

# SIMULACIJA FIZIČKOG SLOJA LoRaWAN MREŽE

---

**Validžić, Marko**

**Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Split / Sveučilište u Splitu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:228:777098>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-29**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of University Department of Professional Studies](#)



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE**  
**Specijalistički diplomski stručni studij Elektrotehnike**

**Marko Validžić**

**ZAVRŠNI RAD**

**Simulacija fizičkog sloja LoRaWAN mreže**

Split, rujan 2020.

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE**  
**Specijalistički diplomski stručni studij Elektrotehnike**

**Predmet:** Senzorske mreže

**ZAVRŠNI RAD**

**Kandidat:** Marko Validžić

**Naslov rada:** Simulacija fizičkog sloja LoRaWAN mreže

**Mentor:** dr. sc. Tonko Kovačević

Split, rujan 2020.

# SADRŽAJ

Sažetak .....	1
1. UVOD .....	2
2. LPWA .....	3
2.1. Što je LPWA i kako radi .....	3
2.2. Područje korištenja LPWA tehnologija .....	3
2.3. LPWA tehnologije .....	4
2.4. Primjeri primjene LPWA .....	7
3. LoRa .....	10
3.1. Radio modulacija i LoRa .....	10
3.2. Slojevi OSI modela .....	11
3.3. Ključna svojstva modulacije LoRa .....	20
4. LoRaWAN .....	22
4.1. Kako radi LoRaWAN? .....	22
4.2. LoRaWAN Klase A, B i C .....	23
4.3. Infrastruktura LoRaWAN mreže .....	24
4.4. Prednosti i ograničenja LoRaWAN .....	26
5. LoRaWAN simulacija .....	30
5.1. Parametri sistema .....	30
5.2. PHY simulator .....	31
6. Zaključak .....	40
LITERATURA .....	41
POPIS SLIKA .....	43
PRILOG .....	44

## **Sažetak**

### **Simulacija fizičkog sloja LoRaWAN mreže**

Predmet ovog rada je LoRaWAN, point-to-multipoint mrežni protokol koji koristi Semtech-ovu LoRa modulacijsku shemu. Pojašnjeni su pojmovi LPWA (eng. *Low-Power Wide-Area Network*) i LoRa te prikazana njihova primjena u praksi. LoRa je metoda za prijenos radijskih signala koja za šifriranje informacija koristi chirped, *multi-symbol* format. LoRa tehnologija i LoRaWAN protokol omogućuju primjenu pametnih IoT aplikacija za upravljanje energijom, kontrolu prirodnih resursa, kontrola zagađenja, efikasnost infrastrukture, prevencija katastrofa. Širenje LoRaWAN mreža i brzi porast broja krajnjih uređaja zahtijeva bolje razumijevanje granica skalabilnosti LoRaWAN-a, što je pokušano uz pomoć alata za simulaciju LoRaWAN mreže. Cilj simulacije bio je utvrditi vrijednost korištenja ovog alata u svakodnevnoj praksi te mogućnost primjene za provjeru poboljšanja tehnologije i otkrivanje mogućih rješenja za optimizaciju performansi LoRaWAN mreže.

***Ključne riječi:*** *LoRaWAN, LoRa, slojevi OSI modela, PHY simulacija*

## **Summary**

### **Simulation of the Physical Layer of the LoRaWAN Network**

The subject of this paper is LoRaWAN, a point-to-multipoint network protocol that uses Semtech's LoRa modulation scheme. The terms LPWA (Low-Power Wide-Area Network) and LoRa are explained and their application in practice is presented. LoRa is a method of transmitting radio signals that uses a chirped, multi-symbol format to encrypt information. LoRa technology and LoRaWAN protocol enable the application of smart IoT applications for energy management, natural resource control, pollution control, infrastructure efficiency and disaster prevention. The expansion of LoRaWAN networks and the rapid increase in the number of end devices requires a better understanding of the limits of LoRaWAN scalability, which has been attempted with the help of the LoRaWAN network simulation tool. The aim of the simulation was to determine the value of using this tool in everyday practice and the possibility of application to check the improvement of technology and discover possible solutions for optimizing the performance of the LoRaWAN network.

***Key words:*** *LoRaWAN, LoRa, OSI Model Layers, PHY simulation*

## 1. UVOD

Predmet rada je LoRaWAN, point-to-multipoint mrežni protokol koji koristi Semtech-ovu LoRa modulacijsku shemu, odnosno LoRaWAN simulacija. LoRa je metoda za prijenos radijskih signala koja za šifriranje informacija koristi chirped, *multi-symbol* format. To je vlasnički sustav koji je napravio proizvođač čipova Semtech, a njegov LoRa IP također je licenciran drugim proizvođačima čipova. LPWA je kratica za Low-Power Wide-Area (mala snaga širokog područja pokrivanja), a ne odnosi na određenu tehnologiju, već se koristi kao izraz za bilo koju mrežu koja je osmišljena za bežičnu komunikaciju s nižom snagom od ostalih mreža, poput mobilne, satelitske ili WiFi. LPWAN (eng. *Low-Power Wide-Area Network*) su mreže male snage širokog područja pokrivanja koje komuniciraju na većim udaljenostima. LoRa tehnologija i LoRaWAN protokol omogućuju pametnim IoT aplikacijama riješiti neke od najvećih izazova današnjice kao što su primjerice: upravljanje energijom, redukcija prirodnih resursa, kontrola zagađenja, efikasnost infrastrukture, prevencija katastrofa. Širenje LoRaWAN mreža i brzi porast broja ED-ova raspoređenih „na terenu“ dovodi do potrebe za razumijevanjem granica skalabilnosti LoRaWAN-a. Odgovor na ovaj problem pokušava se pronaći u alatima za simulaciju mreže LoRaWAN. Sa ciljem optimizacije dizajna i upravljačkih rješenja LoRaWAN aplikacija potrebno je provesti studije temeljene na simulaciji. Kako mrežni simulator nije u potpunosti prilagođen uporabi u ovom kontekstu ili mu nedostaju parametri za implementaciju, razvijen je LoRaWAN simulator sa zadaćom raspodjele resursa u LoRaWAN mreži. Simulacije koje se izvode u realnom okruženju, uzimajući u obzir fizikalne fenomene LoRaWAN-a (učinak hvatanja i faktori interferencije), nude informacije važne za oblikovanje upravljačkih rješenja, procjenu različitih faktora mrežnog dizajna te provjeru učinkovitosti algoritama za optimalnu raspodjelu resursa. Cilj analize grafičkih prikaza rezultata simulacije bio je utvrditi vrijednost korištenja ovog alata u svakodnevnoj praksi te mogućnost primjene za provjeru poboljšanja tehnologije i otkrivanje mogućih rješenja za optimizaciju performansi LoRaWAN mreže. Korišteni modul koji simulira ponašanje LoRa-e trebao je dati dostatnu količinu detalja kako bismo dobili značajne rezultate. Uspoređene su izmjerene i simulirane vrijednosti isporučenih paketa u funkciji udaljnosti između krajnjih uređaja (ED) i pristupnika (gateway) te omjer kolizija u funkciji opterećenja kanala.

## **2. LPWA**

### **2.1. Što je LPWA i kako radi**

LPWA je kratica za Low-Power Wide-Area (mala snaga širokog područja pokrivanja), a ne odnosi na određenu tehnologiju, već se koristi kao izraz za bilo koju mrežu koja je osmišljena za bežičnu komunikaciju s nižom snagom od ostalih mreža, poput mobilne, satelitske ili WiFi. LPWA se također naziva i LPWAN, gdje N označava mrežu. LPWA je sličan izrazima LAN ili WAN po tome što nema službenu specifičnu definiciju.

LPWAN (eng. *Low-Power Wide-Area Network*) – mreže male snage širokog područja pokrivanja komuniciraju na većim udaljenostima od ostalih mreža male snage koje koriste, na primjer, Bluetooth ili NFC.

Dok moderne mobilne mreže karakterizira velika brzina prijenosa podataka (gigabit u sekundi) s LTE Advancedom i nadolazećim 5G mrežama, LPWA mreže prenose značajno manje podataka - često samo nekoliko kilobita po kanalu. S druge strane, mnoge LPWA tehnologije mogu komunicirati na većim udaljenostima, ponekad i do 500 milja ili više.

### **2.2. Područje korištenja LPWA tehnologija**

Vrlo ograničena propusnost LPWA mreža nije prikladna za većinu potrošačkih i komercijalnih aplikacija kao što su glasovne, video, audio ili čak tekstualne poruke. Kao takve, LPWA mreže gotovo isključivo koriste uređaji na Internetu stvari (IoT) i M2M (komunikacija stroj-stroj).

Dok se uređaji koji se koriste u kući ili uredu, poput hladnjaka, rasvjete ili termometra mogu lako prebaciti na kućnu ili uredsku WiFi vezu, neki se uređaji ne mogu pouzdati u takvu vrstu povezivanja. Primjerice, za upravljanje sustavom navodnjavanja koje uključuje desetke kilometara kanala nisu dostupne lokalne mreže, satelitske veze su financijski

neisplative, pa se LPWAN nameće kao idealno rješenje. Koristeći LPWA tehnologiju, mreža velikog broja crpki raspoređenih na velikoj površini se može lako i jeftino povezati. Iako je količina podataka koji se mogu poslati ograničena, propusnost je dovoljna, jer je potrebno iznenađujuće malo podataka kako bi se utvrdio status cijelog sustava i svake pojedinačne crpke za vodu. Različiti brojevi mogu biti dodijeljeni različitim informacijama: status sustava u cijelosti, normalan rad, broj ukupno ispumpanih litara dnevno te niz drugih brojeva za različite pogreške u sustavu. Ovaj sustav omogućio bi poljoprivrednicima da nadziru svaku crpku na liniji sa centralne konzole. Informacija (broj za grešku u sustavu) o pregrijavanju, plus ona o smanjenju broja ispumpanih litara, može signalizirati neispravnu pumpu. Rana upozorenja poput ovog omogućuju tehničaru da se unaprijed pripremi te sa svim potrebnim alatom i rezervnim djelovima izađe na teren. Sve na temelju malenog, periodičnog, prijenosa podataka. [2]

LPWAN tehnologija zasniva se na mogućnosti povezivanja velikog broja uređaja rasprostranjenih na širokim zemljopisnim površinama uz minimalan utrošak energije, čime joj je osigurana uspješna primjena u mnogim segmentima. [3] Od uređaja koji se nalaze u meteorološkim stanicama na vrhu planine, sustava rasvjete u kompleksu staklenika, do semafora, signala za prijelaz vlaka, i još mnogo toga, sve se može nadzirati, a u nekim slučajevima čak i upravljati, uz ograničene potrebe i nisku snagu LPWA.

### **2.3. LPWA tehnologije**

#### **LoRa Alliance**

LoRaWAN (engl. *Long Range Wide Area Network*) je kratica za mrežu širokog područja velikog dometa. Alliance LoRa je neprofitna udruga koja definira i implementira LoRaWAN protokol. Trenutno ne postoji dominantan ili standardizirani protokol za LPWA mreže, a ovaj savez to želi promijeniti. Neka velika tehnološka imena služe kao članovi Alliance LoRa-e, uključujući Alibaba, Cisco, IBM, Charter Communications i SoftBank. (Slika 2.1. [5])



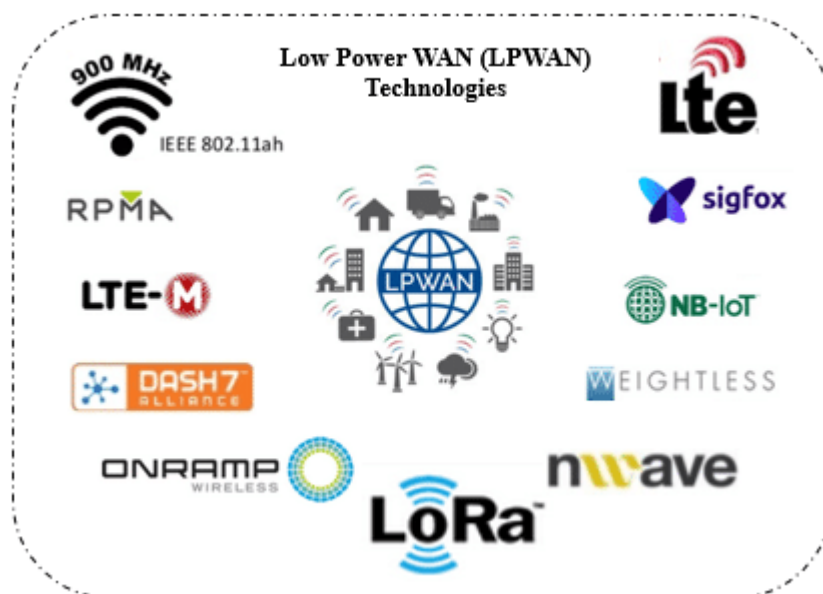
## Sigfox

Sigfox, vlasnička LPWA mreža koju nudi francuska tvrtka, trenutno je jedna od većih LPWA mreža. Ona koristi nelicenciranu frekvenciju u rasponima 868 MHz ili 902 MHz. Karakteriziran kao ultra-uskopojasni radio prijenos, nudi pokrivanje na velike udaljenosti ali s niskom brzinom prijenosa podataka. Svaka poruka je 100 Hz s brzinom prijenosa od 100 ili 600 bita u sekundi, ovisno o regiji. Komunikacija natrag prema uređaju je ograničena, što ga čini lošim izborom za aplikacije koje zahtijevaju dvosmjernu komunikaciju. [2]

## RPMA

S dosegom od 3-6,5 milja (nelinearno), Ingenu nudi tehnologiju koju naziva Random Phase Multiple Access (RPMA). Veliki raspon pokrivenosti omogućava kompaniji da pokrije područje Dallasa/Fort Wortha sa samo 17 mrežnih tornjeva. Prema tvrtki RPMA može prodrijeti u beton, pa čak i povezati se s uređajima pod zemljom. [4]

Ova tehnologija radi u 2,4 GHz spektru, što može prouzročiti smetnje u radu drugih uređaja koji koriste isti spektar, kao što su WiFi, Bluetooth i stariji bežični telefoni. Međutim, prednost je da je 2,4 GHz spektar otvoren za upotrebu u mnogim različitim zemljama, što ga čini tipom radio signala koji se može koristiti u cijelom svijetu. [2]



Slika 2.1. LPWAN tehnologije

## **LTE-M**

LTE-M, koji uključuje eMTC (eng. *enhanced Machine Type Communication*), je vrsta širokopojasne mrežne radio tehnologije (LPWAN), razvijena u okviru 3GPP (3rd Generation Partnership Project) koja omogućuje upotrebu širokog spektra mobilnih uređaja i usluga. [6] LTE-M je temeljena na 4G mobilnoj tehnologiji. Uobičajeno mobilni uređaji nisu male snage, kao što zna svatko tko mora stalno puniti svoj mobitel. Kako bi se smanjila snaga, odnosno potrošnja energije, dizajnirani su specijalizirani 4G bežični čipovi s opcijom Power Saving Mode. Čip je u osnovi isključen većinu vremena, aktivira se samo u unaprijed određenim intervalima. Pored toga, čipovi omogućuju half-duplex komunikaciju, tako da troše manje energije čak i kada su uključeni, ali su mnogo sporiji od tradicionalne 4G veze. Maksimalna brzina prijenosa podataka je oko 100 kbit/s. Ova verzija LPWA nudi povezivanje male snage, ali samo tamo gdje možete dobiti LTE vezu. Zabrinutost zbog korištenja ovakvih tehnologija u mobilnim telefonima je vezana uz učestale nadogradnje sustava prijenosa podataka, dok korisnici usluga i dalje koriste „stare“ uređaje. Na primjer, nijedan uređaj koji se oslanja na 2G vezu vjerojatno neće raditi gotovo nigdje u SAD-u gdje su takve mreže isključene i nadograđene.

## **NB-IoT**

NB-IoT (Narrowband Internet of Things) označava Uskopojasni internet stvari. NB-IoT također dolazi iz specifikacije 3GPP Release 13, a ponekad je poznata i kao CAT M2. Za komunikaciju koristi DSSS modulaciju. NB-IoT nudi maksimalnu brzinu učitavanja od 250 kbit/s i brzinu uzlazne veze od 250 kbit/s (više tonova) ili 20 kbit/s (jedan ton). NB-IoT uređaji mogu trajati do 10 godina. Može koegzistirati s opremom u 2G, 3G i 4G mrežama. Operatori koji trenutno koriste NB-IoT mreže uključuju China Mobile, China Telecom, Deutsche Telekom i druge. [2]

„Tehnologija je namijenjena uređajima koji nemaju potrebe za kontinuiranom povezanošću na mreži i šalju izuzetno male količine podatkovnog prometa bez potrebe za SMS, MMS ili glasovnom komunikacijom. NB-IoT tehnologija pogodna je za primjenu u rješenjima namijenjenima poslovnim i privatnim korisnicima npr. kod sustava za pametno parkiranje, za upravljanje otpadom, za praćenje kvalitete zraka, za praćenje stvari i pošiljaka, za

pametna brojila, kod sustava pametnog doma, sustava za praćenje zdravstvenog stanja i slično.“ [7]

## **Weightless**

Weightless je otvoreni standard koji djeluje u nelicenciranom spektru. To ga čini i operatorom i dobavljačem hardvera neovisnim, ali i manje komercijalnim. Postoje tri vrste:

- Weightless-W koristi nelicencirane frekvencije između frekvencija TV stanica.
- Weightless-N koristi nelicencirani protokol uskog pojasa.
- Weightless-P koristi 12,5 kHz uskopojasni raspon i nudi dvosmjernu komunikaciju.

## **2.4. Primjeri primjene LPWA**

Iako postoji mnogo mogućnosti za primjenu LPWA mreže, neki se koncepti u praksi koriste više od drugih.

### **Upravljanje parkingom**

Na području upravljanja parkiralištima postoji puno aplikacija. Senzor na ili blizu parkirnog mjesta može prijaviti je li mjesto zauzeto ili ne. Podaci se tada mogu koristiti za „feeding“ brojnih aplikacija, uključujući oznake koji pokazuju koliko je slobodnih parkirnih mjesta dostupno na određenoj razini garaže ili vanjskom parkiralištu. U ovoj aplikaciji, mala potrošnja energije je važnija od velike udaljenosti za LPWA mreže. Nitko ne želi preuzeti teret promjene baterija u stotinama ili čak tisućama monitora za parkiranje.

### **Vodomjeri i cjevovodi**

Jednostavan mjerač tlaka koji prenosi svoje trenutno očitavanje može vam pomoći u otkrivanju istjecanja i prije prijavljivanja. Za cjevovode koji se protežu kilometrima presudna je mogućnost komunikacije na velikim udaljenostima bez postojeće mreže, a trajanje baterije potrebno je mjeriti u godinama. Signal koji u ruralnom području omogućava komunikaciju na daljinu umjesto toga u gradu može pružiti podzemnu komunikaciju, omogućavajući nadzor cjevovoda koji su ukopani ispod grada.

## **Pametne palete**

Praćenje pošiljaka obično zahtijeva skeniranje tereta prilikom svake primopredaje. Ako nema zabilježenih promjena jednostavno se pretpostavlja da je teret još uvijek u istoj zgradi, ili ako je u pokretu, u istom kamionu ili vlaku. Uz pametnu paletu, ping može kontinuirano ažurirati ne samo lokaciju, već i dati informaciju je li kontejner otvoren ili je na drugi način s njim neadekvatno rukovano. LPWA je potreban ne samo zbog mogućnosti komunikacije na velike udaljenosti, dok je pošiljka u pokretu između gradova, već i zbog dugog trajanja baterija, što daje sigurnost pravovremenog i točnog dobivanja informacija.

## **Ulična rasvjeta i rasvjeta na autocesti**

S milijardama LED svjetlosnih izvora temeljenih na poluvodičima, pametna rasvjeta jedno je od najvećih i najbrže rastućih tržišta Interneta stvari (IoT). Mrežne tehnologije široke mreže niske snage (LPWA), kao što su Sigfox, NB-IoT, RPMA i Weightless, obećavaju povezivanje milijardi IoT uređaja putem javnih i privatnih mreža koji povezuju tisuće uređaja na više kilometara. [8]

### **3. LoRa**

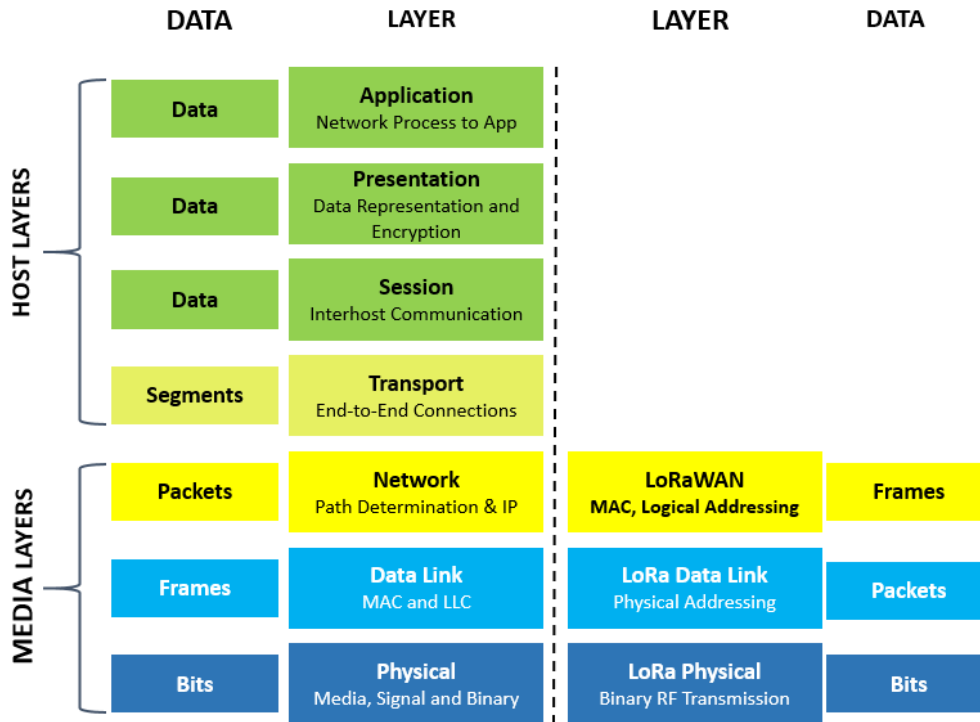
LoRa je metoda prijenosa radijskih signala koja za šifriranje informacija koristi chirped, multi-symbol format. To je vlasnički sustav koji je napravio proizvođač čipova Semtech, a njegov LoRa IP također je licenciran drugim proizvođačima čipova. U osnovi, ti čipovi su standardni ISM pojasni radio čipovi koji mogu koristeći LoRa (ili druge vrste modulacije poput FSK) pretvoriti radio frekvenciju u bitove, bez potrebe za pisanjem koda za implementaciju radijskog sustava. LoRa je tehnologija fizičkog sloja niže razine koja se može koristiti u svim vrstama aplikacija izvan širokog područja. [9]

#### **3.1. Radio modulacija i LoRa**

Tehnika modulacije širenja spektra, izvedena iz postojeće Chirp Spread Spectrum (CSS) tehnologije, LoRa nudi pomak između osjetljivosti i brzine podataka, dok djeluje u kanalu fiksne propusnosti od 125 KHz ili 500 KHz (za uzlazne kanale) i 500 KHz (za silazne kanale). Uz to, LoRa koristi ortogonalne faktore širenja. To omogućava mreži da sačuva vijek trajanja baterije povezanih krajnjih čvorova prilagođavanjem optimizacije razine snage pojedinog krajnjeg čvora i brzine prijenosa podataka. Na primjer, krajnji uređaj smješten blizu gatewaya trebao bi prenijeti podatke malog faktora širenja, jer dolazi do malog gubitka veze. No krajnji uređaj koji se nalazi nekoliko milja od pristupnika morat će prenijeti podatke s mnogo većim faktorom širenja. Ovaj veći faktor širenja pruža povećani dobitak obrade i veću osjetljivost prijema, iako će brzina podataka nužno biti manja.

LoRa je čisto fizička (PHY) ili implementacija slojeva „bitova“, kako je definirano u OSI seven-layer Network Model (OSI model mreže sa sedam slojeva) (slika 3.1. [11]). Umjesto kabliranja, zrak se koristi kao medij za transport LoRa radio valova iz RF odašiljač u IoT uređaju na RF prijemnik u gatewayu i obrnuto. [10] U tradicionalnom ili direktnom spektru širenja u slijedu (DSSS), faza prenošenja odašiljačkog signala mijenja se prema kodnom redoslijedu. Pri multipliciranju podatkovnog signala s unaprijed definiranim uzorkom bita

po mnogo većoj brzini, također poznat kao „spreading code“ (ili sekvenca čipa), stvara se "brži" signal koji ima komponente više frekvencije od izvornog podatkovnog signala.

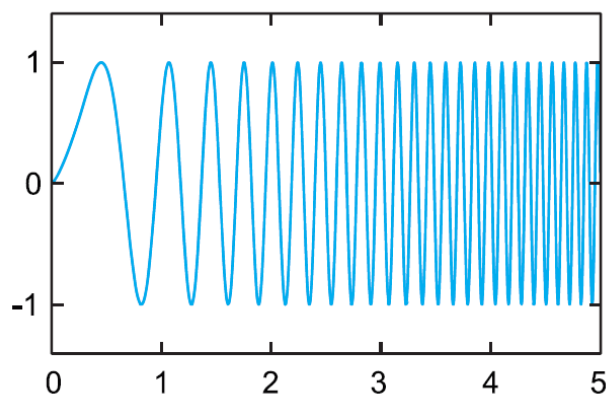


Slika 3.1. OSI seven-layer Network Model

To znači da se širina pojasa signala širi izvan propusnosti izvornog signala. U RF terminologiji, bitovi kodne sekvence nazivaju se čipovi (radi razlikovanja dužih, nekodiranih bitova izvornog podatkovnog signala). Kad preneseni signal stigne do RF prijemnika, on se množi s identičnom kopijom šifre za širenje koja se koristi u RF odašiljaču, što rezultira replikom izvornog podatkovnog signala.

Omjer  $\log_{10}$  brzine čipa u nizu kodova i bita brzine podatkovnog signala naziva se dobitak obrade (Gp). Ovo pojačanje omogućava prijemniku da povрати izvorni podatkovni signal, čak i ako kanal ima negativan omjer signal-šum (SNR). LoRa ima vrhunski Gp u usporedbi s modulacijom tipkovnog pomaka (FSK), omogućujući smanjenu razinu izlazne snage odašiljača, istovremeno održavajući istu brzinu podataka signala i sličan proračun veze. Nedostatak DSSS sustava je činjenica da on zahtijeva visoko precizan (i skup)

referentni sat. Semtechova tehnologija LoRa Chirp Spread Spectrum (CSS) nudi jeftinu alternativu DSSS-a s niskom cijenom i malom snagom, a istovremeno ne zahtijeva visoko precizan referentni sat. U LoRa modulaciji, širenje spektra signala postiže se generiranjem chirp-signalu koji neprekidno varira u frekvenciji (Slika 3.2. [12]).



*Slika 3.2. Ilustracija spektra za širenje LoRa Chirp*

Prednost ove metode je u tome što su vremenski i frekvencijski odstupanja između odašiljača i prijemnika ekvivalentna, što u velikoj mjeri smanjuje složenost dizajna prijemnika. Širina frekvencijskog opsega ovog chirp-a jednaka je spektralnoj širini opsega signala. Podatkovni signal koji prenosi podatke s krajnjeg uređaja na gateway je čipiran s većom brzinom podataka i moduliran na signal nosioca chirp-a. LoRa modulacija također uključuje varijabilnu shemu ispravljanja pogrešaka koja poboljšava robusnost poslanog signala. Za sva četiri poslana bita informacije šalje se pet bit paritetnih informacija.

### **3.2. Slojevi OSI modela**

OSI seven-layer Network Model koristi slojeve u cilju vizualizacije zbivanja u određenom mrežnom sustavu, što pomaže mrežnim administratorima i računalnim programerima brže identificirati problem (npr. radi li se o fizičkom problemu ili je problem s aplikacijom). Sedamdesetih godina prošlog stoljeća su razvijena dva mrežna modela koja su 1983. godine objedinjena i 1984. godine prezentirana kao OSI model, koji se kao takav i danas koristi. Uobičajeno se OSI model opisuje odozgo prema dolje, od 7. do 1. sloja. [22]

Slojevi unutar jednog modela komuniciraju s prvim slojem iznad sebe i prvim slojem ispod sebe. Gornji sloj ovisi o funkcionalnosti koji pruža sloj ispod njega. Ukoliko se komunikacija prikaže s dva OSI modela, može se vidjeti da se slojevi jednog modela povezuju samo s istim slojevima drugog modela.

### **7. sloj – aplikacijski sloj** (eng. *Application Layer*)

Aplikacijski sloj je na samom vrhu modela i predstavlja dio mreže koji je vidljiv većini korisnika. Aplikacije koje rade na ovom sloju su one s kojima korisnici izravno komuniciraju. Web preglednici Google Chrome, Firefox, Safari, ili druge aplikacije poput Skype, Outlook, Office, primjeri su aplikacija sloja 7. Aplikacijski sloj je sloj apstrakcije koji određuje zajedničke komunikacijske protokole i metode sučelja koje koriste hostovi u komunikacijskoj mreži. [22] Pruža usluge aplikacijskom programu omogućujući učinkovitu komunikaciju s drugim aplikacijskim programima na mreži. Ne radi se o klasičnoj aplikaciji, već je aplikacijski sloj komponenta unutar aplikacije koja kontrolira način komunikacije s drugim uređajima. Aplikacijski sloj oslanja se na sve slojeve ispod sebe kako bi dovršio svoj rad.

#### Funkcije aplikacijskog sloja:

- Osigurava identifikaciju prijemnog uređaja, uspostavljanje veze i prihvatanje podataka.
- Omogućuje provjeru autentičnosti između uređaja radi dodatne sigurnosti.
- Osigurava postojanje potrebnih komunikacijskih sučelja (npr. Ethernet, Wi-Fi).
- Osigurava dogovor obaju krajeva oko postupaka oporavka pogrešaka, integriteta podataka i privatnosti .
- Određuje pravila sintakse protokola i podataka na razini aplikacije.
- Korisničkoj aplikaciji prezentira podatke. [23]

### **6. sloj – prezentacijski sloj** (eng. *Presentation Layer*)

Prezentacijski sloj predstavlja područje koje je neovisno o prezentaciji podataka na aplikacijskom sloju. Općenito, predstavlja pripremu ili prijevod formata aplikacije u mrežni format ili iz mrežnog oblikovanja u format aplikacije. Drugim riječima, sloj "prezentira" podatke na aplikaciju ili mrežu. [22] Prezentacijski sloj odgovoran je za



oblikovanje i dostavu informacija aplikacijskom sloju, za daljnju obradu ili prikaz. Ublažava problem aplikacijskog sloja zbog sintaktičkih razlika u prezentaciji podataka u sustavima krajnjih korisnika.

#### Funkcije prezentacijskog sloja:

- Serijalizacija složenih struktura podataka u ravne bajt-nizove može se smatrati ključnom funkcijom prezentacijskog sloja.
- Šifriranje se obično vrši na ovoj razini, iako je moguće u aplikacijskom, sesijskom, transportnom ili mrežnom sloju.
- Dešifriranje - prilikom prijave na web mjesta bankovnih računa prezentacijski sloj dešifrira podatke po primanju istih. [24]

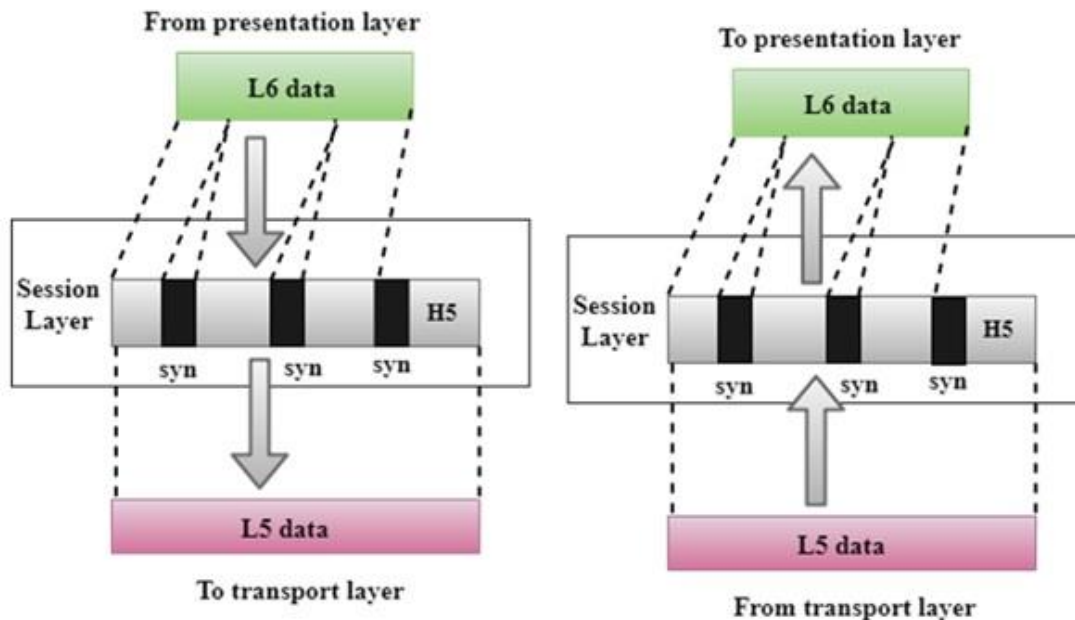
#### **5. sloj – sloj sesije (eng. *Session Layer*)**

Kada dva uređaja, računala ili poslužitelji trebaju "razgovarati" međusobno, potrebno je uspostaviti sesiju, a to se radi na sloju sesije. [22] Poznat je i kao kontroler mrežnog dijaloškog okvira, on kreira, održava i sinkronizira interakciju između komunikacijskih aplikacija. Također kontrolira pojedinačne ili više veza za svaku aplikaciju krajnjeg korisnika i izravno komunicira s prezentacijskim i transportnim slojevima. Usluge koje pruža sloj sesije uglavnom se implementiraju u aplikacijsko okruženje pomoću RPCs – *Remote Procedure Calls*. Kako ne bi došlo do gubitka podataka koji se nalaze na krajevima poruka, striming podataka je označen i pravilno resinkroniziran. Slika 3.3. prikazuje odnos između sloja sesije te prezentacijskog i transportnog sloja.

#### Funkcije sloja sesije:

- Kontrola dijaloga - dopušta uspostavu dijaloga između dva komunikacijska stroja. Omogućuje komunikaciju u *half-duplex* ili *full-duplex* načinu.
- Sinkronizacija - omogućuje postupak dodavanja kontrolnih točaka, koje se nazivaju sinkronizacijske točke, u striming podataka. Primjer: Ako sustav šalje datoteku od 1000 stranica, preporučljivo je dodavati kontrolne točke nakon svakih 100 stranica. U ovom slučaju, ako se greška dogodi tijekom prijenosa stranice broj 648; ponovno se započinje slanje od 601. stranice

- Upravljanje tokenima – sprječava istovremeni pristup dvaju ili više korisnika istoj kritičnoj operaciji.[25]



Slika 3.3. Sloj sesije

#### 4. sloj – transportni sloj (eng. Transport Layer)

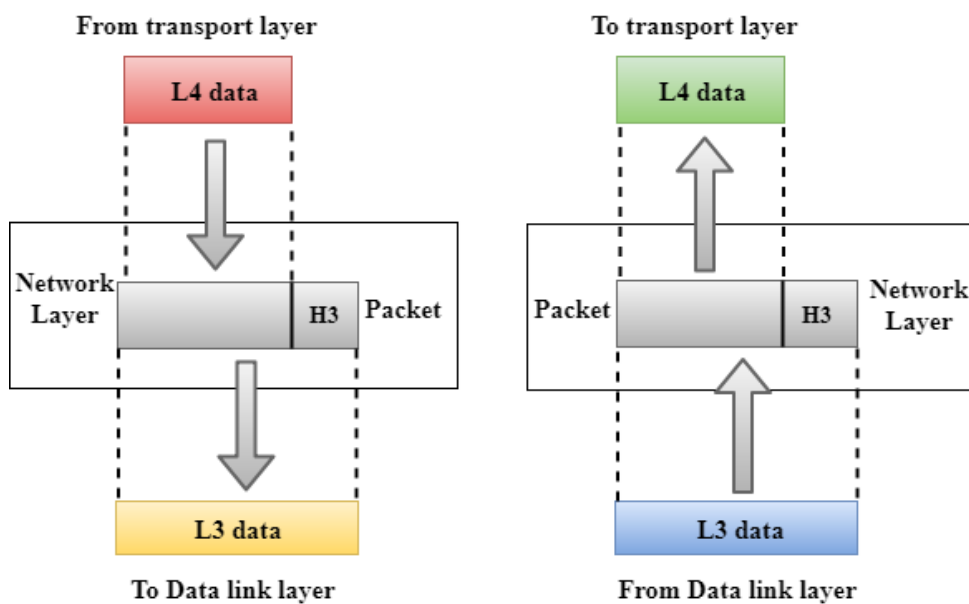
Transportni sloj upravlja prijenosom paketa između dva računala te koordinira prijenos podataka između krajnjih sustava i hostova. Pruža logičnu komunikaciju između aplikacijskih procesa koji se izvode na različitim hostovima unutar slojevite arhitekture protokola i ostalih mrežnih komponenata. Primjeri protokola na transportnom sloju su TCP (*Transmission Control Protocol*) i UDP (*User Datagram Protocol*). Ako se neki paket "zagubi" na putu, TCP će tražiti da se ponovo pošalje, pa je stoga pogodan za razmjenu podataka za koje je integritet podatka na višoj razini od brzine prijenosa. S druge strane UDP nema kontrolu je li se poneki paket zagubio, pa je primjenjiv za multimedijalne aplikacije, gdje je bitnija brzina komunikacije. [22] Osnovna funkcija transportnog sloja je prihvatiti podatke iz gornjeg sloja, podijeliti ih na manje jedinice, proslijediti te podatkovne jedinice mrežnom sloju i osigurati da svi dijelovi ispravno stignu na drugi kraj.

### Funkcije transportnog sloja:

- „*Process to process*“ isporuka – transportni sloj zahtijeva broj porta za ispravnu isporuku segmenta podataka u ispravan proces između više procesa koji se izvode na određenom hostu. Broj porta je 16-bitna adresa koja se koristi za jedinstvenu identifikaciju bilo kojeg programa klijent-poslužitelj.
- „*End-to-end*“ veza između hostova.
- Multipleksiranje i demultipleksiranje - multipleksiranje omogućuje istovremeno korištenje različitih aplikacija putem mreže koja je pokrenuta na hostu. Transportni sloj prihvaća pakete iz različitih procesa diferenciranih prema brojevima njihovih priključaka i prosljeđuje ih mrežnom sloju nakon dodavanja odgovarajućih zaglavlja. Demultipleksiranje je potrebno na strani prijammnika da bi se dobili podaci koji dolaze iz različitih procesa.
- Kontrola zagušenja – situacija u kojoj previše izvora preko iste mreže pokušava poslati podatke dovodi do preopterećenja. Međuspremnicima usmjerivača počinju se prelijevati zbog čega dolazi do gubitka paketa. Kao rezultat ponovnog odašiljanja paketa iz izvora dodatno se povećava zagušenost.
- Integritet podataka i ispravljanje pogrešaka - provjerava greške u porukama koje dolaze iz aplikacijskog sloja pomoću kodova za otkrivanje pogrešaka.
- Kontrola protoka - pruža mehanizam kontrole protoka između susjednih slojeva TCP / IP modela. TCP također sprječava gubitak podataka zbog brzog pošiljatelja i sporog prijammnika primjenom tehnika kontrole protoka. Koristi metodu protokola kliznog prozora koji primatelj postiže slanjem prozora natrag pošiljatelju obavještavajući o veličini podataka koje može primiti. [26]

### **3. sloj – mrežni sloj** (*eng. Network Layer*)

Glavni cilj mrežnog sloja je isporuka paketa od izvora do odredišta kroz više mreža, dok sloj podatkovne veze nadgleda isporuku paketa između dva sustava na istoj mreži. Ako su dva sustava spojena na istu mrežu, obično nema potrebe za mrežnim slojem. Međutim, ako su sustavi spojeni na različite mreže često je potrebno da mrežni sloj dovrši isporuku. Slika 3.4. prikazuje odnos između mrežnog sloja i transportnog sloja te sloja podatkovne veze.



Slika 3.4. Mrežni sloj

Pri dizajniranju mrežnog sloja najvažnije je odrediti rutu paketa. Rute se mogu temeljiti na statičkim tablicama, ali mogu biti i dinamične, odnosno svakom paketu je dodijeljena unaprijed definirana ruta ili se može mijenjati za svaki paket. Ako se u podmreži u isto vrijeme nalazi više paketa dolazi do zagušenja i stvaranja uskog grla. Kako bi se smanjila mogućnost grešaka u prijenosu paketa potrebno je koristiti različite protokole, koji pružaju usluge isporučivanja paketa kroz mrežu sa ili bez spajanja. Najpoznatiji protokol mrežnog sloja je Internet Protokol (IP), a koriste se i sljedeći protokoli: Novell IPX (*Internet Packet Exchange*), Apple Talk, ARP (*Address Resolution Protocol*), RARP (*Reverse Address Resolution Protocol*), DRARP, (*Dynamic RARP*), InARP (*Inverse Address Resolution Protocol*), IPv6 (*Internet Protocol version 6*), MPLS (*Multi-Protocol Label Switching*).

#### Funkcije mrežnog sloja:

- Logičko adresiranje – dodjela jednoznačne adrese svakom mrežnom sloju. Adresiranje na mrežnom sloju se definira IP adresom uređaja, za razliku od fizičkog adresiranja na sloju podatkovne veze koje se definira MAC adresom uređaja.
- Usmjeravanje (eng. routing) podatkovnih paketa - omogućava prijenos paketa s kraja na kraj mreže (end-to-end).

- Fragmentacija i ponovno sastavljanje – mrežni sloj šalje podatke na sloj podatkovne veze koji ga dalje prosljeđuje. Veličina poruke koju sloj podatkovne veze može dalje slati je kod nekih tehnologija ograničena, stoga mrežni sloj fragmentira prevelike pakete podataka. Razbija paket, šalje svaki fragment posebno na sloj podatkovne mreže te ponovno sastavlja dijelove nakon što stignu na mrežni sloj odredišnog sustava. [27]

## **2. sloj – sloj podatkovne veze** (eng. *Data Link Layer*)

Sloj podatkovne veze definira tehnologije pristupa mrežama i mrežnim medijima, a nizovi bitova s fizičkog sloja postaju informacija. Skupine bitova odgovaraju određenoj informaciji čineći okvir (*frame*) čija struktura ovisi o korištenoj tehnologiji. Format okvira se sastoji od početka okvira (*Frame Start*), polje adresa (*Addressing*), tipa (*Type*), upravljačkog polja (*Control Field*). Početak okvira je jedinstveni niz bitova koji se ne može pojaviti nigdje drugdje u okviru. Završetak okvira obično obuhvaća polje provjere (*Error Detection*) i kraj okvira (*Frame Stop*).

### Funkcije sloja podatkovne veze:

- Fizičko adresiranje – sloj podatkovne veze dodaje zaglavlje u okvir kako bi se definirala fizička adresa pošiljatelja i/ili primatelja okvira, ako se okviri distribuiraju u različite sustave u mreži.
- Enkapsulacija podataka – strukturu okvira.
- Kontrola protoka (*flow control*) – omogućava komunikaciju dviju stanica koje rade različitim brzinama da međusobno komuniciraju te ograničava broj okvira koje pošiljatelj može poslati prije nego što dobije potvrdu od primatelja.
- Kontrola pogrešaka (*error control*) – osigurava isporuku okvira bez greške i u pravilnom redosljedu do mrežnog sloja. [11].

## **1. sloj – fizički sloj** (eng. *Physical Layer*)

Fizički sloj (PHY sloj), najniži sloj OSI modela, na razini bita (*bit-level*) se bavi prijenosom između različitih uređaja te podržava električna i mehanička sučelja spojena na fizički medij za sinkroniziranu komunikaciju. Obzirom na veliku raznovrsnost dostupnih

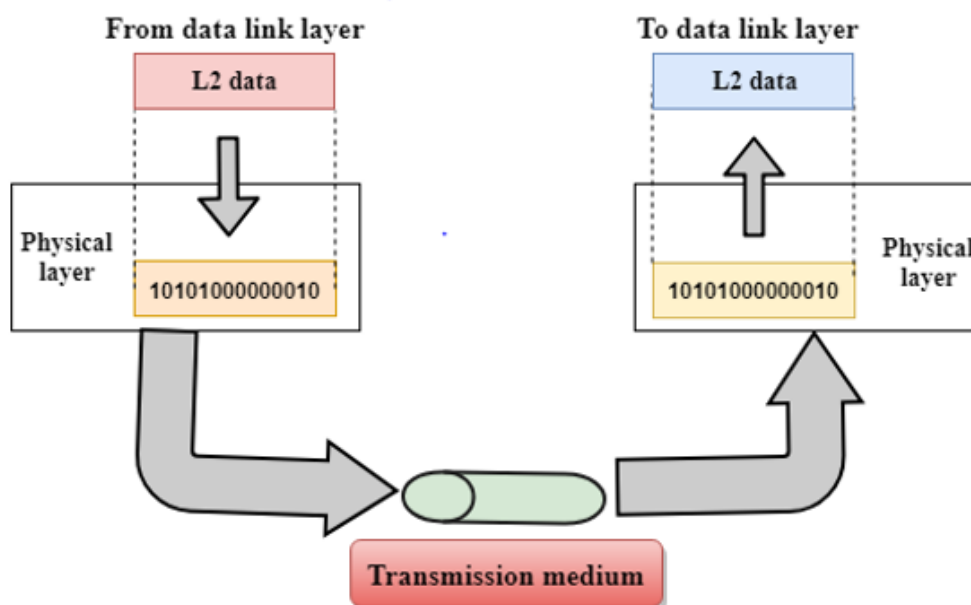
tehničkih uređaja s veoma različitim karakteristikama, radi se o najsloženijem sloju u OSI arhitekturi. Ovaj sloj uključuje bežični prijenos, standarde i tipove kabliranja, mrežne kartice, odnosno sve ono što odgovara zahtjevima određene mreže, ali se ne bavi stvarnim fizički medijem, poput bakrenih žica, vlakana. Fizički sloj konsolidira hardverske zahtjeve mreže s ciljem uspješnog prijenosa podataka, za što je potrebno definirati različite mehanizme prijenosa bitova na nivou ovog sloja, uključujući oblik i vrstu konektora, kabele i frekvencije za svaki fizički medij. Temeljni je sloj za sve funkcije viših razina, informacije dobivene iz sloja podatkovne veze pretvara u elektromagnetske signale (binarne podatke) koje šalje dalje preko fizičkog, bežičnog ili žičanog medija. Signali mogu biti digitalni (električni impulsi) ili analogni (kontinuirani elektomagnetski valovi), a ovisno o vrsti i kvaliteti fizičkog sloja može doći do njihovog oštećenja uslijed različitih fenomena poput šumova, slabljenja, disperzije i distorzije. Inherentna fizička ograničenja prijenosnog medija utječe na maksimalnu širinu pojasa i stopu pogrešaka. Prijenosni mediji mogu biti vođeni („žični“- kabele, optička vlakna) ili nevođeni („bežični“) kod kojih se između pošiljatelja i primatelja ne uspostavlja fizička veza. Budući da je zrak nevođeni medij, bilo tko osim stvarnog primatelja može preuzeti podatke. Fizički sloj igra važnu ulogu u učinkovitom dijeljenju dostupnih komunikacijskih resursa izbjegavajući sukobe između više korisnika. Upravlja brzinom prijenosa radi poboljšanja protoka između pošiljatelja i primatelja.

Primjeri protokola koji koriste fizičke slojeve uključuju:

- *Digital Subscriber Line*
- *Integrated Services Digital Network*
- *Infrared Data Association*
- *Universal Serial Bus (USB)*
- *Bluetooth*
- *Controller Area Network*
- *Ethernet*

Fizički je sloj zadužen za prijenos podataka preko fizičkog medija, na ovom sloju ne postoje jedinice podataka, niti zaglavlja. Za svaki fizički medij koristi se različita modulacija koja osigurava što točniji prijenos podataka. Tako se bitovi kod bakrenih medija prenose kao nizovi različitih naponskih razina signala, odnosno kao promjene napona, dok se kod optičkih medija prenose kao nizovi svjetlosnih impulsa. Standardi

definirani na fizičkom sloju određuju električne i funkcionalne karakteristike signala, te mehanička svojstva sučelja. Standardi koji definiraju karakteristike signala dijele se na one koji se odnose na prijenos signala analognim, digitalnim linijama te lokalnim mrežama. [28] Slika 3.5. [30] prikazuje fizički sloj.



Slika 3.5. Fizički sloj

Okvir fizičkog sloja započinje preambulom koja, osim funkcije sinkronizacije, definira shemu modulacije paketa, koji se modulira s istim faktorom širenja kao i ostatak paketa. Uobičajeno trajanje preambule je  $12,25 T_s$ , slijede je PHY i CRC zaglavlja (*PHY Header, Header CRC*) čija je zajednička dužina 20 bita, a kodirani su najpouzdanijom stopom koda, dok je ostatak okvira kodiran stopom koda navedenom u PHY zaglavlju. PHY zaglavlje također sadrži podatke o duljini korisnog opterećenja (eng. *payload length*) i je li 16-bitni CRC korisnog opterećenja prisutan u okviru. [29]

#### Funkcije fizičkog sloja:

- Fizičke karakteristike sučelja i medija - definira karakteristike sučelja između uređaja i prijenosnog medija. Također definira vrstu prijenosnog medija, brzinu prijenosa, način komunikacije. Kapacitet prijenosnog medija je širina pojasa.

- Prikaz bitova - podaci fizičkog sloja uključuju tok bitova (redosljed 0 i 1) bez ikakve interpretacije. Da bi se prenosili bitovi moraju biti kodirani u signale - električne ili optičke. Fizički sloj određuje tip kodiranja (kako se 0 i 1 pretvaraju u signale). Odgovoran je za bit po bit isporuku podataka na gornji sloj.
- Brzina podataka (brzina prijenosa) - broj bitova koji se šalje svake sekunde također je definiran fizičkim slojem. Drugim riječima, fizički sloj definira trajanje bita.
- Sinkronizacija bitova – potrebna je sinkronizacija na razini bita između pošiljatelja i primatelja, pa tako i satovi s obje strane trebaju biti sinkronizirani.
- Konfiguracija linije - fizički sloj je odgovoran za povezivanje uređaja na medij. Jedna veza dijeli se između nekoliko uređaja u konfiguraciji s više točaka. Računalo generira podatke u obliku 0 i 1. Postoje različite vrste kabela koji prenose podatke s našeg računala na prekidač ili obližnji priključak, a enkoder je odgovoran za kodiranje podataka prije nego što ih se pošalje različitim žicama. Zatim dekoder na sličan način izvlači podatke i čini ih čitljivima na računalima. [28]

### 3.3. Ključna svojstva modulacije LoRa

Kao što je gore spomenuto, pojačanje obrade LoRa uvodi se u RF kanal multipliciranjem podatkovnog signala sa šifrirajućim kodom ili sekvencom čipa. Povećavanjem brzine čipa povećavamo frekvencijske komponente ukupnog spektra signala. Drugim riječima, energija ukupnog signala sada se širi u većem rasponu frekvencija, omogućavajući prijemu da razazna signal s nižim (to jest, lošijim) omjerom signal-šum (SNR). U LoRa smislu, iznos koda širenja primijenjen na izvorni podatkovni signal naziva se faktor širenja (SF – spreading factor). LoRa modulacija ima ukupno šest faktora širenja (SF6 do SF12). Ako se koristi veći faktor širenja, signal će moći putovati, a RF prijemnik će ga i dalje primati bez pogreške.

Slika 3.6. prikazuje četiri različita faktora širenja koji se mogu koristiti za uzlazne veze (UL) na 125 KHz kanalu. Pokazuje ekvivalentnu brzinu bita kao i procijenjeni raspon (ovisi o terenu, npr. u seoskom ravničarskom okruženju bez velikih građevina će se postići



veće udaljenosti). Također prikazuje vrijeme zadržavanja ili vrijeme u zraku (TOA), vrijednosti za 11 bajt korisnog opterećenja za svaki od četiri faktora širenja.

Spreading Factor (For UL at 125 KHz)	Bit Rate	Range (Depends on Terrain)	Time on Air for an 11-byte payload
SF10	980 bps	8 km	371 ms
SF9	1760 bps	6 km	185 ms
SF8	3125 bps	4 km	103 ms
SF7	5470 bps	2 km	61 ms

*Slika 3.6. LoRa faktori širenja*

Faktori širenja LoRa modulacije su inherentno oktogonalni, što znači da se signali modulirani različitim faktorima širenja koji se istovremeno prenose na istom frekvencijskom kanalu ne ometaju. Umjesto toga, signali istih faktora širenja jedan drugome predstavljaju šum.

LoRa signali su robusni i vrlo otporni na mehanizme interferencije unutar (in-band) i izvan pojasa (out-of-band). LoRa modulacija je također otporna na višestazno širenje i slabljenje signala, što ga čini idealnim za uporabu u urbanim i prigradskim okruženjima, gdje oba mehanizma dominiraju. Pored toga, Doppler pomaci uzrokuju mala odstupanja frekvencije u vremenskoj osi signala baznog pojasa. Dopušteno odstupanje frekvencije umanjuje zahtjev za referentnim izvorima niske tolerancije što LoRa čini idealnom za podatkovnu komunikaciju s mobilnih uređaja. [10]

## 4. LoRaWAN

LoRaWAN je point-to-multipoint mrežni protokol koji koristi Semtech-ovu LoRa modulacijsku shemu. Nije riječ samo o radio valovima, već i o tome kako radio valovi komuniciraju s LoRaWAN ulazima kako bi proveli enkripciju i identifikaciju. Uključuje i komponentu oblaka na koju se povezuje više pristupnika. Zbog svojih ograničenja, LoRaWAN se rijetko koristi za industrijske aplikacije (privatne mreže).

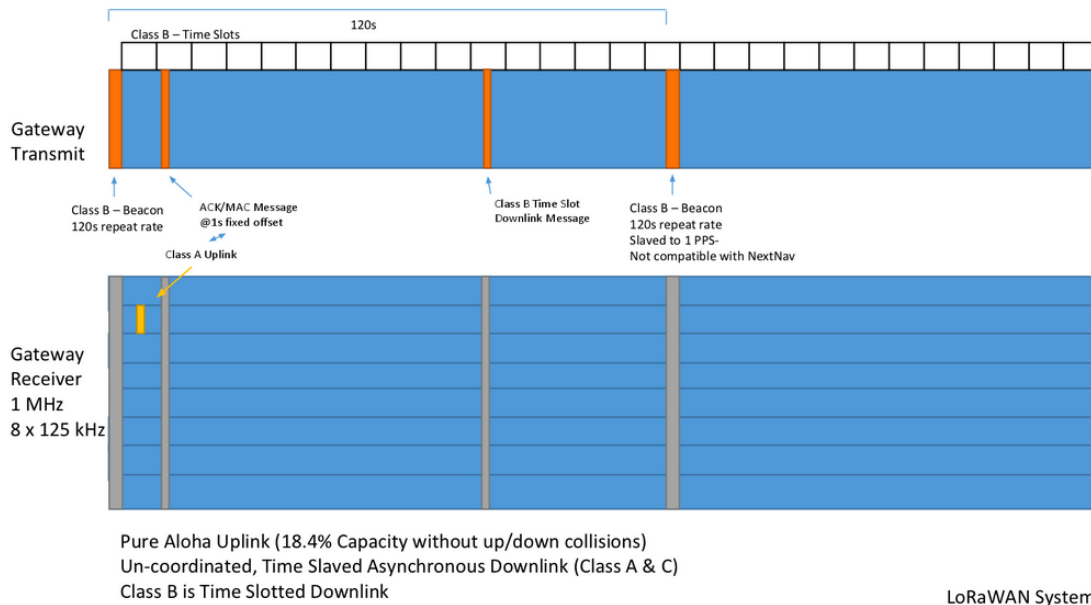
### 4.1. Kako radi LoRaWAN?

Na najosnovnijoj razini radio protokoli poput LoRaWAN-a prilično su jednostavni. Način na koji zvjezdasta mreža funkcionira sličan je odnosu profesora i studenata na predavanju. Gateway/pristupnik (profesor) govori krajnjim čvorovima (razred) i obrnuto. Ovo je asimetričan odnos u smislu komunikacije. Svi bi u razredu mogli istovremeno pokušavati komunicirati s profesorom, ali profesor ih ne bi mogao istovremeno čuti ili razumjeti. Iako izrazito pojednostavljeni, mnogi elementi zvjezdaste topologije se podudaraju s ovom analogijom.

Primjer četiri gateway-a i jednog čvora: čvor odašilje naslijepo u radio spektar, a svaki gateway može ga preuzeti i poslati ga u oblak. Poslanu poruku može stići do sva četiri gateway-a koji je šalju dalje, ali ne mora stići niti do jednog. Nakon dostavljanja poruke više nema potvrde primitka, ali čvorovi u LoRaWAN-u mogu zatražiti potvrde. Ako se traži potvrda i sva četiri pristupnika pakupe istu poruku, oblak odabire jedan gateway da odgovori u određeno vrijeme, obično nekoliko sekundi kasnije. Problem je sljedeći: kada se taj gateway vraća natrag na čvor, prestaje slušati sve ostalo. Dakle, ako vašoj aplikaciji treba puno priznanja, vjerojatno će potrošiti više vremena na prenošenje potvrda nego na preslušavanje, što će s vremenom dovesti do kolapsa mreže.

Slika 4.1. prikazuje način rada LoRaWAN-a. Gornja traka označava odašilje li gateway: ako je narančasta – odašilje, ako je plava – ne odašilje. Traka pri dnu prikazuje kanale

prijemnika. Gotovo svi LPWAN sustavi, uključujući LoRaWAN, imaju višestruki prijemni kanal, a većina LoRaWAN sustava može istovremeno primiti osam poruka na bilo kojem broju frekvencijskih kanala.



Slika 4.1. LoRaWAN – način rada

## 4.2. LoRaWAN Klase A, B i C

LoRaWAN ima tri klase koje djeluju istovremeno.

Klasa A je čisto asinkrona, što nazivamo čistim ALOHA sustavom. Ovaj sustav podrazumijeva da krajnji čvorovi ne čekaju na komunikaciju s gateway-em, već prenose kad god je potrebno, a do tada miruju. Ako imate savršeno koordiniran sustav preko osam kanala, svaki put slot možete napuniti porukom. Čim jedan čvor dovrši prijenos, odmah započinje drugi. Bez ikakvih nedostataka u komunikaciji, teoretski najveći kapacitet čiste ALOHA mreže iznosi oko 18,4% maksimuma. Ograničeni kapacitet je posljedica sudara, jer ako se jedan čvor odašilje, a drugi se probudi i odluči prenijeti poruku u istom frekvencijskom kanalu s istim radiopostajama, oni će se sudariti.

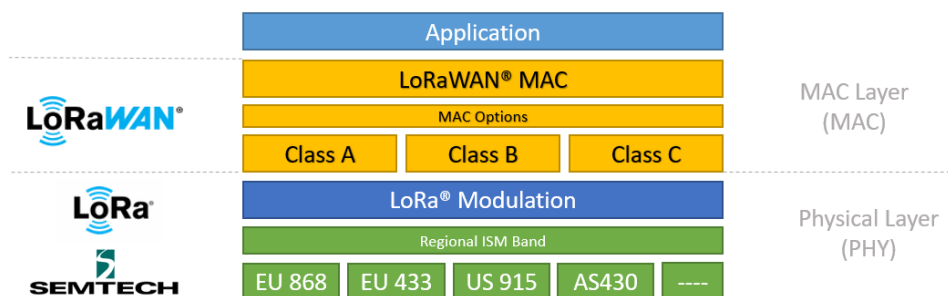
Klasa B omogućuje slanje poruka na čvorove s baterijskim napajanjem. Svakih 128 sekundi gateway odašilje signalni (Slika 3.1. [14]). Sve LoRaWAN bazne stanice prenose signale u točno isto vrijeme, jer su podređene jednom pulsu u sekundi (1PPS). To znači da

svaki GPS satelit u orbiti šalje poruku na početku svake sekunde, omogućavajući vrijeme da se sinkronizira širom svijeta. Svim čvorovima klase B dodijeljen je vremenski interval unutar ciklusa od 128 sekundi i navedeno im je kada da ih slušaju. Možete, na primjer, reći čvoru da sluša svaki deseti vremenski interval, a kada se to dogodi, omogućava se slanje „downlink“ poruke.

Klasa C omogućuje čvorovima da neprestano slušaju, a „downlink“ poruka može se poslati u bilo kojem trenutku. Koristi se prvenstveno za aplikacije s AC napajanjem, jer je potrebno puno energije da čvor bude cijelo vrijeme budan, a prijemnik aktivan. [9]

### 4.3. Infrastruktura LoRaWAN mreže

Da bismo u potpunosti razumjeli LoRaWAN mreže, započet ćemo s osvrtom na tehnološki „stack“. LoRa je fizički (PHY) sloj, tj. bežična modulacija koja se koristi za stvaranje komunikacijske veze dugog doseg. LoRaWAN je otvoreni mrežni protokol koji osigurava dvosmjernu komunikaciju, mobilnost i lokalne usluge standardizirane i održavane od strane Alliance LoRa. (Slika 4.2. [13]) [10]



Slika 4.2. LoRaWAN tehnološki „stack“

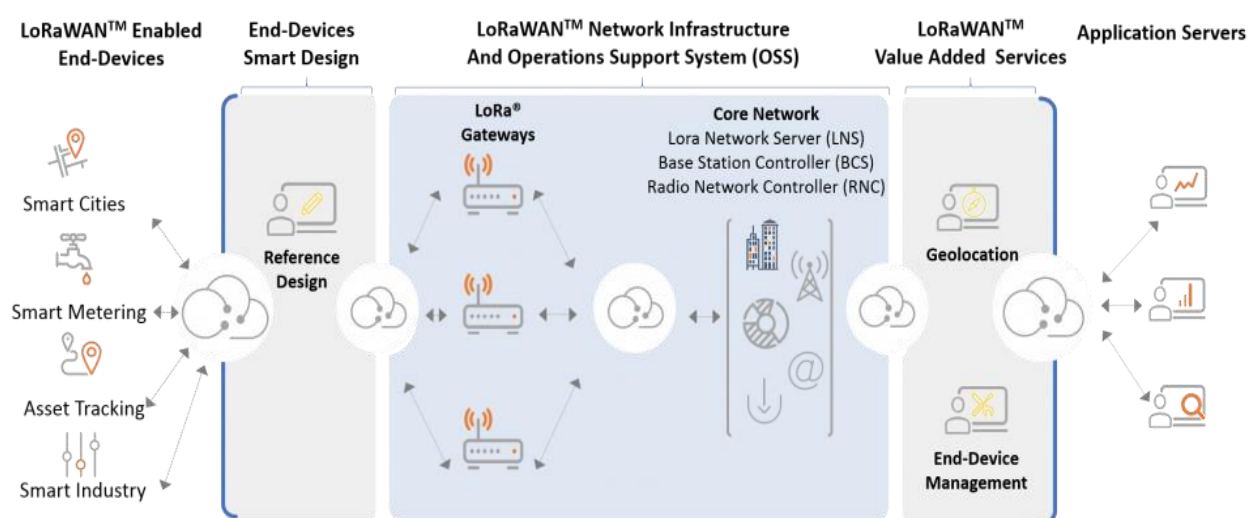
LoRaWAN mreža razmještena je u zvjezdastoj mrežnoj arhitekturi, pri čemu krajnji uređaji nisu povezani s određenim gateway-om, već prenose podatke na više gateway-a unutar njihovog radiofrekvencijskog područja.

## Krajnji uređaji

Proizvođači uređaja mogu se učinkovito koristiti specifikacijama i programima certificiranja tvrtke LoRa Alliance kako bi dizajnirali krajnje uređaje koji će se povezati u LoRaWAN mreže. Oni također mogu postići brži ulazak na tržište upotrebljavajući postojeće Reference Design ponude predložene od strane pojedinih dobavljača, temeljene na njihovim ekspertizama o LoRaWAN mrežama, kako bi učinkovito ugradili LoRaWAN povezivanje u svoj dizajn, dobili najbolje prakse za optimizaciju veze uređaja i prijenosa podataka na mreži.

## Radio mreža

LoRa Gateways (LoRa pristupnici), dizajnirani za vanjsku i unutarnju upotrebu, mogu samostalno podržavati desetine tisuća senzora krajnjih uređaja i omogućiti implementaciju u javnim i privatnim mrežama. Pristupnici podržavaju dvosmjernu komunikaciju i mogu istovremeno obrađivati poruke s mnogih LoRa krajnjih uređaja. Pristupnik djeluje kao prosljeđivač paketa i šalje pakete na mrežni server putem backhaul priključka koji može koristiti Ethernet, Wi-Fi, 3G ili 4G/LTE. LoRa pristupnici su jeftiniji u usporedbi sa celularnim baznim stanicama, što omogućava jednostavno povećanje mrežnog kapaciteta dodavanjem dodatnih pristupnika na jednostavan način. Pristupnici mogu podržati između 8 i 64 kanala što omogućuje mreži da obradi milijune poruka dnevno. Kvaliteta radio mreže (pokrivenost, robusnost, performanse, trajanje rada, pouzdanost) izravno ovisi o kvaliteti pristupnika.



Slika 4.3. Infrastruktura LoRaWAN mreže i sustav operativne potpore (OSS) [16]

## **Jezgra mreže – Core Network (CN)**

LoRaWAN mrežni poslužitelj (LNS – LoRaWAN Network Server) može se smjestiti u oblaku ili rasporediti u prostorijama operatora. Obraduje pakete primljene s više pristupnika i usmjerava ih na aplikacijski poslužitelj. Implementacija i rad uspješne LoRaWAN mreže zahtijeva snažne alate za nadzor, optimizaciju, upravljanje ili rješavanje problema pristupnika, njihovu konfiguraciju i dodjeljivanje QoS (Quality of Service) zahtjeva na mreži. Inspirirani iskustvom mobilne mreže, neki dobavljači nude potpuni paket upravljačkih rješenja Operating Support System (OSS) za učinkovito orkestriranje cijele mreže u stvarnom vremenu i osiguravanje njezine dostupnosti za prikupljanje „mission-critical“ podataka. Uz LoRaWAN mrežni poslužitelj (LNS), nadzornik baznih stanica (BSC – *Base Stations Controller*) ključni je skup značajki za daljinsko upravljanje LoRa gatewayima raspoređenim na terenu (postavke, firmver za upozorenja i ažuriranje aplikacija, sigurnost, integritet), dok nadzornik radio mreže (RNC – *Radio Network Controller*) pomaže u neprestanom praćenju i optimiziranju radijskih performansi i pokrivenosti cijele mreže (frekvencije, spektar, pokrivenost, snaga, opterećenje).

### **Aplikacijski poslužitelji**

Mrežni poslužitelj LoRaWAN (LNS) šalje pakete na odgovarajući aplikacijski poslužitelj koji obrađuje korisničku aplikaciju i tretira podatke kako bi ih prikazao kao relevantne. Mogućnosti radijske pristupne mreže (RAN - *Radio Access Network*) također se mogu izravno integrirati u aplikacijske poslužitelje i nadzorne ploče putem API-ja, za brzo postavljanje i upravljanje LoRaWAN mrežom. Vlasnici tvrtki također mogu povećati mogućnosti aplikacijskog poslužitelja uslugama s dodanom vrijednošću kao što su geolokacija ili upravljanje krajnjim uređajima, kako bi se najbolje iskoristile mogućnosti radio mreže i jezgre mreže te stvorile nove usluge. [17]

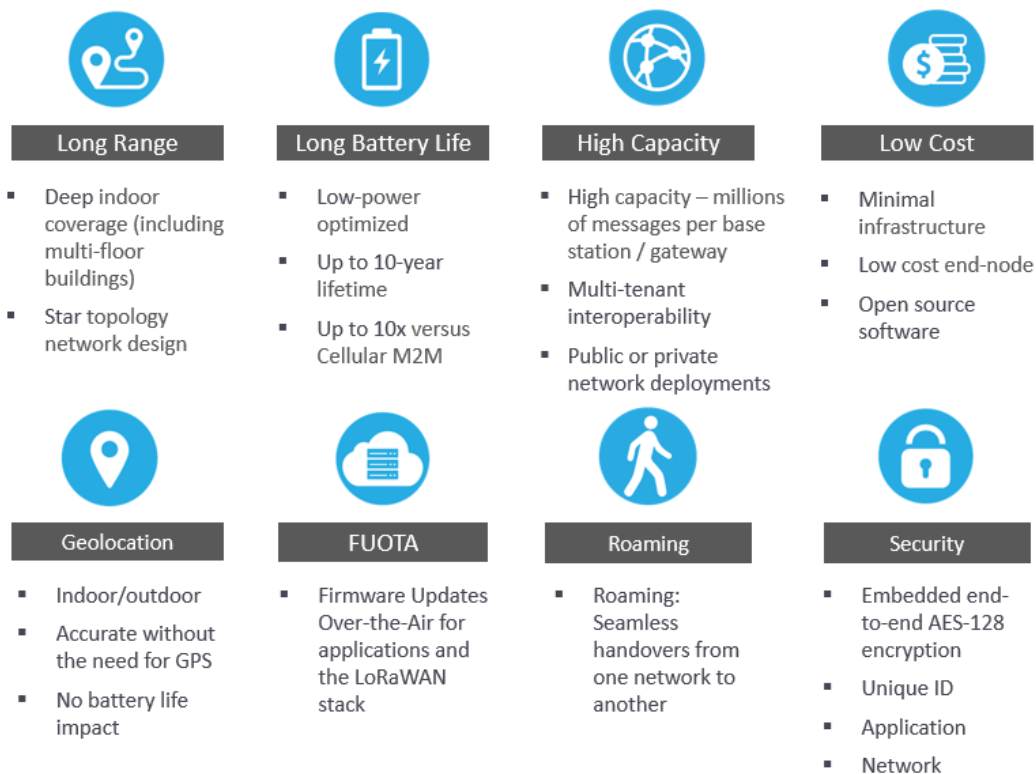
## **4.4. Prednosti i ograničenja LoRaWAN**

### **Prednosti LoRaWAN**

- Veliki domet (veliko područje pokrivanja signalom) – gateway temeljen na LoRa tehnologiji može primati i prenositi signale na udaljenosti većoj od 15 kilometara u ruralnim područjima. Čak i u gustom gradskom okruženju, poruke mogu prijeći i

do pet kilometara, ovisno o tome koliko su duboko u zatvorenom prostoru krajnji uređaji (krajnji čvorovi).

- Niska potrošnja električne energije – podatkovni paketi su vrlo mali i prenose se samo nekoliko puta dnevno. Nadalje, kada krajnji uređaji spavaju, potrošnja energije mjeri se u milivatima (mW), omogućujući bateriji uređaja/senzora da traje 10-20 godina.
- Izvrsna penetracija radijskog signala unutar objekata
- Vrlo velik stupanj sigurnosti podataka.
- Fleksibilnost poslovnog modela LoRaWAN – Može biti usluga od strane pružatelja infrastrukture koja korisnicima omogućuje implementaciju senzora i rješenja bez investicije u izgradnju vlastite mreže. S druge strane može se koristiti za izgradnju privatnih mreža, koje omogućuje investitoru jednostavno i jeftino prikupljanje i upravljanje „mission-critical“ podacima.



*Slika 4.4. Prednosti korištenja LoRaWAN mreže*

- Veliki kapacitet - LoRaWAN mreža može podržati milijune poruka. Međutim, broj podržanih poruka u bilo kojoj implementaciji ovisi o broju instaliranih gateway-ova. Jedan osam-kanalni gateway može podržati nekoliko stotina tisuća poruka tijekom razdoblja od 24 sata. Ako svaki krajnji uređaj dnevno pošalje 10 poruka, takav gateway može podržati oko 10.000 uređaja. Ako mreža uključuje 10 takvih gateway-ova, mreža može podržati otprilike 100.000 uređaja i milijun poruka. Ako je potreban veći kapacitet, sve što je potrebno jest dodavanje novih pristupnika mreži.
- Niski kapitalni i operativni troškovi - obzirom na mogućnosti krajnjih čvorova i pristupnika zasnovanih na LoRa, samo nekoliko pristupnika konfiguriranih u zvjezdastoj mreži može poslužiti mnoštvo krajnjih čvorova. Također, kada se zajedno s otvorenim standardom LoRaWAN koriste ekonomični LoRaRF moduli koji su ugrađeni u jeftine krajnje čvorove, povrat ulaganja može biti značajan. (Slika 3.4. 16) [10]

### **Prepreke za izgradnju privatnih mreža s LoRaWAN-om**

LoRaWAN dobro funkcionira za neke aplikacije, ali nije najbolje prilagođen za klijentska rješenja (eng. *customer-deployed solutions*), odnosno privatne mreže. Glavni razlozi za to su:

- **Koegzistencija većeg broja gateway-a omogućuje interferencije**, jer su s LoRaWAN-om svi pristupnici, bez obzira tko ih posjeduje ili upravlja s njima, podešeni na iste frekvencije. U slučaju da samo jedna mreža koristi jedno područje izbjegava se problem kolizija. Međutim, putem LoRa Alliance moguće je raditi na određenim kanalima namijenjenim određenim namjenama. Moguće je i da mrežni operateri na serveru ograniče iznos silazne veze (downlink) kako bi se osiguralo da krajnje točke niskog prioriteta ne "začepljuju" mrežu s prometom silazne veze.
- **Ne jamči primanje poruke.** LoRaWAN je asinkron, temeljen na ALOHA protokolu kod kojeg su stope pogreške paketa (PER) često veće od 50 %. Takav PER ne predstavlja problem ako se radi o npr. aplikacijama za očitavanje brojila, dok se za industrijske ili poslovne senzorske mreže ili upravljačke sustave traži PER 0 %.



- **Zahtijeva značajan rad na razvoju kompletnog proizvoda.** LoRaWAN je primarno sloj podatkovne veze (MAC) (OSI sloj 2), sa samo nekim elementima mrežnog sloja (OSI sloj 3). Još uvijek niti jedan dobavljač ne nudi cjelovito LoRaWAN rješenje. Umjesto toga, potrebno je surađivati s više dobavljača kako biste nabavili čvorove, pristupnike, pomoćni poslužitelj i ostale dijelove sustava zasebno. Iako ovo omogućuje veliku fleksibilnost primjene, programeri aplikacija trebaju utrošiti veliki dio vremena kako bi ponudili kompletni proizvod (uključujući pakiranje, nadzor silazne veze, multicast itd.).
- **Ograničenje trajanja radnog ciklusa.** Postoje ograničenja svojstvena pojasu od 868 MHz u javnim mrežama. U Europi je u većini slučajeva ograničenje radnog ciklusa jedan posto, što znači da svaki pojedinačni gateway ne može odašiljati duže od 1 % određenog ukupnog vremena. Zbog toga je gateway prilično ograničen u količini podataka koje može prenijeti. U SAD-u, FCC propisi za ISM pojas nemaju takva ograničenja.
- **Promjenjiva jedinica maksimalnog prijenosa (MTU).** Još jedno veliko ograničenje LoRaWAN-a je veličina korisničkog opterećenja MTU koja je promjenjiva ovisno o faktoru širenja koji mreža dodjeljuje čvoru. Ako je čvor udaljen od pristupnika broj bajtova koji može prenijeti je mali, dok je onog koji je u blizini daleko veći. Stoga, firmver čvora ili aplikacija moraju biti sposobne prilagoditi se promjenama veličine korisničkog opterećenja na aplikacijskom sloju, što je vrlo teško kod razvoja firmvera.

LoRaWAN je prihvatljiva opcija za razvoj javnih mreža u vlasništvu pružatelja usluga. U ovom se prostoru natječu mnogi dobavljači hardverskih i mrežnih servera, što LoRaWAN čini dobrom opcijom za jednostavne aplikacije, bez puno čvorova i ne nužno potrebnom potvrdom o isporuci/primitku podataka. Mnogi korisnici LoRaWAN-a još nisu iskusili te blokade puta jednostavno zato što su njihove mreže i dalje prilično male. Ozbiljnije zapreke se javljaju kod složenijih aplikacija kod kojih se LoRaWAN koristi za upravljanje javnom mrežom s velikim brojem korisnika i za različite funkcije. [9]

## 5. LoRaWAN simulacija

Kako bi se izbjegli negativni utjecaji kolizija, interferencija i drugih faktora koji utječu na ispravan prijenos podatkovnih paketa, prije uvođenja IoT aplikacija na LoRaWAN, potrebno je provesti simulaciju kako bi se primjenio optimalni mrežni dizajn i parametri protokola. Obzirom na ograničenja radijskih resursa neizbježan je odabir istog SF (Spreading Factor) i podkanala te je potrebno procijeniti dizajn mreže pod utjecajem efekta hvatanja i sudara između SF, kako bi se smanjio broj sudara. Stoga se mora postaviti mrežni simulator LoRaWAN kako bi se pružio rani uvid u različite fizikalne aspekte koji mogu utjecati na performanse mreže.

### 5.1. Parametri sistema

#### Radio resursi:

- Čimbenici širenja: Faktor širenja (SF) može se odabrati između 8 i 12. Što je veći SF, veći je omjer signal-šum, osjetljivost i raspon, ali i vrijeme u zraku (vrijeme zauzimanja kanala).
- Kanali: ovise o svjetskoj regiji, LoRa komunikacija može raditi u frekvencijskim opsezima 433MHz i 868Mhz ISM ili opsegu 900MHz.
- Razina snage prijenosa: u LoRa komunikaciji, svaki krajnji uređaj može prilagoditi oblik napajanja za prijenos 4dBm do 20dBm, u koraku od 1dBm.
- Brzina kodiranja (CR): *Forward Error Correction* kod se koristi za zaštitu LoRa komunikacije od smetnji. CR se može postaviti na 4/5, 4/6, 4/7 ili 4/8. Viši CR nudi veću zaštitu, ali povećava vrijeme zauzimanja kanala.

**Širina propusnog opsega** (BW – *Bandwidth*) - LoRa komunikacije mogu raditi u propusnom opsegu (BW) od 125kHz, 250kHz ili 500kHz. Veći BW daje veću brzinu prijenosa podataka, ali nižu osjetljivost (zbog integracije dodatne buke). Suprotno tome, niži BW daje veću osjetljivost, ali nižu brzinu prijenosa podataka.

**Veličina paketa** – za potrebe simulacije definirana je veličina paketa za svaki krajnji uređaj.

**Ograničenje radnog ciklusa** (eng. *Duty Cycle Restriction*) i **stopa stvaranja paketa** (eng. *Packet Generation Rate*)

**Model širenja** (eng. *Propagation model*) [18]

### 5.1.PHY simulator

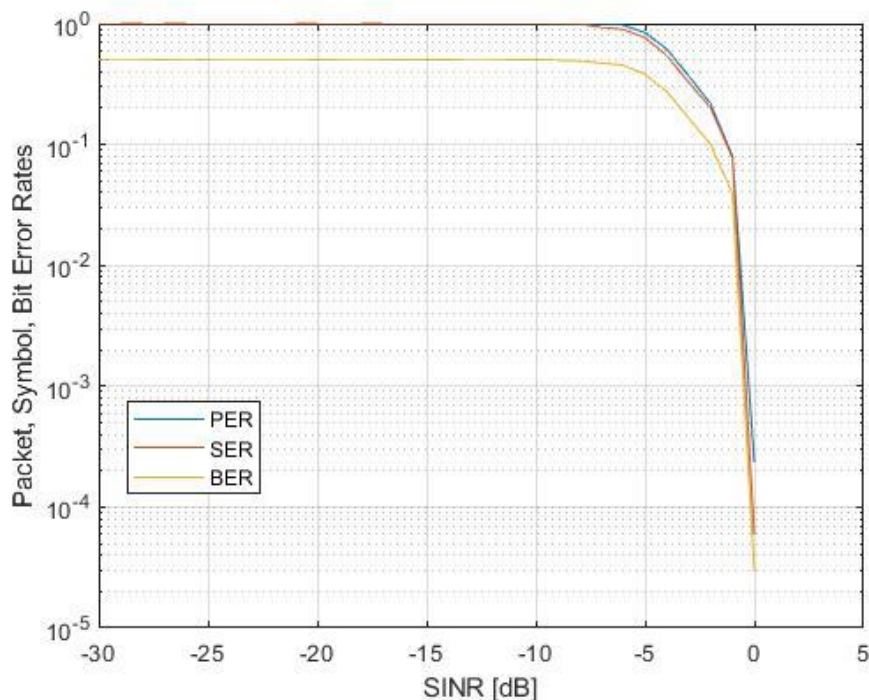
Analizirani su rezultati simulacije dobiveni korištenjem MATLAB-ove skripte (Prilog 1) koja je implementirana na razini linka s ciljem testiranja prijema dva LoRa prijenosa koji se preklapaju, moduliranih s različitim faktorima širenja (SF).

Pri svakom pokretanju simulacije referentni okvir moduliran s referentnim faktorom širenja  $SF_{ref}$  se sažima u randomizirani broj interferirajućih simbola moduliranih s različitim faktorom širenja  $SF_{int}$ . Dobiveni prekriveni signal demoduliran je uz odsutnost buke, uz pretpostavku savršene sinkronizacije prijarnika. Tijekom simulacije SIR raste od -30 dB, koracima od 1 dB. Stotine okvira mora biti pogrešno demodulirano za doseganje sljedećeg koraka. Simulacija se završava kada je BER manji od 1%. Simulator generira 8 dijagrama tijekom izvođenja. Prvi prikazuje stope pogreške paketa, simbola i bita (PER, SER i BER) tekućeg eksperimenta. Slike 2 do 8 su konačne BER krivulje za faktore širenja 6 do 12 u odnosu na sve ostale. [19]

U sustavu koji koristi LoRa modulaciju, sudar je opisan kao trenutak u kojem dva ili više senzora istovremeno šalju podatke jedni drugima koristeći isti faktor širenja (SF) na istom kanalu. Ti bi sudari svojim djelovanjem mogli dovesti do gubitka mrežnih paketa. Unatoč svemu, zahvaljujući efektu hvatanja (eng. *capture effect*), prijernik može ponekad uspješno dekodirati jedan od paketa čak i kada se dogodi sudar. Efekt hvatanja može se definirati kao sposobnost prijernika za dekodiranje paketa čak i u slučaju sudara više paketa, prednost pri dekodiranju ima paket s većim *Signal-to-Noise*. LoRa specifikacija, kako je definirao Semtech, ima sedam faktora širenja (SF6 – SF12) i četiri različite širine kanala (62,5 kHz, 125 kHz, 250 kHz i 500 kHz). Između specifičnih faktora širenja (SF) i različitih širina pojasa (BW) lako se može odrediti teorijska ortogonalnost, odnosno ne-ortogonalnost. Ako se isti SF koristi na istom komunikacijskom kanalu, razina performansi dramatično opada, jer uvjeti ortogonalnosti nisu ispunjeni.

Referentni paket interferira sa slučajnim LoRa paketom koji je moduliran faktorom širenja, tako da se analiziraju sve moguće varijacije. Interferirajući paket šalje se u nasumičnim momentima sa SIR-om (*Signal-to-Interference Ratio*) koji se povećava u koracima od 1 dB, počevši od - 30 dB. Primjenom ovog mehanizma može se odrediti BER (Bit Error Rate) karakteristika, kao rezultat usporedbe demoduliranih bitova s onima inicijalno moduliranima. Može se zaključiti da, što je manji faktor širenja koji ometa komunikaciju, viši je prag SIR potreban za dobivanje prihvatljive vrijednosti BER. Ovaj model simulacije pruža mogućnost analize utjecaja propusnosti komunikacijskog kanala i dimenzije korisnog opterećenja na razinu performansi LoRa tehnologije određivanjem njene skalabilnosti procjenom BER parametra. Modulirani paket zatim interferira sa slučajnim LoRa paketom moduliranim faktorom širenja. Najgori scenarij se događa u slučaju kada paket interferira s paketom moduliranim istim faktorom širenja, a važno je napomenuti da se razmatra pretpostavka savršene sinkronizacije između odašiljača i prijammnika.

U nastavku će biti prikazan tijek i rezultati simulacije. Na sučelju simulatora se prvo pojavljuju referentni grafovi za PER, SER i BER, od SF6inf/SF6 (Slika 5.1.) do SF12inf/SF12. Za potrebe ovdje promatrane simulacije pažnju je potrebno usmjeriti na BER krivulje.



Slika 5.1. Referentni graf za SF6/SF6inf

Cilj simulacije je bio utvrditi kako interferencija pri različitim faktorima širenja (od SF6 do SF12) utječe na smanjenje, odnosno rast BER-a, uz porast od 1dB nakon maksimalno dopuštenog broja grešaka. Simulacija je rađena uz širinu kanala (BW) od 125 kHz.

Faktor širenja (SF) odlučuje o tome koliko će nositelja podataka biti poslano u sekundi. Odabir odgovarajućeg faktora širenja ovisi o mreži i određuje se na temelju okolišnih uvjeta između komunikacijskog uređaja i pristupnika. Niži SF omogućuje kodiranje više podataka u sekundi, dok viši SF podrazumijeva manje podataka za kodiranje u sekundi. U usporedbi s nižim SF-om, za slanje iste količine podataka s većim SF-om potrebno je više vremena, poznato kao „*on air time*“. Više vremena u zraku znači da modem radi dulje i troši više energije. Prednost visokog SF-a je u tome što produženo vrijeme emitiranja daje prijemniku više mogućnosti za uzorkovanje snage signala što rezultira boljom osjetljivošću i boljom pokrivenošću. [20]

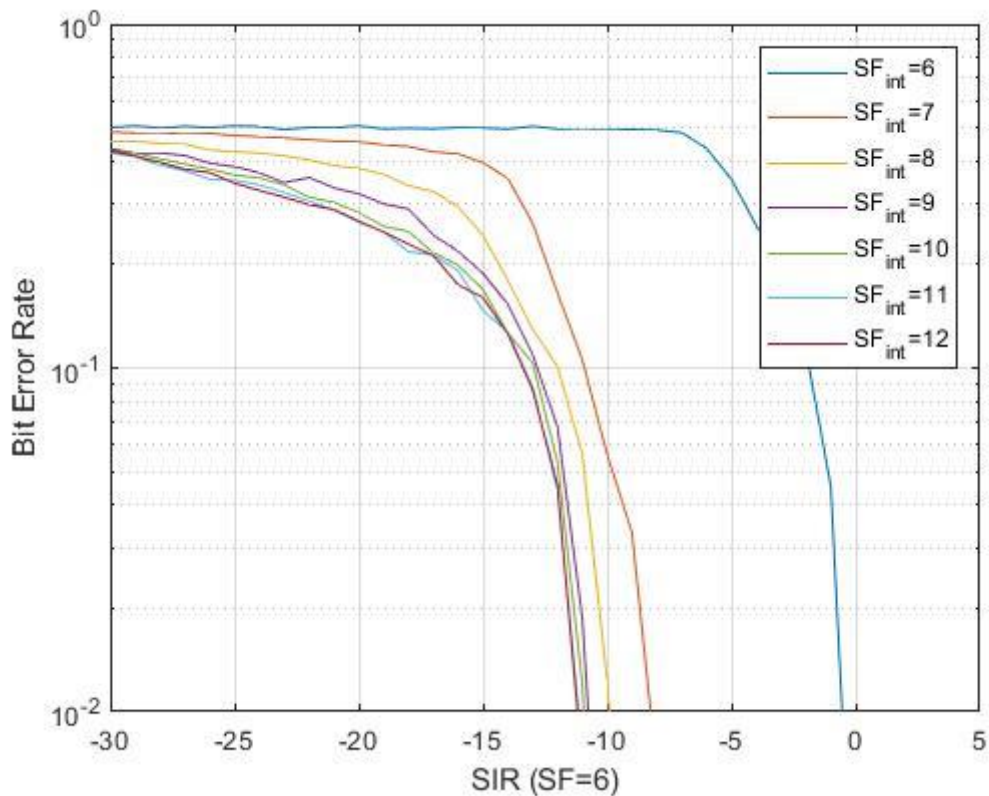
Prekid prijenosa paketa može se dogoditi u dva slučaja:

- SNR je ispod razine praga potrebne za dekodiranje bez pogreške. Ta razina je -20 dB za SF = 12 do -6 dB za SF = 7.
- LoRa signali različitih faktora širenja (SF) interferiraju jedan s drugim stvarajući gubitak paketa.

Slike od 5.2. do 5.8. prikazuju odnos između BER i SIR u slučajevima interferencije između interferirajućeg faktora širenja (SF<sub>int</sub>) i referentnog signala (SF) s pripadajućim vrijednostima interferirajućeg SF-a u rasponu od 6 do 12. Primjerice, Slika 5.2. prikazuje svojstva BER-a pri ponavljanoj simulaciji sa SF6 koja ometa signale od SF6 do SF12. Za sve interferirajuće signale uočavaju se bolje performanse u zoni oko -10 dB, dok se kod interferencije s SF6 performanse pogoršavaju već od -1 dB.

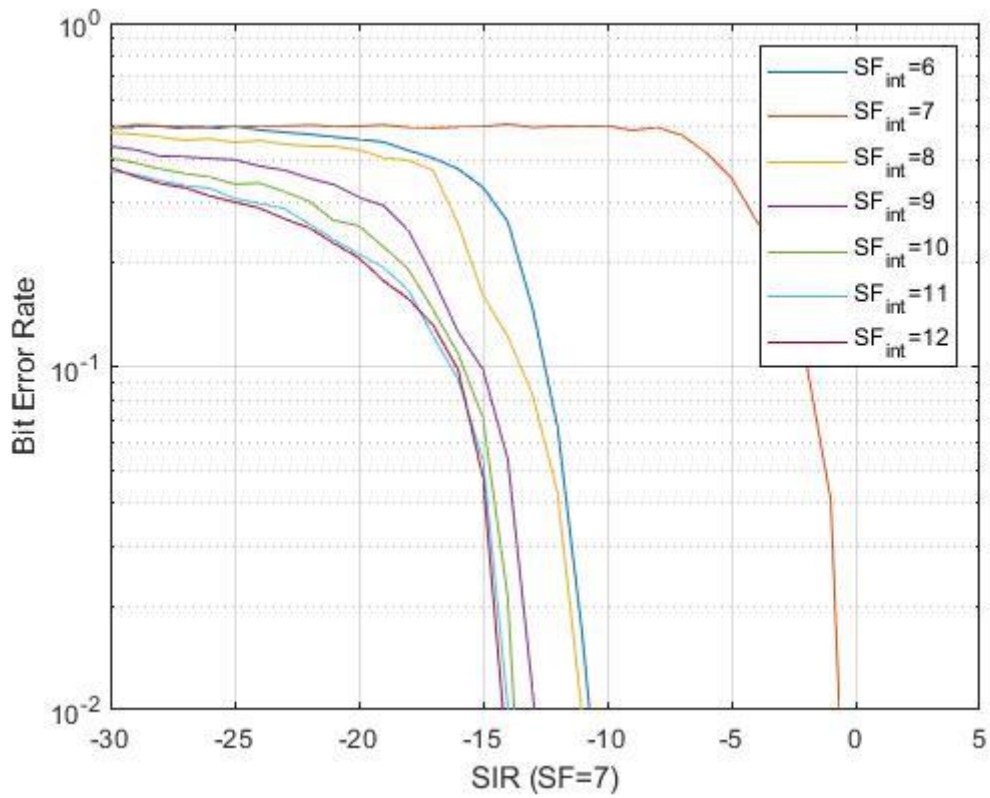
Simulacija se izvodi s paketima koji se istovremeno prenose na CR = 3 s preplitanjem i sivim kodiranjem kao što je to učinjeno u fizičkom sloju LoRa-e. Preklapajući prijenos referentnih i ometajućih signala stvara se zbrajanjem referentnih okvira moduliranih na referentnom SF-u s onim ometajućih signala s interferirajućim SF-om. Paketi koji ometaju generiraju se do pojave 100 sudara, s referentnim korisnim opterećenjem od 8 bajtova.

Grafikon prikazuje prag omjera signala i smetnji (SIR) ispod kojeg su paketi oštećeni. Co-SF smetnje stvaraju nisku graničnu razinu SIR-a ispod koje je oporavak paketa otežan zbog visokog BER-a. Simulacija potvrđuje da smetnje Co-SF stvaraju visoki BER što dovodi do gubitka paketa. [21]

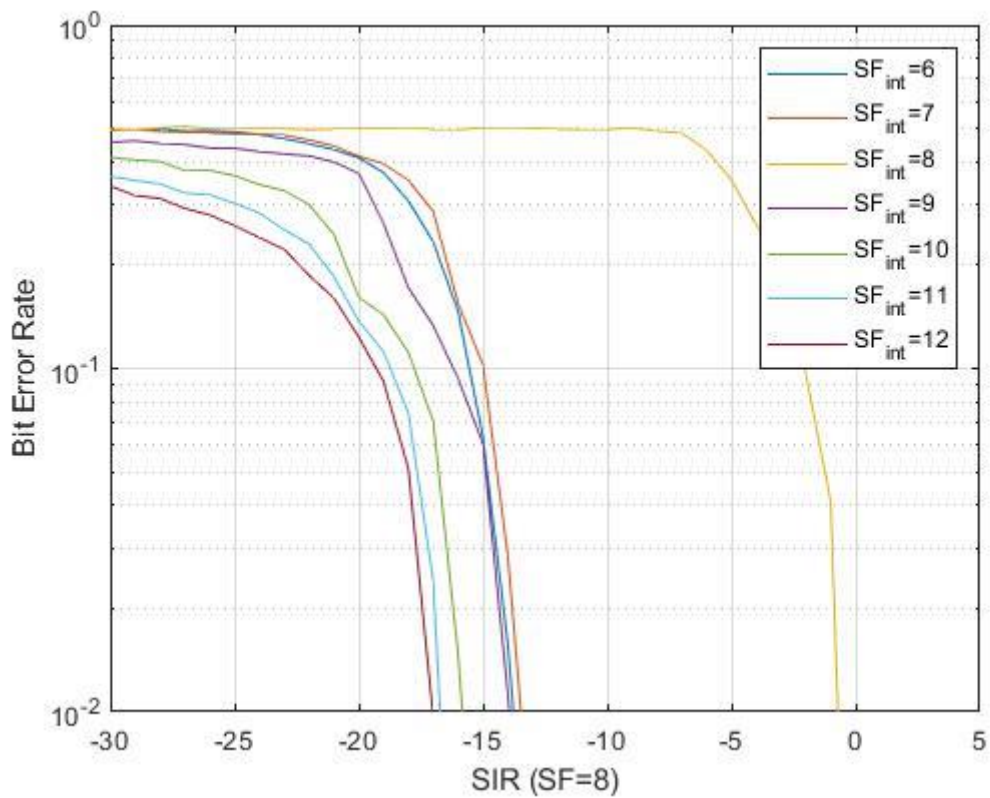


Slika 5.2. Bit Error Rate (BER) u slučaju kada paket SF6 interferira s SF6 do SF12

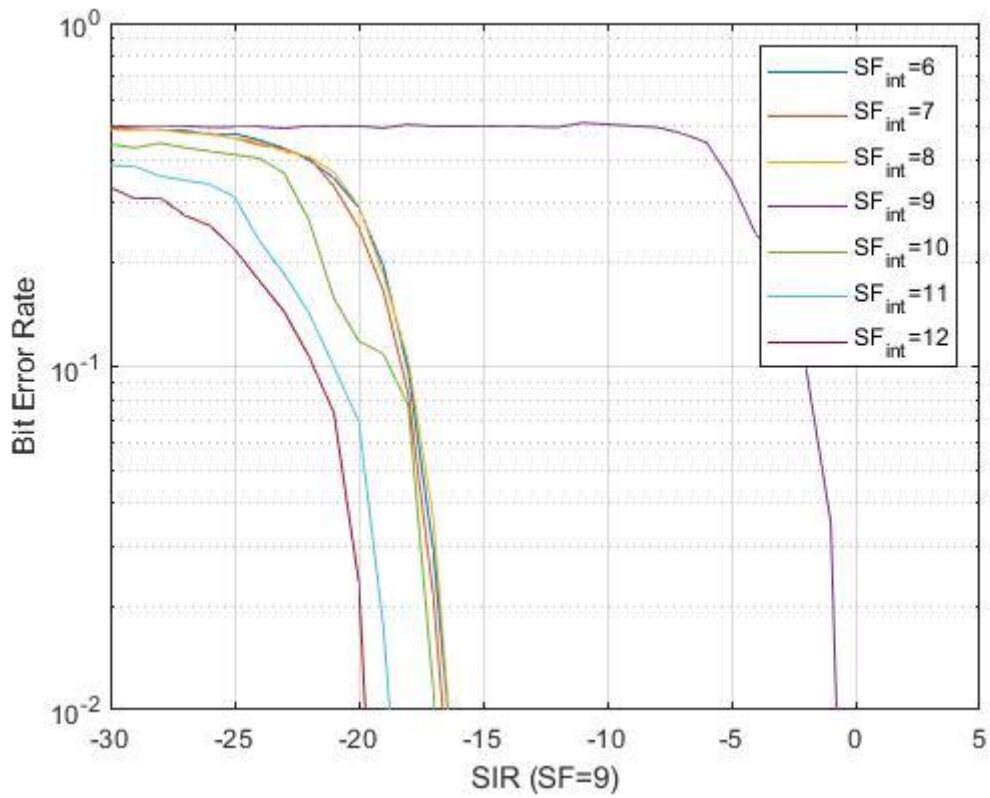
Iz grafova je vidljivo da se najlošije BER performanse javljaju kada se referentni i interferentni faktori širenja podudaraju. Sve ove krivulje imaju gotovo identičan izgled, postotak BER-a se smanjuje pri vrijednosti od oko -8 dB, a BER od 1% se doseže na vrijednosti od oko -1 dB. Krivulja BER-a je strmija za sve SF<sub>inf</sub> kako raste vrijednost referentnog SF, isključujući krivulje SF<sub>inf</sub> koji se podudara s referentnim. BER od 1% se doseže u području od oko -10 dB (SF6) do -25 dB. Kako raste referentni SF krivulje se sve više podudaraju, uz neočekivano najstrmiju krivulju SF12<sub>inf</sub>.



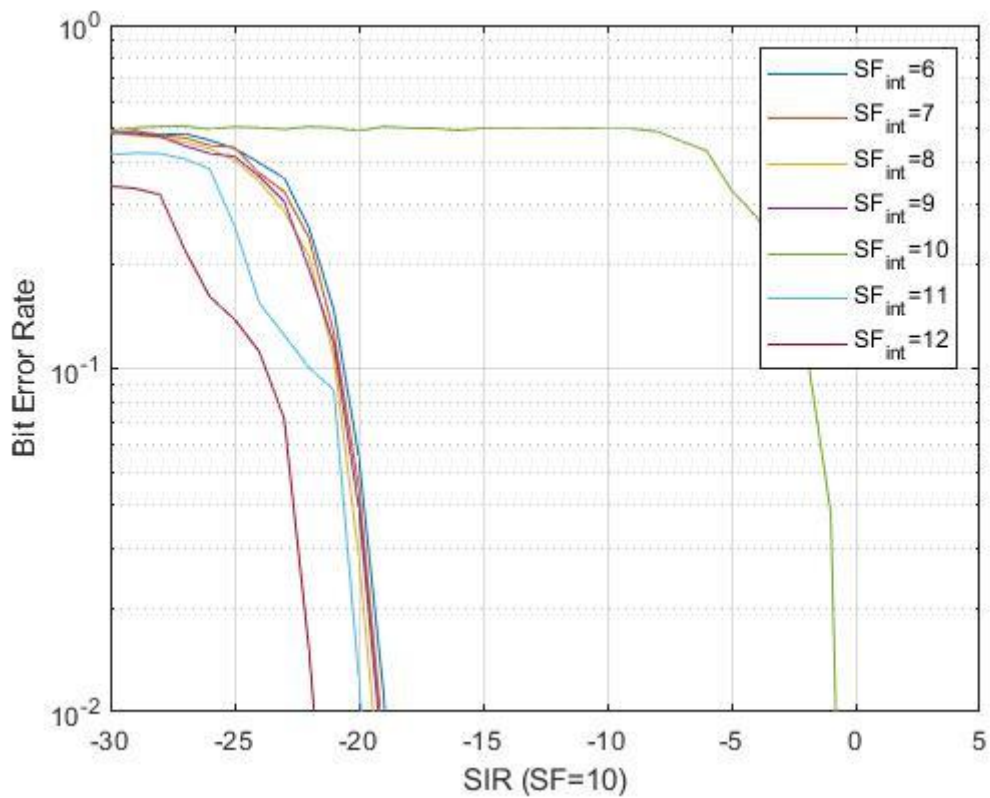
Slika 5.3. Bit Error Rate (BER) u slučaju kada paket SF7 interferira s SF6 do SF12



Slika 5.4. Bit Error Rate (BER) u slučaju kada paket SF8 interferira s SF6 do SF12

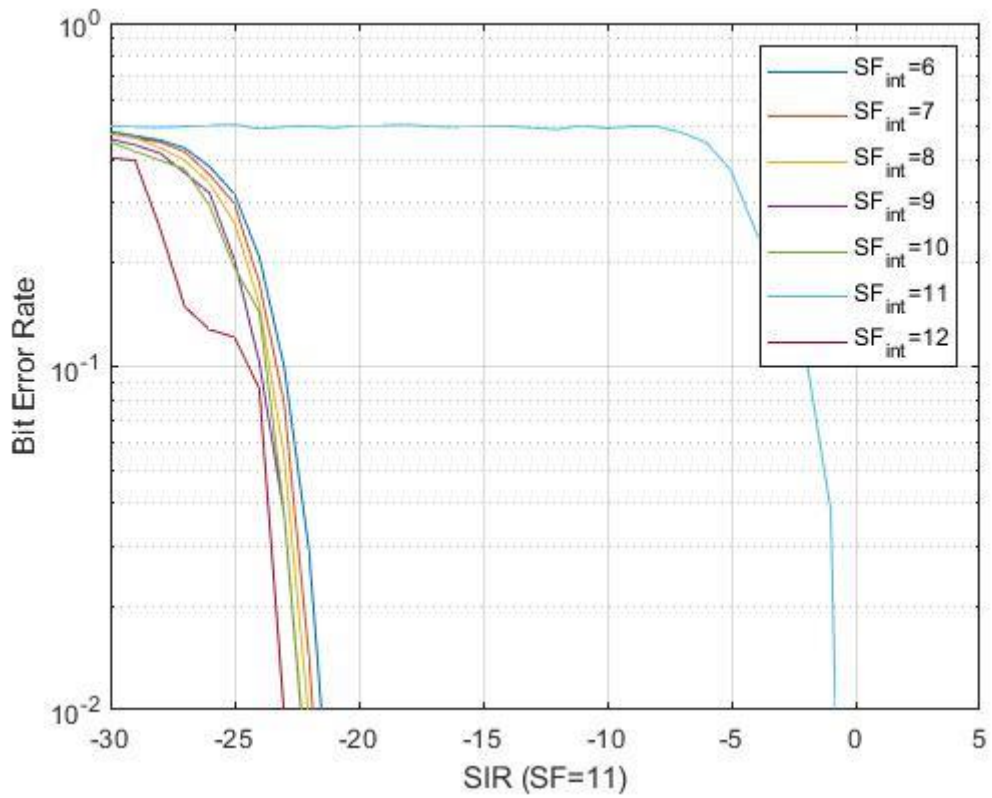


Slika 5.5. Bit Error Rate (BER) u slučaju kada paket SF9 interferira s SF6 do SF12

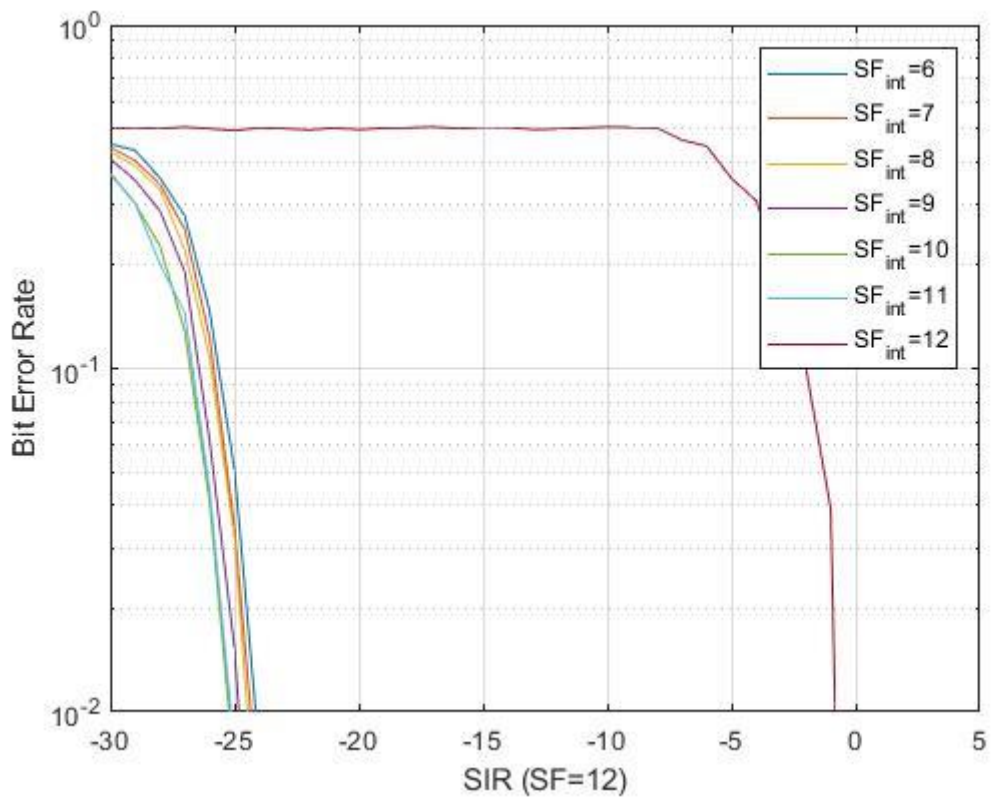


Slika 5.6. Bit Error Rate (BER) u slučaju kada paket SF10 interferira s SF6 do SF12





Slika 5.7. Bit Error Rate (BER) u slučaju kada paket SF11 interferira s SF6 do SF12



Slika 5.8. Bit Error Rate (BER) u slučaju kada paket SF12 interferira s SF6 do SF12

Slika 5.9. sažima podatke iz ranije prikazanih grafova te prikazuje SIR (vrijednost decibela) za BER 0,01 (1%), za sve kombinacije referentnih faktora širenja (SF\_ref 6 do SF\_ref 12) i intereferentnih faktora širenja (SF\_int 6 do SF\_int 12). Brojčane vrijednosti potvrđuju trendove iščitane iz grafova:

SF_ref:6	SF_int:6	SIR for BER=0.01: -0.538655 [dB]
SF_ref:6	SF_int:7	SIR for BER=0.01: -8.24675 [dB]
SF_ref:6	SF_int:8	SIR for BER=0.01: -9.89861 [dB]
SF_ref:6	SF_int:9	SIR for BER=0.01: -10.7571 [dB]
SF_ref:6	SF_int:10	SIR for BER=0.01: -10.9363 [dB]
SF_ref:6	SF_int:11	SIR for BER=0.01: -11.1538 [dB]
SF_ref:6	SF_int:12	SIR for BER=0.01: -11.1883 [dB]
SF_ref:7	SF_int:6	SIR for BER=0.01: -10.7095 [dB]
SF_ref:7	SF_int:7	SIR for BER=0.01: -0.654579 [dB]
SF_ref:7	SF_int:8	SIR for BER=0.01: -11.0243 [dB]
SF_ref:7	SF_int:9	SIR for BER=0.01: -12.9337 [dB]
SF_ref:7	SF_int:10	SIR for BER=0.01: -13.741 [dB]
SF_ref:7	SF_int:11	SIR for BER=0.01: -13.9945 [dB]
SF_ref:7	SF_int:12	SIR for BER=0.01: -14.1913 [dB]
SF_ref:8	SF_int:6	SIR for BER=0.01: -13.7709 [dB]
SF_ref:8	SF_int:7	SIR for BER=0.01: -13.4662 [dB]
SF_ref:8	SF_int:8	SIR for BER=0.01: -0.71014 [dB]
SF_ref:8	SF_int:9	SIR for BER=0.01: -13.942 [dB]
SF_ref:8	SF_int:10	SIR for BER=0.01: -15.8268 [dB]
SF_ref:8	SF_int:11	SIR for BER=0.01: -16.7258 [dB]
SF_ref:8	SF_int:12	SIR for BER=0.01: -17.0192 [dB]
SF_ref:9	SF_int:6	SIR for BER=0.01: -16.409 [dB]
SF_ref:9	SF_int:7	SIR for BER=0.01: -16.6109 [dB]
SF_ref:9	SF_int:8	SIR for BER=0.01: -16.382 [dB]
SF_ref:9	SF_int:9	SIR for BER=0.01: -0.768915 [dB]
SF_ref:9	SF_int:10	SIR for BER=0.01: -16.9358 [dB]
SF_ref:9	SF_int:11	SIR for BER=0.01: -18.7511 [dB]
SF_ref:9	SF_int:12	SIR for BER=0.01: -19.7343 [dB]
SF_ref:10	SF_int:6	SIR for BER=0.01: -18.9458 [dB]
SF_ref:10	SF_int:7	SIR for BER=0.01: -19.1221 [dB]
SF_ref:10	SF_int:8	SIR for BER=0.01: -19.4158 [dB]
SF_ref:10	SF_int:9	SIR for BER=0.01: -19.2091 [dB]
SF_ref:10	SF_int:10	SIR for BER=0.01: -0.795144 [dB]
SF_ref:10	SF_int:11	SIR for BER=0.01: -19.9022 [dB]
SF_ref:10	SF_int:12	SIR for BER=0.01: -21.7917 [dB]
SF_ref:11	SF_int:6	SIR for BER=0.01: -21.4999 [dB]
SF_ref:11	SF_int:7	SIR for BER=0.01: -21.8436 [dB]
SF_ref:11	SF_int:8	SIR for BER=0.01: -22.0467 [dB]
SF_ref:11	SF_int:9	SIR for BER=0.01: -22.3229 [dB]
SF_ref:11	SF_int:10	SIR for BER=0.01: -22.3093 [dB]
SF_ref:11	SF_int:11	SIR for BER=0.01: -0.809513 [dB]
SF_ref:11	SF_int:12	SIR for BER=0.01: -23.0133 [dB]
SF_ref:12	SF_int:6	SIR for BER=0.01: -24.1453 [dB]
SF_ref:12	SF_int:7	SIR for BER=0.01: -24.342 [dB]
SF_ref:12	SF_int:8	SIR for BER=0.01: -24.4799 [dB]
SF_ref:12	SF_int:9	SIR for BER=0.01: -24.8212 [dB]
SF_ref:12	SF_int:10	SIR for BER=0.01: -25.2139 [dB]
SF_ref:12	SF_int:11	SIR for BER=0.01: -25.1402 [dB]
SF_ref:12	SF_int:12	SIR for BER=0.01: -0.821281 [dB]

Slika 5.9. SIR za BER=0,01

- BER 0,01 se doseže uz najveći broj grešaka, odnosno uz najveći broj koraka po 1 dB, u slučajevima kada se SF\_ref i SF\_int podudaraju – od 0,538655 dB (SF6) do 0,821281 dB (SF12).
- SIR (dB) vrijednosti za sve SF\_int (osim one koja se podudara sa SF\_ref) se međusobno približavaju od SF\_ref 6 do SF\_ref 12.
- BER 0,01 se doseže uz najmanje pogrešaka kod SF\_int 12, bez obzira na SF\_ref vrijednost (osim SF\_ref 12) - od 11,1883 dB (SF6) do 23.0133 dB (SF11).

## 6. Zaključak

Cilj simulacije bio je utvrditi vrijednost korištenja ovog alata u svakodnevnoj praksi te mogućnost primjene za provjeru poboljšanja tehnologije i otkrivanje mogućih rješenja za optimizaciju performansi LoRaWAN mreže. Pri svakom pokretanju simulacije referentni okvir moduliran s referentnim faktorom širenja  $SF_{ref}$  je sažet u randomizirani broj interferirajućih simbola moduliran s različitim faktorom širenja  $SF_{int}$ . Tijekom simulacije SIR raste od -30 dB, koracima od 1 dB. Stotine okvira mora biti pogrešno demodulirano za doseganje sljedećeg koraka. Simulacija se završava kada je BER manji od 1%. Simulator generira 8 dijagrama tijekom izvođenja. Prvi prikazuje stope pogreške paketa, simbola i bita (PER, SER i BER) tekućeg eksperimenta. Slike 6.2. do 6.8. su konačne BER krivulje za SF 6 do 12 u odnosu na sve ostale. Simulacije su bazirane na smetnjama interferencije gdje referentni signali ometaju sve interferencijske SF od 6 do 12.

Simulacijom su dobivene najlošije BER performanse kada se referentni i interferentni faktori širenja podudaraju, a sve krivulje imaju gotovo identičan izgled, postotak BER-a se smanjuje pri vrijednosti od oko -8 dB, a BER od 1% se doseže na vrijednosti od oko -1 dB. Krivulja BER-a je strmija za sve  $SF_{inf}$  kako raste vrijednost referentnog SF, isključujući krivulje  $SF_{inf}$  koji se podudara s referentnim. BER od 1% se doseže u području od oko -10 dB ( $SF_6$ ) do -25 dB. Kako raste referentni SF krivulje se sve više podudaraju, uz neočekivano najstrmiju krivulju  $SF_{12inf}$ . Na temelju navedenog zaključujemo da kod iste vrijednosti SF-a interferirajućeg i referentnog signala dolazi do visokog BER-a odnosno gubljenja paketa u prijenosu signala. Ako se isti SF koristi na istom komunikacijskom kanalu, dolazi do veće mogućnosti greške u prijenosu, jer nisu ispunjeni uvjeti ortogonalnosti. To je posebno izraženo kod većih vrijednosti SF-a (npr. za SF 11 i 12), „time on air“ je veći, a time je i mogućnost grešaka veća. U praksi se to događa kada više krajnjih uređaja pokušava istovremeno uspostaviti vezu. Kod različitih vrijednosti SF-a interferirajućeg i referentnog signala ne dolazi do značajnog gubljenja paketa. To je iz razloga što su signali sa drugačijim SF-ovima tzv. kvazi ortogonalni. Do značajnijeg gubitka paketa dolazi jedino kada je razina šuma iznad određenog praga i ona je izraženija kod nižih vrijednosti SF-a. U praksi LoRaWAN podržava automatsku prilagodbu faktora širenja (SF), ovisno o mrežnoj konfiguraciji, takozvanu prilagodljivu brzinu podataka (ADR), čime se može smaniti utjecaj preklapanja.

## LITERATURA

- [1] <http://jultika.oulu.fi/files/nbnfi-fe2019091328070.pdf>, [pristupljeno 23.08.2020]
- [2] <https://www.paessler.com/it-explained/lpwa>, [pristupljeno 08.07.2020]
- [3] W. Meert, B. Reynders and S. Pollin, *Range and coexistence analysis of range long unlicensed communication*, in 2017 24rd International Conference about Telecommunications
- [4] <https://www.ingenu.com/technology/rpma/>, [pristupljeno 08.07.2020]
- [5] [https://www.researchgate.net/figure/Low-Power-WAN-LPWAN-Technologies\\_fig4\\_335608547](https://www.researchgate.net/figure/Low-Power-WAN-LPWAN-Technologies_fig4_335608547), [pristupljeno 09.07.2020]
- [6] <https://en.wikipedia.org/wiki/LTE-M>, [pristupljeno 09.07.2020]
- [7] <https://mreza.bug.hr/ht-uvodi-nb-iot-mrezu-za-internet-stvari/>, [pristupljeno 09.07.2020]
- [8] <https://onworld.com/smartlightinglpwa/index.html>, [pristupljeno 09.07.2020]
- [9] <https://www.link-labs.com/blog/what-is-lorawan>, [pristupljeno 09.07.2020]
- [10] <https://lora-developers.semtech.com/library/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>, [pristupljeno 08.07.2020]
- [11] [https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/images/OSI\\_Stack.png](https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/images/OSI_Stack.png), [pristupljeno 07.07.2020]
- [12] <https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/images/CSS.png>, [pristupljeno 09.07.2020]
- [13] [https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/images/Spreading\\_Factors.png](https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/images/Spreading_Factors.png), [pristupljeno 07.07.2020]
- [14] [https://www.link-labs.com/hs-fs/hubfs/Imported\\_Blog\\_Media/LoRaWAN.png?width=996&height=558&name=LoRaWAN.png](https://www.link-labs.com/hs-fs/hubfs/Imported_Blog_Media/LoRaWAN.png?width=996&height=558&name=LoRaWAN.png), [pristupljeno 09.07.2020]
- [15] [https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/images/Technology\\_stack.png](https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/images/Technology_stack.png), [pristupljeno 09.07.2020]
- [16] <https://www.kerlink.com/wp-content/uploads/2018/01/Schema-970x362.png>, [pristupljeno 09.07.2020]

- [17] <https://www.kerlink.com/iot-portfolio-and-technologies/iot-technologies/lora/>, [pristupljeno 09.07.2020]
- [18] D. Tuyen Ta, K. Khawam, S. Lahoud, C. Adjih, S. Martin (2020.), *LoRa-MAB: A Flexible Simulator for Decentralized Learning Resource Allocation in IoT Networks*, <https://hal.inria.fr/hal-02431653> [pristupljeno 22.08.2020]
- [19] <http://lora.tti.unipa.it/>, [pristupljeno 23.08.2020]
- [20] <https://www.thethingsnetwork.org/article/how-spreading-factor-affects-lorawan-device-battery-life> [pristupljeno 25.08.2020]
- [21] Thomas, A., Eldhose, N.V. (2020) Lorawan Scalability Analysis – Co Spreading Factor Interference, *International Journal of Computer Networks and Communications*, Vol. 12, No 1, pp. 65-81.
- [22] <https://www.networkworld.com/article/3239677/the-osi-model-explained-how-to-understand-and-remember-the-7-layer-network-model.html>, [pristupljeno 06.09.2020]
- [23] <https://searchnetworking.techtarget.com/definition/Application-layer>, [pristupljeno 06.09.2020]
- [24] [https://en.wikipedia.org/wiki/Presentation\\_layer](https://en.wikipedia.org/wiki/Presentation_layer), [pristupljeno 06.09.2020]
- [25] <https://www.includehelp.com/computer-networks/functions-of-session-layer-in-the-osi-model.aspx>, [pristupljeno 07.09.2020]
- [26] <https://www.geeksforgeeks.org/transport-layer-responsibilities/>, [pristupljeno 07.09.2020]
- [27] <https://www.includehelp.com/computer-networks/functions-of-network-layer-in-the-osi-model.aspx>, [pristupljeno 07.09.2020]
- [28] <https://www.techopedia.com/definition/8866/physical-layer>, [pristupljeno 08.09.2020]
- [29] <http://www.techplayon.com/lora-long-range-network-architecture-protocol-architecture-and-frame-formats/>, [pristupljeno 08.09.2020]
- [30] <https://www.includehelp.com/computer-networks/functions-of-physical-layer-in-the-osi-model.aspx>, [pristupljeno 08.09.2020]

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. LPWAN tehnologije .....	5
Slika 3.1. OSI seven-layer Network Model .....	10
Slika 3.2. Ilustracija spektra za širenje LoRa Chirp .....	11
Slika 3.3. Sloj sesije .....	14
Slika 3.4. Mrežni sloj .....	16
Slika 3.5. Fizički sloj .....	19
Slika 3.6. LoRa faktori širenja .....	21
Slika 4.1. LoRaWAN – način rada .....	23
Slika 4.2. LoRaWAN tehnološki „stack“ .....	24
Slika 4.3. Infrastruktura LoRaWAN mreže i sustav operativne potpore (OSS) .....	25
Slika 4.4. Prednosti korištenja LoRaWAN mreže .....	27
Slika 5.1. Referentni graf za SF6/SF6inf .....	32
Slika 5.2. Bit Error Rate (BER) u slučaju kada paket SF6 interferira s SF6 do SF12 .....	34
Slika 5.3. Bit Error Rate (BER) u slučaju kada paket SF7 interferira s SF6 do SF12 .....	35
Slika 5.4. Bit Error Rate (BER) u slučaju kada paket SF8 interferira s SF6 do SF12 .....	35
Slika 5.5. Bit Error Rate (BER) u slučaju kada paket SF9 interferira s SF6 do SF12 .....	36
Slika 5.6. Bit Error Rate (BER) u slučaju kada paket SF10 interferira s SF6 do SF12 ...	36
Slika 5.7. Bit Error Rate (BER) u slučaju kada paket SF11 interferira s SF6 do SF12 ...	36
Slika 5.8. Bit Error Rate (BER) u slučaju kada paket SF12 interferira s SF6 do SF12 ...	37
Slika 5.9. SIR za BER=0,01 .....	38

MATLAB skripta je preuzeta s <http://lora.tti.unipa.it> (TTIlab - University of Palermo) i modificirana za potrebe simulacije fizičkog sloja LoRaWAN mreže.

```

% stopa kodiranja CR=1...4 za stopu 4/(4+CR)
CR = 3;
% simulirani bitovi za svaku petlju (zaokružuje se na cijeli broj
% prepletenih blokova)
N_bits_raw = 160;
N_bits = zeros(1,12);
for SF = 6:12
N_bits(SF) = ceil(N_bits_raw/(4*SF))*(4*SF);
end

% širina pojasa signala
BW = 125e3;

% faktor preuzorkovanja
OSF = 8;

% minimum and maksimum SINR-a za simulaciju
SINR_dB_min = -30;
SINR_dB_max = 5;
SINR_dB_step = 1;
SINR_dB = SINR_dB_min:SINR_dB_step:SINR_dB_max;

% ciljani BER i P(e) parametri procjene
BER_target = 0.01;
Pe_target = 0.01;
rx_errors_threshold = 100;
max_trials = 30000;
seconds_budget = 7200;

% minimum and maksimum SF i SF_int
SF_min = 6;
SF_max = 12;
SF_int_min = 6;
SF_int_max = 12;

% ispis parametara simulacije
fprintf('N_bits(raw): %d',N_bits_raw);
fprintf(' %d',N_bits(SF_min:SF_max));
fprintf(' CR: %d\nBW: %gkHz OSF: %d\n',...
CR,BW*1e-3,OSF);

fig = zeros(1,2+SF_max-SF_min);
fig(1) = figure(1);
% fig(2) = figure(2);
for SF=SF_min:SF_max
fig(2+SF-SF_min) = figure(2+SF-SF_min);
end
fig2_update_delay=5;

% petlje preko željenih faktora širenja
for SF = SF_min:SF_max

% izgraditi bazani „unchrip“
mu = +1;
fc = 0;

```



```

phi0 = 2*pi*rand;
c = lora_chirp(fc, mu, BW, SF, 0, 0, OSF);
% c(1+k,:) = conj(exp(1i*phi0)*c(1,1+k*OSF))*c(1,1+mod(-k*OSF+(0:2^SF*
OSF-1),2^SF*OSF));

% dec2bin tablica pretraživanja
de2bi_SF = dec2bin(0:2^SF-1) - '0';

% zaokružiti na cijeli broj prepletenih blokova
N_bits = ceil(N_bits_raw/(4*SF))*(4*SF);
% sivo mapiranje LUT
x = de2bi_SF;
bin2dec_SF = 2.^(SF-1:-1:0).';
g = mod(x+[zeros(2^SF,1),x(:,1:end-1)],2)*bin2dec_SF;
ig = zeros(2^SF,1);
ig(1+g) = 0:2^SF-1;

switch CR
case 1
% jednostavna provjera pariteta
P = ones(4,1);
G = [eye(4),P];
H = [P;1];
case 2
% skraćeni Hamming
temp = dec2bin(0:7) - '0';
P = temp(sum(temp,2)>=2,:);
P = P(:,[1 2]);
G = [eye(4),P];
H = [P;eye(2)];
case 3
% Hamming(7,4)
temp = dec2bin(0:7) - '0';
P = temp(sum(temp,2)>=2,:);
G = [eye(4),P];
H = [P;eye(3)];
case 4
% prošireni Hamming(8,4)
temp = dec2bin(0:7) - '0';
P = temp(sum(temp,2)>=2,:);
P = [P,mod(1+sum(P,2),2)];
G = [eye(4),P];
H = [P;eye(4)];
end

% coset leaders LUT
cl = zeros(2^CR,4+CR);
cl_found = zeros(2^CR-1,1);
for i = 1:4+CR
syn = H(i,:) * (2.^(CR-1:-1:0).');
if ~cl_found(syn)
cl(syn,i)=1;
cl_found(syn) = 1;
else
cl_found(syn) = 2;
end
end
if any(cl_found==0)
for i1 = 1:4+CR-1
for i2 = i1+1:4+CR
syn = mod(H(i1,:)+H(i2,:),2) * (2.^(CR-1:-1:0).');
if ~cl_found(syn)
cl(syn,[i1,i2])=1;
cl_found(syn) = 1;
else
cl_found(syn) = 2;
end
end
end

```

```

end
end
end
end

% petlja preko interferirajućeg signala SF_int
for SF_int = SF_int_min:SF_int_max
    BW_int = 125e3;

    % faktor preuzorkovanja
    OSF_int = OSF*BW/BW_int;

    % bazni „upchirp“
    mu = +1;
    fc_int = 0;
    phi0_int = 2*pi*rand;
    c_int = lora_chirp(fc_int, mu, BW_int, SF_int, 0, phi0_int, OSF_int);

    % izraditi grafikon
    x_axis = zeros(1,numel(SINR_dB));
    y_axis_Pe = zeros(1,numel(SINR_dB));
    y_axis_SER = zeros(1,numel(SINR_dB));
    y_axis_BER = zeros(1,numel(SINR_dB));

    % SINR petlja
    SINR_idx = 1;
    seconds=0;tic;
    fig2_last_update=-1;
    while SINR_idx<=numel(SINR_dB) && seconds+toc<=seconds_budget

        % SINR omjer amplitude
        alpha = sqrt(10^(-SINR_dB(SINR_idx)/10));

        rx_errors_tot = 0;
        sym_errors_tot = 0;
        bit_errors_tot = 0;
        trials = 0;

        while rx_errors_tot < rx_errors_threshold ...
            && seconds+toc<seconds_budget && trials<max_trials

                rx_errors_tot

            % slučajni izvor
            bits = floor(2*rand(1,N_bits));

            % Hamming kodiranje
            N_codewords = N_bits/4;
            N_codedbits = N_codewords*(4+CR);
            C = zeros(N_codewords,4+CR);
            for i = 1:N_codewords
                C(i,:) = mod(bits((i-1)*4+(1:4))*G,2);
            end

            % preplitanje (iz LoRa PHY patenta)
            interleaver_size = (4+CR)*SF;
            N_blocks = N_codedbits/interleaver_size;
            N_syms = N_codedbits/SF;
            S = zeros(N_syms,SF);
            for i = 0:N_blocks-1
                for k = 0:4+CR-1
                    for m = 0:SF-1
                        S(1+(4+CR)*i+k,1+m) = ...
                            C(1+SF*i+mod(m-k,SF),1+k);
                    end
                end
            end
        end
    end
end
end

```

```

% broj uzoraka za chrip
sym_len = 2^SF*OSF;

% „chirped“ modulacija spektra signala
Ns = N_syms*sym_len;
s = zeros(1,Ns);
for sym = 1:N_syms
    % (inverse) Gray mapping
    k = ig(1+S(sym,:)*bin2dec_SF);
    s((sym-1)*sym_len+(1:sym_len)) = ...
        conj(exp(1i*phi0)*c(1+k*OSF))*...
        c(1+mod(-k*OSF+(0:2^SF*OSF-1),2^SF*OSF));
end

% interferirajući signal
sym_len_int = 2^SF_int*OSF_int;
N_syms_int = ceil(sym_len*N_syms/sym_len_int);
N_bits_int = N_syms_int*SF_int;
bits_int = floor(2*rand(1,N_bits_int));
s_int = zeros(1,Ns);
for sym = 1:N_syms_int
    k = 2^(0:SF_int-1)*bits_int((sym-1)*SF_int+(1:SF_int))';
    s_int((sym-1)*sym_len_int+(1:sym_len_int)) = ...
        conj(exp(1i*phi0_int)*c_int(1+k*OSF_int))*...
        c_int(1+mod(-k*OSF_int+(0:2^SF_int*OSF_int-1),2^SF_int*OSF_int));
end

% dodaj interferirajući signal sa slučajnim iznosom pomaka vremena
r = s + alpha * ...
    s_int(1+mod((0:Ns-1)+floor(sym_len_int*rand),Ns));

% demodulacija bazirana na fft (pretpostavlja perfektu
% sinhronizaciju)
S_est = zeros(N_syms,SF);
down_chirp = lora_chirp(fc, -1, BW, SF, 0, 0, OSF);
for sym = 1:N_syms
    temp = down_chirp.*r((sym-1)*sym_len+(1:sym_len));
    z = ifft(temp(1:OSF:end));
    [max1,pos] = max(abs(z));

    if toc-fig2_last_update>fig2_update_delay
% set(0,'CurrentFigure',fig(2))
% plot(abs(fftshift(fft(temp))))
% nacrtaj
        fig2_last_update=toc;
        end

        S_est(sym,:) = de2bi_SF(1+g(pos),:);
    end

% isprepletanje
C_est = zeros(N_codewords,4+CR);
for i = 0:N_blocks-1
    for k = 0:4+CR-1
        for m = 0:SF-1
            C_est(1+SF*i+mod(m-k,SF),1+k) = ...
                S_est(1+(4+CR)*i+k,1+m);
        end
    end
end

% Hamming dekoder
bits_est = zeros(1,N_bits);
for i = 1:N_codewords
    temp = C_est(i,:);
    if CR>2

```

```

    syn = mod(temp*H,2)*(2.^(CR-1:-1:0)');
    if syn~=0 && c1_found(syn)==1
        temp = mod(temp+c1(syn,:),2);
    end
end
bits_est((i-1)*4+(1:4)) = temp(1:4);
end

    trials = trials + 1;

sym_err = sum(S~=S_est,2);
sym_errors = sum(sym_err~=0);

bit_errors = sum(bits(:) ~= bits_est(:));

if bit_errors
    rx_errors_tot = rx_errors_tot + 1;
    sym_errors_tot = sym_errors_tot + sym_errors;
    bit_errors_tot = bit_errors_tot + bit_errors;
end
end

Pe = rx_errors_tot/trials;
SER = sym_errors_tot/(trials*N_syms);
BER = bit_errors_tot/(trials*N_bits);
x_axis(SINR_idx) = SINR_dB(SINR_idx);
y_axis_Pe(SINR_idx) = Pe;
y_axis_SER(SINR_idx) = SER;
y_axis_BER(SINR_idx) = BER;

        rx_errors_tot
        Pe

% fprintf('SINR: %g [dB] P(e): %g SER: %g BER: %g (trials:%g)\n',...
% SINR_dB(SINR_idx),Pe,SER,BER,trials)

set(0,'CurrentFigure',fig(1));
hold off
semilogy(x_axis,y_axis_Pe);
hold on
semilogy(x_axis,y_axis_SER);
semilogy(x_axis,y_axis_BER);
grid on
set(gca,'XLim',[SINR_dB_min,SINR_dB_max])
xlabel('SINR [dB]');
ylabel('Packet, Symbol, Bit Error Rates');
        legend('PER','SER','BER','Location','Best');
drawnow

SINR_idx = SINR_idx+1;
seconds=seconds+toc;toc;
fig2_last_update = -1;
if BER <= BER_target
    seconds = seconds_budget;
end
end

set(0,'CurrentFigure',fig(2+SF-SF_min));
if SF_int==SF_int_min
    hold off
end
semilogy(x_axis,y_axis_BER);
set(gca,'XLim',[SINR_dB_min,SINR_dB_max])
hold on
grid on
for i = 1:SINR_idx
    if y_axis_BER(i)>BER_target && y_axis_BER(i+1)<BER_target

```

```

fprintf('SF_ref:%d SF_int:%d SIR for BER=%g: %g [dB]\n',...
SF,SF_int,BER_target,x_axis(i)+(x_axis(i+1)-x_axis(i)) ...
/(log10(y_axis_BER(i+1))-log10(y_axis_BER(i))) ...
*(log10(BER_target)-log10(y_axis_BER(i))));
end
end
end

xlabel(['SIR (SF=',num2str(SF),')']);
ylabel('Bit Error Rate')
l_entries = cell(1,SF_int_max-SF_int_min+1);
for SF_int = SF_int_min:SF_int_max
l_entries{SF_int-SF_int_min+1} = ['SF_{int}=',num2str(SF_int)];
end
legend(l_entries)
ylim([BER_target,1])
end
end
function [ s, t ] = lora_chirp(fc, mu, BW, SF, k, phi0, OSF)
N = 2^SF*OSF;
fs = BW*OSF;
Ts = 1/fs;
T = N*Ts;
t = (-N/2:N/2-1)*Ts;
k = floor(k);
phi=zeros(1,N);
t1 = t(1:k*OSF);
t2 = t((k*OSF+1):N);
if k>0
phi(1:k*OSF) = -k*mu/2+3*BW*T*mu/8+BW*mu*t1-k*mu*t1/T+BW*mu*t1.^2/(2*T);
end
phi((k*OSF+1):N) = +k*mu/2-BW*T*mu/8-k*mu*t2/T+BW*mu*t2.^2/(2*T);
s=exp(1i*(phi0+2*pi*phi));
t = t+T/2;
end

```