

Usporedba LoRaWAN, Sigfox i NB-IoT bežičnih senzorskih mreža

Radičević, Dora

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:830369>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI
Vukelićeva 4, Zagreb

Dora Radičević

**USPOREDBA LORAWAN, SIGFOX I NB-IOT BEŽIČNIH
SENZORSKIH MREŽA**

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2020.

Zagreb, 10. ožujka 2020.

Zavod: **Zavod za informacijsko komunikacijski promet**
Predmet: **Računalne mreže**

ZAVRŠNI ZADATAK br. 5514

Pristupnik: **Dora Radičević (0135247529)**
Studij: **Promet**
Smjer: **Informacijsko-komunikacijski promet**

Zadatak: **Usporedba LoRaWAN, Sigfox i NB-IoT bežičnih senzorskih mreža**

Opis zadatka:

Opisati koncept Internet stvari (engl. Internet of Things, IoT) na temelju njihovih značajki, arhitekture, tehnologije i dr. Analizirati značajke bežičnih mreža LoRaWAN, Sigfox i NB-IoT. Provesti usporedbu bežičnih mreža LoRaWAN, Sigfox i NB-IoT na temelju različitih čimbenika (primjerice mreže, sigurnosti, primjene i dr.).

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

doc. dr. sc. Ivan Grgurević

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
Vukelićeva 4, Zagreb

ZAVRŠNI RAD

**USPOREDBA LORAWAN, SIGFOX I NB-IOT BEŽIČNIH
SENZORSKIH MREŽA**

**COMPARISON OF LORAWAN, SIGFOX AND NB-IOT
WIRELESS SENSOR NETWORKS**

Mentor:

doc. dr. sc. Ivan Grgurević

Student:

Dora Radičević

JMBAG: 0135247529

Zagreb, srpanj 2020.

SAŽETAK

Internet stvari (engl. *Internet of Things* - IoT) pruža jednostavna rješenja za povezivanje objekata s Internetom i jedan je od najbrže rastućih aspekata informacijskih i komunikacijskih tehnologija. Nagli razvoj IoT-a dovodi do pojave mreža širokog područja male snage (engl. *Low Power Wide Area Network* - LPWAN), s obzirom da postojeći protokoli nisu zadovoljavali potrebama IoT-a u pogledu pokrivenosti, potrošnje energije i cijene. LoRaWAN, Sigfox i NB-IoT bežične senzorske mreže vodeće su LPWAN mreže na IoT tržištu koje pružaju učinkovita rješenja za prijenos male količine podataka na velike udaljenosti uz nisku potrošnju energije. U radu su navedene i opisane sve bitne značajke pojedine mreže, a usporedba je provedena na temelju ključnih IoT čimbenika koji određuju njihovu izvedivost u različitim slučajevima primjene. Također, razmatrano je nekoliko slučajeva upotrebe te je objašnjeno koja mreža najučinkovitije odgovara traženim zahtjevima pojedine IoT aplikacije.

KLJUČNE RIJEČI: Internet stvari; LoRa; LoRaWAN; Sigfox; NB-IoT

SUMMARY

Internet of Things (IoT) offers simple solutions for connecting devices to the Internet and is one of the fastest growing aspects of information and communication technologies. The rapid development of IoT introduced us to Low Power Wide Area Networks (LPWAN), given that the existing protocols did not satisfy the needs of IoT in terms of coverage, energy consumption and price. LoRaWAN, Sigfox and NB-IoT wireless sensor networks are currently the leading LPWAN networks on the IoT market that offer effective solutions for transmitting small amounts of data over great distances all the while consuming small amounts of energy. This paper lists and explains all the important features of each individual network type, and their comparison was conducted based upon key IoT factors which determine the networks applicability in different applications. Furthermore, a few application use cases were pondered and the paper explains in detail which network type best suits the individual requirements of any given IoT application.

KEYWORDS: Internet of things; Lora; LoRaWAN; Sigfox; NB-IoT

Sadržaj

| | |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Uvod | 1 |
| 2. Koncept <i>Internet of Things</i> (IoT) mreža | 3 |
| 2.1. Definicija i zastupljenost IoT-a..... | 3 |
| 2.2. Arhitektura IoT sustava | 5 |
| 2.3. IoT komunikacijske tehnologije | 8 |
| 2.3.1. Bežične tehnologije kratkog dometa | 9 |
| 2.3.2. Mobilne tehnologije..... | 11 |
| 2.3.3. Tehnologije mreža širokog područja male snage (LPWAN) | 12 |
| 2.4. IoT aplikacije | 14 |
| 3. Značajke LoRaWAN bežičnih mreža | 15 |
| 3.1. LoRa fizički sloj | 16 |
| 3.1.1. Chirp Spread Spectrum modulacija | 16 |
| 3.1.2. Parametri fizičkog sloja i LoRaWAN konfiguracija | 18 |
| 3.1.3. Format fizičkog LoRa okvira | 20 |
| 3.2. LoRaWAN komunikacijski protokol | 21 |
| 3.3. Format LoRaWAN okvira | 22 |
| 3.4. Arhitektura LoRaWAN mreže | 23 |
| 3.5. Sigurnost LoRaWAN mreže | 25 |
| 4. Značajke Sigfox bežičnih mreža | 26 |
| 4.1. Modulacija i prijenos podataka | 27 |
| 4.2. Format Sigfox okvira | 29 |
| 4.3. Arhitektura Sigfox mreže | 30 |
| 4.4. Sigurnost Sigfox mreže | 32 |
| 5. Značajke NB – IoT bežičnih mreža | 33 |
| 5.1. Modulacija i načini rada..... | 33 |
| 5.2. Format NB – IoT okvira | 35 |
| 5.3. Arhitektura NB – IoT mreže..... | 37 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.4. Sigurnost NB-IoT mreže..... | 39 |
| 6. Usporedba LoRaWAN, Sigfox i NB – IoT bežičnih mreža | 41 |
| 6.1. Tehnološka usporedba..... | 42 |
| 6.2. Kvaliteta usluge – QoS..... | 43 |
| 6.3. Područje pokrivenosti..... | 44 |
| 6.4. Vijek trajanja baterije i kašnjenje | 46 |
| 6.5. Skalabilnost i duljina poruke..... | 48 |
| 6.6. Domet u urbanim i ruralnim područjima | 48 |
| 6.7. Cijena IoT mreže..... | 49 |
| 6.8. Poslovni model..... | 50 |
| 7. Primjena LoRaWAN, Sigfox i NB – IoT bežičnih mreža na temelju uspješnosti IoT čimbenika | 52 |
| 7.1. Pametna poljoprivreda | 52 |
| 7.2. Pametno mjerenje električne energije | 53 |
| 7.3. Pametna zgrada..... | 54 |
| 7.4. Pametna ulična rasvjeta | 55 |
| 7.5. Pametna logistika..... | 56 |
| 8. Zaključak | 58 |
| Literatura | 60 |
| Popis kratica | 63 |
| Popis slika | 66 |
| Popis tablica | 67 |
| Popis grafikona..... | 67 |

1. Uvod

Razvoj Interneta pridonio je promjeni svakodnevnih navika čovjeka i unaprijedio načine funkcioniranja u poslovanju. Izradio je temelje raznim aspektima informacijske i komunikacijske tehnologije (engl. *Information and communications technology* - ICT), a jedan od najznačajnijih je Internet stvari (engl. *Internet of Things* - IoT). IoT omogućuje povezivanje i razmjenu podataka između raznih objekata poput prozora, rasvjete ili hladnjaka, te ih time čini „pametnima“. Razne IoT aplikacije imaju specifične zahtjeve poput dugog doseg, niske brzine prijenosa podataka, niske potrošnje energije i isplativosti. Kako bi se udovoljilo tim zahtjevima koriste se LPWAN tehnologije LoRa, Sigfox, i NB-IoT koje uključuju brojne tehničke razlike.

LoRa, Sigfox i NB-IoT su tehnologije pogodne za IoT rješenja u situacijama gdje Internet i struja nisu lako dostupni. Da bi se postigla niska potrošnja energije, uređaji rade na baterije, a mreže su dizajnirane za rješenja koja ne zahtijevaju preciznost i visoku dostupnost. Uređaji periodički šalju male količine podataka, bez potrebe za konstantnom komunikacijom s Internetom. Ove vrste mreže oduhvaćaju veliki raspon slučajeva upotrebe. Međutim, jedna tehnologija ne može podjednako zadovoljavati tražene parametre u svim IoT aplikacijama. Svrha završnog rada je pružiti uvid u značajke i način rada LoRaWAN, Sigfox i NB-IoT mreža te odrediti područje primjene pojedine mreže ovisno o uspješnosti IoT čimbenika. Cilj završnog rada je analizirati i međusobno usporediti LoRaWAN, Sigfox i NB-IoT bežične mreže na temelju ključnih IoT čimbenika. Rad je podijeljen u osam cjelina:

- 1) Uvod
- 2) Koncept Internet of Things (IoT) mreža
- 3) Značajke LoRaWAN bežičnih mreža
- 4) Značajke Sigfox bežičnih mreža
- 5) Značajke NB-IoT bežičnih mreža
- 6) Usporedba LoRaWAN, Sigfox i NB – IoT bežičnih mreža
- 7) Primjena LoRaWAN, Sigfox i NB – IoT bežičnih mreža na temelju uspješnosti IoT čimbenika
- 8) Zaključak

U uvodu je opisana svrha i cilj te koncept završnog rada. U drugom poglavlju opisan je koncept, definicija i zastupljenost IoT-a. Prikazana je arhitektura IoT sustava te su navedene i opisane vrste IoT tehnologija kojima je omogućeno prikupljanje, transport i razmjena podataka. Također, definiran je pojam IoT aplikacija i grafički je prikazan udio IoT projekata u različitim segmentima.

Trećim poglavljem je definiran i opisan pojam LoRa fizičkog sloja s pripadajućim parametrima i formatom okvira poruke. Detaljno su opisane značajke LoRaWAN bežične mreže, uključujući format LoRaWAN okvira, sigurnost i arhitekturu mreže.

Značajke Sigfox bežične mreže opisane su u četvrtom poglavlju. Objašnjen je proces prijenosa podataka putem Sigfox mreže te je opisana arhitektura, sigurnosni ekosustav i format okvira iste.

U petom poglavlju detaljno je opisan način rada, arhitektura i sigurnost NB-IoT mreže. Također, prikazan je i objašnjen format NB-IoT okvira za silaznu i uzlaznu vezu.

U šestom poglavlju provedena je usporedba značajki LoRaWAN, Sigfox i NB-IoT bežičnih mreža na temelju IoT čimbenika kao što su tehnički parametri, kvaliteta usluge, područje pokrivenosti, vijek trajanja baterije itd.

U sedmom poglavlju razmatrano je nekoliko slučajeva upotrebe poput pametne poljoprivrede, pametne zgrade i pametne logistike s ciljem odabira najpogodnije mreže koja će odgovoriti na postavljene zahtjeve pojedine aplikacije.

U osmom poglavlju, *Zaključku*, sintetizirane su sve informacije prikupljene i obrađene tijekom istraživanja teme i izrade završnog rada.

Na kraju rada, nalazi se *Literatura* koja daje uvid u sve knjige, članke, studije i analitike te internetske stranice korištene pri izradi završnog rada.

2. Koncept *Internet of Things* (IoT) mreža

IoT je koncept koji podrazumijeva spajanje bilo kojeg uređaja na Internet i/ili povezivanje s drugim uređajima. Ilustrativno se može zamisliti kao divovska mreža koja uključuje milijardu uređaja koji prikupljaju i međusobno razmjenjuju informacije. Ovakvi uređaji imaju novu razinu digitalne inteligencije koja im omogućuje komuniciranje i razmjenu podataka u realnom vremenu bez ljudske uključenosti u tu komunikaciju. [1]

2.1. Definicija i zastupljenost IoT-a

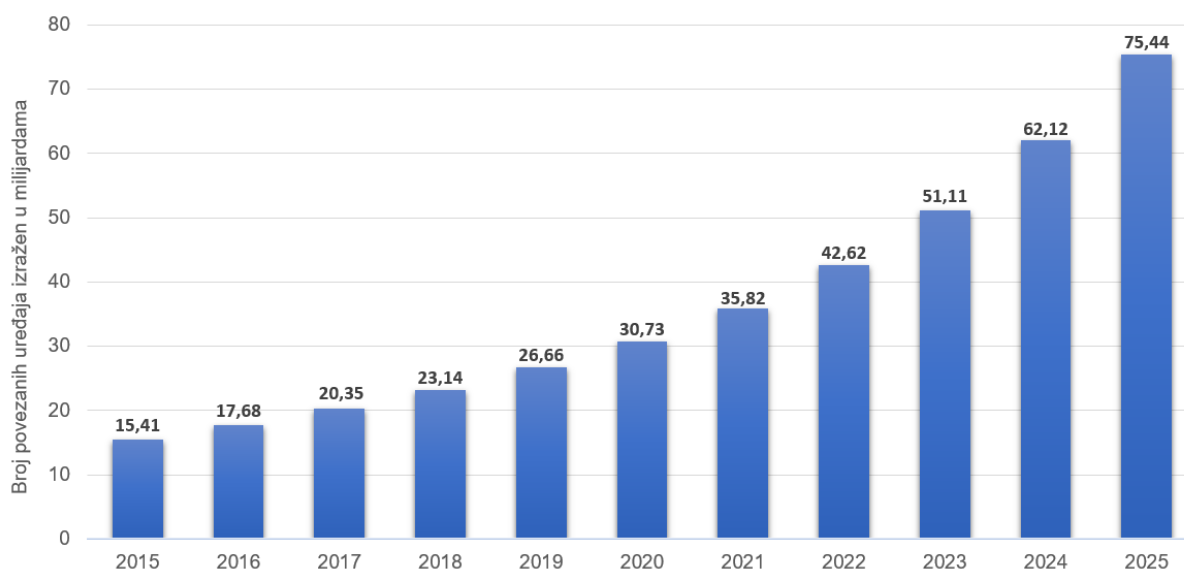
IoT se smatra jednim od glavnih trendova koji u cjelini oblikuju razvoj tehnologija u sektoru ICT-a. [2] Sam pojam Internet stvari je veoma širok i složen te danas postoje mnoge definicije kojima se opisuje. Naime, IoT je najčešće opisan kao globalna mreža međusobno povezanih pametnih uređaja koji pružaju mogućnost međusobne komunikacije i komunikacije s okolinom, razmjenjujući podatke koji se prikupljaju iz okruženja. Pokretanje procesa na reakcije uzrokovane stanjem okruženja mogu biti realizirane s ili bez direktnog djelovanja čovjeka. Također, smatra se sastavnim dijelom budućeg Interneta, uključujući postojeći i nadolazeći razvoj Interneta i mreže. Konceptualno bi mogao biti definiran kao dinamična globalna mrežna infrastruktura sa samo konfigurirajućim mogućnostima na temelju standardnih i interoperabilnih komunikacijskih protokola gdje fizičke i virtualne "stvari" imaju identitete, fizičke atribute i virtualne osobnosti, a koriste inteligentna sučelja i besprijekorno su integrirani u informacijsku mrežu. [3]

Pomoću IoT-a, usluge mogu komunicirati s objektima koristeći standardna sučelja koja osiguravaju potrebnu vezu kako bi mogli mijenjati njihovo stanje i dohvatiti sve potrebne informacije, pritom uzimajući u obzir pitanja sigurnosti i privatnosti. Uređaji obično imaju softver i ugrađene senzore koji omogućuju prikupljanje i razmjenu podataka putem Interneta te se mogu kontrolirati na daljinu, što dovodi do ekonomske koristi i veće učinkovitosti za korisnike.

Sa konceptualnog stajališta, IoT mreža se gradi na tri temeljne karakteristike povezane sa sposobnošću pametnih objekata:

- 1) Prepoznatljivost (bilo što da se može identificirati)
- 2) Komunikacija (bilo što da može komunicirati)
- 3) Integracija (bilo što da se može integrirati).

Navedene karakteristike IoT sustav može provoditi gradeći mreže međusobnih objekata, s krajnjim korisnicima ili drugim subjektima u mreži. [2] Sve više organizacija i vlada smatra digitalnu transformaciju prioritetom, a time se ujedno povećava i usvajanje IoT tehnologije. Donja statistika prikazuje kontinuirani prodor IoT tehnologije, odnosno broj uređaja povezanih na Internet izražen u milijardama ovisno o prethodnim godinama, kao i predviđani broj uređaja koji će biti povezani na Internet u godinama koje slijede. [4]



Grafikon 1. Zastupljenost IoT uređaja tijekom godina

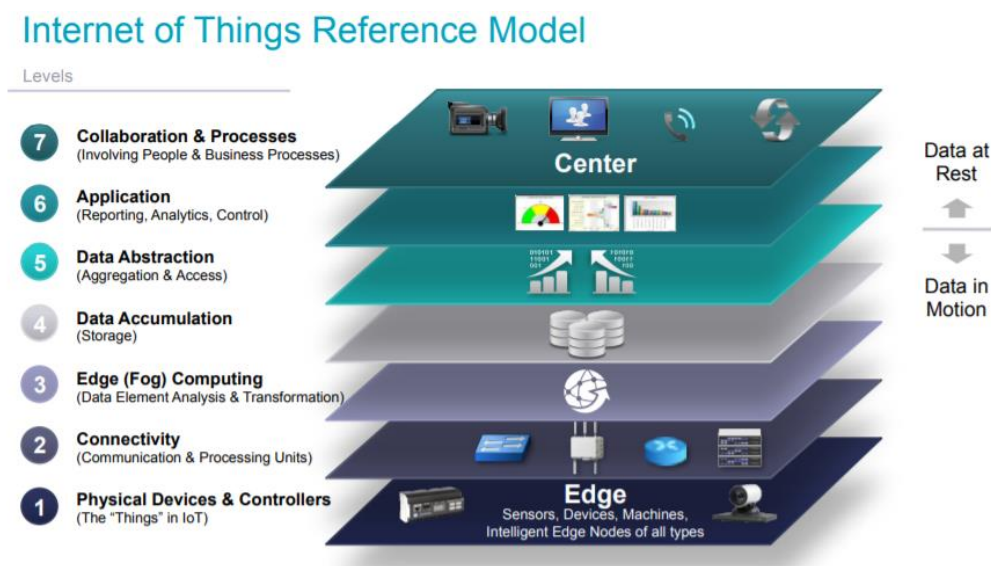
Izvor: [7]

Iz grafikona 1 je vidljivo kako je već 2015. godine broj IoT uređaja iznosio 15.41 milijardi, što je daleko više od broja stanovnika na planeti Zemlji. Broj IoT uređaja kontinuirano raste, a zanimljiva je činjenica da se svake sekunde 127 novih uređaja poveže na Internet. Tijekom 2020. godine stručnjaci procjenjuju instalaciju skoro 31 milijarde IoT uređaja, dok će kroz slijedećih pet godina ta brojka značajno rasti.

Naime, predviđa se da će ukupna instalirana baza uređaja povezanih s Internetom do 2025. godine iznositi 75,44 milijardi širom svijeta, što je petostruko povećanje u deset godina. [5]

2.2. Arhitektura IoT sustava

IoT arhitektura sastoji se od mnogih elemenata poput senzora, protokola, aktuatora ili pokretača, usluga u oblaku i raznih slojeva. Također se naziva i modelom ravnomjernog pokretanja. Prilikom izrede arhitekture za IoT mrežu potrebno je osigurati pouzdanu komunikaciju, dobivanje određene vrste podataka na željenoj razini točnosti te određenu razinu sigurnosti i privatnosti. Trenutno ne postoji jedinstven konsenzus o arhitekturi za IoT koji je univerzalno dogovoren. Stoga su različite arhitekture predložene od strane različitih informatičkih stručnjaka. Na slici 1 prikazan je referentni model prema kojem je moguće izraditi IoT sustav koji se temelji na M2M (engl. *Machine to Machine*) komunikaciji. M2M je komunikacijska paradigma koja omogućava povezivanje i komunikaciju između uređaja putem mreže. Uređaji u M2M domeni obično šalju ili primaju fiksnu količinu podataka u fiksnom vremenskom intervalu. [6]



Slika 1. IoT referentni model, [8]

Prvi sloj referentnog modela čine fizički uređaji i kontroleri. Najčešće se sastoji od senzora podataka u različitim oblicima poput RFID (engl. *Radio-Frequency Identification*) oznake, infracrvenih senzora ili drugih senzorskih mreža koje bi se mogle koristiti za osjet temperature, vlage, brzine ili položaja objekata. Ovaj sloj prikuplja korisne informacije o objektima iz senzorskih uređaja koji su povezani s njima i pretvaraju informacije u digitalne signale, a zatim ih prosljeđuju na sljedeći sloj radi daljnjeg djelovanja. [7]

Komunikacija i povezanost omogućeni su drugim slojem. Odgovoran je za pouzdan i pravovremen prijenos informacija. To uključuje prijenose između uređaja i mreže, prijenose putem mreže te prijenose podataka između više mreža. [8] Svrha ovog sloja je da primi korisne informacije u obliku digitalnih signala iz prvog sloja i prenese ih na sustave za obradu u trećem sloju pomoću tehnologija kao što su WiFi, Bluetooth, WiMaX, Zigbee, GSM (engl. *Global System for Mobile Communications*) itd.

Treći sloj je poznat kao sloj za obradu. Zadatak ovog sloja je da analizira i obrađuje ogromne količine podataka primljenih od senzorskih uređaja. Uključuje tehnologije poput računalstva u oblaku¹ i sveprisutna računalstva koja osiguravaju izravan pristup bazi podataka kako bi se u nju pohranili svi potrebni podaci. Pomoću inteligentne opreme za obradu, informacije se obrađuju i na temelju obrađenih rezultata informacija poduzima se potpuno automatizirana radnja. [7] Osnovno načelo IoT referentnog modela zahtijeva da najinteligentniji sustav pokreće obradu podataka što prije i što bliže rubu mreže, a to omogućuje jedinstveni koncept *Fog Computing*. Njegova zadaća je pretvorba protokola, usmjeravanje do softverskih funkcija višeg sloja i rukovanje kriptiranim podacima. Također je zadužen za procjenu podataka, odnosno za odluku da li se podaci preusmjeravaju na neko dodatno odredište ili se prosljeđuju dalje na obradu. [8]

Četvrti sloj zadužen je za akumulaciju podataka te se na njemu određuje potreba za daljnjom obradom podataka na višim slojevima. S obzirom na brzinu, volumen i raznolikost koje IoT sustavi mogu pružiti, ključno je osigurati pohranu dolaznih podataka za naknadnu obradu, normalizaciju, integraciju i pripremu za više razine.

¹ Računalstvo u oblaku (engl. *Cloud computing*) predstavlja dostupnost resursa računalnog sustava na zahtjev poput pohrane podataka bez izravnog upravljanja od strane korisnika.

Stoga se na ovom sloju određuje trebaju li podaci biti pohranjeni za stalno ili se radi o podacima koji trebaju biti sačuvani samo privremeno. Ovaj sloj može biti implementiran u jednostavnom SQL-u (engl. *Structured Query Language*) ili može zahtijevati sofisticiranije sustave poput *Hadoop & Hadoop, Mongo, Cassandra, Spark* ili druga NoSQL rješenja.

Funkcije apstrakcije podataka na petom sloju usmjerene su na prikazivanje podataka i njihovo pohranjivanje na načine koji omogućuju razvoj jednostavnijih aplikacija poboljšanih performansi. Zbog velikog broja uređaja koji generiraju podatke, nije ih moguće smjestiti u istu bazu podataka. Iz tog razloga, razina apstrakcije podataka ima mnoge zadaće koje uključuju: usklađivanje više formata podataka iz različitih izvora, osiguravanje dosljedne semantike podataka između izvora, potvrda da su podaci potpuni, zaštita podataka odgovarajućom provjerom autentičnosti i autorizacije i slično. [8]

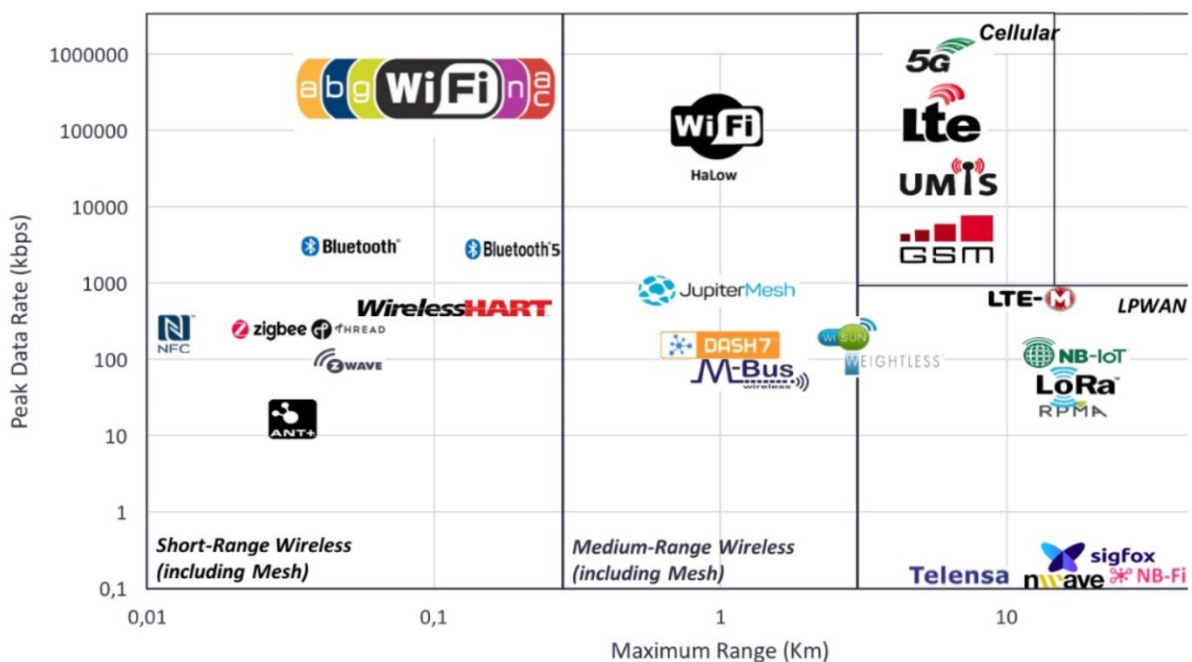
Aplikacijski sloj je šesti sloj modela, a odgovoran je za isporuku specifičnih aplikacijskih usluga korisniku. On na temelju obrađenih podataka, realizira primjene IoT-a za sve vrste industrija. Praćenje i optimizacija procesa, upravljanje alarmima, statistička analiza, logika upravljanja, logistika, mjerenje tlaka samo su neki primjeri IoT aplikacija. Takve aplikacije mogu bi biti realizirane kao pametni domovi, pametni automobili, pametni gradovi itd.

Sedmi sloj naziva se slojem suradnje i procesa, a upravlja cijelim IoT sustavom, uključujući aplikacije, poslovne i profitne modele kao i privatnost korisnika. Odgovoran je za sva istraživanja povezana s IoT-om i generira drugačije poslovne modele za učinkovite poslovne strategije. [7]

2.3. IoT komunikacijske tehnologije

IoT komunikacijske tehnologije pružaju mrežnu infrastrukturu i komunikacijske mogućnosti koje su potrebne IoT uređajima za prikupljanje, transport i razmjenu podataka putem Interneta. Također omogućavaju i njihovo daljinsko nadziranje i kontroliranje. IoT komunikacijske tehnologije pokrivaju niz tehnologija implementiranih u IoT projekte i rješenja, uključujući:

- 1) Bežične tehnologije kratkog dometa
- 2) Mobilne tehnologije
- 3) Tehnologije mreža širokog područja male snage (engl. *Low Power Wide Area Network* - LPWAN) [9]



Slika 2. IoT komunikacijske tehnologije, [9]

Slikom 2 prikazane su različite komunikacijske tehnologije ovisno o maksimalnoj brzini prijenosa podataka i maksimalnom rasponu. Prikazan je maksimalan teorijski raspon i brzina podataka za svaku tehnologiju, ali to ne znači da se obje značajke mogu istovremeno postići. Naime, bežična tehnologija u idealnim uvjetima može postići maksimalan domet pri prenošenju s maksimalnom brzinom prijenosa podataka, no što je veća iskorištena brzina prijenosa podataka, niži je doseg komunikacije. [9]

2.3.1. Bežične tehnologije kratkog dometa

Bežične tehnologije kratkog dometa nisu pogodne za IoT aplikacije koje zahtijevaju prijenos podataka dugog dometa jer imaju raspon signala koji ne prelazi 30 metara. Njihova najveća prednost su niska cijena i velika brzina prijenosa podataka. U ovu kategoriju IoT tehnologija pripadaju RFID, NFC (engl. *Near-field communication*), ANT+ (engl. *Adaptive Network Topology*) i drugi, dok najčešće korištene IoT tehnologije uključuju Zigbee, Bluetooth i Wi-Fi.

Zigbee je bežični standard kratkog dometa male snage (IEEE 802.15.4), obično raspoređen u isprepletenoj (engl. *mesh*) topologiji kako bi proširio pokrivenost prenošenjem podataka na više čvorova senzora. U usporedbi sa LPWAN-om, Zigbee pruža veću brzinu podataka, ali u isto vrijeme i znatno manju potrošnju energije zbog konfiguracije mreže. Zbog fizičkog kratkog doseg (<100 m), Zigbee i slični protokoli (npr. *Z-Wave*, *Thread* i sl.) su najprikladniji za IoT aplikacije srednjeg dometa s ravnomjernom raspodjelom čvorova u neposrednoj blizini. Zigbee je savršeno dopunjavanje Wi-Fi-ja za razne slučajeve korištenja kućne automatizacije kao što su pametna rasvjeta, upravljanje sigurnošću i energijom itd.

Definiran u kategoriji osobnih bežičnih mreža, Bluetooth je komunikacijska tehnologija kratkog dometa dobro postavljena na tržištu potrošača. Novi *Bluetooth Low-Energy* (BLE), poznat i kao *Bluetooth Smart*, dodatno je optimiziran za korisničke IoT aplikacije zahvaljujući niskoj potrošnji energije. Uređaji s omogućenom BLE tehnologijom uglavnom se koriste zajedno s elektroničkim uređajima, često pametnim telefonima, koji služe kao središte za prijenos podataka u oblak. Danas je BLE široko integriran u *fitness* i medicinske uređaje (npr. pametni satovi, mjerači glukoze, pulsni oksimetri itd.) kao i uređaje aplikacija poput pametne kuće (npr. brave na vratima), pri čemu se podaci prikladno prenose i vizualiziraju na pametnim uređajima.

Wi-Fi (IEEE 802.11a/b/g/n) jedna je od najučestalijih tehnologija u poslovnom i kućnom okruženju. No, u svijetu IoT-a Wi-Fi ima manje značajnu ulogu. Osim nekoliko aplikacija poput digitalnih signala i unutarnjih sigurnosnih kamera, Wi-Fi nije često izvedivo rješenje za povezivanje krajnjih IoT uređaja zbog velikih ograničenja u pokrivenosti, skalabilnosti i potrošnji energije.

Umjesto toga, tehnologija može služiti kao pomoćna mreža za prebacivanje podataka iz središnjeg IoT čvora u oblak, posebno u pametnim kućama. Nova, manje poznata inačica Wi-Fi-a pod nazivom *Wi-Fi HaLow* (IEEE 802.11ah) uvodi primjetna poboljšanja u rasponu i energetske učinkovitosti koja pružaju široku lepezu slučajeva upotrebe IoT-a. *HaLow* također radi u frekvencijskom opsegu 900 MHz i dostupan je samo u SAD-u, što ga čini daleko od globalnog rješenja. [10]

Tablica 1. Usporedba tehnologija ZigBee, BLE i Wi-Fi 802.11

| | ZigBee | BLE | Wi-Fi 802.11 |
|----------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Brzina prijenosa podataka | 20, 40 i 250 Kbit/s | 1 Mbit/s | 11 i 54 Mbit/s |
| Domet | Od 10 do 100 metara | 100 metara | Više od 100 metara |
| Mrežna topologija | Izravna komunikacija ili mesh topologija | Zvezdasta i mesh | Zvezdasta i mesh |
| Frekvencija | 2.4 GHz | 2.4 GHz | 2.4 GHz i 5GHz |
| Potrošnja energije | Jako niska | Jako niska | Visoka |
| Primjena u IoT segmentima | Pametni domovi, pametne zgrade, industrijski IoT | Pametni domovi, nosivi uređaji, pametna maloprodaja, povezano zdravlje | Pametni domovi, pametna maloprodaja |

Izvor: [10]

Tablica 1 prikazuje usporedbu tehnologija ZigBee, BLE i Wi-Fi 802.11 prema raznim parametrima kao što su brzina prijenosa, raspon prijenosa podataka, topologija mreže i slično. Iako ove bežične tehnologije pružaju velike brzine prijenosa podataka, zbog ograničenog dometa ne mogu zadovoljiti tražene zahtjeve aplikacija u širokom spektru IoT primjene. [10]

2.3.2. Mobilne tehnologije

Dobro uspostavljene na tržištu, mobilne mreže nude pouzdanu širokopoljansku komunikaciju koja podržava različite glasovne pozive i aplikacije za video *streaming*. S druge strane, nameću vrlo visoke operativne troškove i zahtjeve za napajanjem. [10] Naime, povezivanje IoT uređaja mobilnom komunikacijom i prijenos podataka široko je prihvaćeno u cijelom svijetu. U početku je mobilna povezanost IoT uređaja bila omogućena prvim generacijama tehnologije, 2G i 3G. Međutim, mobilne generacije kao što je 4G otvaraju put ka većoj propusnosti, nižem kašnjenju i većoj podršci velikim količinama uređaja po ćeliji, što će biti još više unaprijeđeno dolaskom 5G mreža.

Mobilne tehnologije koje omogućavaju IoT uključuju 2G, 3G, 4G i 5G. Mreža četvrte generacije LTE (engl. *Long Term Evolution*) vjerojatno je jedna od najuspješnijih tehnologija i jedan od razloga zašto 5G još nije potpuno implementiran, jer 4G još uvijek zadovoljava trenutne potrebe. Drugi glavni razlog što 5G još nije aktivno implementiran su troškovi 5G infrastrukture. 4G ne samo da je fleksibilan za tvrtke, već i učvršćuje IoT te može postojati zajedno s 5G, umjesto da ga zamjenjuje. [11]

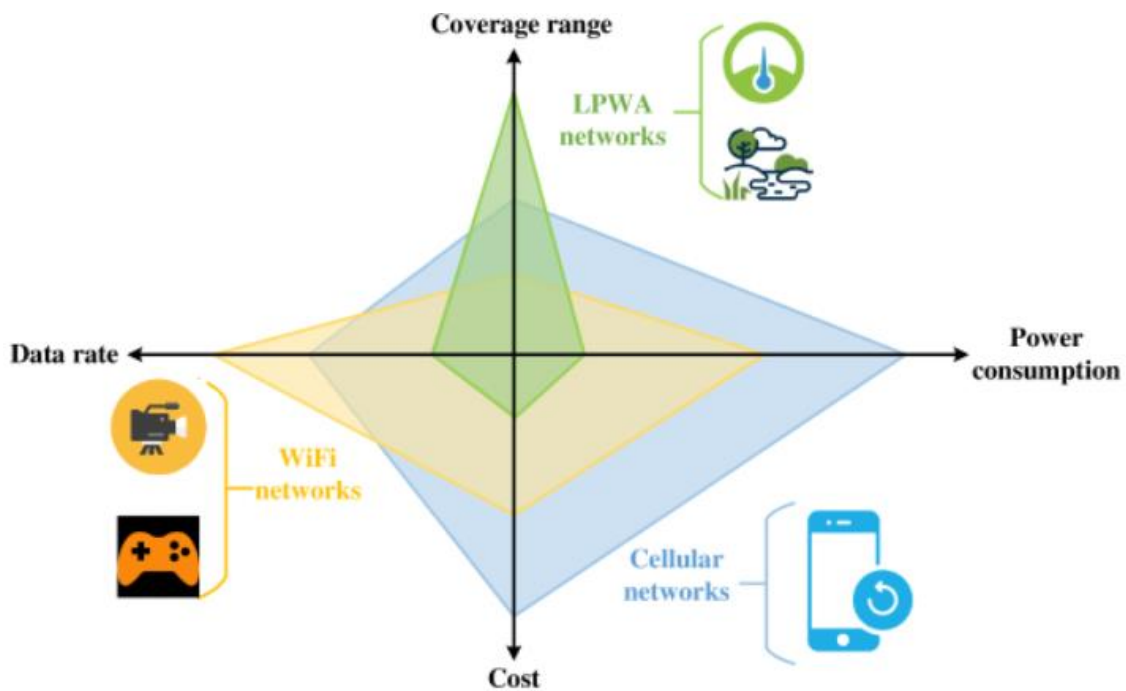
Iako mobilne mreže nisu održive za većinu IoT aplikacija koje pokreću senzorske mreže na baterije, oni se dobro uklapaju u posebne slučajeve upotrebe kao što su povezani automobili ili vozni park u transportu i logistici. Na primjer, usmjeravanje prometa, napredni sustavi za pomoći vozaču, zajedno s telematikom i uslugama praćenja voznog parka, mogu se pouzdati u sveprisutnu i široku propusnost mobilne mreže.

5G mreža s podrškom za brzu pokretljivost i ultra niskim kašnjenjem pozicionirana je kao budućnost autonomnih vozila i proširene stvarnosti. Očekuje se da će 5G u stvarnom vremenu omogućiti video nadzor za javnu sigurnost, mobilnu isporuku medicinskih podataka u stvarnom vremenu za povezano zdravlje i nekoliko vremenski osjetljivih aplikacija za industrijsku automatizaciju. [10]

2.3.3. Tehnologije mreža širokog područja male snage (LPWAN)

IoT aplikacije imaju posebne zahtjeve poput dugog dometa, niske brzine prijenosa podataka, niske potrošnje energije i ekonomičnosti. Bežične tehnologije kratkog dometa (npr. ZigBee, Bluetooth) nisu prilagođene za scenarije koji zahtijevaju prijenos dugog dometa. S druge strane, rješenja koja se temelje na mobilnoj komunikaciji (npr. 2G, 3G i 4G) mogu pružiti veću pokrivenost, ali troše pretjeranu energiju uređaja. Stoga zahtjevi IoT aplikacija dovode do pojave novih tehnologija bežične komunikacije koje se nazivaju tehnologije mreža širokog područja male snage. [12]

LPWAN sve više dobiva na popularnosti u industrijskim i istraživačkim zajednicama zbog svoje niske snage, dugog dometa i jeftinih komunikacijskih karakteristika. Omogućavajući dugotrajnu komunikaciju na malim, jeftinim baterijama koje traju godinama, ova skupina tehnologija je izgrađena sa namjerom da podrži velike IoT mreže koje se šire preko ogromnih industrijskih i komercijalnih područja. [10] Pruža komunikaciju na daljinu više od deset kilometara u ruralnim zonama i do pet kilometara u gradskim zonama. Jednostavni i lagani protokoli LPWAN-a smanjuju složenost u dizajnu hardvera, a samim time i troškove uređaja. Njegov dugi domet u kombinaciji sa zvjezdanom topologijom smanjuju skupe infrastrukturne potrebe, a mogućnost uporabe bez licenciranih ili licenciranih pojaseva smanjuje troškove mreže. LPWAN je vrlo pogodan za primjenu IoT-a koji treba prenijeti samo malene količine podataka u velikom rasponu. Mnoge LPWAN tehnologije pojavile su se u licenciranom i nelicenciranom frekvencijskom pojasu. Među njima, Sigfox, LoRa i NB-IoT danas su vodeće tehnologije koje uključuju mnoge tehničke razlike. [12]

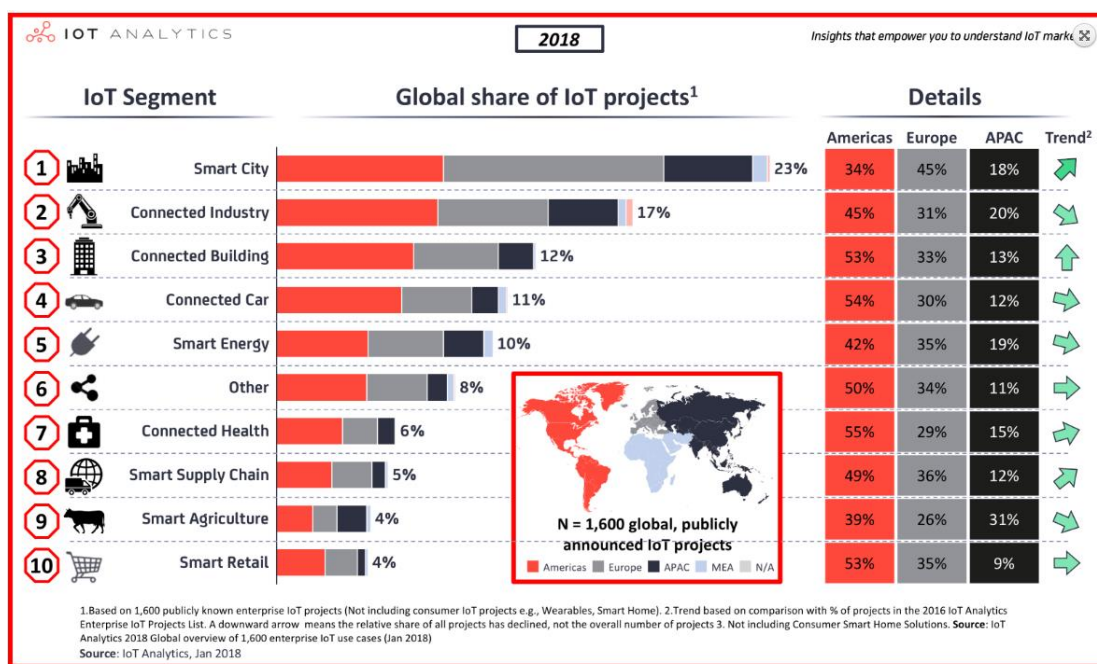


Slika 3. Usporedba performansi mobilnih mreža, LPWAN mreža i mreža kratkog dometa, [13]

Različiti zahtjevi i tehnologije IoT rezultirali su različitim dizajnom mreža. Na primjer, IoT uređaji u pametnoj poljoprivredi i pametnom gradu, koji se obično napajaju baterijama, zahtijevaju prijenosne domete do nekoliko desetaka kilometara, a očekuje se da će trajati više od deset godina. Stoga je održivi IoT više nego što je poželjno. Mobilna mreža može pružiti pokrivenost dugog doseg, ali ne može ponuditi visoku energetska učinkovitost zbog složene modulacije i tehnika višestrukog pristupa. Suprotno tome, tipične bežične lokalne mreže (engl. *Wireless Local Area Networks* - WLAN) zahtijevaju niže troškove, ali imaju vrlo ograničenu pokrivenost. Tehnologije mreža širokog područja male snage postaju obećavajuća alternativa za podršku održivom IoT-u zbog njegove mogućnosti da ponudi bolje kompromise među potrošnjom električne energije, pokrivenosti, brzinom prijenosa podataka i troškovima. Slikom 3 prikazana je usporedba performansi različitih bežičnih mreža te je vidljivo da su razvijene različite mreže za različite aplikacije. Primjerice, LPWAN tehnologije mogu značajno pridonijeti IoT ekosustavima zbog svojih jedinstvenih karakteristika dugog raspona prijenosa i male potrošnje energije. [13]

2.4. IoT aplikacije

IoT aplikacije su unaprijed ugrađene softverske aplikacije kao usluga (engl. *Software as a Service* - SaaS) koje mogu analizirati i predstaviti prikupljene podatke IoT senzora korisnicima putem nadzornih ploča. IoT aplikacije koriste algoritme strojnog učenja za analizu ogromne količine podataka u oblaku. Korištenjem IoT nadzornih ploča i upozorenja u stvarnom vremenu korisnik dobiva vidljivost o ključnim pokazateljima performansi, statistici za prosječno vrijeme između kvarova i drugim informacijama. Algoritmi temeljeni na strojnom učenju mogu prepoznati anomalije opreme i poslati upozorenja korisnicima, pa čak i pokrenuti automatizirane ispravke ili proaktivne mjere suzbijanja. Pomoću IoT aplikacija utemeljenih na oblaku, korisnici mogu brzo poboljšati postojeće procese za opskrbne lance, korisničku službu, ljudske resurse i financijske usluge. [14]



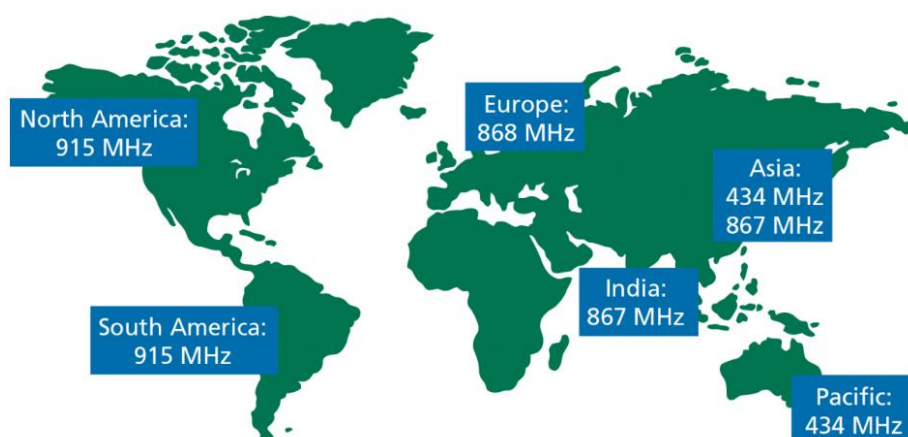
Slika 4. Udio IoT projekata u raznim segmentima, [15]

Slika 4 prikazuje segmente u kojima su IoT aplikacije najzastupljenije kao i udio njihovih projekata u pojedinim dijelovima svijeta te odgovarajuće trendove porasta aplikacija. Ova statistika iz 2018. godine ne uključuje vodeće korisničke IoT aplikacije kao što su nosivi uređaji i pametni domovi. Sa slike je vidljivo da vodeću ulogu imaju pametni gadovi (engl. *Smart City*) čiji udio projekata iznosi 23% i najzastupljeniji su u Europi. Slijede ga segmenti povezane industrije (engl. *Connected Industry*) i povezane zgrade (engl. *Connected Building*) koji su najrazvijeniji u Americi. [15]

3. Značajke LoRaWAN bežičnih mreža

Mreža širokog područja i velikog dometa (engl. *Long Range Wide Area Network* - LoRaWAN) je protokol za kontrolu pristupa medijima (engl. *Media Access Control* - MAC) za mreže širokog područja (engl. *Wide Area Network* - WAN). Dizajniran je da omogući komunikaciju uređajima niske potrošnje sa aplikacijama putem Interneta. LoRaWAN nalazi se na drugom i trećem sloju OSI (engl. *Open Systems Interconnection*) modela. [16]

LoRa, što je kratica od "*Long Range*", je bežični komunikacijski sustav dugog dometa prijenosa podataka namijenjen upotrebi na dugotrajnim uređajima koji rade pomoću baterija, gdje je potrošnja energije je od najveće važnosti. LoRa specifikacija opisuje samo fizički sloj, a kao sloj kontrole pristupa mediju (MAC) dostupan je LoRaWAN kojim se omogućava LoRa mreže širokog područja. Naime, LoRaWAN definira komunikacijski protokol i arhitekturu sustava mreža, dok fizički sloj LoRa omogućava dugoročnu komunikacijsku vezu. [17]



Slika 5. Frekvencijski pojasevi koje koristi LoRa tehnologija, [19]

LoRa i LoraWAN spadaju u kategoriju nečelijskih protokola i bežičnih komunikacijskih LPWAN mreža, koje rade u nelicenciranom spektru. Koriste nelicencirani radijski spektar u industrijskim, znanstvenim i medicinskim (engl. *Industrial, Scientific and Medical* - ISM) frekvencijskim pojasevima, kako bi se omogućila komunikacija između udaljenih senzora i pristupnika povezanih s mrežnim i aplikacijskim poslužiteljima. [18] Ovisno o regiji u kojoj je smještena, mreža koristi različite frekvencijske pojaseve. Primjerice u Europi koristi 868 MHz pojas, u Americi 915 MHz, a u Aziji djeluje na 433 ili 867 MHz pojasu kao što je vidljivo na slici 5.

3.1. LoRa fizički sloj

Točnu definiciju LoRa je vrlo teško odrediti jer se može odnositi na više područja:

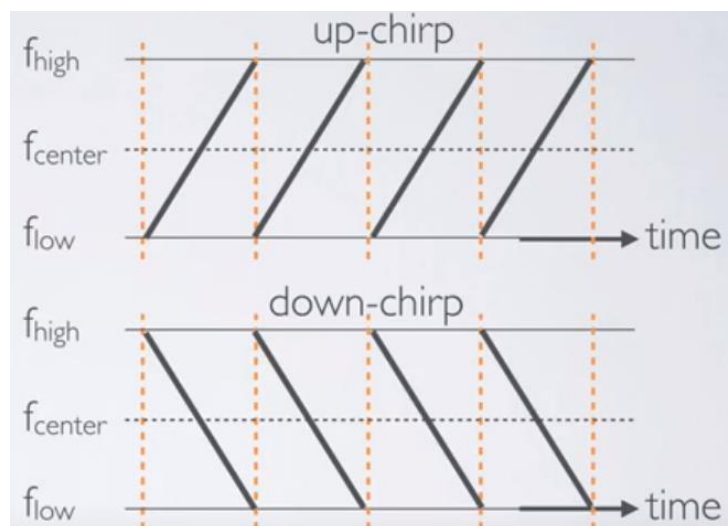
- 1) Tehnički gledano, LoRa predstavlja shemu radio modulacije, odnosno način manipuliranja radio vala radi kodiranja informacija pomoću formata s više simbola.
- 2) LoRa se također odnosi na sustave koji podržavaju modulaciju, uključujući LoRa čipove i pristupnike.
- 3) Može se odnositi i na LoRa komunikacijsku mrežu za IoT aplikacije. [20]

Sa gledišta fizičkog sloja, LoRa je definirana kao tehnika širokog spektra modulacije tzv. *Chirp Spread Spectrum* (CSS) koja djeluje na fizičkom sloju LoRaWAN mreže i predstavlja rješenje za LPWAN mreže. LoRa tehnologiju je prvi put razvila kompanija Cycleo 2009. godine u Francuskoj, a tri godine kasnije otkupila ju je Američka tvrtka Semtech. U 2015. godini LoRa je standardizirana od strane LoRa Alliance i raspoređena u 42 države, a razvija se i u drugim zemljama s ciljem ulaganja u razne mobilne operatere (npr. Bouygues i Orange u Francuskoj i Fastnet u Južnoj Africi). [12]

3.1.1. Chirp Spread Spectrum modulacija

Mnogi bežični sustavi koriste FSK (engl. *Frequency-Shift Keying*) modulacije na fizičkom sloju kako bi se postigla niska potrošnja. LoRa CSS modulacija, slično kao i FSK modulacija pruža sustavima vrlo nisku potrošnju, ali za razliku od FSK modulacije omogućava značajno veći domet komunikacije što je čini pogodnijom za brojne IoT aplikacije. [17] CSS modulacija razvijena je 40-ih godina, a tradicionalno se koristila za vojne komunikacijske potrebe zbog mogućnosti komuniciranja na velikim udaljenostima i otpornosti na interferenciju. LoRa je njegova prva implementacija koja pruža niske cijene i komercijalnu upotrebu. [21]

Chirp Spread Spectrum je tehnika raširenog spektra koja za kodiranje informacija koristi širokopojasne linearne frekvencijski modulirane *chirp* impulse. *Chirp*, odnosno skraćenica od *Compressed High Intensity Radar Pulse*, predstavlja ton u kojem se frekvencija povećava od minimalne prema maksimalnoj (*up-chirp*) ili smanjuje od maksimalne prema minimalnoj (*down-chirp*) tijekom vremena. Slikom 8 je prikazan jedan od načina vizualizacije *up-chirpa* i *down-chirpa*. Kod *up-chirpa* frekvencija se povećava tijekom vremena i kada je postignuta maksimalna frekvencija spušta se do najmanje te se proces ponavlja ispočetka. *Down-chirp* je postupak inverzan *up-chirpu*. Naime, proces započinje od maksimalne frekvencije i smanjuje se tijekom vremena, kada dođe do minimalne frekvencije vraća se ka maksimalnoj i proces se ponavlja. [22]



Slika 6. Prikaz up-chirpa i down-chirpa, [34]

Zbog linearnosti *chirp* signala, frekvencijska odstupanja između prijemnika i odašiljača jednaka su vremenskim odstupanjima. Ova karakteristika čini modulaciju imunu na Doplerov efekt. Odstupanje frekvencije između odašiljača i prijemnika može doseći 20% širine pojasa bez utjecaja na performanse dekodiranja. To pridonosi u smanjenju ukupne cijene LoRa odašiljača, jer kristali ugrađeni u odašiljače ne moraju biti izrađeni do krajnje točnosti. LoRa prijemnici mogu se zaključati na primljene frekvencije, pružajući osjetljivost od -130 dBm. [23]

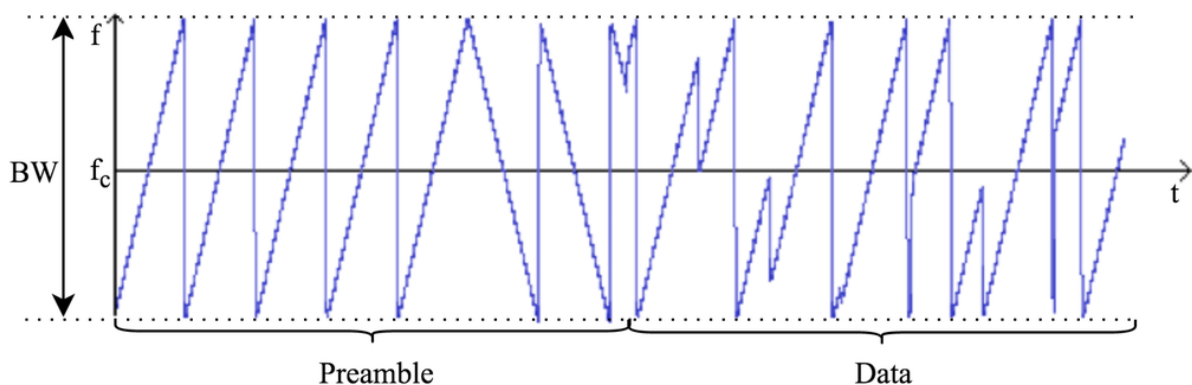
3.1.2. Parametri fizičkog sloja i LoRaWAN konfiguracija

Za prilagodbu LoRa modulacije potrebno je nekoliko parametara:

- Širina pojasa (engl. *Bandwidth*) – LoRa koristi tri širine pojasa: 125, 250 i 500 kHz),
- Faktor širenja (engl. *Spreading Factor* - SF) – LoRa koristi nekonvencionalnu definiciju faktora širenja kao logaritam po bazi 2 od broja *chirp*-ova po simbolu (ili broj bita potrebnih za kodiranje jednog simbola), kod LoRa tehnologije faktor širenja može iznositi od SF7 do SF12
- Kodna brzina – predstavlja iznos *Forward Error Correction*² (FEC) polja, kod LoRa tehnologije iznosi $4/(4+n)$ gdje je $n \in \{1,2,3,4\}$.

Ovi parametri utječu na efektivnu brzinu modulacije, njezinu otpornost na smetnje i jednostavnost dekodiranja.

LoRa simbol se sastoji od 2^{SF} *chirp*-ova, koji pokrivaju cijeli frekvencijski opseg. Prvih nekoliko *up-chirp* simbola predstavljaju tzv. preambulske simbole koji se koriste za detekciju LoRa *chirp*-ova. Kada se dosegne maksimalna frekvencija pojasa, frekvencija se obrušava i porast frekvencije počinje opet od minimalne frekvencije. Sljedeća dva *down-chirp* simbola su simboli koji se koriste za vremensku sinkronizaciju i na kraju se nalaze modulirani simboli (podaci). Slika 7 daje primjer LoRa prijenosa u promjeni frekvencije tijekom vremena. Diskontinuiteti u frekvenciji predstavljaju modulirane simbole, odnosno kodiranu informaciju koja se prenosi. [23]



Slika 7. Promjena frekvencije vremenskog uzorka signala emitiranog od strane LoRa odašiljača, [23]

² *Forward Error Correction* (FEC) je metoda kontrole pogreške u prijenosu podataka u kojoj predajnik šalje suvišne podatke, a prijatelj prepoznaje samo onaj dio podataka koji ne sadrži vidljive pogreške.

Faktori širenja ili raspršenja su, ukratko, dužine trajanja *chirp-a*. LoRa djeluje s faktorima širenja od SF7 do SF12. SF7 ima najkraće vrijeme u zraku te manji domet, dok SF12 ima najduže vrijeme u zraku, ali i najveći domet. Svaki inkrement u faktoru širenja udvostručuje vrijeme u zraku za prijenos iste količine podataka.

Tablica 2. Stope podataka za frekvencijski pojas EU868

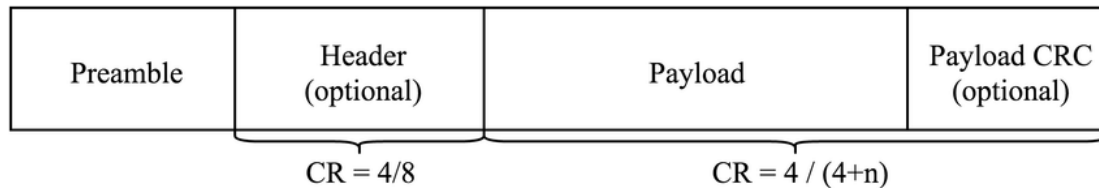
| Brzina prijenosa | Konfiguracija | Bit/s | Maksimalna veličina poruke (B) |
|-------------------------|----------------------|--------------|---------------------------------------|
| DR0 | SF12/125kHz | 250 | 59 |
| DR1 | SF11/125kHz | 440 | 59 |
| DR2 | SF10/125kHz | 980 | 59 |
| DR3 | SF9/125kHz | 1760 | 123 |
| DR4 | SF8/125kHz | 3125 | 230 |
| DR5 | SF7/125kHz | 5470 | 230 |
| DR6 | SF7/250kHz | 11000 | 230 |

Izvor: [24]

LoRaWAN koristi drugačiju konfiguraciju frekvencije, faktora širenja i širine pojasa, ovisno o frekvencijskom pojasu. Primjerice, za frekvencijski pojas EU868 stope podataka prikazane su tablicom 2. [24]

3.1.3. Format fizičkog LoRa okvira

Iako se LoRa modulacija može koristiti za prijenos proizvoljnih okvira, format fizičkog okvira je specificiran i implementiran u Semtech-ovim predajnicima i prijemnicima. [23] Propusni opseg i faktor širenja su konstantni za LoRa okvir, čija je struktura prikazana na slici 8.



Slika 8. Format LoRa okvira, [23]

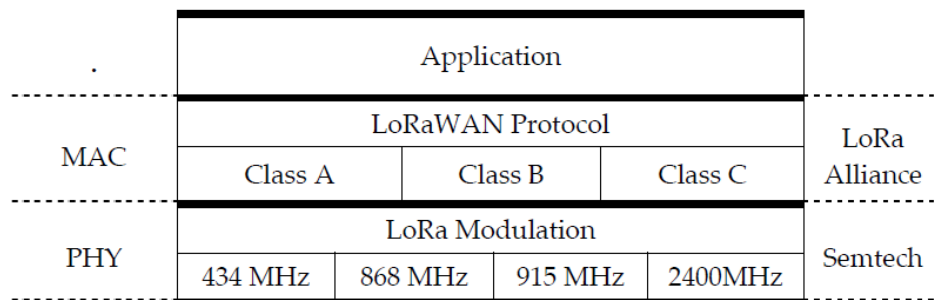
LoRa okvir počinje sa uvodnim poljem, odnosno preambulom (engl. *Preamble*). Preambula se sastoji od niza *up-chirp* simbola koji zauzimaju cijeli frekvencijski pojas. Posljednja dva *up-chirp*-a kodiraju riječ za sinkronizaciju, ona se sastoji od jednog bajta i omogućava razlikovanje različitih LoRa mreža koje koriste iste frekvencijske. Uređaj konfiguriran s danom riječi za sinkronizaciju prestat će pratiti prijenos ako dekodirana riječ za sinkronizaciju ne odgovara njegovoj konfiguraciji. Zatim slijede dva cijela i jedna četvrtina *down-chirp*-a, odnosno 2.25 simbola. Ukupno trajanje polja preambule može biti između 10.25 i 65539.25 simbola. Nakon preambule, može postojati polje zaglavlja (engl. *Header*). Kad je ono prisutno, prenosi se kodnom brzinom od 4/8. U zaglavlju se nalazi informacija o veličini poruke koja se prenosi te se ukazuje na prisutnost cikličke provjere redundancije (engl. *Cyclic Redundancy Check* - CRC) tj. koda za otkrivanje pogrešaka prilikom prijena poruke, koji se nalazi na kraju okvira. Zaglavlje također uključuje CRC kako bi prijemnik mogao odbaciti pakete s neispravnim zaglavljima. Preostali dio okvira zauzima polje u kojemu se nalazi poruka koja se prenosi (engl. *Payload*). Maksimalna veličina tog polja je 255 bajta, a za skladištenje vrijednosti koje označava dužinu poruke koristi se jedan bajt. Zaglavlje je opcionalno kako bi se onemogućilo u situacijama kada nije potrebno, na primjer kada su duljina poruke, brzina kodiranja i prisutnost CRC-a unaprijed poznati. [23]

3.2. LoRaWAN komunikacijski protokol

Komunikacijski protokol LoRaWAN definiran je od strane LoRa Alliance, neprofitnog tehnološkog saveza sa više od 500 tvrtki članica, posvećenih omogućavanju IoT širokopoljnih mreža. Za razliku od LoRa standarda koji je autorski zaštićen, LoRaWAN je potpuno otvoren standard. [25]

LoRaWAN dopušta privatnu mrežu koju omogućuje platforma bazirana na oblaku TTN (engl. *The Things Network*). TTN je *open-source* za LoRaWAN implementaciju, koja korisnicima omogućava registraciju uređaja i izradu aplikacije te integraciju s TTN platformom. Osim TTN postoji i američka firma *Link Labs* sa vlastitim LoRa protokolom otvorenog koda zvanog *Symphony Link*. [26]

LoRaWAN je MAC protokol namijenjen da koristi LoRa fizički sloj. Razvijen je za bežične uređaje koji se napajaju putem baterija i imaju potrebe za prijenosom podataka malim brzinama na velike udaljenosti. Omogućava bežično povezivanje uređaja sa Internetom u regionalnim, nacionalnim ili globalnim mrežama. Zahtjevi koje LoRaWAN ispunjava su ključni za IoT i bežične senzorske mreže, a odnose se na sigurnu dvosmjernu komunikaciju, mobilnost uređaja i lokalizacijske usluge. [23]



Slika 9. Slojevita organizacija LoRa i LoRaWAN, [27]

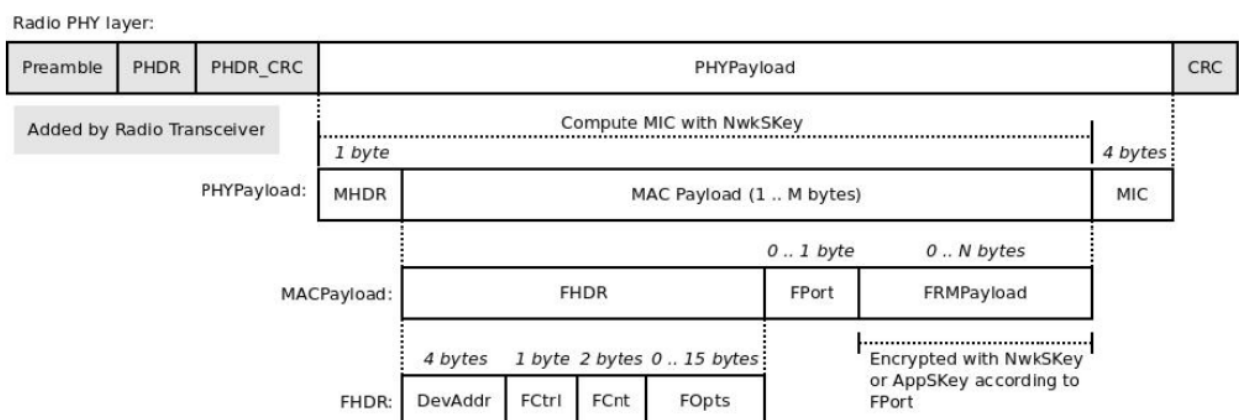
Kako bi se bolje razumjela razlika između LoRa i LoRaWAN slikom 9 je prikazana njihova slojevita organizacija. LoRa definira modulaciju i postoji samo na fizičkom sloju, dok LoRaWAN predstavlja komunikacijski protokol i arhitekturu mreže.

Pored toga važno je napomenuti da LoRaWAN pruža i različite klase krajnjih uređaja za rješavanje različitih zahtjeva širokog spektra IoT aplikacija:

- 1) Klasa A – Uređaji ove klase imaju najmanju potrošnju energije. Nakon slanja podataka održavaju dva prozora prijema (engl. *receive window*) i vraćaju se u stanje pripravnosti. Oni ne mogu primiti podatke u bilo kojem trenutku.
- 2) Klasa B – Za razliku od klase A, ova klasa otvara dodatni prijemni prozor u određenim intervalima. Za ovu klasu uređaja neophodna je sinkronizacija sa pristupnikom pomoću *beacon* okvira³ kako bi poslužitelj dobio informaciju kada je krajnji uređaj spreman za prijem podataka.
- 3) Klasa C – Kod ovih uređaja moguća je dvosmjerna komunikacija sa maksimalnim vremenom primanja paketa. Takvi uređaji imaju konstantno otvoren prozor prijema te mogu u svako doba primiti i slati podatke što rezultira maksimalnom potrošnjom energije. [27]

3.3. Format LoRaWAN okvira

LoRaWAN protokol ne omogućava komunikaciju među krajnjim uređajima. Komunikacija je dvosmjerna i isključivo između krajnjih uređaja i poslužitelja. [28] LoRaWAN koristi LoRa okvir na fizičkom sloju, koji je prethodno opisan i prikazan slikom 8. Na MAC sloju format LoRaWAN okvira je detaljno prikazan na slici 10.



Slika 10. Format LoRaWAN okvira, [28]

³ Beacon okvir jedan je od upravljačkih okvira u WLAN mrežama utemeljenim na IEEE 802.11 standardu. Sadrži sve informacije o mreži i prenosi se periodički.

Payload fizičkog sloja sadrži polja MHDR (engl. *MAC Header*), *MAC Payload* i MIC (engl. *Message Integrity Code*). MDHR označava MAC zaglavlje čija je minimalna duljina od 13 do 28 bajta. MIC predstavlja kod integriteta kriptirane poruke i izračunava se na osnovu polja MHDR, FHDR, FPort i FRMPayload. Nadalje, *MAC Payload* sastoji se od zaglavlja okvira (engl. *Frame Header - FHDR*), polja FPort i FRMPayload. FPort je polje porta za multipleksiranje. Kada je vrijednost ovog polja nula to znači da poruka sadrži samo MAC naredbe. FRMPayload je poruka koja je kriptirana AES⁴ (engl. *Advanced Encryption Standard*) algoritmom, uz upotrebu ključa od 128 bita. FHDR zaglavlje uključuje *DevAddr* polje koje sadrži 32-bitnu adresu uređaja, FCnt polje brojača okvira, FCtrl polje kontrole okvira te FOpts se koristi za prijenos MAC naredbe. Treba napomenuti da su MAC zaglavlje (MHDR) i CRC neophodni za *uplink*⁵ poruke, dok *downlink*⁶ poruke imaju zaglavlje, ali ne i CRC polje. [28]

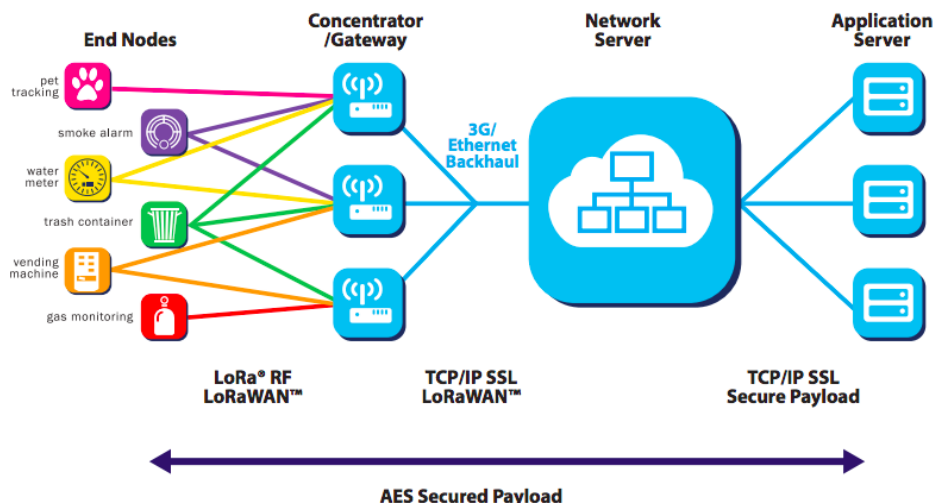
3.4. Arhitektura LoRaWAN mreže

LoRaWAN mrežna arhitektura raspoređena je u topologiji zvijezde i prikazana je slikom 11. LoRaWAN mreže sadrže pristupnike koje prenose podatke između senzorskih čvorova i mrežnog poslužitelja. Komunikacija između senzorskih čvorova i pristupnika odvija se preko bežičnog kanala koristeći LoRa fizički sloj, dok se veza između pristupnika i mrežnog poslužitelja ostvaruje preko matične mreže temeljene na IP-u (engl. *Internet Protocol*). Sve poruke koje šalju krajnji uređaji primaju svi pristupnici unutar raspona. Koristeći ovaj način redundancije, LoRaWAN povećava broj uspješno primljenih poruka. Međutim, za postizanje ove značajke potreban je veći broj pristupnika, što može povećati troškove implementacije mreže. Za filtriranje duplikata odgovoran je mrežni poslužitelj, koji također vrši provjeru autentičnosti uređaja i odabir najprikladnijeg pristupnika za silaznu vezu. [28]

⁴ Advanced Encryption Standard je specifikacija za šifriranje elektroničkih podataka koju je 2001. uspostavio Američki nacionalni institut za standarde i tehnologiju.

⁵ Uplink je opći izraz za slanje poruka u obliku radio signala od krajnjeg uređaja prema pristupniku koji proslijeđuje te zaprimljene poruke mrežnom poslužitelju.

⁶ Downlink je opći izraz za slanje poruka od poslužitelja prema pristupniku koji radio signalom proslijeđuje poruke krajnjem uređaju.



Slika 11. Arhitektura LoRaWAN mreže, [29]

Krajnji uređaji koriste se za slanje malih količina podataka na niskim frekvencijama i velikim udaljenostima. Sastoje se od senzora, LoRa transpondera i mogu sadržavati mikrokontrolere s ugrađenom memorijom. Senzori se koriste za otkrivanje parametara koji se mijenjaju tijekom vremena npr. temperatura, vlaga, lokacija. LoRa transponder služi za prijenos signala putem LoRa patentirane metode radio odašiljanja i najčešće je ugrađen u senzor. Krajnji uređaji šalju prikupljene podatke na LoRa pristupnike koji se povezuju s mrežnim poslužiteljem te mu šalju podatke primljene od ugrađenih senzora. Pristupnici su uvijek povezani s izvorom napajanja. Spajaju se na mrežni poslužitelj putem standardnih IP veza i djeluju kao transparentan most, jednostavno pretvarajući radio frekvencijske pakete u IP pakete i obrnuto.

Mrežni poslužitelj upravlja cijelom mrežom. LoRaWAN mrežni poslužitelji su platforme bazirane na oblaku, kao što je *The Things Network*. Njegova poslužiteljska arhitektura sadrži ruter, broker i upravitelj. Ruter je odgovoran za upravljanje statusom pristupnika i za zakazivanje prijenosa te je povezan s jednim ili više brokera. Brokери su središnji dio mreže i njihova je zadaća mapirati uređaj na aplikaciju, prosljeđivati poruke uzlazne veze ispravnoj aplikaciji, kao i prosljeđivati poruke prema ispravnom ruteru. Također, broker je poslužiteljska komponenta zadužena za filtriranje duplih paketa. Upravitelj je odgovoran za šifriranje, dešifriranje i prosljeđivanje poruka u aplikacije. [30] Nakon što se ukloni višak paketa i izvrši sigurnosna provjera, podaci se šalju prema aplikacijskom poslužitelju. Aplikacijski poslužitelj krajnji je poslužitelj na kojem se svi podaci koje šalju krajnji uređaji definiraju kao procesi i poduzimaju se potrebne radnje. [29]

3.5. Sigurnost LoRaWAN mreže

Sigurnost je glavna zadaća za bilo kakvu masovnu upotrebu IoT-a i izuzetno je važna za bilo koji LPWAN. LoRaWAN koristi dva sloja sigurnosti i to jedan za mrežu i jedan za aplikaciju. Mrežna sigurnost osigurava autentičnost čvora u mreži, dok aplikacijska sigurnost osigurava da mrežni operator nema pristup podacima aplikacije krajnjeg korisnika. Prema tome, LoRaWAN specifikacija definira dva sloja kriptografije:

- Jedinstveni 128-bitni mrežni sesijski ključ (engl. *Network Session Key* – *NwkSKey*) između krajnjeg uređaja i mrežnog poslužitelja i
- Jedinstveni 128-bitni sesijski ključ aplikacije (engl. *Application Session Key* - *AppSKey*) na razini aplikacije.

Podaci preko LoRaWAN kriptiraju se dva puta. Podaci se prvo šifriraju od strane čvora, a zatim se ponovno šifriraju LoRaWAN protokolom i tek tada se šalju na LoRa pristupnik. Pristupnik šalje podatke preko normalne IP mreže mrežnom poslužitelju. Mrežni poslužitelj sadrži ključeve mrežne sesije (*NwkSKey*) i dešifrira LoRaWAN podatke. Zatim podatke prosljeđuje na aplikacijski poslužitelj koji dešifrira podatke senzora pomoću ključa sesije aplikacije (*AppSKey*). [29]

4. Značajke Sigfox bežičnih mreža

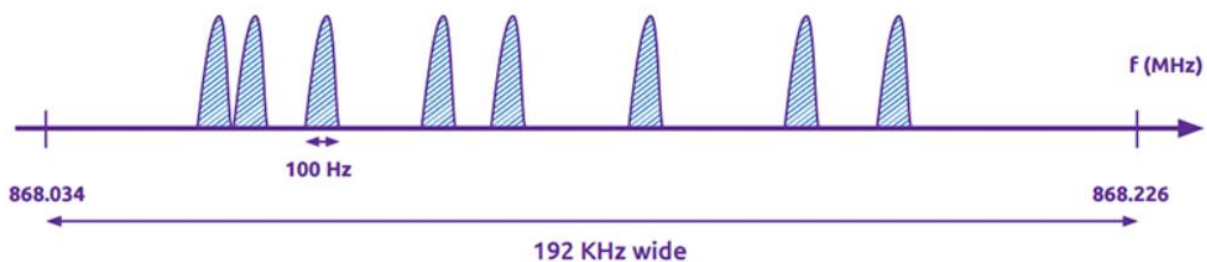
Sigfox nije samo naziv IoT tehnologije, već je i mrežni operator koji nudi cjelovito rješenje IoT povezivanja na temelju svojih patentiranih tehnologija. Dio je LPWAN tehnologija, gdje je količina poslanih podataka mala (kreće se od nekoliko bajtova i doseže stotine kilobajta), radni domet je velik (dostiže desetke kilometara), a trenutna potrošnja je izuzetno mala (deseci *mA* po prijenosu). Sigfox operativna mobilna telekomunikacijska mreža namijenjena je implementaciji IoT-a i omogućava dvosmjernu komunikaciju koju uvijek inicira uređaj. [31]

Za razliku od 3GPP (engl. *The 3rd Generation Partnership Project*) IoT tehnologija i vlasničkih protokola, Sigfox je cjelovita mrežna tehnologija, licencirana lokalnom operatoru koji koristi signalnu infrastrukturu Sigfoxa na nelicenciranoj ISM frekvenciji. Rezultat je jedna globalna mreža koja koristi jedan standard, kojim upravljaju lokalni operatori. Potpuno upravljana mreža na mnogo je načina slična uobičajenoj mobilnoj mreži, osim što je tehnologija razvijena, izgrađena i implementirana za posluživanje samo ekstremno niske brzine prijenosa podataka. Sigfox tehnologiju nije moguće koristiti privatno. [32]

Sigfox je francuska tvrtka koja je nastala 2010. godine radi pružanja globalnog, jednostavnog i jeftinog rješenja za povezivanje Internet stvari i M2M komunikacije. Od 2018. godini Sigfox je dostupan u 53 države, s procijenjenom površinom pokrivenosti od pet milijuna četvornih kilometara. Sigfox koristi svoje vlastite bazne stanice opremljene kognitivnim softverskim radio stanicama koje se povezuju s pozadinskim poslužiteljima pomoću IP mreže. [27]

4.1. Modulacija i prijenos podataka

Za prijenos informacija, u fizičkom sloju, Sigfox koristi D-BPSK (engl. *Differential Binary Phase-Shift Keying*) modulaciju za koju poruka ima fiksnu širinu pojasa od 100 Hz i šalje se brzinom od 100 bps ili 600 bps. Prijenos se odvija u okviru nelicenciranog ISM frekvencijskog spektar ispod 1 GHz koji za europsku regiju iznosi 868 MHz, a za američku regiju 915 MHz. Ova tehnika modulacije dio je tipa modulacije UNB (engl. *Ultra-Narrow Band*), koja uz CSS (koji se koristi u sustavima LoRaWAN) i *Narrow-Band* (koju koristi NB-IoT), zahtijeva malu potrošnju energije kako bi se osigurale veze između čvorova i baznih stanica. [31] Slika 12 prikazuje širinu kanala u frekvencijskom opsegu koji za Europu iznosi 868 MHz gdje je tehnologija raspoređena u širini pojasa od 192 kHz, pri čemu je svaki prijenos širok 100 Hz.

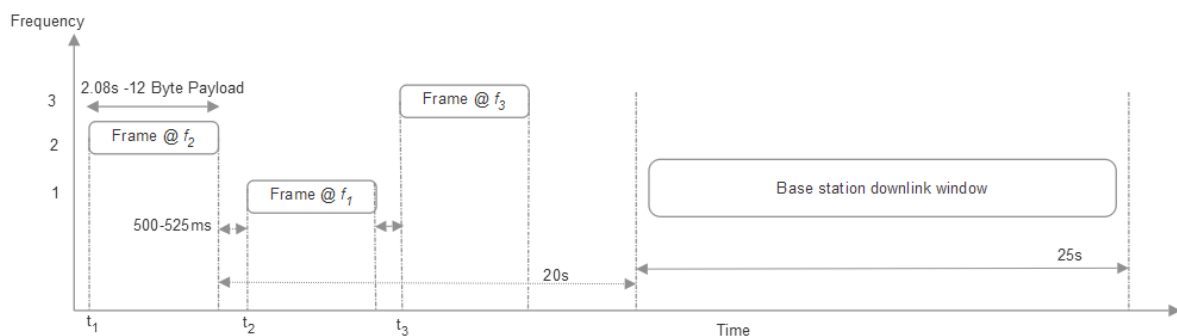


Slika 12. Fiksna širina kanala koju koristi Sigfox, [32]

Prednosti upotrebe D-BPSK modulacije su u tome što ona donosi visoku učinkovitost pristupa spektralnom mediju i lako ju je provesti. Niska brzina prijenosa omogućuje upotrebu jeftinih komponenti primopredajnika. Također, koncentriranjem zračenja u vrlo malo propusnog opsega povećava se gustoća energije i postiže se veza otpornija na smetnje signala s većom širinom pojasa i snagom. [31]

Upotrebom ultra uskog pojasa, Sigfox efikasno koristi frekvencijski pojas i doživljava vrlo nisku razinu buke, što dovodi do vrlo male potrošnje energije, velike osjetljivosti prijelnika i jeftinog dizajna antene, na štetu maksimalne propusnosti od samo 100 bps. Sigfox je u početku podržavao samo uzlaznu komunikaciju, ali kasnije je razvio dvosmjerne tehnologije sa značajnom asimetrijom veze.

Komunikacija silazne veze, tj. podaci koji se šalju od baznih stanica do krajnjih uređaja mogu se poslati samo nakon komunikacije uzlazne veze. Za prijenos s mreže na uređaj koristi se GFSK (engl. *Gaussian Frequency Shift Keying*) modulacija koja omogućava brzine do 600 *bps*. Razlog korištenja različitih modulacija je taj što se signali za uzlaznu vezu obično susreću s više smetnji od signala za silaznu vezu. Naime, kako D-BPSK modulacija ima manju propusnost povećava se snaga koncentriranja zračenja što rezultira većoj otpornosti na smetnje. Budući da interferencija nije tako velika briga za silaznu vezu, signali silazne veze usmjereni su na efikasnije postizanje što većeg broja aplikacija. Kod GFSK modulacije je veća propusnost, odnosno ima više prostora za slanje signala čime se omogućava povezivanje više pristupačnih aplikacija.



Slika 13. Kronologija prijena podataka Sigfox tehnologijom, [33]

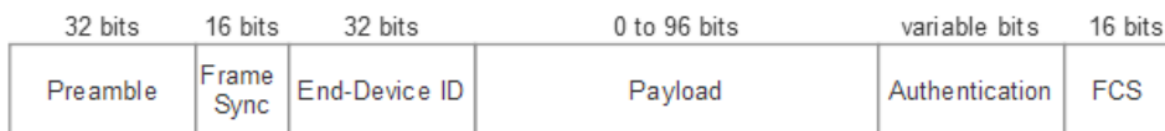
Dvosmjerna komunikacija važna je karakteristika Sigfoxa u odnosu na druge protokole. Naime, ne postoji pasivni način prijema, što znači da bazna stanica ne može jednostavno poslati poruku uređaju krajnje točke u bilo kojem trenutku. [33] Na slici 13 može se vidjeti kako svaki period prijena podataka traje 2,08 sekunde i ponavlja se tri puta na različitim frekvencijama kako bi se povećale mogućnosti ispravnog prijema poruke. Prozor prijema otvara se za komunikaciju tek nakon završetka prozora za prijenos, odnosno tek nakon razdoblja od 20 sekundi nakon što je prva poruka poslana od strane krajnjeg uređaja. Prozor će ostati otvoren 25 sekundi što omogućava primanje kratke poruke. [33]

Svaka poruka krajnjeg uređaja prenosi se tri puta preko različitih frekvencijskih kanala. U tu svrhu, na primjer, u Europi je opseg između 868.034 MHz i 868.226 MHz podijeljen na 400 ortogonalnih 100 Hz kanala (među njima je 40 kanala rezervirano i ne koristi se). Kako bazne stanice mogu istovremeno primiti poruke preko svih kanala, krajnji uređaj može nasumično odabrati frekvencijski kanal za prijenos svojih poruka. To pojednostavljuje dizajn krajnjeg uređaja i smanjuje njegov trošak. Broj poruka preko uzlazne veze ograničen je na 140 poruka dnevno. Međutim, broj poruka preko silazne veze ograničen je samo na četiri poruke dnevno, što znači da potvrda svake poruke uzlazne veze nije podržana. [12]

4.2. Format Sigfox okvira

U razini podatkovne veze, odnosno na MAC sloju svaki uzlazni okvir ima ukupnu duljinu od 26 bajta (208 bita). Slikom 14 prikazan je format okvira za uzlaznu vezu, gdje je vidljivo da do 12 bajta (96 bita) ovog okvira veze podataka može biti *payload*, odnosno poruka koju je definirao korisnik. [27]

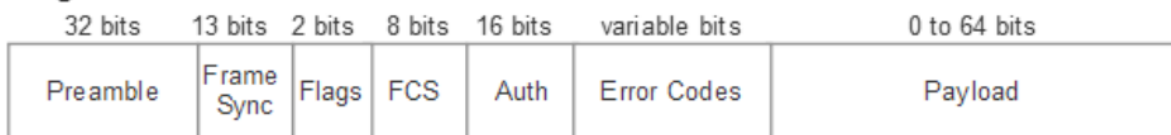
Sigfox MAC Frame Uplink:



Slika 14. Format Sigfox okvira za uzlaznu vezu, [33]

Format Sigfox okvira za uzlaznu vezu sastoji se i od preambule za sinkronizaciju u prijenosu, polja za sinkronizaciju okvira koje određuje vrste okvira koji se prenose, identifikatora poruke za otkrivanje dupliciranih elemenata i FCS (engl. *Frame Check Sequence*) polja provjere okvira koji se koristi za otkrivanje pogreške. Također sadrži i Sigfox ID koji je jedinstven za svaki uređaju u Sigfox mreži, a koristi se za usmjeravanje i provjeru autentičnosti uređaja. Predstavlja jedinstveni 32-bitni identifikator koji se bilježi u memoriji uređaja i ne mijenja se tijekom radnog vijeka uređaja. [33]

Sigfox MAC Frame Downlink:

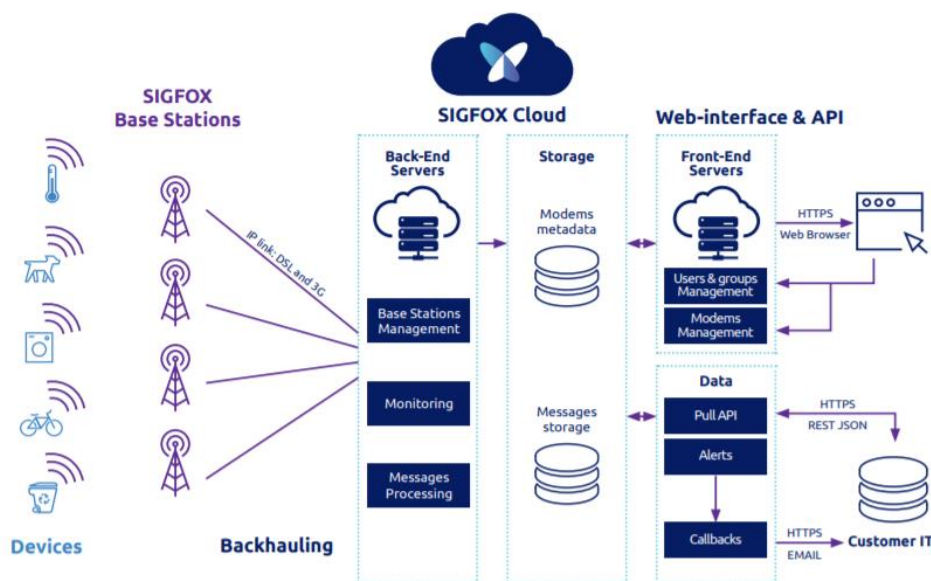


Slika 15. Format Sigfox okvira za silaznu vezu, [33]

Sa slike 15 je vidljivo da Sigfox okvir za silaznu vezu sadrži i polje kodiranja pogrešaka te polje zastavica za ograničavanje okvira. Okvir za silaznu vezu može sadržavati do 8 bajta (64 bita) prilagodljivih informacija, ovisno o aplikaciji. Sadržaj se može ažurirati iz Sigfox poslužitelja s konstantnim ili varijabilnim vrijednostima kao što su trenutni datum i vrijeme ili se može dinamički generirati iz korisničke infrastrukture. [27]

4.3. Arhitektura Sigfox mreže

Mreža Sigfoxa može biti izuzetno gusta i sastavljena od milijun čvorova po baznoj stanici. Gustoća je definirana kao funkcija broja poruka koje se šalju putem mreže. Topologija Sigfox mreže je zvjezdasta, a njena arhitektura prikazan je slikom 16. Povezuje više objekata na istu baznu stanicu, a sve bazne stanice na Sigfox poslužitelje. Koristi se koncept kolaborativne mreže. Svaku zonu obično pokrivaju tri bazne stanice u tzv. "Prostornoj raznolikosti". Sa tri bazne stanice na tri različita mjesta koje pokrivaju svaki objekt povećava se pouzdanost prijema poruka. [27]

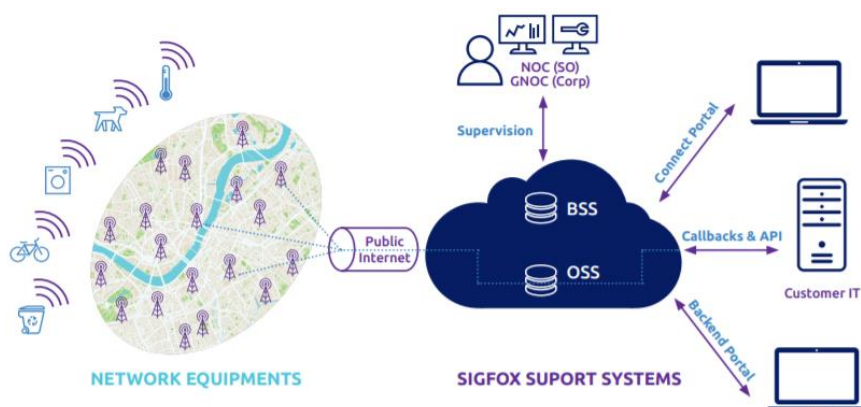


Slika 16. Arhitektura Sigfox mreže, [34]

Sigfox koristi radio definiran softver⁷ (engl. *Software Defined Radio* - SDR) koji pomaže u smanjenju visokih troškova hardvera za bazne stanice. Ne koristi se nikakav poseban hardver, već softverski algoritam za učinkovito upravljanje demodulacijom, čime se znatno smanjuje ukupni trošak poslovanja. Podaci prikupljeni od strane krajnjih uređaja se šalju do baznih stanica, a zatim se prenose na Sigfox cloud. Za prijenos se uglavnom koristi DSL (engl. *Digital Subscriber Line*) povezivanje i 3G ili 4G kao rezervna opcija. Na Sigfox cloudu⁸ vrši se obrada podataka. Poslužitelji jezgrene mreže prate status mreže i upravljaju baznim stanicama širom svijeta. Postoji potencijalno puno replika iste poruke koje stižu u jezgrenu mrežu, ali pohranjene se samo jedna. Mrežna infrastruktura pohranjuje korisničke poruke, a metapodaci se mogu koristiti za izgradnju usluga. Korisnici mogu pristupiti podacima putem web sučelja i API⁹ (engl. *Application Programming Interface*), dok je pristup platformi omogućen putem web preglednika ili pomoću REST API¹⁰ (engl. *Representational State Transfer Application Programming Interface*) za sinkronizaciju sa sustavom i slanje poruka na uređaj. Također, Sigfox mreža može se podijeliti na dva glavna sloja:

- 1) Sloj mrežne opreme i
- 2) Sigfox sustav podrške. [34]

Podjela je prikazana slikom 17, a veza između slojeva omogućena je javnim Internetom, ali je osigurana VPN (engl. *Virtual Private Network*) vezom.



Slika 17. Dva glavna sloja Sigfox mreže, [34]

⁷ Radio definiran softver (SDR) je radio komunikacijski sustav u kojem su neke ili sve funkcije fizičkog sloja softverski definirane.

⁸ Sigfox cloud je središnje Sigfox mreže na kojem se pohranjuju poruke i informacije s krajnjih uređaja.

⁹ Aplikacijsko programsko sučelje (API) je sučelje koje definira interakcije između više softverskih posrednika.

¹⁰ Reprezentativni državni transfer aplikacijskog programskog sučelja (REST API) predstavlja skup pravila kojih se programeri pridržavaju prilikom kreiranja API-ja.

Sloj mrežne opreme u osnovi se sastoji od baznih stanica (i drugih elemenata, npr. antena) zaduženih za primanje poruka s uređaja i njihov prijenos na Sigfox sustave podrške. Sigfox sustav podrške drugi je sloj koji čini jezgrenu mrežu zaduženu za obradu i slanje poruka putem funkcije povratnih poziva ¹¹(engl. *Callback*) krajnjem korisniku. Ovaj sloj pruža mogućnost različitim akterima ekosustava (Sigfox operaterima, kanalima i krajnjim kupcima) za interakciju sa sustavom putem web sučelja ili API-ja. Također, uključuje module i značajke koje su ključne za osiguravanje uspostave, rada i nadzora mreže kao što su Sustav poslovne podrške (engl. *Business Support System*) za naručivanje i naplatu, radio planiranje koje podržava razmještaj mreže, nadzor radi osiguranja dobrog rad mreže. Osim toga, ovaj sloj uključuje i pohranu te alate za analizu podataka prikupljenih ili generiranih od strane mreže. [34]

4.4. Sigurnost Sigfox mreže

Što se tiče sigurnosti, odašiljač se provjerava autentifikacijom pomoću identifikatora uređaja, a provjera identiteta poruke vrši se njenim rednim brojem. U radio vezi nema enkripcije poruka, ovaj zadatak je dodijeljen OSI aplikacijskom sloju ako je to potrebno. VPN tunel postavlja se između baznih stanica i Sigfox poslužitelja, a siguran HTTPS (engl. *Hypertext Transfer Protocol Secure*) protokol može se koristiti za komunikaciju s korisničkom infrastrukturom. [27]

Ekosustav Sigfox mreže sadrži nekoliko sigurnosnih principa:

- autentikacija, integritet, „*anti-replay*“;
- kriptografija bazirana na AES standardu;
- enkripcija poruka za osiguranje povjerljivosti podataka;
- izolacija dijelova mreže, tako da u slučaju napada, samo mali segment mreže bude u opasnosti. [34]

¹¹ Povratni poziv je je svaki izvršni kod koji se prosljeđuje kao argument drugom kodu te se očekuje da će drugi kod u određeno vrijeme ponovno pozvati (izvršiti) argument.

5. Značajke NB – IoT bežičnih mreža

Kako bi udovoljila zahtjevima IoT aplikacija, standardizacijska organizacija 3GPP uvela je novu tehnologiju radio pristupa pod nazivom *Narrowband - Internet of Things* (NB-IoT) koja se smatra obećavajućim korakom prema evoluciji 5G IoT. NB-IoT standard je bežične komunikacije za IoT i pripada kategoriji LPWAN mreža. Uz podršku svih glavnih proizvođača mobilne opreme, čipseta i modula, NB-IoT može se primijeniti sa 2G, 3G i 4G mobilnim mrežama. Također koristi sigurnosne i privatne značajke mobilnih mreža, poput podrške za povjerljivost identiteta korisnika, provjeru autentičnosti entiteta, integritet podataka i identifikaciju mobilne opreme. NB-IoT je varijanta mobilne mreže 4. generacije dizajnirana posebno za IoT. Može pružiti poboljšanu pokrivenost u odnosu na LTE, kao i masivno povezivanje uređaja, niske troškove i složenost uređaja te manju potrošnju energije. [35]

Signali i kanali na fizičkom sloju dizajnirani su tako da udovolje zahtjevima velike pokrivenosti, naročito u ruralnim i zatvorenim prostorima, kao i niskoj složenosti uređaja. NB-IoT značajno poboljšava potrošnju energije korisničkih uređaja, kapacitet sustava i učinkovitost spektra, posebno pri velikoj pokrivenosti. Trajanje baterije veće od deset godina pogodno je za širok raspon slučajeva uporabe. IoT aplikacije koje zahtijevaju češću komunikaciju pogodnije su za NB-IoT jer nema ograničenja radnog ciklusa koji radi na licenciranom spektru. [36]

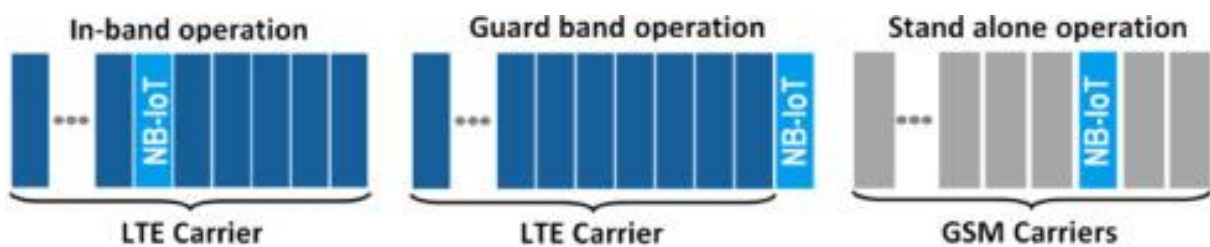
5.1. Modulacija i načini rada

NB-IoT može koegzistirati s GSM i LTE mrežama pod licenciranim frekvencijskim opsezima (npr. 700 MHz, 800 MHz i 900 MHz), a za prijenos koristi QPSK (engl. *Quadrature Phase Shift Keying*) modulaciju. Kao i LTE, i NB-IoT temelji se na tehnici višestrukog pristupa s ortogonalnom raspodjelom podnosioca (engl. *Orthogonal Frequency Division Multiple Access - OFDMA*) s propusnom širinom sustava od 180 kHz, što se podudara s jednim fizičkim blokom resursa¹² (engl. *Physical Resource Block - PRB*) u LTE prijenosu. 3GPP preporučuje integraciju NB-IoT-a u kombinaciji s LTE mobilnim mrežama.

¹² Fizički blok resursa (PBR) je najmanja jedinica resursa koja se može dodijeliti korisniku.

Također, NB-IoT može se jednostavno podržati samo nadogradnjom softvera pored postojeće LTE infrastrukture. [12] Sa 180 kHz minimalnih zahtjeva spektra, kao što je prikazano na slici 18, NB-IoT može se primijeniti u tri moguća načina rada:

- 1) Samostalan rad (engl. *Stand alone operation*) - Mogući scenarij je upotreba trenutno korištenih GSM frekvencijskih opsega. S njihovom širinom pojasa od 200 kHz još uvijek postoji zaštitni interval od deset kHz na obje strane spektra.
- 2) Rad u zaštitnom pojasu (engl. *Guard band operation*) – Za rad se koriste neiskorišteni blokovi resursa unutar zaštitnog pojasa LTE nosioca.
- 3) Rad u opsegu (engl. *In – band operation*) - Koristi blokove resursa unutar LTE nosioca. Dodjela resursa između LTE i NB-IoT nije fiksna. Međutim, postoje određena ograničenja jer nisu sve frekvencije, tj. blokovi resursa unutar LTE nosioca dopušteni da se koriste za ćelijsku vezu. [12]



Slika 18. Načini rada NB – IoT tehnologije, [12]

Kako bi podržao spomenute scenarije implementacije, NB-IoT koristi OFDM (engl. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) tehniku modulacije za prijenos podataka u silaznoj vezi i SC-FDMA (engl. *Single-Carrier Frequency Division Multiple Access*) za prijenos podataka u uzlaznoj vezi.

Ključne promjene dizajna NB-IoT za razliku od LTE mreže uključuju sinkronizacijske sekvence, preambule s slučajnim pristupom, vremenski raspon između kontrole i prijensa podataka itd. Te su promjene prvenstveno motivirane činjenicom da je NB-IoT potreban za rad na frekvencijskom pojasu od 180 kHz tj. jedan PRB, dok su mnogi upravljački kanali u cjelini dizajnirani tako da raspoređuju više PRB-ova koji zauzimaju veću širinu pojasa. Ovakav dizajn mijenja zahtjeve za primjenu IoT-a, osiguravajući najbolje performanse u postojećem LTE sustavu. Nadalje, s obzirom na ograničene računске resurse u NB-IoT uređaju, uveden je koncept vremenskog pomaka između upravljačkog kanala i prijensa podataka.

Vremensko odstupanje između kraja kontrolnog paketa za silaznu vezu i početka prijena podataka uzlazne veze iznosi najmanje četiri milisekunde. Slično tome, odstupanje vremena između kraja kontrolnog paketa za silaznu vezu i početak povezanog prijena podataka uzlazne veze iznosi najmanje osam milisekunde. Zbog vremenskog pomaka, prijensi silazne i uzlazne veze su povezani, što zahtijeva njihovu zajedničku optimizaciju resursa. Kada se uzme u obzir vremensko odstupanje, vršna brzina prijena podataka silazne i uzlazne veze značajno se smanjuje. [35]

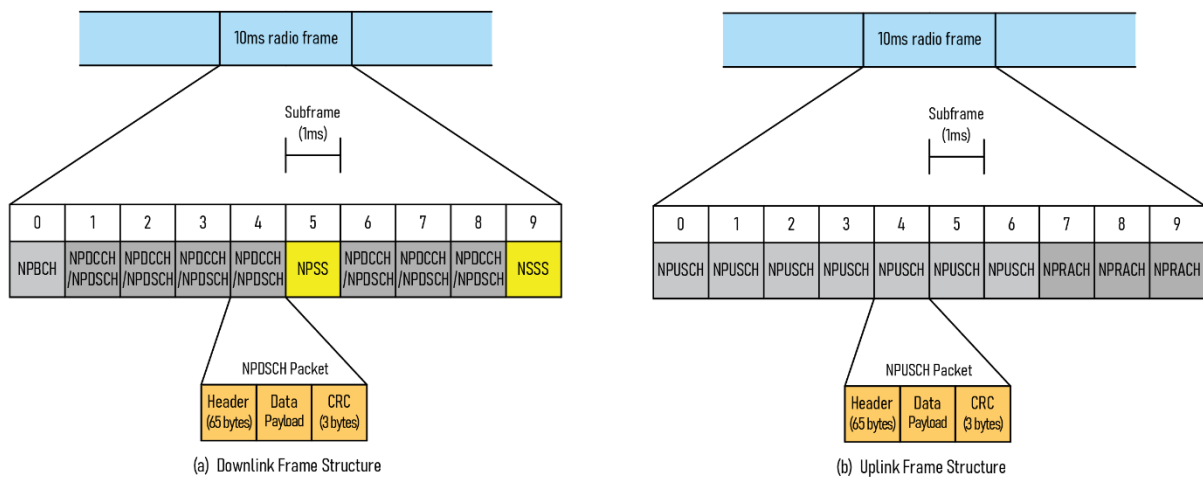
5.2. Format NB – IoT okvira

Format okvira NB-IoT za silaznu vezu sličan je formatu LTE-a po vremenskoj domeni duljine deset *ms*. Svaki se okvir sastoji od deset podokvira duljine jedne milisekunde, a svaki se podokvir sastoji od dva *slot*¹³ s duljinom od sedam OFDM simbola. U frekvencijskoj domeni okvir se sastoji od jednog PBR-a s 12 podnosilaca i razmakom od 15 *kHz*. Za razliku od LTE-a, fizički kanali i signali NB-IoT za silaznu vezu primarno su multipleksirani u vremenu. [35] Slika 19 prikazuje kako se podokviri NB-IoT raspoređuju na različite fizičke kanale i signale u silaznoj i uzlaznoj vezi. NB-IoT ima dva fizička signala i tri fizička kanala:

- 1) *Narrowband Reference Signal* (NRS): NRS se koristi za pružanje referentnih faza za demodulaciju silaznog kanala. Prenosi se u svim podokvirima koji se mogu koristiti za emitiranje ili slanje podataka silazne veze.
- 2) *Narrowband Primary and Secondary Synchronization Signals* (NPSS i NSSS): NPSS i NSSS koriste se za pretraživanje stanica koristeći sinkronizaciju vremena i frekvencije, kao i detekciju identiteta ćelije. NPSS se prenosi u podokviru broj pet, dok se NSSS prenosi u podokviru broj devet.
- 3) *Narrowband Physical Broadcast Channel* (NPBCH): NPBCH nosi glavni informativni blok (engl. *Master Information Block* - MIB) i prenosi se u nultom podokviru. MIB ostaje nepromijenjen tijekom vremenskog intervala prijena od 640 *ms*.

¹³ Slot predstavlja najmanju podjelu komunikacijskog kanala koja se dodjeljuje određenim korisnicima u komunikacijskom sustavu.

- 4) *Narrowband Physical Downlink Control Channel (NPDCCH)*: NPDCCH se smatra jezgrom elementa kontrolnih kanala za silaznu vezu jer sadrži podatke o kontroli kao što su pozivanje, dodjeljivanje silazne i uzlazne veze, tip modulacije koji se koristi za prijenos, kontrolu snage i slično. On kontrolira prijenos podataka između bazne stanice i korisničke opreme. Veličina kontrolnih podataka definira se na 23 bita i kodira se preko jednog podokvira.
- 5) *Narrowband Physical Downlink Shared Channel (NPDSCH)*: NPDSCH je glavni kanal koji nosi podatke. Sastoji se od podataka o jedinici za korisnike, podataka o kontroli i bloka s informacijama o sustavu (engl. *System Information Block - SIB*). Ako je SIB prisutan u okviru, on uvijek zauzima podokvir broj četiri u 16 kontinuiranih okvira.



Slika 19. Format NB-IoT okvira za silaznu i uzlaznu vezu, [35]

U uzlaznoj vezi, NB-IoT podržava jednotonski i višetonski prijenos. Prijenos s više tonova koristi SC-FDMA shemu modulacije s razmakom podnosioca od 15 kHz i ukupnom širinom pojasa od 180 kHz sa *slotom* duljine $0,5\text{ ms}$. Međutim, prijenos s jednim tonom podržava razmak podnosioca od 15 kHz i $3,75\text{ kHz}$. Trajanje razmaka podnosioca $3,5\text{ kHz}$ je četiri puta duže u usporedbi s 15 kHz , što rezultira duljinom slota od dvije milisekunde koji ima sedam OFDM simbola sa 48 podnosilaca. U NB-IoT uzlaznoj vezi, mapiranje resursa definirano je kao resursna jedinica (engl. *Resource Unit - RU*). RU je kombinacija broja podnosilaca (frekvencijska domena) i broja mjesta (vremenska domena).

Za uzlaznu vezu, NB-IoT ima jedan fizički signal i dva fizička kanala:

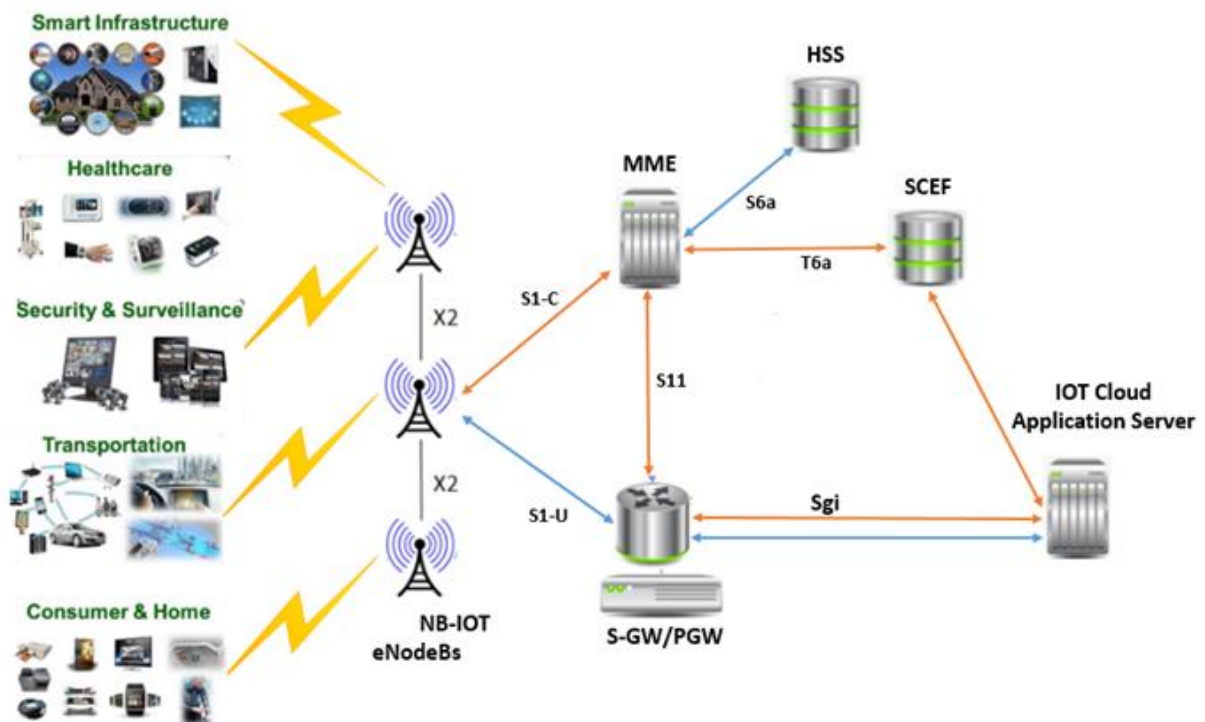
- 1) *Demodulation Reference Signal (DMRS)*: DMRS se prenosi samo u resursnim jedinicama koje sadrže podatke. Ovisno o prijelaznoj vezi, DMRS se prenosi bilo u jednom ili u tri SC-OFDMA simbola po *slotu*.
- 2) *Narrowband Physical Random Access Channel (NPRACH)*: Omogućava krajnjem uređaju da se poveže sa baznom stanicom. Bazna stanica koristi preambulu slučajnog pristupa koju šalje korisnički uređaj kako bi procijenio vrijeme uzlazne veze, što je potrebno za izdavanje vremenske naredbe kako bi se održala ortogonalnost uzlazne veze između različitih korisnicima.
- 3) *Narrowband Uplink Shared Channel (NPUSCH)*: Suprotno LTE-u, kod NB- IoT i podaci i kontrolne informacije prenose se preko zajedničkog kanala uzlazne veze. Razlikovanje se vrši pomoću dva formata. Prvi format koristi se za prijenos podataka uzlazne veze i koristi *turbo code*¹⁴ za ispravljanje pogrešaka. Drugi format koristi se za signaliziranje hibridnog automatskog ponovnog zahtjeva (engl. *Hybrid Automatic Repeat Request - HARQ*) u svrhu potvrde podataka u silaznoj vezi. [35]

5.3. Arhitektura NB – IoT mreže

NB-IoT koristi istu arhitekturu kao i uobičajena LTE mreža s određenom optimizacijom potrebnom da podrži IoT korisničke zahtjeve. NB-IoT osnovna mreža temelji se na evoluiranom paketnom sustavu ¹⁵(engl. *Evolved Packet System - EPS*) i definirane su dvije optimizacije za mobilni IoT (engl. *Cellular IoT - CloT*), optimizacija CloT korisničke ravnine i optimizacija CloT upravljačke ravnine. Osnovna arhitektura za NB-IoT prikazana je slikom 20. Slično kao i LTE mreža sastoji se od dva dijela, a to su pristupna mreža i jezgrena mreža. U arhitekturi pristupne mreže nema promjena, ali u jezgrenoj mreži i korisnička i upravljačka ravnina su optimizirane tako da podržavaju razne IoT aplikacije. Obje ravnine odabiru najbolji put za kontrolne i korisničke pakete podataka, putem uzlazne i silazne veze. [37]

¹⁴ Turbo code je klasa visoko učinkovite FEC metode kontrole pogreške.

¹⁵ Evoluirani paketni sustav (EPS) predstavlja evoluciju EPS-a 3G / UMTS standarda.



Slika 20. Arhitektura NB-IoT mreže, [37]

Postupak pristupa stanici korisnika NB-IoT sličan je postupku LTE. U upravljačkoj ravni razvijena UMTS zemaljska pristupna mreža (E-UTRAN) upravlja radio komunikacijom između korisničke opreme i MME (engl. *Mobility Management Entity*) čvora, a sastoji se od evoluiranih baznih stanica nazvanih eNodeB ili eNB. U NB-IoT mrežama, eNB je bez gubitaka i koristi strategiju prvi došao prvi poslužen (engl. *First-Come First-Service*) za dolazne zahtjeve.

Korisnički uređaji prikupljaju podatke iz okruženja pomoću senzora, zatim generiraju protoke poruka i šalju ih na NB-IoT eNB. ENB prima poruke, obrađuje ih i prosljeđuje MME čvoru. MME je glavni signalni čvor u EPS-u. Odgovoran je za pokretanje ćelijskog pretraživanja i provjere autentičnosti mobilnog uređaja. MME sadržava podatke o lokaciji na razini područja praćenja za svakog korisnika i zatim odabire odgovarajući pristupnik tijekom početnog postupka registracije. Upravljanje pohranom podataka pretplatnika u HSS-u (engl. *Home Subscriber Server*) također mora biti optimizirano kako bi podržalo veliki broj IoT uređaja.

Nadalje se podaci prenose kroz *Serving Gateway*¹⁶ (SGW) do *Packet Data Network Gateway*¹⁷ (PGW) ili do *Service Capability Exposure Function* (SCEF), ovisno o tome koja se vrsta paketa podatak prenosi. Ne-IP podaci će se prenijeti na novi definirani čvor SCEF koji je specifičan za NB-IoT mreže. SCEF je dizajniran posebno za podatke o tipu uređaja. Koristi se za isporuku podataka (koji se ne prenose putem IP) preko upravljačke ravnine i pruža sučelje za mrežne usluge (autentifikacija i autorizacija, otkrivanje i pristup mrežnim mogućnostima).

Sa tih čvorova podaci se preusmjeravaju na aplikacijski poslužitelj ili IoT Cloud. Takav način prijenosa prikazan je slikom 20 i označen narančastom linijom. Podaci silazne veze se prenose istim putem u obrnutom smjeru. Ovaj pristup ne zahtijeva radio *bearer* koji poput tunela prolazi kroz različite mrežne elemente i provodi se na različitim mrežnim sučeljima. Umjesto toga, paketi podataka mogu se slati putem signalizacije radio *bearera*. Stoga je ovo rješenje najprikladnije za prijenos rijetkih i malih paketa podataka.

S korisničkom optimizacijom, podaci se prenose na isti način kao i konvencionalni promet podataka, tj. preko radio kanala podaci se šalju putem SGW-a i PGW-a na aplikacijski poslužitelj. Ovaj pristup zahtijeva podršku isporuke i IP i ne-IP paketa podataka, a označen je plavom linijom na slici 20. [37]

5.4. Sigurnost NB-IoT mreže

NB-IoT nasljeđuje provjeru identiteta i enkripcije od LTE mreže. U slučajevima kada se podaci korisnika prenose u manje sigurno okruženje, poput Interneta, između javne mreže mobilnog operatera i mreže korisnika, operateri mogu upravljati sigurnošću mreže. Koriste se različite metode upravljanja sigurnošću u komunikacijskoj mreži NB-IoT, a jedna od najučestalijih je APN (engl. *Access Point Name*) ili platforma operatera.

¹⁶ Serving Gateway je čvor korisničke ravnine koji služi za usmjeravanje i prosljeđivanje korisničkih paketa podataka.

¹⁷ Packet Data Network Gateway je priključni čvor između korisničke opreme i vanjskih mreža. Predstavlja ulaznu točku podatkovnog prometa za korisničku opremu.

Naime, neki operateri nude mogućnost montiranja posredničkog poslužitelja koji prikuplja podatke iz NB-IoT mreže bez prijenosa putem Interneta. Korisnička platforma obično je povezana sa sigurnom virtualnom privatnom mrežom operatora, što čini cjelokupan put od uređaja do poslužitelja u oblaku značajno sigurnijim. Međutim ova opcija podrazumijeva troškove za korisnika i malu fleksibilnost za promjene operatora.

Također, NB-IoT obično koristi UDP (engl. *User Datagram Protocol*) protokol. To je vrlo jednostavan protokol i idealan je za NB-IoT zbog male potrošnje, jer nije potrebno uspostaviti vezu da bi se mogli slati podaci. Kada UDP paket putuje Internetom, svi su njegovi podaci vidljivi trećim stranama. Stoga se kao jedna od metoda koristi i osiguravanje UDP protokola. U ovom slučaju podaci se prenose od kraj do kraja kriptirani istom tehnologijom, a oblačni poslužitelj odgovoran je za provjeru autentičnosti i dekodiranje podataka, čime se postiže visoka razina sigurnosti. [38]

6. Usporedba LoRaWAN, Sigfox i NB – IoT bežičnih mreža

LoRaWAN, Sigfox i NB-IoT su bežične mreže koje spadaju u kategoriju LPWAN mreža te kao takve imaju istu namjenu. Cilj je pružiti pametna rješenja uz nižu cijenu, nižu potrošnju energije i veću pokrivenost. Međutim razlikuju se u mnogim čimbenicima koji otkrivaju njihove prednosti, ali i nedostatke. U nastavku rada bit će provedena usporedba značajki LoRaWAN, Sigfox i NB-IoT bežičnih mreža na temelju sljedećih IoT čimbenika:

- 1) Tehnološka usporedba
- 2) Kvaliteta usluge – QoS
- 3) Područje pokrivenosti
- 4) Vijek trajanja baterije i kašnjenje
- 5) Skalabilnost i duljina poruke
- 6) Domet u urbanim i ruralnim područjima
- 7) Cijena IoT mreže
- 8) Poslovni model [12]

6.1. Tehnološka usporedba

Postoje brojne tehnološke karakteristike koje mogu utjecati na rad i primjenu pojedine mreže. Stoga su tablicom 3 prikazane tehnološke razlike između LoRaWAN, Sigfox i NB-IoT mreža na temelju parametara poput frekvencijskog pojasa, modulacije, širine pojasa, maksimalne brzine prijenosa podataka i drugih.

Tablica 3. Tehnološke razlike između LoRaWAN, Sigfox i NB-IoT bežičnih mreža

| Parametri | LoRaWAN | Sigfox | NB - IoT |
|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Frekvencijski pojas | Nelicencirani ISM pojasevi (868 MHz u Europi, 915 MHz u Sjevernoj Americi i 433 MHz u Aziji) | Nelicencirani ISM pojasevi (868 MHz u Europi, 915 MHz u Sjevernoj Americi i 433 MHz u Aziji) | Licencirani LTE frekvencijski pojasevi |
| Modulacija | CSS | UNB (BPSK,GFSK) | QPSK |
| Širina pojasa | 250 kHz i 125 kHz | 100 Hz | 200 kHz |
| Maksimalna brzina prijenosa podataka | 50 kbps | 100 bps | 200 kbps |
| Dvosmjernost | Ograničeno/ Half-duplex | Half - duplex | Half - duplex |
| Maksimalni broj poruka po danu | Neograničeno (ovisno o SF-u) | 140 (uplink), 4 (downlink) | Neograničeno |
| Maksimalna veličina poruke | 234 Bajta | 12 Bajta (uplink), 8 Bajta (downlink) | 1600 Bajta |
| Maksimalna izlazna snaga | 0.025 W | 0.025 W | 0.2 W |
| Otpornost na smetnje | Jako visoka | Jako visoka | Niska |
| Autentikacija i enkripcija | Da (AES 128b) | Standardno ne, ali je moguće | Da (LTE enkripcija) |
| Prilagodljiva brzina prijenosa podataka | Da (Spread Factor) | Ne | Ne |
| Mogućnost privatne mreže | Da | Ne | Ne |
| Lokalizacija | Da (RSSI i TDOA) | Da (RSSI) | Ne |
| Standardizacija | LoRa-Alliance | Sigfox u suradnji sa ETSI | 3GPP |

Izvor: [12]

Iz tablice je vidljivo kako spomenute mreže za rad koriste različite vrste modulacije. Također, NB-IoT pruža najveću maksimalnu brzinu prijenosa podataka koja iznosi 200 *kbps*, ali za razliku od LoRaWAN i Sigfox mreže ima nisku otpornost na smetnje. NB-IoT ne pruža mogućnost lokalizacije, dok je lokalizacija LoRaWAN mreže omogućena pomoću algoritma na temelju vremenske razlike između dolaska paketa (engl. *Time Difference of Arrival* - TDOA) i algoritma temeljenog na primljenim vrijednostima pokazatelja jačine signala (engl. *Received Signal Strength Indicator* - RSSI) , a lokalizacija Sigfox mreže omogućena je RSSI algoritmom. [12, 39]

6.2. Kvaliteta usluge – QoS

Kako bi se osigurala dostupnost važnih podataka kada je to najpotrebnije, kvaliteta usluge (engl. *Quality of service* – QoS) komunikacijske mreže predstavlja najvažniji faktor. Primarni QoS indikator je stopa pogreške paketa (engl. *Packet Error Rate* - PER) koja označava postotak neuspjelih prijenosa od ukupnog broja poslanih poruka. U industrijskim primjenama IoT-a obično se traži PER manji od jedan posto. S obzirom na njihov jedinstveni raspon, snagu i troškovne prednosti, očekuje se da će LPWAN mreže odgovoriti na rastuću potražnju za pouzdanom M2M komunikacijom. Međutim, QoS ostaje izazov za većinu LPWAN rješenja. To je uglavnom iz dva razloga, njihovo funkcioniranje u spektru bez dozvole i upotreba jednostavne asinhronne komunikacije, obično čistog ALOHA protokola, gdje čvor pristupa kanalu i šalje poruku kad god ima podataka za slanje. Iako donose značajne prednosti napajanja, nekoordinirani prijenosi u asinhronim mrežama uvelike povećavaju vjerojatnost sudara paketa i gubitka podataka.

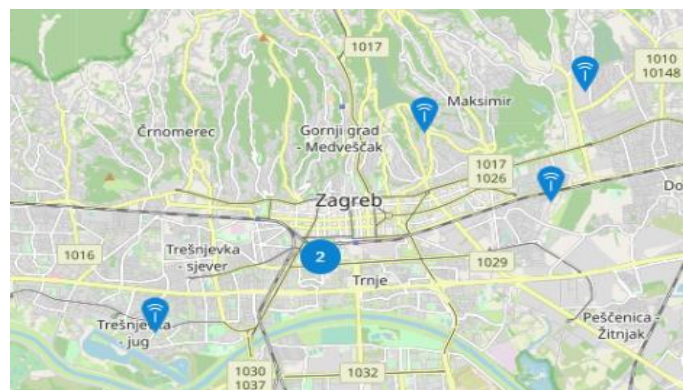
Postoji nekoliko mehanizama za ublažavanje ovih nedostataka kao što su dodatne opcije raspoređivanja u MAC sloju za smanjenje sudara paketa i poboljšanje QoS-a u LPWAN-u. Jedna je potvrda primljenih poruka u kojima se pokreće pokušaj ponovnog slanja ako nema potvrde paketa. Druga je funkcija *Listen-Before-Talk*, odnosno „slušanje prije razgovora“ gdje čvor osjeti tekući prijenos u radijskom okruženju prije nego što pošalje poruku. Problem navedenih mehanizama je u tome što uvode dodatne komunikacijske troškove koji znatno povećavaju vrijeme prijenosa i potrošnju energije svake poruke, kao i veću složenost i troškove dizajna primopredajnika.

Dodavanje potvrde također povećava mogućnost neuspjelih poruka jer odašiljačka bazna stanica ne može osjetiti dolazne poruke. Kao takvi, mehanizmi ublažavanja često se zaobilaze u stvarnim implementacijama LPWAN-a. Kad ponovni prijenos nije moguć, stopa pogreške paketa postaje ključni parametar za mjerenje QoS-a u LPWAN-u. [40]

Sigfox i LoRaWAN koriste nelicencirani frekvencijski spektar i asinhronu komunikaciju zasnovanu na ALOHA protokolu. Učinkovito mogu biti otporni na smetnje, višesmjernost i slabljenje. Međutim, ne mogu ponuditi isti QoS koji pruža NB-LoT. Naime, NB-LoT koristi licencirani spektar i sinhroni protokol temeljen na LTE-u. Te dvije karakteristike su optimalne za QoS na štetu troška jer aukcije licenciranog LTE spektra iznose više od 500 milijuna eura po MHz-u. Zbog kvalitete usluge i navedenih troškova, NB-LoT je pogodan za aplikacije kojima je potrebna zajamčena kvaliteta usluge, dok su za aplikacije koje nemaju ovo ograničenje prikladne LoRaWAN ili Sigfox mreže. [12]

6.3. Područje pokrivenosti

The Things Network predstavlja *open-source* za izradu LoRaWAN mreže, što znači da su pristupnike postavili neprofitni članovi *The Things Network* zajednice. Tvrtka Odašiljači i veze d.o.o. je mrežni operator za LoRaWAN mrežu u Hrvatskoj s više od 85% pokrivanja stanovništva. LoRaWAN mreža trenutno sadrži 10983 pristupnika diljem svijeta u 149 različitih država. Na području Hrvatske je postavljeno 21 aktivnih pristupnika, od kojih se šest nalazi u gradu Zagrebu. [25] Za korištenje LoRaWAN mreže na području Zagreba, potrebno je biti u dometu jednog od šest pristupnika čija je lokacija prikazana na slici 21.



Slika 21. Pokrivenost LoRaWAN mrežom na području grada Zagreba, [25]

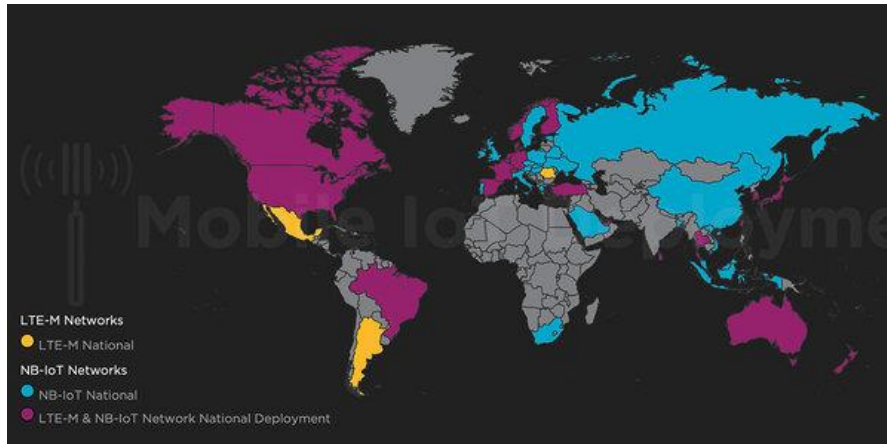
Pokrivenost sedmine svjetskog stanovništva govori u prilog globalnosti Sigfoxove mreže u koju je uključena i Hrvatska preko tvrtke IoT Net Adria koja je ekskluzivni operator Sigfox u Hrvatskoj. IoT Net Adria je hrvatska tvrtka čiji je cilj uspostaviti mrežu baznih stanica koja će pokrivati 96 posto stanovništva u Hrvatskoj i stvoriti sustav koji će poticati IT tvrtke, *startupe* i pojedince da se uključe u razvoj implementacija koje se temelje na Sigfox tehnologiji. [41] Točna lokacija Sigfox baznih stanica nije javno dostupna, ali na njihovoj *web* stranici postoji mapa za provjeru područja pokrivenosti. Na slici 22 prikazana je dostupnost Sigfox mreže na području Hrvatske koja je označena plavom bojom, dok ljubičasta boja označuje područja u kojima je Sigfox mreža u razvoju.



Slika 22. Područje pokrivenosti Sigfox mreže u RH, [42]

Za razliku od LoRaWAN i Sigfox mreže, mrežne mogućnosti NB-IoT posljednjih godina primjenjuju mobilni operatori kako bi omogućili uskopojasnu IoT pokrivenost za svoje klijente. Mnoge ključne industrijske tvrtke kao što su Ericsson, Nokia, Intel i Huawei pokazali su veliko zanimanje za NB-IoT i aktivno su sudjelovali njegovoj u standardizaciji diljem svijeta. [35] Karta područja pokrivenosti NB-IoT mreže prikazana je slikom 23 te označena plavom i ljubičastom bojom koja ujedno označava i dostupnost LTE-M¹⁸ mreže.

¹⁸ LTE-M je vrsta tehnologije mreža širokog područja male snage, standardizirana od 3GPP organizacije.



Slika 23. Područje pokrivenosti NB - loT mrežom, [42]

Hrvatski Telekom (HT) prvi je uveo NB-LoT mrežnu tehnologiju u Hrvatsku koja je dostupna na području Rovinja i Splita, a u tijeku je i uvođenje NB-LoT na području Istre i Dalmacije te u gradovima Zagreb, Rijeka, Opatija, Krk i Sisak. Također, A1 Hrvatska od 2019. godine nudi nacionalnu pokrivenost NB-LoT mrežom, s ciljem omogućavanja prodornosti signala do nedostupnih mjesta, poput podzemnih garaža, šahtova, podruma i sl. [43]

6.4. Vijek trajanja baterije i kašnjenje

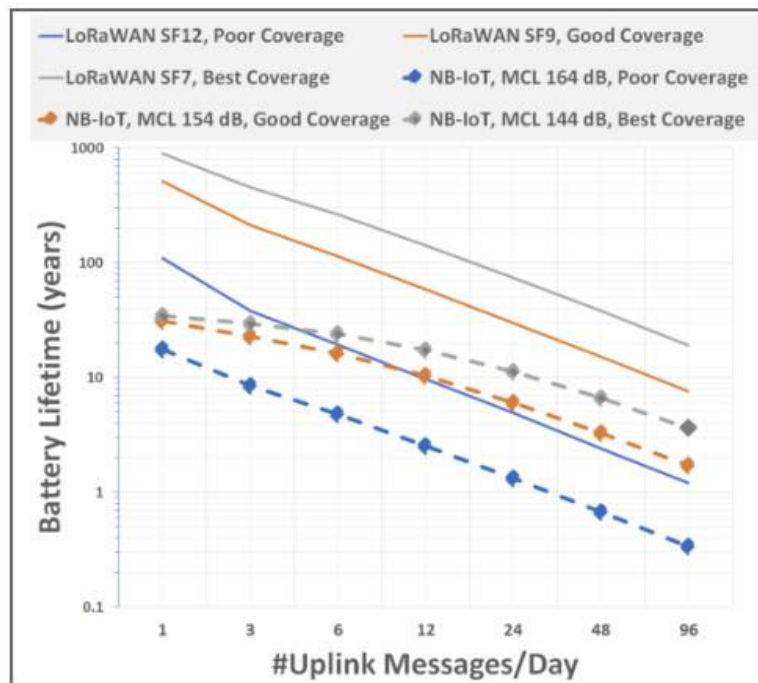
Sigfox, LoRa i NB-LoT krajnji uređaji su većinu vremena u stanju mirovanja odnosno izvan rada, čime se smanjuje količina potrošene energije, što rezultira dugotrajnim vijekom uređaja. No, krajnji uređaj NB-LoT troši dodatnu energiju zbog sinkrone komunikacije i rukovanja QoS-om, a njegovi načini pristupa OFDM / FDMA zahtijevaju više vršne struje. Ova dodatna potrošnja energije smanjuje vijek trajanja krajnjeg uređaja NB-LoT u odnosu na Sigfox i LoRa. [12]

Tehnološki centar AMIHO Technology koji pruža komunikacijska rješenja za loT i pametno mjerenje proveo je usporednu analizu vijeka trajanja baterije za LoRaWAN i NB-LoT mreže prikazanu slikom 24. Slika prikazuje usporedbu životnog vijeka baterije LoRaWAN i NB-LoT krajnjih uređaja koji se nalaze na maloj, srednjoj i velikoj udaljenosti od stanice za prijenos podataka veličine 50 bajtova različitih frekvencija. U analizi se za LoRaWAN krajnje uređaje koriste već spomenuti faktori širenja SF7, SF9 i SF12. U ovom slučaju uređaji sa SF12 koji omogućuje najveći domet nalaze se na velikoj udaljenosti od pristupnika, odnosno pokrivenost stanicama je vrlo mala, dok se SF7 koji omogućuje manji domet nalazi na maloj udaljenosti od pristupnika. [44]

Inače, kod NB-IoT krajnjih uređaja koristi se parametar maksimalnog gubitka spojke¹⁹ (engl. *Maximum Coupling Loss* - MCL) koji doseže do 164 dB MCL-a kako bi krajnji uređaji poslužili u teško dostupnim područjima, poput podruma. Postoje tri klase pokrivanja kojima se omogućuje da NB-IoT krajnji uređaji pristupe baznoj stanici:

- Razina 0: normalna pokrivenost s $MCL \approx 144$ dB i 15 kHz razmakom podnositelja.
- Razina 1: snažna pokrivenost s $MCL \approx 154$ dB i 15 kHz razmakom podnositelja.
- Razina 2: ekstremna pokrivenost s $MCL \approx 164$ dB i 3,75 kHz razmakom podnositelja. [45]

Kao i kod LoRaWAN uređaja, za potrebe analize, NB-IoT krajnji uređaji sa $MCL \approx 164$ dB koji omogućavaju najveći domet postavljeni su na velikoj udaljenosti od bazne stanice, uređaji sa $MCL \approx 144$ dB na maloj udaljenosti, a uređaji sa $MCL \approx 154$ dB na srednjoj udaljenosti. Prema analizi LoRaWAN se prikazao mnogo učinkovitiji. Primjerice, ako LoRaWAN krajnji uređaj prenosi 96 poruka po danu i nalazi se daleko od pristupnika, njegova baterija troši više energije i može potrajati do dvije godine, dok baterija NB-IoT krajnjih uređaja u istim uvjetima ima životni vijek tek nekoliko mjeseci. [44]



Slika 24. Usporedba životnog vijeka baterije LoRaWAN i NB-IoT krajnjih uređaja, [44]

¹⁹ Maksimalan gubitak spojke (MCL) služi kao metrika za procjenu pokrivenosti radio pristupnom tehnologijom. Teoretski se može definirati kao najveći gubitak provedene razine snage koji sustav može tolerirati.

No, NB-IoT nudi prednost niskog kašnjenja koje iznosi manje od deset sekundi. Za razliku od Sigfoxa, LoRa nudi klasu uređaja C koji podržavaju malo dvosmjerno kašnjenje na račun povećane potrošnje energije. Dakle, za aplikacije koje nisu osjetljive na kašnjenje i nemaju veliku količinu podataka za slanje, Sigfox i LoRa klasa A su najbolje opcije. Za aplikacije koje zahtijevaju nisku latenciju, NB-IoT i LoRa klasa uređaja C su bolji izbor. [12]

6.5. Skalabilnost i duljina poruke

Podrška ogromnog broja uređaja jedno je od glavnih obilježja Sigfox, LoRaWAN i NB-IoT mreža. Ove tehnologije dobro rade s povećanjem broja i gustoće povezanih uređaja. Postoji nekoliko kriterija za određivanje skalabilnosti poput učinkovitog iskorištavanja raznolikosti u kanalu, kao i u vremenu i prostoru. No, NB-IoT nudi prednost vrlo visoke skalabilnosti u odnosu na Sigfox i LoRaWAN mrežu. NB-IoT omogućava povezivanje do 100 tisuća krajnjih uređaja po ćeliji, u odnosu na Sigfox i LoRaWAN koji pružaju povezivanje 50 tisuća uređaja po ćeliji.

Bez obzira na to, NB-IoT također nudi prednost maksimalne veličine poruke. Kao što je prikazano u tablici 3, NB-IoT omogućava prijenos podataka do 1600 bajtova. LoRa omogućava slanje najviše 243 bajta podataka. Suprotno tome, Sigfox predlaže najnižu duljinu poruke od samo 12 bajta, što ograničava njegovo korištenje u raznim IoT aplikacijama koje trebaju slati velike veličine podataka. [12]

6.6. Domet u urbanim i ruralnim područjima

U uobičajenim LPWAN mrežama, domet ovisi o brojnim čimbenicima kao što su unutarnji/vanjski pristupnici, veličina poruke, korištena antena, okruženje tj. prisutnosti fizičkih prepreka i slično. Smatra se da Sigfox ima najveći domet koji u urbanim područjima iznosi deset kilometara, dok u ruralnim doseže i više od 40 kilometara. Naravno, navedene vrijednosti je moguće još povećati, na primjer, upotrebom mrežnih repetitora ili mikro bazne stanice.

Nešto niži domet ima LoRa, koji u urbanim sredinama, ovisno o okruženju, varira između pet i deset kilometara. U ruralnim područjima domet doseže do 20 kilometara. NB-IoT ima domet manji od deset kilometara. Najbolje uspijeva u sofisticiranim urbanim lokacijama, ali njegove performanse nisu dostignute u prigradskim ili seoskim područjima. To je posljedica toga što je korištenje NB-IoT-a je ograničeno na LTE bazne stanice i njegove performanse ne mogu biti dostignute na bilo kojem mjestu koje nema jaku pokrivenost 4G mrežom. Budući da se LoRaWAN ne oslanja na mobilne podatke ili Wi-Fi za funkcioniranje, njena pokrivenost ostaje relativno stabilna na svim vrstama lokacija. [12]

6.7. Cijena IoT mreže

Kada se govori o cijeni IoT mreže potrebno je uzeti u obzir različite aspekte troškova poput troška frekvencijskog spektra odnosno licence, troškova implementacije baznih stanica i cijene krajnjeg uređaja. Tablica 4 prikazuje usporedbu cijena Sigfox, LoRaWAN i NB-IoT mreža. Očito je da su Sigfox i LoRaWAN isplativije za izgradnju u usporedbi s NB-IoT mrežom. [12]

Tablica 4. Cijene LoRaWAN, Sigfox i NB-IoT mreža (na datum: 21. 11. 2017.)

| | Cijena spektra | Cijena instalacije stanice | Cijena krajnjeg uređaja |
|----------------|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| LoRaWAN | Besplatna | Od 100 do 1000 eura | Od 3 eura |
| Sigfox | Besplatna | Više od 4000 eura | Manje od 2 eura |
| NB-IoT | Više od 500 milijuna eura po MHz | 15000 eura | Više od 20 eura |

Izvor: [12]

S obzirom da TTN pruža mogućnost izgradnje vlastite LoRaWAN mreže troškovi instalacije stanice mogu biti visoki. Općenito, cijene pristupnika sa osam kanala koji mogu zaprimiti do osam poruka uzlazne veze u isto vrijeme kreću se od 2 000 do 2 500 kuna.

Međutim postoji mogućnost izrade jeftine verzije pristupnika s jednim kanalom koji ne podržava *downlink*, već samo *uplink* poruke, za cijenu od 350 do 700 kuna. Na mjesečnoj bazi, pretplata za Sigfox mrežu košta oko dva eura (15 kn) po uređaju, a A1 Hrvatska nudi tarifu pod nazivom NB IOT start čija mjesečna naknada iznosi pet kuna sa uključenim podatkovnim prometom od 1 MB. [12, 46]

6.8. Poslovni model

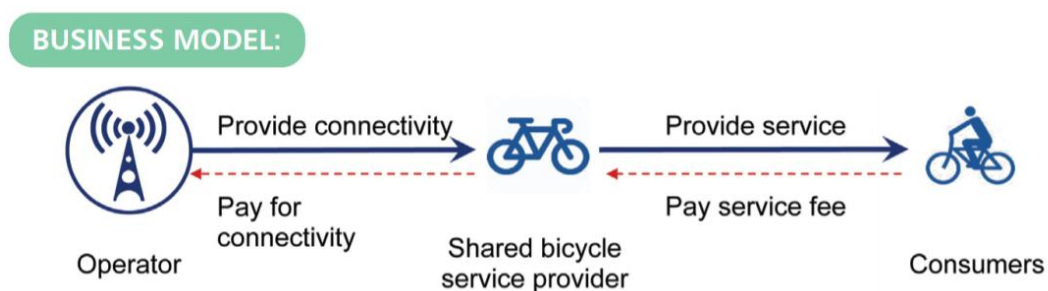
Sigfox poslovni model ima *top-down* pristup. Tvrtka posjeduje svu svoju tehnologiju, od sigurnosnih podataka i mrežnog poslužitelja do softvera krajnjih točaka. No, Sigfox je u osnovi otvoreno tržište krajnjih točaka. Naime, on daje svoju krajnju tehnologiju proizvođačima ili dobavljačima, sve dok su dogovoreni određeni poslovni uvjeti. Veliki proizvođači poput STMicroelectronics, Atmel, Texas Instruments i mnogih drugih proizvode uređaje temeljene na Sigfox tehnologiji. Također, Sigfox smatra da je smanjivanje troškova aplikacije način za poticanje ljudi na njegovo tržište.

Krajnje točke Sigfoxa koriste MSK (engl. *Minimum Shift Keying*) radio stanice, a relativno su jeftine. Cijena čipa iznosi samo nekoliko dolara, a cijena modula iznosi manje od deset dolara ako se kupuje u velikim količinama. Stoga, prodaja samog hardvera nije velika zarada za Sigfox. Profit tvrtke Sigfox temelji se na sklapanju ugovora sa raznim mrežnim operatorima koji preprodaju Sigfox tehnologiju svojim kupcima. Drugim riječima, Sigfox prodaje softver/mrežu kao uslugu mrežnim operatorima. U nekim slučajevima tvrtka zapravo razvija mrežu i djeluje kao mrežni operator, kao na primjer u Francuskoj i Sjedinjenim Američkim Državama. Sigfox smatra da je lakše raditi s operaterima mobilnih mreža i naplaćivati malu ponavljajuću naknadu nego prodavati skupi hardver u krajnjoj točki. No, postoje neki izazovi povezani s ovim poslovnim modelom. Primjerice, ako korisnik želi razviti Sigfox mrežu, mora izravno raditi sa Sigfoxom i ne postoji druga opcija. Uz to se na jednom području može primijeniti samo jedna Sigfox mreža jer tvrtka ima ekskluzivne dogovore s mrežnim operaterima.

LoRa Alliance je neprofitna organizacija i ima drugačiju strategiju. Za razliku od Sigfoxa ima otvoreniji sustav jer je specifikacija koja upravlja načinom upravljanja mrežom relativno otvorena.

Korisnik može preuzeti specifikacije i pridružiti se organizaciji LoRa Alliance, a bilo koji proizvođač hardvera može izgraditi modul ili pristupnik u skladu sa LoRa specifikacijama. Međutim jedina tvrtka koja proizvodi LoRa radio signale je LoRa Semtech. Dakle, iako je sam ekosustav otvoren, on ima zatvoreni element. Prednost otvorenog standarda LoRaWAN-a je njegov potencijal da bude fleksibilan, odnosno neće ga pokretati određena tvrtka. Nažalost, u praksi to rezultira sporijim razvojem. Cilj LoRa Alliance je implementacija LoRaWAN mreže od strane mrežnih operatora, ali i privatnih kompanija i *startup-ova*. [47]

NB-IoT je razvijen od strane standardizacijske organizacije 3GPP te njegovu uslugu pružaju razni mobilni operatori diljem svijeta. Poslovni model NB-IoT-a ovisi o slučaju upotrebe, a najčešće se temelji na pružanju SIM (engl. *Subscriber Identity Module*) kartice. Na primjer, ako se radi o *Smart shared bicycle* odnosno pametnom dijeljenju bicikla, poslovni model je vrlo jednostavan. Inače, pametno dijeljenje bicikla bazirano na NB-IoT mreži omogućava korisniku da mobilnim uređajem lako pronađe bicikl koji je dostupan u blizini, koristi ga kako bi stigao do odredišta i ostaviti ga za sljedeću osobu. Također, NB-IoT se koristi za osiguravanje povezanosti između zaključavanja bicikla i poslužitelja aplikacija, tako da brava može sinkronizirati s poslužiteljem različite informacije poput stanja zaključavanja, zemljopisnog položaja bicikla i lozinke.



Slika 25. Poslovni model pametnog dijeljenja bicikla, [48]

Poslovni model pametnog dijeljenja bicikla prikazan je slikom 25. Mobilni operator pruža davatelju usluga (npr. Mobike) povezanost putem SIM kartice. Davatelj usluga plaća mobilnom operateru za NB-IoT povezanost, a potrošačima nudi usluge vožnje. Zatim, potrošači plaćaju davatelja usluga za svaku vožnju. [48]

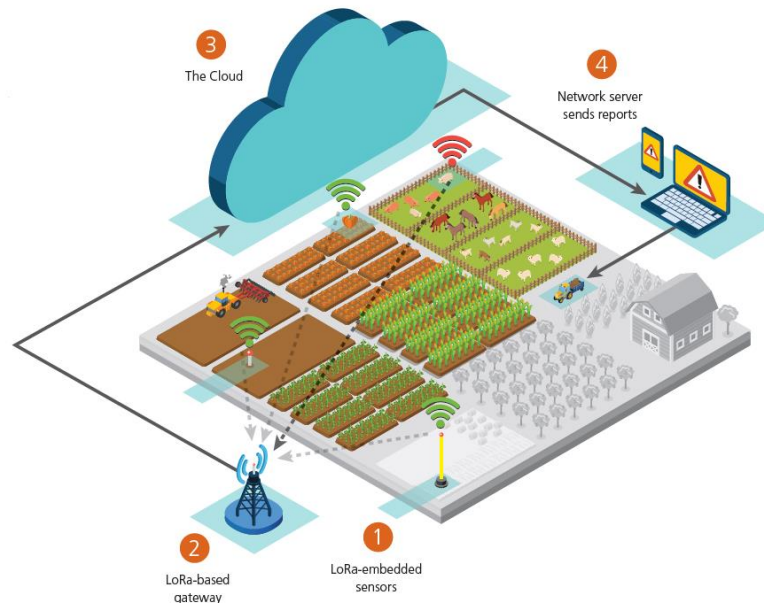
7. Primjena LoRaWAN, Sigfox i NB – IoT bežičnih mreža na temelju uspješnosti IoT čimbenika

IoT čimbenici i tehničke razlike Sigfox, LoRaWAN i NB-IoT mreža određuju njihovu izvedivost za primjenu u različitim slučajevima upotrebe. S obzirom da jedna tehnologija ne može podjednako zadovoljavati tražene parametre u svim IoT aplikacijama, u nastavku će biti razmatrani različiti slučajevi upotrebe aplikacija sa sažetkom tehnologije koja im najbolje odgovara. [12]

7.1. Pametna poljoprivreda

Iako se poljoprivredni sektor često zanemaruje u IoT području, pametna poljoprivreda je jedan od IoT segmenata koje ne treba podcijeniti. IoT omogućava poljoprivrednicima da bolje izmjere hranjive tvari u tlu, upotrijebljeno gnojivo, zasađeno sjeme, podzemnu vodu ili temperaturu uskladištenih proizvoda pomoću primjene guste mreže senzora, čime se gotovo udvostručuje produktivnost. Također, pametne tehnike uzgoja omogućavaju poljoprivrednicima da bolje prate potrebe pojedinih životinja i na odgovarajući način prilagode njihovu prehranu, sprečavajući tako bolesti i poboljšavajući zdravlje stada. Osim toga, vlasnici velikih farmi mogu koristiti bežične IoT aplikacije za nadgledanje lokacije, dobrobiti i zdravlja njihove stoke. Pomoću ovih podataka oni mogu prepoznati bolesne životinje te ih odvojiti od stada i spriječiti širenje bolesti. Pametna poljoprivreda može postati važno područje primjene, posebno u zemljama izvoznicama poljoprivrednih proizvoda. [23]

U poljoprivredi je potreban dugi vijek trajanja baterije senzorskih uređaja. Senzori temperature, vlažnosti i lužine mogli bi značajno smanjiti potrošnju vode i poboljšati doprinos. Uređaji ažuriraju osjetne podatke nekoliko puta na sat jer se okolišni uvjeti ne mijenjaju radikalno. Stoga su Sigfox i LoRaWAN idealni za ovu vrstu primjene. Također, mnoge farme danas nemaju pokrivenost LTE baznom stanicom, pa NB-IoT nije rješenje za poljoprivredu u bliskoj budućnosti. [12]



Slika 26. Primjer rješenja za pametnu poljoprivredu, [49]

Slikom 26 je prikazano rješenje za pametnu poljoprivredu korištenjem LoRaWAN mreže. Razni senzori postavljeni su na području cijele farme te prikupljaju podatke o tlu, vremenu, biljkama i životinjama. Podaci sa senzora povremeno se šalju na LoRa gateway koji šalje informacije na cloud poslužitelj gdje se podaci analiziraju pomoću Cloud aplikacije. Zatim, aplikacija šalje podatke i upozorenja poljoprivredniku putem mobilnog uređaja ili računala kako bi imao uvid o uvjetima na farmi u stvarnom vremenu. [49]

7.2. Pametno mjerenje električne energije

Pametno mjerenje omogućava objektivno praćenje potrošnje električne energije koje se događa u sustavu. Na primjer, pametno brojilo spojeno na vod za prirodni plin prati broj termi koje potroši postrojenje. Pametna značajka brojila omogućava kontrolu protoka korištenog resursa, poput prirodnog plina, vode ili električne energije, kao i njegovo daljinsko upravljanje. [50] Na tržištu električnog mjerenja tvrtke obično zahtijevaju učestalu komunikaciju, nisku latenciju i visoku brzinu prijenosa podataka. Obično se ne uvjetuje mala potrošnja energije, ni dugo trajanje baterije, jer električna brojila imaju kontinuirani izvor napajanja.

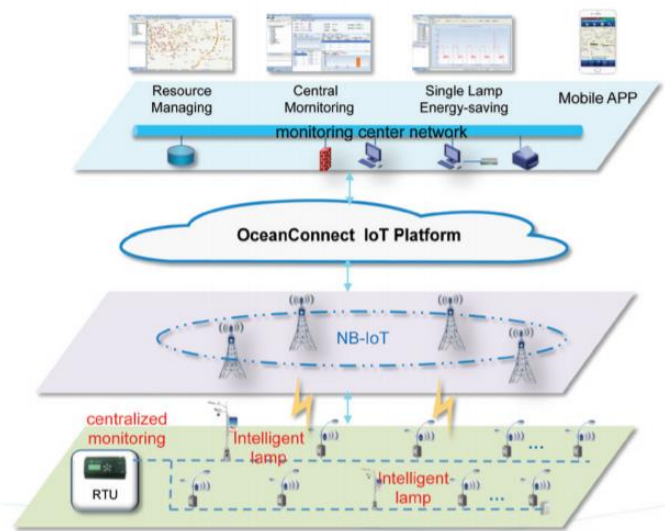
Nadalje, tvrtkama je potreban nadzor mreže u stvarnom vremenu za donošenje trenutnih odluka, npr. u slučaju opterećenja ili prekida rada. Stoga je Sigfox neadekvatan za ovu primjenu jer ne omogućava male latencije. Naprotiv, električna brojila mogu se postaviti pomoću LoRa klase C uređaja da bi se osigurala vrlo mala kašnjenja. No NB-IoT je prikladniji za ovu aplikaciju zbog zahtijevane velike brzine podataka i česte komunikacije. Osim toga, električna brojila obično se nalaze na stacionarnim mjestima u gusto naseljenim područjima. Stoga je lako osigurati pokrivenost NB-IoT mreže od strane mobilnih operatora. [12]

7.3. Pametna zgrada

Pametna zgrada upotrebljava raznu tehnologiju za razmjenu informacija o onome što se događa između sustava u zgradi kako bi se optimizirale njezine performanse. Te se informacije zatim koriste za automatizaciju različitih procesa, od grijanja i ventilacije do klimatizacije i sigurnosti. Opći troškovi zgrada značajan su trošak za svakog vlasnika i korisnika zgrade. No, razina potrošnje često je rasipna jer se ne primjenjuje pametno. Do dodatne potrošnje dolazi kada su svjetla upaljena u nekorištenim prostorijama ili kada se koristi grijanje kada to nije potrebno. Glavna motivacija pametne zgrade je izbjegavanje ove vrste rasipne uporabe energije i resursa, kako bi se smanjili troškovi i poboljšala energetska učinkovitost. Senzori temperature, vlage, sigurnosti, i protoka vode upozoravaju upravitelje imovine da spriječe oštećenja i odmah odgovore na zahtjeve. Čišćenje i upotreba zgrada također se može provoditi učinkovitije. Ovi senzori zahtijevaju niske troškove i dug vijek trajanja baterije. Ne zahtijevaju kvalitetu usluge ili često komuniciranje, stoga su Sigfox i LoRaWAN prikladniji za ovu vrstu aplikacija. [12]

7.4. Pametna ulična rasvjeta

Pametna ulična rasvjeta jedan je od najvažnijih slučajeva upotrebe pametnih gradova. Tradicionalno rješenje trpi nekoliko izazova poput nestabilnosti mreže i rada mreže sa više skokova. Pametna ulična rasvjeta omogućava automatsko paljenje ovisno o intenzitetu okolnog svjetla, kontrolu intenziteta svjetla pomoću detektora pokreta, kao i informiranje u slučaju prekida rada. Time se mogu smanjiti troškovi rada za otprilike 50% uz istovremeno omogućavanje kontrole i nadziranja stanja svake pojedine žarulje, što čini konfiguraciju za uštedu energije jednostavnijom i fleksibilnijom. LoRaWAN i Sigfox mogu omogućiti nižu cijenu, ali ne mogu pružiti masivnu povezanost široko rasprostranjenim uličnim svjetiljkama, pa je NB-IoT bolje rješenje.



Slika 27. Primjer rješenja pametne ulične rasvjete, [48]

Pametno rješenje ulične rasvjete zasnovano na NB-IoT tehnologiji prikazano je slikom 27, a sastoji se od terminalne opreme za nadgledanje uličnih svjetiljki, NB-IoT mrežnog povezivanja, platforme za upravljanje IoT-om i mreže nadzornog centra. Rješenje se temelji na korištenju daljinske terminalne jedinice (engl. *Remote Terminal Unit* - RTU) koja omogućava povezivanje objekata u fizičkom svijetu s distribuiranim upravljačkim sustavom. Podaci se šalju putem NB-IoT mreže, a nadzorni centar ima mogućnost nadgledanja i upravljanja uličnom rasvjetom te informiranja o potrošnji energije pojedine lampe. [48]

7.5. Pametna logistika

Pametna logistika omogućava praćenje kretanja, isporuke roba i usluga u realnom vremenu. Trenutno je praćenje paleta za utvrđivanje položaja i stanja robe vrlo poželjno u logistici. U ovoj su aplikaciji najtraženiji zahtjevi trošak uređaja i vijek trajanja baterije. Praćenje paleta dobar je primjer rješenja hibridne primjene. Logističke tvrtke mogu imati vlastitu mrežu koja će osigurati zajamčenu pokrivenost u njihovim objektima, a IoT uređaji niske cijene lako bi se mogli primijeniti na vozilima. Sigfox ili LoRa javne bazne stanice mogu se koristiti kada se vozila nalaze izvan objekata ili kada roba stigne do odredišta. No LoRaWAN omogućava pouzdaniju komunikaciju od Sigfoxa kada se kreće velikim brzinama. NB-IoT mreža možda neće biti dostupna na svim logističkim lokacijama, obično u ruralnim područjima. Zbog niskih troškova, dugog trajanja baterije i pouzdane mobilne komunikacije, LoRaWAN je prikladniji za ovu aplikaciju. [12]



Slika 28. Primjer rješenja za praćenje imovine, [51]

Također, LoRaWAN se pokazao kao idealno rješenje za praćenje imovine u zračnim lukama. Na primjer, zračna luka Istanbul koja ima površinu od 76,5 milijuna četvornih metara, implementirala je mrežu i aplikacije utemeljene na LoRaWAN-u, kao i cjelovito IoT rješenje koje se sastoji od 3000 LoRa senzora. Slika 28 prikazuje pametno rješenje praćenja imovine na aerodromu. Uređaji za praćenje smješteni su na strojevima tvrtke, kao što su traktori, kolica, utovarivači pojaseva, utovarivači palete, viljuškari i ostali bitni strojevi koji se mogu kretati. Prilikom praćenja temperature motora, brzine, tlaka ulja ili stanja napunjenosti akumulatora, bitne informacije mogu se tijekom vremena prikupljati i pratiti u oblaku. LoRa pristupnici postavljaju se po kvadratnoj milji ili dalje ako se radi o velikom prostoru. Oni sakupljaju informacije iz senzora i šalju na *cloud*. Softver koji se temelji na oblaku konfiguriran je za prikupljanje svih podataka o imovini i trajno ih prati. Ove se informacije dugoročno pohranjuju, a pristupa im se putem weba, mobilnih uređaja, stolnih računala ili tableta. Imovina je vidljiva u stvarnom vremenu, a izgubljena imovina može se otkriti u sekundi pomoću pametnog telefona. S vremenom se podaci mogu analizirati kako bi se pratila najčešće korištena imovina i snizili operativni troškovi smanjenjem upravljanja voznim parkom i kontrolom zaliha. [51]

8. Zaključak

Nagli razvoj IoT tehnologija rezultirao je velikim brojem uređaja povezanih na Internet te se smatra da će se taj broj znatno povećavati tijekom godina. Više ne postoje ograničenja za povezivanje i implementaciju IoT uređaja u razne objekte kako bi se korisniku omogućilo informiranje u stvarnom vremenu te upravljanje i nadzor istih. Može se reći da IoT spaja fizički i virtualni svijet s ciljem stvaranja personaliziranog i inteligentnog okruženja.

Postoji niz tehnologija koje pružaju rješenja za realizaciju IoT-a u skoro svim poslovnim i javnim sektorima, ali i u osobnoj primjeni. Tehnologije mreža širokog područja male snage (LPWAN) odgovaraju na zahtjeve velikog spektra IoT aplikacija poput dugog dometa, niske brzine prijenosa podataka, niske potrošnje energije i ekonomičnosti. LoRaWAN, Sigfox i NB-IoT vodeće su LPWAN bežične mreže omogućene vlastitom tehnologijom. Iako imaju istu namjenu razlikuju se u mnogo tehničkih značajki, od modulacije, načina rada uređaja, prijenosa podataka do arhitekture same mreže.

Usporedbom LPWAN mreža je prikazano kako LoRaWAN i Sigfox rade na nelicenciranom frekvencijskom pojasu čime je smanjena ukupna cijena instalacije mreže. Također, LoRaWAN ima mogućnost izrade privatne mreže, ali u Hrvatskoj je ova vrsta mreže još uvijek u razvoju pa je trenutno pokrivenost LoRa *gateway*-ima relativno mala. Obe mreže pružaju niske brzine prijenosa podataka što rezultira dugim vijekom trajanja baterije krajnjih uređaja stoga su idealne za izgradnju IoT rješenja za potrebe poljoprivrede, stočarstva i tome srodnim djelatnostima. Za razliku od Sigfoxa, LoRaWAN omogućava pouzdanu komunikaciju kada se uređaji kreću velikim brzinama pa se često primjenjuje za aplikacije pametne logistike.

Suprotno od Sigfox i LoRaWAN mreža, ukupna cijena NB-IoT mreže je značajno veća jer za rad koristi licencirani frekvencijski pojas, ali zato pruža prijenos podataka uz visoku kvalitetu usluge i vrlo nisko kašnjenje. Također, pokrivenost NB-IoT mrežom dostupna je diljem svijeta zahvaljujući LTE baznim stanicama, naročito u gusto naseljenim područjima. Zbog ovih karakteristika pogodna je za aplikacije u području pametnog mjerenja i pametne ulične rasvjete.

Uz sve prednosti i nedostatke, spomenute LPWAN mreže imaju svoje mjesto na IoT tržištu. Danas postoje razne vrste IoT aplikacija i svaka ima svoj jedinstveni skup mrežnih zahtjeva. Stoga se odabir najbolje bežične mreže za određeni slučaj upotrebe IoT-a treba provoditi u skladu s IoT čimbenicima ovisno o traženim zahtjevima pojedine aplikacije.

Literatura

- [1] IoT, Ofir. Preuzeto sa: <https://www.ofir.hr/iot-ili-internet-stvari-2/> [Pristupljeno: ožujak 2020.]
- [2] D. Miorandi, S. Sicari, F. De Pellegrini, I. Chlamtac. Internet of things: Vision, applications and research challenges. Elsevier. 2012;10(7): 1497-1516.
- [3] IoT Cluster Strategic Research Agenda, Research. Preuzeto sa: http://www.internet-of-things-research.eu/pdf/loT_Cluster_Strategic_Research_Agenda_2011.pdf [Pristupljeno: ožujak 2020.]
- [4] The IoT Rundown for 2020, Security today. Preuzeto sa: <https://securitytoday.com/Articles/2020/01/13/The-IoT-Rundown-for-2020.aspx?Page=2> [Pristupljeno: ožujak 2020.]
- [5] IoT number of connected devices worldwide, Statista. Preuzeto sa: <https://www.statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide/> [Pristupljeno: ožujak 2020.]
- [6] P. Sethi, S. R. Sarangi. Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications. Journal of Electrical and Computer Engineering. 2017: 1-25.
- [7] M.U. Farooq, M. Waseem, S. Mazhar, A. Khairi, T. Kamal. A Review on Internet of Things (IoT). International Journal of Computer Applications. 2015;113(1): 1-7.
- [8] Cisco - The Internet of Things Reference Model. Internet of Things World Forum. 2014: 1–12
- [9] IoT Connectivity, IoT analytics. Preuzeto sa: <https://iot-analytics.com/iot-segments/iot-connectivity/> [Pristupljeno: ožujak 2020.]
- [10] 6 Leading Types of IoT Wireless Tech and Their Best Use Cases, Behrtech. Preuzeto sa: <https://behrtech.com/blog/6-leading-types-of-iot-wireless-tech-and-their-best-use-cases/> [Pristupljeno: ožujak 2020.]
- [11] Cellular IoT Connectivity, The Embedded Blog. Preuzeto sa: <https://embeddedams.nl/method-2-cellular-iot-connectivity/> [Pristupljeno: ožujak 2020.]
- [12] K. Mekkia, E. Bajica, F. Chaxela, F. Meyerb. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. Elsevier. 2017;5(1): 1-7
- [13] Low-Power Wide-Area Networks for Sustainable IoT, Groundai. Preuzeto sa: <https://www.groundai.com/project/low-power-wide-area-networks-for-sustainable-iot/1> [Pristupljeno: ožujak 2020.]
- [14] What Is IoT, Oracle. Preuzeto sa: <https://www.oracle.com/internet-of-things/what-is-iot.html> [Pristupljeno: ožujak 2020.]
- [15] The Top 10 IoT Segments in 2018, IoT analytics. Preuzeto sa: <https://iot-analytics.com/top-10-iot-segments-2018-real-iot-projects/> [Pristupljeno: ožujak 2020.]
- [16] LoRaWAN Architecture, The Things Network. Preuzeto sa: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/architecture.html> [Pristupljeno: ožujak 2020.]
- [17] A technical overview of LoRa and LoRaWAN, LoRa Alliance Technical Marketing Workgroup. 2015. Preuzeto sa: https://www.nnnco.com.au/wp-content/uploads/what_is_lorawan.pdf [Pristupljeno: ožujak 2020.]

- [18] LoRa Network and Protocol Architecture, Techplayon. Preuzeto sa: <http://www.techplayon.com/lora-long-range-network-architecture-protocol-architecture-and-frame-formats> [Pristupljeno: ožujak 2020.]
- [19] Introduction LoRa Module, PDAControl. Preuzeto sa: <http://pdacontrolen.com/introduction-lora-module-rfm95-hoperf/> [Pristupljeno: ožujak 2020.]
- [20] What is LoRa, LinkLabs. Preuzeto sa: <https://www.link-labs.com/blog/what-is-lora> [Pristupljeno: ožujak 2020.]
- [21] R. S. Sinha, Y. Wei, S. H. Hwang. A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT. Elsevier. 2017;3(1): 14-21
- [22] LoRa, Read the docs. Preuzeto sa: <https://lora.readthedocs.io/en/latest/> [Pristupljeno: ožujak 2020.]
- [23] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, W. M. Townsley. A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. 2016;16(9): 1-18
- [24] Data Rate and Spreading Factor, Exploratory engineering. Preuzeto sa: https://docs.exploratory.engineering/lora/dr_sf/ [Pristupljeno: ožujak 2020.]
- [25] LoRa Alliance. Preuzeto sa: <https://lora-alliance.org/> [Pristupljeno: ožujak 2020.]
- [26] The Things Network. Preuzeto sa: <https://www.thethingsnetwork.org/> [Pristupljeno: ožujak 2020.]
- [27] J. R. Aparicio, F. C. Cartagena, J. S. Muro, J. Y. Moreno. Design and Implementation of a Mixed IoT LPWAN Network Architecture. 2019;19(3):1-28
- [28] LoRaWAN, Hackmd. Preuzeto sa: <https://hackmd.io/@hVCY-ICeTGeM0rEcouirxQ/S1kg6Ymo-?type=view> [Pristupljeno: ožujak 2020.]
- [29] LPWAN, LoRa, LoRaWAN and the Internet of Things, Medium. Preuzeto sa: <https://medium.com/coinmonks/lpwan-lora-lorawan-and-the-internet-of-things-aed7d5975d5d> [Pristupljeno: ožujak 2020.]
- [30] Network Architecture, The Things Network. Preuzeto sa: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/network/architecture.html> [Pristupljeno: ožujak 2020.]
- [31] A. Lavric, A. I. Petrariu, V. Popa. Long Range SigFox Communication Protocol Scalability Analysis Under Large-Scale, High-Density Conditions. IEEE Access. 2019;7: 1-10
- [32] Sigfox UNB, Halberd Bastion. Preuzeto sa: <https://halberdbastion.com/technology/iot/iot-protocols/sigfox-unb> [Pristupljeno: travanj 2020.]
- [33] Perry Lea. Internet of Things for Architects: Architecting IoT Solutions by Implementing Sensors, Communication Infrastructure, Edge Computing, Analytics, and Security, Microsoft; 2018.
- [34] Technical overview, Sigfox. Preuzeto sa: <https://www.disk91.com/wp-content/uploads/2017/05/4967675830228422064.pdf> [Pristupljeno: travanj 2020.]
- [35] H. Malik, H. Pervaiz, M. M. Alam, Y. L. Moullec, A. Kuusik, M. A. Irman. Radio Resource Management Scheme in NB-IoT Systems. IEEE Access. 2018: 1-18

- [36] Narrowband – Internet of Things (NB-IoT), Gsma. Preuzeto sa: <https://www.gsma.com/iot/narrow-band-internet-of-things-nb-iot/> [Pristupljeno: travanj 2020.]
- [37] Narrow Band LTE- NB-IoT, Codeplayon. Preuzeto sa: <http://www.codeplayon.com/2019/03/narrow-band-lte-nb-iot-2/> [Pristupljeno: travanj 2020.]
- [38] Security of NB-IoT devices, Accent systems. Preuzeto sa: <https://accent-systems.com/blog/security-of-nb-iot-devices/> [Pristupljeno: travanj 2020.]
- [39] S. Kim, J. W. Chong. An Efficient TDOA-Based Localization Algorithm without Synchronization between Base Stations. International Journal of Distributed Sensor Networks. 2015;11(9): 1-5
- [40] The Truth about Quality-of-Service in LPWAN, Behrtech. Preuzeto sa: <https://behrtech.com/blog/lpwan-quality-of-service-a-comparative-study-of-mythings-vs-lora/> [Pristupljeno: travanj 2020.]
- [41] Suradnja IoT NeT Adria i Sigfoxa, Netokracija. Preuzeto sa: https://www.netokracija.com/iot-net-adria-sigfox-suradnja-141831?fbclid=IwAR2iqo6BoVCytl5gnyYOWEjpe21E2pVMQU_FPQR6I4ae61_7wfaRIOMh-wc [Pristupljeno: travanj 2020.]
- [42] Coverage, Sigfox. Preuzeto sa: <https://www.sigfox.com/en/coverage> [Pristupljeno: travanj 2020.]
- [43] Deployment map, Gsma. Preuzeto sa: <https://www.gsma.com/iot/deployment-map/#HR> [Pristupljeno: travanj 2020.]
- [44] A Look at LoRaWAN and NB-IoT Power Consumption, Cnx software. Preuzeto sa: <https://www.cnx-software.com/2018/03/29/a-look-at-lorawan-and-nb-iot-power-consumption/> [Pristupljeno: travanj 2020.]
- [45] M. Chafii, F. Bader, J. Palicot. Enhancing Coverage in Narrow Band-IoT Using Machine Learning. IEEE Wireless Communications and Networking Conference. 2018: 1-7
- [46] Internet stvari, A1HR. Preuzeto sa: <https://www.a1.hr/poslovnj/internet/internet-stvari> [Pristupljeno: travanj 2020.]
- [47] Sigfox vs LoRa, LinkLabs. Preuzeto sa: <https://www.link-labs.com/blog/sigfox-vs-lora> [Pristupljeno: travanj 2020.]
- [48] NB-IoT Commercial Premier Use Case Library, Gsma. Preuzeto sa: https://www.gsma.com/iot/wp-content/uploads/2017/12/NB-IoT-Commercial-Premier-Use-case-Library-1.0_Layout_171110.pdf [Pristupljeno: travanj 2020.]
- [49] Precision Farming, Semtech. Preuzeto sa: https://www.semtech.com/uploads/technology/LoRa/app-briefs/Semtech_Agr_PrecisionFarming_AppBrief-FINAL.pdf [Pristupljeno: travanj 2020.]
- [50] What is smart metering, Business News Daily. Preuzeto sa: <https://www.businessnewsdaily.com/10925-what-is-smart-metering.html> [Pristupljeno: travanj 2020.]
- [51] Asset Tracking - Airport, Semtech. Preuzeto sa: https://www.semtech.com/uploads/technology/LoRa/app-briefs/Semtech_SupChain_AssetTracking-Airport_AppBrief-FINAL.pdf [Pristupljeno: travanj 2020.]

Popis kratica

| | |
|---------|-------------------------------------------|
| 3GPP | The 3rd Generation Partnership Project |
| AES | Advanced Encryption Standard |
| API | Application Programming Interface |
| APN | Access Point Name |
| AppSKey | Application Session Key |
| BLE | Bluetooth Low-Energy |
| Chirp | Compressed High Intensity Radar Pulse |
| CioT | Cellular IoT |
| CRC | Cyclic Redundancy Check |
| CSS | Chirp Spread Spectrum |
| D-BPSK | Differential Binary Phase-Shift Keying |
| DMRS | Demodulation Reference Signal |
| DSL | Digital Subscriber Line |
| EPS | Evolved Packet System |
| FCS | Frame Check Sequence |
| FSK | Frequency-Shift Keying |
| GFSK | Gaussian Frequency Shift Keying |
| GSM | Global System for Mobile Communications |
| HSS | Home Subscriber Server |
| ICT | Information and communications technology |
| IoT | Internet of Things |
| IP | Internet Protocol |
| ISM | Industrial, Scientific and Medical |

| | |
|---------|-----------------------------------------------|
| LoRa | Long Range |
| LoRaWAN | Long Range Wide Area Network |
| LPWAN | Low Power Wide Area Network |
| MAC | Media Access Control |
| MCL | Maximum Coupling Loss |
| MIC | Message Integrity Code |
| MME | Mobility Management Entity |
| MSK | Minimum Shift Keying |
| M2M | Machine to Machine |
| NB-IoT | Narrowband - Internet of Things |
| NPBCH | Narrowband Physical Broadcast Channel |
| NPDCCH | Narrowband Physical Downlink Control Channel |
| NPDSCH | Narrowband Physical Downlink Shared Channel |
| NPRACH | Narrowband Physical Random Access Channel |
| NPSS | Narrowband Primary Synchronization Signals |
| NPUSCH | Narrowband Physical Uplink Shared Channel |
| NRS | Narrowband Reference Signal |
| NwkSkey | Network Session Key |
| NSSS | Narrowband Secondary Synchronization Signals |
| OFDM | Orthogonal Frequency Division Multiplexing |
| OFDMA | Orthogonal Frequency Division Multiple Access |
| OSI | Open Systems Interconnection |
| PER | Packet Error Rate |
| PGW | Packet Data Network Gateway |

| | |
|---------|---------------------------------------------------|
| PRB | Physical Resource Block |
| QoS | Quality of service |
| QPSK | Quadrature Phase Shift Keying |
| RFID | Radio Frequency Identification |
| RSSI | Received Signal Strength Indicator |
| RU | Resource Unit |
| SCEF | Service Capability Exposure Function |
| SC-FDMA | Single-Carrier Frequency Division Multiple Access |
| SDR | Software Defined Radio |
| SF | Spreading Factor |
| SGW | Serving Gateway |
| SIM | Subscriber Identity Module |
| TDOA | Time Difference of Arrival |
| TTN | The Things Network |
| UDP | User Datagram Protocol |
| UNB | Ultra-Narrow Band |
| WAN | Wide Area Network |
| WLAN | Wireless Local Area Network |

Popis slika

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1. IoT referentni model..... | 5 |
| Slika 2. IoT komunikacijske tehnologije | 8 |
| Slika 3. Usporedba performansi mobilnih mreža, LPWAN mreža i mreža kratkog dometa..... | 13 |
| Slika 4. Udio IoT projekata u raznim segmentima | 14 |
| Slika 5. Frekvencijski pojasevi koje koristi LoRa tehnologija | 15 |
| Slika 6. Prikaz up-chirpa i down-chirpa..... | 17 |
| Slika 7. Promjena frekvencije vremenskog uzorka signala emitiranog od strane LoRa odašiljača..... | 18 |
| Slika 8. Format LoRa okvira | 20 |
| Slika 9. Slojevita organizacija LoRa i LoRaWAN | 21 |
| Slika 10. Format LoRaWAN okvira | 22 |
| Slika 11. Arhitektura LoRaWAN mreže..... | 24 |
| Slika 12. Fiksna širina kanala koju koristi Sigfox | 27 |
| Slika 13. Kronologija prijenosa podataka Sigfox tehnologijom..... | 28 |
| Slika 14. Format Sigfox okvira za uzlaznu vezu | 29 |
| Slika 15. Format Sigfox okvira za silaznu vezu..... | 30 |
| Slika 16. Arhitektura Sigfox mreže..... | 30 |
| Slika 17. Dva glavna sloja Sigfox mreže..... | 31 |
| Slika 18. Načini rada NB – IoT tehnologije | 34 |
| Slika 19. Format NB-IoT okvira za silaznu i uzlaznu vezu | 36 |
| Slika 20. Arhitektura NB-IoT mreže | 38 |
| Slika 21. Pokrivenost LoRaWAN mrežom na području grada Zagreba | 44 |
| Slika 22. Područje pokrivenosti Sigfox mreže u RH..... | 45 |
| Slika 23. Područje pokrivenosti NB - IoT mrežom | 46 |
| Slika 24. Usporedba životnog vijeka baterije LoRaWAN i NB-IoT krajnjih uređaja ... | 47 |
| Slika 25. Poslovni model pametnog dijeljenja bicikla..... | 51 |
| Slika 26. Primjer rješenja za pametnu poljoprivredu | 53 |
| Slika 27. Primjer rješenja pametne ulične rasvjete | 55 |
| Slika 28. Primjer rješenja za praćenje imovine | 56 |

Popis tablica

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablica 1. Usporedba tehnologija ZigBee, BLE i Wi-Fi 802.11 | 10 |
| Tablica 2. Stope podataka za frekvencijski pojas EU868 | 19 |
| Tablica 3. Tehnološke razlike između LoRaWAN, Sigfox i NB-IoT bežičnih mreža.. | 42 |
| Tablica 4. Cijene LoRaWAN, Sigfox i NB-IoT mreža (na datum: 21. 11. 2017.)..... | 49 |

Popis grafikona

| | |
|-----------------------------------------------------------|---|
| Grafikon 1. Zastupljenost IoT uređaja tijekom godina..... | 4 |
|-----------------------------------------------------------|---|



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj _____ završni rad

isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

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

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

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu _____ završnog rada pod naslovom **Usporedba LoRaWAN, Sigfox i NB-IoT bežičnih senzorskih mreža**

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

U Zagrebu, 27. lipanj 2020.

Student/ica:

Dora Radičević *Radičević*
(potpis)