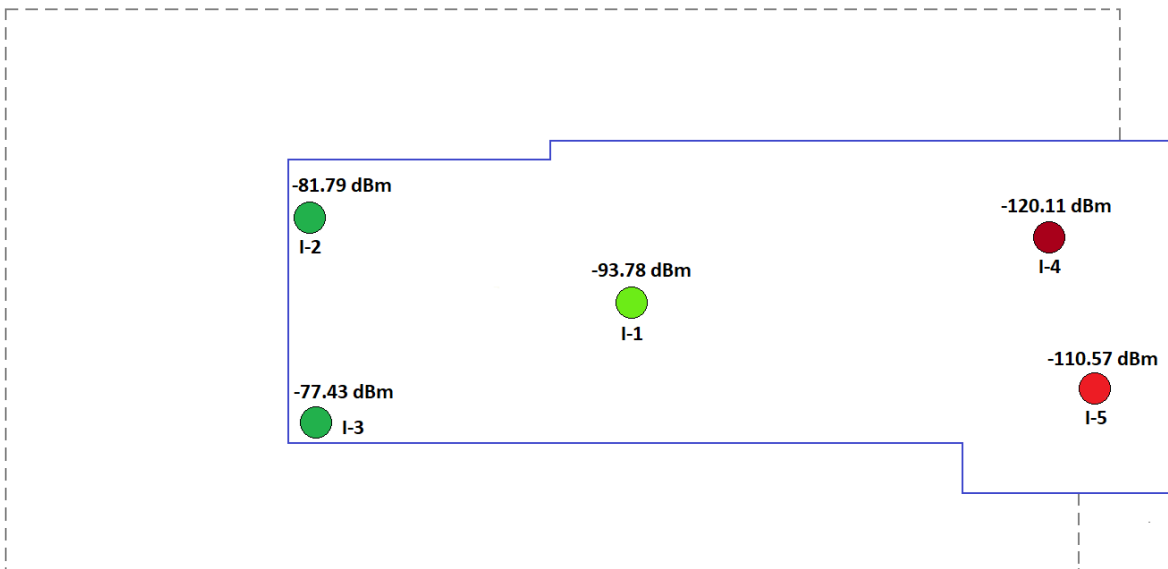
U ovom dijelu priloga su prikazani grubo skicirani tlocrti svih etaža poslovnog objekta u kojem je vršeno testiranje. Na slikama je prikazan položaj svih tačaka po etažama, kao i njihove oznake koje su identične onima u tabelama sa rezultatima mjerenja koje se takođe nalaze u ovom prilogu. Tačke su obojene odgovarajućim nijansama zelene, žute, narandžaste i crvene u skladu sa jačinom signala. Veza jačine signala i boje tačke je predstavljena odgovarajućom legendom na slici 6.13 u samom radu. Prikazane su i prosječne jačine signala u svim tačkama.



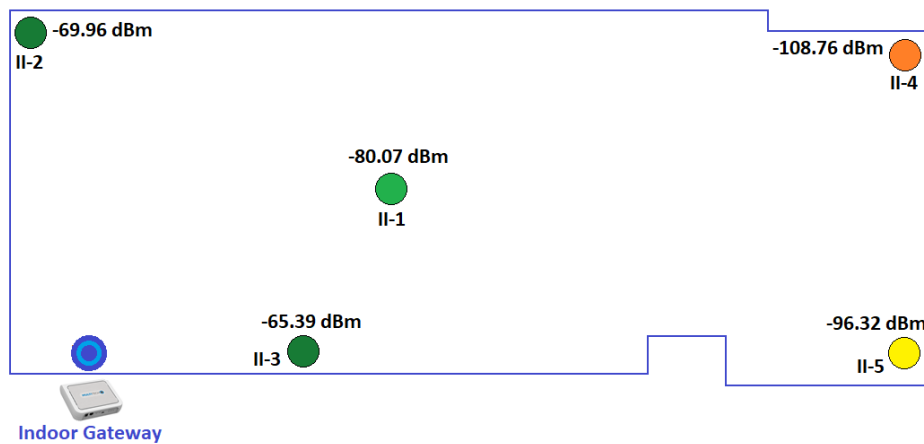
Tlocrt podruma sa označenim tačkama u kojima je vršeno mjerenje



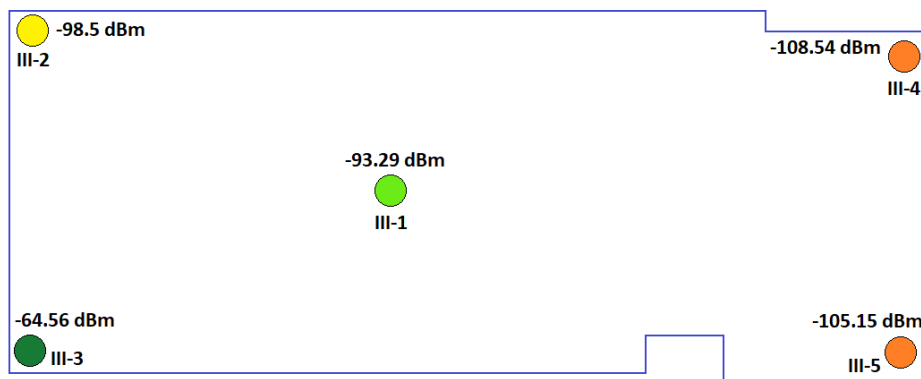
Tlocrt prizemlja sa označenim tačkama u kojima je vršeno mjerenje



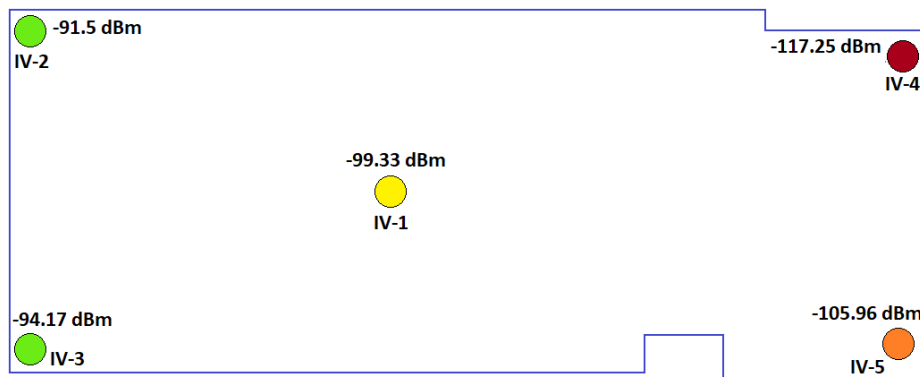
Tlocrt 1. sprata sa označenim tačkama u kojima je vršeno mjerenje



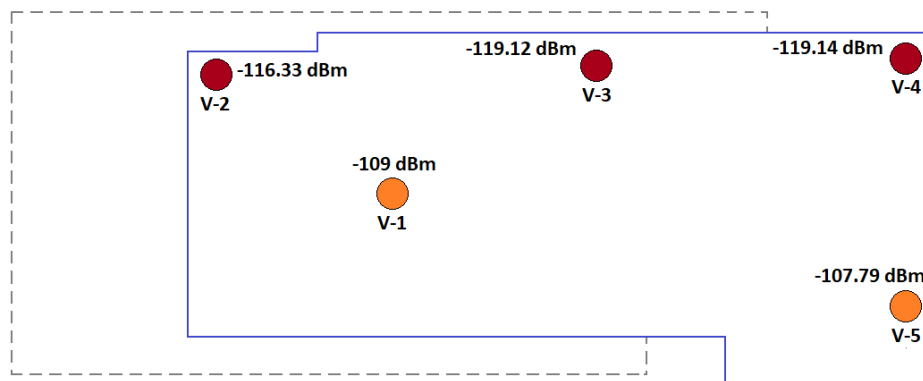
Tlocrt 2. sprata sa tačkama mjerenja i tačnim položajem gateway-a



Tlocrt 3. sprata sa označenim tačkama u kojima je vršeno mjerenje



Tlocrt 4. sprata sa označenim tačkama u kojima je vršeno mjerenje



Tlocrt 5. sprata sa označenim tačkama u kojima je vršeno mjerenje

9.3 Rezultati mjerenja unutar poslovnog objekta

U narednim tabelama se nalaze detaljni rezultati mjerenja po svim tačkama u poslovnom objektu kompanije Lanaco d.o.o. Za svaku etažu je izabrano po pet tačaka, pa s obzirom da objekat ima sedam etaža, ukupno postoji 35 tabela. Položaj tačaka u kojima je vršeno mjerenje je prikazan u prethodnom odjeljku priloga, a u tabelama su prikazani sljedeći podaci: oznaka tačke mjerenja, brzina, faktor širenja SF, frekvencijski opseg BW, snaga emitovanja testnog uređaja, snaga primljenog signala (RSSI) u tački mjerenja, margina i odnos signal-šum (SNR).

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
PO-1 (Podrum)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	-118	2	1.5
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-114	3	4.5
			P=14	-114	9	4.2
			P=20	-113	9	5
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-113	7	4.2
			P=14	-113	12	4.2
			P=20	-115	11	3.5
DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed	
		P=8	-119	2	1.2	
		P=14	-119	11	2	
		P=20	-118	10	1.7	
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed	
		P=8	-118	8	2.5	
		P=14	-115	13	3.5	
		P=20	-117	15	2.2	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
PO-2 (Podrum)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	-115	2	4.7
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-113	4	5.2
			P=14	-114	9	4.5
			P=20	-114	7	4.7
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-114	5	3.7
			P=14	-113	13	5.2
			P=20	-114	11	4.5
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-115	5	5
			P=8	-113	5	5.7
			P=14	-113	17	6
			P=20	-118	10	3.5
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-117	5	4	
		P=8	-119	8	3.7	
		P=14	-119	13	3	
		P=20	-119	12	2.2	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
PO-3 (Podrum)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	-109	1	5.7
			P=20	-111	0	4.2
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	-111	6	5.7
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-111	2	6.7
			P=14	-117	8	6
			P=20	-113	7	5
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-114	0	5.5
			P=8	-113	5	6.2
			P=14	-114	11	5.2
			P=20	-113	8	5.5
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-115	0	5
			P=8	-114	5	5
			P=14	-113	12	5
			P=20	-113	13	4.7
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-114	6	5.5
			P=8	-112	13	6.5
			P=14	-114	15	6
			P=20	-115	15	5.5
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-115	4	5.5	
		P=8	-114	14	6	
		P=14	-113	20	6.2	
		P=20	-114	19	5.5	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
PO-4 (Podrum)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	x	x	x
			P=8	x	x	x
			P=14	x	x	x
			P=20	x	x	x
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	x	x	x
			P=8	x	x	x
			P=14	x	x	x
			P=20	x	x	x
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	x	x	x
			P=8	x	x	x
			P=14	x	x	x
			P=20	x	x	x
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	x	x	x
			P=8	x	x	x
			P=14	x	x	x
			P=20	x	x	x
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	x	x	x
			P=8	x	x	x
			P=14	x	x	x
			P=20	x	x	x
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	x	x	x
			P=8	x	x	x
			P=14	x	x	x
			P=20	x	x	x
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	x	x	x	
		P=8	x	x	x	
		P=14	x	x	x	
		P=20	x	x	x	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
PO-5 (Podrum)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	x	x	x
			P=8	x	x	x
			P=14	x	x	x
			P=20	x	x	x
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	x	x	x
			P=8	x	x	x
			P=14	x	x	x
			P=20	x	x	x
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	x	x	x
			P=8	x	x	x
			P=14	x	x	x
			P=20	x	x	x
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	x	x	x
			P=8	x	x	x
			P=14	x	x	x
			P=20	x	x	x
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	x	x	x
			P=8	x	x	x
			P=14	x	x	x
			P=20	x	x	x
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	x	x	x
			P=8	x	x	x
			P=14	x	x	x
			P=20	x	x	x
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	x	x	x	
		P=8	x	x	x	
		P=14	x	x	x	
		P=20	x	x	x	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
PR-1 (Prizemlje)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	-109	6	4.5
			P=20	-96	11	7
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	-94	12	7.2
			P=8	-102	15	6.7
			P=14	-98	15	7.2
			P=20	-100	15	7.2
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-99	10	7.5
			P=8	-101	13	7.5
			P=14	-98	18	8
			P=20	-97	16	7.7
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-99	13	8.2
			P=8	-98	18	8.7
			P=14	-99	22	8
			P=20	-97	22	6.2
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-97	15	6.7
			P=8	-97	21	7.5
			P=14	-95	26	8.7
			P=20	-95	22	8.2
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-94	23	10.2
			P=8	-98	22	10.2
			P=14	-99	25	10
			P=20	-101	23	9.2
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-99	20	7.5	
		P=8	-98	25	7.2	
		P=14	-99	27	6.7	
		P=20	-102	27	7.5	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
PR-2 (Prizemlje)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-107	0	5.5
			P=14	-107	3	6.2
			P=20	-105	5	6.7
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-105	6	6.7
			P=14	-105	11	6.7
			P=20	-105	5	6.2
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-104	3	7.5
			P=8	-107	8	7.5
			P=14	-108	12	7
			P=20	-109	12	6.5
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-107	5	8.2
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	-107	13	7.7
			P=20	-111	13	6.7
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-111	7	6.2
			P=8	-108	12	6.7
			P=14	-107	18	6.5
			P=20	-111	16	6.2
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-110	11	7.2
			P=8	-109	15	7
			P=14	-105	21	8.2
			P=20	-109	20	7.2
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-109	15	6.5	
		P=8	-109	17	7	
		P=14	-108	23	7.2	
		P=20	-110	22	6.2	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
PR-3 (Prizemlje)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-108	0	5
			P=14	-107	4	5.5
			P=20	-107	5	6.2
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	-102	4	7
			P=8	-102	7	7
			P=14	-104	11	6.7
			P=20	-107	11	7.7
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-103	5	7.2
			P=8	-103	6	7.7
			P=14	-109	12	6.5
			P=20	-107	13	7.2
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-104	9	7.7
			P=8	-104	14	6.5
			P=14	-105	19	8
			P=20	-105	18	7
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-105	13	7.5
			P=8	-104	16	8.5
			P=14	-108	17	7.2
			P=20	-105	20	8
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-105	9	9
			P=8	-104	19	8
			P=14	-105	21	8.2
			P=20	-107	21	8.5
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-105	16	7.5	
		P=8	-104	20	6.7	
		P=14	-105	22	7	
		P=20	-108	22	6.7	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
PR-4 (Prizemlje)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-111	4	6.5
			P=14	-113	9	6
			P=20	-115	3	4
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-117	2	1.5
			P=14	-113	9	5.5
			P=20	-115	4	4
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-117	3	3.7
			P=14	-118	3	2
			P=20	-113	12	4.7
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-116	2	3.7
			P=8	-118	3	3.7
			P=14	-116	13	4
			P=20	-113	12	5.2
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-118	2	2.7	
		P=8	-117	10	4.5	
		P=14	-117	10	3.5	
		P=20	-114	15	4.2	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
PR-5 (Prizemlje)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	-119	3	0.2
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	-121	6	-1.2
			P=20	Failed	Failed	Failed
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed	
		P=8	Failed	Failed	Failed	
		P=14	Failed	Failed	Failed	
		P=20	-120	9	-0.7	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
I-1 (1.sprat)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-88	12	7.2
			P=14	-87	13	7
			P=20	-86	14	7.5
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	-92	12	7.5
			P=8	-95	14	6.5
			P=14	-98	17	7.5
			P=20	-93	16	7.2
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-95	14	7.2
			P=8	-93	19	7.7
			P=14	-92	20	7
			P=20	-93	20	7.7
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-92	18	8.5
			P=8	-96	18	7.7
			P=14	-95	23	8
			P=20	-96	22	7.7
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-96	18	7.5
			P=8	-97	19	7.5
			P=14	-91	23	7.2
			P=20	-94	22	8.5
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-96	21	9
			P=8	-96	23	9
			P=14	-96	25	8
			P=20	-91	25	8
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-98	22	7.7	
		P=8	-96	25	8	
		P=14	-96	27	7.5	
		P=20	-94	26	7.5	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
I-2 (1.sprat)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	-79	13	7
			P=8	-78	13	7.5
			P=14	-78	14	7.5
			P=20	-80	13	7.2
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	-81	16	6.7
			P=8	-81	14	7
			P=14	-76	17	6.5
			P=20	-83	14	7.7
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-84	20	8.2
			P=8	-83	18	7.7
			P=14	-81	19	7.5
			P=20	-85	18	7.7
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-83	23	8.2
			P=8	-83	23	8.2
			P=14	-83	24	9
			P=20	-84	20	8
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-83	25	6.7
			P=8	-81	25	7
			P=14	-81	25	7.2
			P=20	-83	22	6.7
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-81	25	7.5
			P=8	-82	28	6.5
			P=14	-82	27	8
			P=20	-83	29	9.5
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-83	28	7.5	
		P=8	-83	25	7.5	
		P=14	-83	28	7.5	
		P=20	-83	27	9.2	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
I-3 (1.sprat)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	-73	14	7.5
			P=8	-74	13	6.7
			P=14	-73	14	7
			P=20	-77	14	6.2
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	-75	16	6.7
			P=8	-74	14	6.5
			P=14	-73	16	6.2
			P=20	-76	16	6.7
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-78	21	7
			P=8	-76	18	7.7
			P=14	-76	21	7.5
			P=20	-78	21	7.2
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-78	23	8
			P=8	-77	24	8
			P=14	-78	25	7.7
			P=20	-79	21	8
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-80	23	8.7
			P=8	-79	24	9
			P=14	-78	25	6.5
			P=20	-82	22	7.2
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-79	28	9.2
			P=8	-79	28	9.2
			P=14	-78	26	10
			P=20	-79	28	9.5
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-80	27	8.2	
		P=8	-78	26	9.2	
		P=14	-79	28	7.2	
		P=20	-82	27	8	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
I-4 (1.sprat)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	-116	3	1.5
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-118	1	0
			P=14	-119	5	1.2
			P=20	-119	6	0.2
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	-123	7	-3
			P=20	-125	10	-5.2
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed	
		P=8	-119	5	0.5	
		P=14	-119	9	-0.5	
		P=20	-123	8	-2.2	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
I-5 (1.sprat)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-104	0	6.5
			P=14	-105	6	5.5
			P=20	-108	3	4.7
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-107	5	6.7
			P=14	-112	4	2.7
			P=20	-119	2	-2.5
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-108	2	7
			P=8	-108	8	6.7
			P=14	-108	11	6
			P=20	-122	1	-4.7
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	-107	16	7
			P=20	-109	15	6.2
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-111	9	5.5
			P=14	-115	8	2.7
			P=20	-109	16	5.7
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-108	10	6.7
			P=8	-114	10	3.2
			P=14	-115	15	3.2
			P=20	-109	20	6.7
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-109	14	6	
		P=8	-113	14	4.2	
		P=14	-115	15	2.7	
		P=20	-108	22	6.5	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
II-1 (2.sprat)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	-71	13	7.2
			P=8	-78	14	6.5
			P=14	-74	13	7
			P=20	-82	14	7.2
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	-77	17	6.5
			P=8	-75	17	6.2
			P=14	-76	18	6.5
			P=20	-78	17	6.5
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-80	19	7.5
			P=8	-80	21	7
			P=14	-80	20	7.7
			P=20	-81	18	7.7
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-79	23	7.7
			P=8	-82	23	7
			P=14	-79	24	8.2
			P=20	-78	23	8.5
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-83	25	6.7
			P=8	-82	21	8
			P=14	-80	26	8
			P=20	-85	24	7.7
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-84	26	9.5
			P=8	-84	29	9.5
			P=14	-82	28	7.7
			P=20	-83	25	9.7
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-84	27	7	
		P=8	-82	27	7.5	
		P=14	-80	27	8.2	
		P=20	-83	28	7.7	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
II-2 (2.sprat)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	-67	14	6.7
			P=8	-64	14	7
			P=14	-66	13	7.5
			P=20	-66	14	6.7
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	-66	17	7
			P=8	-64	17	5.7
			P=14	-68	16	6
			P=20	-68	17	6.2
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-70	21	7.5
			P=8	-71	22	8
			P=14	-70	22	7
			P=20	-67	21	7
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-70	23	7.2
			P=8	-70	24	7.7
			P=14	-70	21	6.7
			P=20	-71	23	8.2
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-71	23	7.7
			P=8	-74	22	8.5
			P=14	-74	26	6.5
			P=20	-71	26	8.7
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-68	28	8
			P=8	-73	28	10.2
			P=14	-71	25	9.7
			P=20	-73	27	9.7
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-74	26	8.7	
		P=8	-73	28	9.2	
		P=14	-75	29	8.5	
		P=20	-74	28	8	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
II-3 (2.sprat)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	-65	14	7
			P=8	-61	14	6.7
			P=14	-63	15	6.5
			P=20	-60	14	6.7
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	-62	17	6.7
			P=8	-61	16	6.7
			P=14	-60	16	6.5
			P=20	-61	15	7
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-65	21	7.5
			P=8	-65	18	8
			P=14	-64	20	7.5
			P=20	-64	17	8.2
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-65	24	6.5
			P=8	-65	23	6
			P=14	-66	24	8.5
			P=20	-66	23	7.7
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-66	25	6.7
			P=8	-66	22	8.7
			P=14	-69	25	8.7
			P=20	-70	23	7.5
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-69	26	8.2
			P=8	-68	25	9.5
			P=14	-70	27	9
			P=20	-68	26	8.7
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-69	28	8	
		P=8	-67	28	9.2	
		P=14	-67	28	8.7	
		P=20	-69	27	8.2	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
II-4 (2.sprat)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	-108	3	5.5
			P=20	-105	5	6.2
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-104	6	6.7
			P=14	-108	11	6.7
			P=20	-109	8	6.5
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-108	3	6
			P=8	-107	7	7.2
			P=14	-105	13	7
			P=20	-111	11	6
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-108	5	6.5
			P=8	-109	10	7
			P=14	-109	14	5.5
			P=20	-112	9	6.2
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-109	7	6.5
			P=8	-109	13	6.2
			P=14	-112	15	7
			P=20	-110	17	5.7
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-108	10	7.5
			P=8	-109	15	7.2
			P=14	-110	20	8.7
			P=20	-111	18	7
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-109	14	6.7	
		P=8	-109	19	6.5	
		P=14	-110	23	6.5	
		P=20	-110	20	6.5	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
II-5 (2.sprat)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	-95	6	6.7
			P=8	-96	7	6.5
			P=14	-95	12	7.2
			P=20	-95	11	7
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	-95	11	6.7
			P=8	-94	15	7.2
			P=14	-96	16	7.7
			P=20	-96	14	7
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-97	13	7.7
			P=8	-96	17	7
			P=14	-95	19	7.2
			P=20	-96	16	7.5
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-97	14	6
			P=8	-97	18	8.2
			P=14	-96	22	8.2
			P=20	-97	18	8
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-98	13	7
			P=8	-97	21	8
			P=14	-96	23	7.7
			P=20	-97	21	7.2
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-97	21	7.5
			P=8	-95	24	9
			P=14	-95	25	9.5
			P=20	-97	26	8.5
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-99	22	7.2	
		P=8	-97	24	7.7	
		P=14	-96	27	8	
		P=20	-100	27	7	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
III-1 (3.sprat)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-92	11	7
			P=14	-93	12	7.2
			P=20	-93	13	6.5
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	-91	13	7.5
			P=8	-91	15	7.2
			P=14	-92	17	7
			P=20	-90	16	7
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-93	16	7
			P=8	-92	18	8.5
			P=14	-95	16	7.7
			P=20	-94	20	7.5
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-94	18	8.5
			P=8	-92	22	8
			P=14	-87	23	8.2
			P=20	-93	23	8.2
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-94	20	7
			P=8	-94	22	6.7
			P=14	-93	22	6.5
			P=20	-95	24	7.5
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-94	18	9.5
			P=8	-95	25	8.7
			P=14	-93	26	8.7
			P=20	-102	26	8
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed	
		P=8	Failed	Failed	Failed	
		P=14	Failed	Failed	Failed	
		P=20	-97	27	8	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
III-2 (3.sprat)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	-91	11	6.7
			P=8	-86	13	7.5
			P=14	-102	11	6.7
			P=20	-97	9	7.2
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	-97	7	6.5
			P=8	-104	10	6.2
			P=14	-99	12	6.7
			P=20	-113	6	4
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-105	6	6.7
			P=8	-103	14	6.7
			P=14	-105	14	6.5
			P=20	-95	20	8
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-98	15	8
			P=8	-97	15	7.7
			P=14	-93	20	7.2
			P=20	-92	23	8
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-91	9	7.7
			P=8	-97	18	8.2
			P=14	-98	21	7
			P=20	-104	19	7.5
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-97	18	9
			P=8	-101	21	8.2
			P=14	-99	24	8.7
			P=20	-100	23	8.2
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed	
		P=8	Failed	Failed	Failed	
		P=14	Failed	Failed	Failed	
		P=20	Failed	Failed	Failed	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
III-3 (3.sprat)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	-61	14	7.2
			P=8	-60	14	7
			P=14	-61	14	7
			P=20	-61	13	7
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	-61	14	6.5
			P=8	-61	17	7
			P=14	-61	17	6.5
			P=20	-61	16	6.5
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-65	17	7.5
			P=8	-65	20	8
			P=14	-64	22	7.7
			P=20	-65	18	7.7
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-65	23	8.5
			P=8	-66	24	8.5
			P=14	-65	23	8.5
			P=20	-66	24	8
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-68	27	8.5
			P=8	-66	26	9
			P=14	-68	25	8.7
			P=20	-67	25	8.2
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-68	26	8.7
			P=8	-67	29	10
			P=14	-67	27	9.5
			P=20	-67	28	9.5
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed	
		P=8	Failed	Failed	Failed	
		P=14	-68	29	8.7	
		P=20	Failed	Failed	Failed	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
III-4 (3.sprat)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	-105	25	2.7
			P=20	-105	3	2
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-110	0	1
			P=14	-105	9	5
			P=20	-108	8	3.2
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-110	3	3.2
			P=14	-110	9	3.2
			P=20	-107	12	4.7
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-107	5	4.7
			P=8	-109	7	4.5
			P=14	-110	12	3
			P=20	-107	14	4.7
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-108	2	3.7
			P=8	-111	8	2.7
			P=14	-111	14	2.5
			P=20	-108	17	3.7
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-108	10	5
			P=8	-111	12	3
			P=14	-110	17	3.7
			P=20	-108	20	5
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-109	12	4	
		P=8	-110	15	4.5	
		P=14	-111	19	3	
		P=20	-107	22	5.5	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
III-5 (3.sprat)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-103	1	6.2
			P=14	-103	2	6
			P=20	-102	5	6.7
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	-102	4	6.5
			P=8	-102	8	6.7
			P=14	-102	13	7.2
			P=20	-104	12	7.2
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-103	6	7.2
			P=8	-103	9	7.7
			P=14	-104	15	7.2
			P=20	-105	13	7.5
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-103	9	8
			P=8	-107	12	7.5
			P=14	-110	15	6.5
			P=20	-108	16	6.5
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-109	8	6
			P=8	-107	16	8.5
			P=14	-107	18	7.5
			P=20	-107	20	8.2
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-105	14	9.2
			P=8	-108	18	8
			P=14	-108	21	7.5
			P=20	-107	23	7.7
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-105	18	6.7	
		P=8	-104	20	7.7	
		P=14	-108	22	6.2	
		P=20	-103	23	7.5	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
IV-1 (4.sprat)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-98	7	7
			P=14	-96	11	7.2
			P=20	-97	10	7
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	-98	6	5.7
			P=8	-99	10	7
			P=14	-98	13	6.5
			P=20	-99	14	7
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-101	10	7.5
			P=8	-99	13	8
			P=14	-100	14	7.7
			P=20	-98	18	8
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-100	13	8
			P=8	-100	16	8
			P=14	-101	20	8.5
			P=20	-99	21	8.2
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-102	15	7.5
			P=8	-98	19	8
			P=14	-101	20	7
			P=20	-98	23	6.7
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-100	19	9.7
			P=8	-99	22	10
			P=14	-99	24	9.5
			P=20	-98	24	7.2
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-99	22	7.7	
		P=8	-99	24	7.2	
		P=14	-99	26	7.7	
		P=20	-107	27	7.5	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
IV-2 (4.sprat)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	-85	11	7.2
			P=8	-90	11	7
			P=14	-91	13	7
			P=20	-92	14	7.2
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	-91	13	7.5
			P=8	-90	17	7.5
			P=14	-92	15	7.7
			P=20	-91	16	7.2
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-92	16	6.7
			P=8	-91	17	7
			P=14	-92	17	7.7
			P=20	-92	20	7.2
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-92	19	7.7
			P=8	-91	20	7.7
			P=14	-94	21	7.2
			P=20	-92	22	7.2
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-90	22	7.7
			P=8	-92	23	7.2
			P=14	-94	22	7.5
			P=20	-92	24	7.5
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-91	24	8.7
			P=8	-92	25	8.2
			P=14	-91	25	8.5
			P=20	-92	27	8
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-91	25	7.2	
		P=8	-93	25	8	
		P=14	-92	28	7.5	
		P=20	-94	27	7.5	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
IV-3 (4.sprat)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-91	12	7
			P=14	-88	13	6.5
			P=20	-105	4	6.2
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	-101	6	7
			P=8	-99	11	7.2
			P=14	-104	11	7
			P=20	-93	16	6.7
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-88	16	7.7
			P=8	-91	17	7.5
			P=14	-90	20	8
			P=20	-91	19	7.7
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-93	18	7
			P=8	-95	17	8
			P=14	-94	23	7.7
			P=20	-93	22	8.7
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-93	20	7.2
			P=8	-93	23	7.5
			P=14	-93	24	6.2
			P=20	-93	24	6.5
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-91	23	8.5
			P=8	-95	25	10
			P=14	-96	26	9.2
			P=20	-96	25	9
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed	
		P=8	Failed	Failed	Failed	
		P=14	Failed	Failed	Failed	
		P=20	Failed	Failed	Failed	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
IV-4 (4.sprat)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	-115	5	0.5
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	-120	4	-3
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-115	2	3.7
			P=8	-118	2	-1.5
			P=14	-120	4	-3.5
			P=20	-117	11	0.2
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed	
		P=8	-117	6	0.7	
		P=14	-116	13	2	
		P=20	Failed	Failed	Failed	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
IV-5 (4.sprat)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-102	0	6
			P=14	-104	6	6.2
			P=20	-104	5	6.5
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	-103	3	7
			P=8	-107	3	6.2
			P=14	-104	11	7.2
			P=20	-108	9	6.2
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-102	6	7.5
			P=8	-108	3	7.2
			P=14	-108	13	7
			P=20	-108	13	7
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-104	9	6.7
			P=8	-108	9	6.2
			P=14	-108	15	7.2
			P=20	-105	15	7.7
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-104	11	7.7
			P=8	-108	14	7.7
			P=14	-107	19	7.7
			P=20	-109	18	6.2
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-104	14	8.7
			P=8	-110	14	7.5
			P=14	-105	21	8.5
			P=20	-105	21	8.2
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-105	16	7.5	
		P=8	-109	14	7	
		P=14	Failed	Failed	Failed	
		P=20	Failed	Failed	Failed	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
V-1 (5.sprat)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	-108	1	5.2
			P=20	-108	2	5.7
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-107	3	6.5
			P=14	-107	9	6.7
			P=20	-108	8	6.7
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-109	0	6.7
			P=8	-108	6	6.5
			P=14	-108	13	7.5
			P=20	-109	11	7
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	-109	2	7.2
			P=8	-110	7	7.2
			P=14	-107	15	7.2
			P=20	-108	14	6.2
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-110	5	6.5
			P=8	-112	11	6.7
			P=14	-110	16	6
			P=20	-109	16	6
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-110	10	7.2
			P=8	-112	14	8.5
			P=14	-108	20	7
			P=20	-109	19	6.7
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-111	10	6.7	
		P=8	-110	16	6.2	
		P=14	Failed	Failed	Failed	
		P=20	Failed	Failed	Failed	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
V-2 (5.sprat)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	-113	25	2.5
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	-115	3	3.7
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	-115	6	4
			P=20	-116	3	3
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-117	0	3.2
			P=14	-118	2	0.7
			P=20	-115	8	4.7
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-116	0	4
			P=8	-117	2	0.5
			P=14	-121	2	-1.7
			P=20	-115	12	3.7
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-116	2	5
			P=8	-120	2	1.5
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	-116	14	4.5
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed	
		P=8	-115	12	5	
		P=14	Failed	Failed	Failed	
		P=20	Failed	Failed	Failed	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
V-3 (5.sprat)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	-120	0	-1
			P=20	-118	2	0.7
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-119	0	0
			P=14	-121	0	-1.2
			P=20	-118	6	0
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	-120	8	0.7
			P=20	-118	8	3.2
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed	
		P=8	Failed	Failed	Failed	
		P=14	-119	11	1.5	
		P=20	Failed	Failed	Failed	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
V-4 (5.sprat)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	-118	1	-2
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	-119	1	-2.7
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	-122	4	-5
			P=20	-116	9	1.7
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	-128	4	-10
			P=20	-115	11	0
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed	
		P=8	-116	6	0.7	
		P=14	Failed	Failed	Failed	
		P=20	Failed	Failed	Failed	

Tačka mjerenja	Brzina (Data Rate)	Faktor širenja (SF) i opseg (BW)	Snaga emitovanja testnog uređaja [dBm]	RSSI (Downlink) [dBm]	Margina [dBm]	SNR
V-5 (5.sprat)	DR6 (11kb/s)	SF=7 BW=250kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	Failed	Failed	Failed
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR5 (5.47kb/s)	SF=7 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-104	5	7
			P=14	-107	9	6.7
			P=20	-108	8	6.5
	DR4 (3.125kb/s)	SF=8 BW=125kHz	P=2	-108	2	6.5
			P=8	-104	8	7.7
			P=14	Failed	Failed	Failed
			P=20	Failed	Failed	Failed
	DR3 (1.76kb/s)	SF=9 BW=125kHz	P=2	Failed	Failed	Failed
			P=8	-110	7	6.7
			P=14	-107	14	7
			P=20	-109	12	6.7
	DR2 (0.98kb/s)	SF=10 BW=125kHz	P=2	-109	6	6.2
			P=8	-109	12	5.7
			P=14	-108	18	6.5
			P=20	-111	15	6.7
	DR1 (0.54kb/s)	SF=11 BW=125kHz	P=2	-111	8	8.2
			P=8	-104	18	10
			P=14	-105	23	9
			P=20	-112	14	6.5
DR0 (0.29kb/s)	SF=12 BW=125kHz	P=2	-111	8	6	
		P=8	-103	21	8.5	
		P=14	-108	23	7.2	
		P=20	Failed	Failed	Failed	

10. Biografija

Saša Verić je rođen 17. marta 1987. godine u Mrkonjić Gradu, gdje je završio osnovnu školu 2002. godine. Gimnaziju je završio 2006. godine, kao učenik generacije, takođe u Mrkonjić Gradu. Studije na Elektrotehničkom fakultetu u Banjoj Luci započeo je 2006. godine na odsjeku za Elektroniku i telekomunikacije, a diplomirao je 21. oktobra 2011. godine. Od marta 2012. do avgusta 2014. godine bio je zaposlen u JP Radio-televizija Republike Srpske na poziciji inženjer za mreže i razvoj mrežnih servisa. Od 01. septembra 2014. godine do danas, zaposlen je u kompaniji Lanaco d.o.o. na poziciji sistem inženjer za računarske sisteme.

УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
ПОДАЦИ О АУТОРУ ОДБРАЊЕНОГ МАСТЕР/МАГИСТАРСКОГ РАДА

Име и презиме аутора мастер/магистарског рада: **Саша Верић**

Датум, мјесто и држава рођења аутора: **17.03.1987. године, Мркоњић Град, Босна и Херцеговина**

Назив завршеног факултета/Академије аутора и година дипломирања:

Електротехнички факултет Универзитета у Бањој Луци, 2011. година

Датум одбране завршног/дипломског рада аутора: **21.10.2011.**

Наслов завршног/дипломског рада аутора: **Еквализација радио-канала**

Академско звање коју је аутор стекао одбраном завршног/дипломског рада:

Дипломирани инжењер електротехнике – 240 ECTS

Академско звање које је аутор стекао одбраном мастер/магистарског рада:

Магистар електронике и телекомуникација

Назив факултета/Академије на коме је мастер/магистарски рад одбрањен:

Електротехнички факултет Универзитета у Бањој Луци

Наслов мастер/магистарског рада и датум одбране: **Анализа могућности**

имплементације LoRaWAN бежичне мреже на подручју града Бање Луке,

28.06.2019. године

Научна област мастер/магистарског рада према CERIF шифрарнику: **T 180**

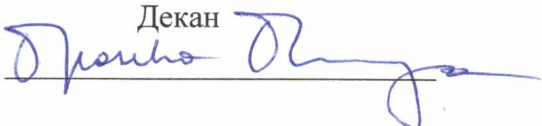
Имена ментора и чланова комисије за одбрану мастер/магистарског рада:

доц. др Славко Шајић, председник

доц. др Жељко Ивановић, ментор

доц. др Младен Кнежић, члан

У Бањој Луци, дана 28.06.2019.

Декан


ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

**Изјављујем да је
мастер/магистарски рад**

Наслов рада Анализа могућности имплементације LoRaWAN бежичне мреже на подручју града Бање Луке

Наслов рада на енглеском језику Analysis of the possibility of implementation of LoRaWAN wireless network in the Banja Luka city area

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да мастер/магистарски рад, у цјелини или у дијеловима, није био предложен за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

У Бањој Луци 19.06.2019.

Потпис кандидата

Саша Верић

**Изјава којом се овлашћује Електротехнички факултет/ Академија
умјетности
Универзитета у Бањој Луци да мастер/магистарски рад учини јавно доступним**

Овлашћујем Електротехнички факултет/ Академију умјетности Универзитета у Бањој Луци да мој мастер/магистарски рад, под насловом

Анализа могућности имплементације LoRaWAN бежичне мреже на подручју града Бање Луке

који је моје ауторско дјело, учини јавно доступним.

Мастер/магистарски рад са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату, погодном за трајно архивирање.

Мој мастер/магистарски рад, похрањен у д и г и т а л н и р е п о з и т о р и ј у м Универзитета у Бањој Луци, могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (*Creative Commons*), за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство - некомерцијално - без прераде
4. Ауторство - некомерцијално - дијелити под истим условима
5. Ауторство - без прераде
6. Ауторство - дијелити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

У Бањој Луци 19.06.2019.

Потпис кандидата



**Изјава о идентичности штампане и електронске верзије
мастер/магистарског рада**

Име и презиме аутора Саша Верић

Наслов рада Анализа могућности имплементације LoRaWAN бежичне мреже на подручју града
Бање Луке

Ментор доц. др Жељко Ивановић

Изјављујем да је штампана верзија мог мастер/магистарског рада идентична електронској
верзији коју сам предао/ла за дигитални репозиторијум Универзитета у Бањој Луци.

У Бањој Луци 19.08.2019.

Потпис кандидата

Саша Верић

Доц. др Славко Шајић
Електротехнички факултет Универзитета у Бањој Луци

Доц. др Жељко Ивановић
Електротехнички факултет Универзитета у Бањој Луци

Доц. др Младен Кнежић
Електротехнички факултет Универзитета у Бањој Луци

УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ	
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ	
БАЊА ЛУКА	
Број:	570
Датум:	6. 6. 2019.

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВИЈЕЋУ ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БАЊОЈ ЛУЦИ

Одлуком Наставно-научног вијећа Електротехничког факултета Универзитета у Бањој Луци број 20/3.567-587/18 од 19.06.2018. године, именовани смо за чланове Комисије за завршни рад II циклуса студија под називом “Анализа могућности имплементације LoRaWAN бежичне мреже на подручју града Бање Луке”, кандидата Саше Верића, дипл. инж. електротехнике. Након прегледа приложеног рада подносимо сљедећи

ИЗВЈЕШТАЈ

1. БИОГРАФСКИ ПОДАЦИ КАНДИДАТА

Саша Верић је рођен 17. марта 1987. године у Мркоњић Граду, гдје је завршио основну школу 2002. године. Гимназију је завршио 2006. године, као ученик генерације, такође у Мркоњић Граду. Студије на Електротехничком факултету у Бањој Луци започео је 2006. године на одсјеку за Електронику и телекомуникације, а дипломирао је 21. октобра 2011. године. Током основних студија остварио је запажене резултате на такмичењу студената Електријада из области телекомуникација. Од марта 2012. до августа 2014. године био је запослен у ЈП Радио-телевизија Републике Српске на позицији инжењер за мреже и развој мрежних сервиса. Од 01. септембра 2014. године до данас, запослен је у компанији Lanaco д.о.о. на позицији систем инжењер за рачунарске системе.

Кандидат је објавио један рад који је везан за тему завршног рада другог циклуса:

[1] Saša Verić, "Pregled rješenja za realizaciju LoRa bežične mreže", *Zbornik radova INFOTEH-JAHORINA*, Vol. 17, March 2018, pp. 500 – 505.

2. ОСНОВНИ ПОДАЦИ О РАДУ

Завршни рад II циклуса студија под називом “Анализа могућности имплементације LoRaWAN бежичне мреже на подручју града Бање Луке”, кандидата Саше Верића, садржи 129 нумерисаних страница, са укупно 45 слика и 12 табела, а организован је у седам поглавља:

1. Увод,
2. IoT,
3. LPWAN технологије,
4. LoRa,

5. LoRaWAN,
6. Експериментални резултати,
7. Закључак.

Списак коришћене литературе садржи 45 извора.

Рад садржи и списак табела и слика, а у прилогу су дати резултати експерименталних мјерења.

3. АНАЛИЗА РАДА

У уводу рада указано је на проблем међусобног повезивања великог броја уређаја који се све више користе у свим сферама људског дјеловања, како би нам олакшали живот. Међусобно повезивање уређаја углавном је засновано на бежичним технологијама. У циљу испуњавања комуникационих захтјева дошло је до појаве читавог низа нових протокола и технологија које не захтијевају велику снагу потрошње. Једна од нових технологија су и LoRa и LoRaWAN бежичне сензорске мреже. Циљ свих бежичних сензорских мрежа је што веће географска покривања уз што мање инфраструктурних ресурса, што је и наглашено у уводу. На крају увода дефинисани су предмет и циљеви истраживања, као и очекивани резултати рада.

У другом поглављу разматране су најприхваћеније дефиниције IoT концепта. Укратко су представљени основни елементи и основне карактеристике IoT система. Дат је и осврт на веома широк спектар примјена IoT система и апликација у пракси, као и низ фактора које је потребно размотрити или испунити при пројектовању таквих система и апликација.

Као изузетно популаран концепт, IoT подстиче истраживања на многим пољима, а посебно на пољу бежичних комуникационих технологија. LPWAN, као читав низ комуникационих технологија и протокола који задовољавају критеријуме IoT система и апликација, тема је трећег поглавља.

Четврто поглавље је резервисано за основне карактеристике LoRa технологије, односно за физички слој ове технологије. Дат је осврт на начин модулације сигнала, формат физичких оквира, дomet комуникационог линка, потрошње електричне енергије, те отпорности на интерференције. Представљена је и међусобна веза и зависност битске брзине, фреквентног опсега и фактора проширења код LoRa модулације.

У петом поглављу је описана LoRaWAN технологија која, за разлику од LoRa технологије, поред физичког слоја, садржи и дефиницију комуникационих протокола на мрежном слоју, као и саму архитектуру комплетног система. Основни елементи те архитектуре су крајњи чворови, *gateway* и мрежни сервер.

Детаљније упознавање са LoRaWAN *gateway*-има (базна станица и *gateway* за унутрашњу употребу) и тестним уређајем америчке фирме *Multitech* дато је у шестом поглављу. На одређеним физичким удаљеностима, мјерењем јачине сигнала, брзине преноса података, доказана је могућност употребе концепта LoRa технологије на подручју града Бање Луке. Уцртавањем одговарајућих линија и тачака на мапи Бање Луке, на основу географских положаја на којима је мјерено, добиле су се потребне информације за коришћење LoRaWAN технологије на подручју града. На сличан начин је урађено тестирање унутар пословног објекта.

Рад се завршава закључком у којем је дат кратак осврт на добијене резултате, те су размотрени правци за даље истраживање.

4. НАЈВАЖНИЈИ ДОПРИНОСИ

Најважнији доприноси овог рада су:

- експериментална мјерења параметара LoRaWAN сигнала у стамбеном, урбаном и отвореном простору;
- графички приказ покривености LoRaWAN мрежом на подручју града Бање Луке;
- графички приказ покривености LoRaWAN мрежом унутар пословног објекта;
- приједлог расподеле LoRaWAN gateway-а за покривање урбаног подручја града Бање Луке.

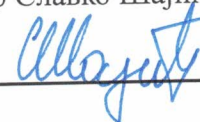
5. ЗАКЉУЧАК И ПРИЈЕДЛОГ

Комисија сматра да завршни рад II циклуса студија под називом “**Анализа могућности имплементације LoRaWAN бежичне мреже на подручју града Бање Луке**”, кандидата Саше Верића садржи све потребне елементе и резултате којима су остварени постављени циљеви истраживања, па са задовољством предлаже Наставно-научном вијећу Електротехничког факултета Универзитета у Бањој Луци да усвоји извјештај Комисије и одобри заказивање усмене јавне одбране.

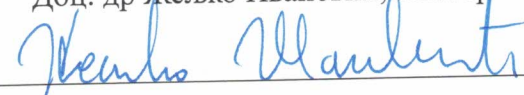
Бања Лука, 06.06.2019. године

КОМИСИЈА

1. Доц. др Славко Шајић, председник



2. Доц. др Жељко Ивановић, ментор



3. Доц. др Младен Кнежић, члан

