

Primjena tehnologija širokog područja male snage u ruralnim IoT mrežnim scenarijima

Opačak, Josipa

Master's thesis / Diplomski rad

2018

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:031394>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-10**

Repository / Repozitorij:

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



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

Sveučilišni studij

**PRIMJENA TEHNOLOGIJA ŠIROKOG PODRUČJA POKRIVANJA
MALE SNAGE U RURALNIM IoT MREŽNIM SCENARIJIMA**

Diplomski rad

Josipa Opačak

Osijek, 2018

Sadržaj

| | |
|---|-----------|
| 1. UVOD | 1 |
| 1.1. ZADATAK DIPLOMSKOG RADA | 1 |
| 2. INTERNET STVARI | 2 |
| 2.1. KONCEPT INTERNETA STVARI | 2 |
| 2.2. RAZVOJ KONCEPTA INTERNETA STVARI | 3 |
| 2.3. NEDOSTATCI KONCEPTA INTERNETA STVARI | 3 |
| 2.4. PERSPEKTIVA RAZVOJA RADIOTEHNOLOGIJA U INTERNET STVARIMA | 3 |
| 3. KARAKTERISTIKE LPWAN TEHNOLOGIJA | 5 |
| 3.1. ŠIROKO PODRUČJE POKRIVANJA SIGNALOM | 5 |
| 3.2. VRLO NISKA SNAGA | 6 |
| 3.3. NISKA CIJENA | 8 |
| 3.4. SKALABILNOST | 8 |
| 3.5. OČUVANJE DEFINIRANIH RAZINA KVALITETE USLUGA | 10 |
| 4. BEŽIČNI PRIJENOS PODATAKA | 11 |
| 4.1. OSNOVE PRIJENOSA PODATAKA | 11 |
| 4.1.1. KOMUNIKACIJSKI PROTOKOLI I SLOJEVITI MODEL | 11 |
| 4.1.2. TCP/IP- REFERENTNI MODEL | 11 |
| 4.1.3. PETEROSLOJNI STOG - HIBRIDNI REFERENTNI MODEL INTERNETSKOG PROTOKOLA | 11 |
| 4.1.4. ISO/OSI REFERENTNI MODEL | 12 |
| 4.2. SLOJEVI MREŽNIH MODELA I NJIHOVI ZADATCI | 12 |
| 4.3. TEHNOLOGIJE ZA BEŽIČNI PRIJENOS PODATAKA U INTERNET STVARIMA | 14 |
| 4.3.1. TEHNOLOGIJE ZA BEŽIČNI PRIJENOS KRATKOG DOMETA | 15 |
| 4.3.2. MOBILNE MREŽE | 16 |
| 5. LPWAN RJEŠENJA | 20 |
| 5.1. LPWAN TEHNOLOGIJE | 21 |
| 5.1.1. LORA ALLIANCE | 21 |
| 5.1.2. SIGFOX | 25 |
| 5.1.3. INGENU | 26 |
| 5.1.4. ENOCEAN | 27 |
| 5.1.5. WEIGHTLESS | 29 |
| 5.1.6. IEEE 802.11AH/WI-FI-HALOW | 30 |
| 5.2. MEĐUNARODNA RASPROSTRANJENOST LPWAN RJEŠENJA | 30 |
| 6. PRIMJERI PRIMJENE IOT REJEŠENJA | 31 |
| 6.1. ELEKTRIČNO MJERENJE | 31 |

| | |
|--|--|
| 6.2. PAMETNA POLJOPRIVREDA | 31 |
| 6.3. AUTOMATIZACIJA POLJOPRIVREDE..... | 32 |
| 6.4. PAMETNA GRADNJA | 32 |
| 6.5. PRODAJNA MJESTA NA MALO | 32 |
| 6.6. PRAĆENJE PALETE ZA LOGISTIKU | 32 |
| | |
| <u>7. PRIMJENA IOT KONCEPTA U RURALNIM PODRUČJIMA.....</u> | <u>34</u> |
| | |
| 7.1. PAMETNA POLJOPRIVREDA | 34 |
| 7.2. PREDNOSTI PAMETNE POLJOPRIVREDE | 34 |
| 7.3. RAZVIJANJE IOT RJEŠENJA..... | 35 |
| 7.4. PRIMJENA PAMETNE POLJOPRIVREDE | 36 |
| 7.5. LPWAN PRUŽATELJI USLUGA | 39 |
| 7.6. PRIMJERI PRIMJENE PAMETNE POLJOPRIVREDE | 40 |
| 7.6.1. LOCIRANJE OBJEKATA | 41 |
| 7.6.2. NADZOR IZVORA VODE | 41 |
| 7.6.3. PRAĆENJE ZAPOSLENIKA FARME | 42 |
| 7.7. NEKI OD PUBLICIRANIH PRIMJERA PRIMJENE LPWAN RJEŠENJA | 42 |
| 7.8. ISTRAŽIVANJE USPJEHA LPWAN RJEŠENJA U PAMETNOJ POLJOPRIVREDI..... | 43 |
| | |
| <u>8. USPOREDBA POSTOJEĆIH LPWAN SUSTAVA</u> | <u>46</u> |
| | |
| 8.1. PARAMETRI ZA OPIS LPWAN SUSTAVA..... | 46 |
| 8.2. OPIS ODABRANIH RJEŠENJA..... | 48 |
| 8.2.1. LORAWAN..... | 48 |
| 8.2.2. SIGFOX..... | 51 |
| 8.2.3. INGENU | 53 |
| 8.2.4. ENOCEAN | 55 |
| 8.3. ZNAČAJKE ODABRANIH RJEŠENJA I SUSTAV VREDNOVANJA PRI USPOREDBI RJEŠENJA..... | 58 |
| | 58 |
| | |
| <u>LITERATURA</u> | <u>62</u> |
| | |
| <u>SAŽETAK.....</u> | <u>66</u> |
| | |
| <u>ABSTRACT</u> | <u>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</u> |
| | |
| <u>ŽIVOTOPIS.....</u> | <u>67</u> |

1. UVOD

Digitalizacija koja je u stalnom porastu, postaje sve prisutnija u svakom aspektu života. Uvođenjem koncepta Interneta stvari (engl. *Internet of Things*, IoT) započinje nova faza razvoja različitih strojeva i elektroničkih uređaja koji se počinju dizajnirati poput malih računala. Oni se povezuju na Internet, Internetom šalju svoje podatke, odnosno podatke iz svoje okoline te ih primaju od ostalih uređaja, obrađuju i na osnovu njih donose odluke koje zatim šalju dalje mrežom. Dakle, ključna značajka koncepta koji se naziva Internetom stvari temelji se na povezivanju uređaja na Internet. Jedan od osnovnih izazova vezanih uz implementaciju koncepta Interneta stvari bio je vezan uz mogućnost napajanja uređaja iz baterija koje su jedva zadovoljavale postojeće energetske potrebe. Rješenje ovog problema nađeno je u primjeni mreža male snage širokog područja pokrivanja, (engl. *Long-power Wide-Area Network*, skr. LPWAN).

Primjena mreža male snage koje pokrivaju široko područje, odnosno imaju dulji domet, privlači puno pozornosti zbog njihove mogućnosti međusobnog povezivanja udaljenih uređaja uz minimalnu potrošnju energije [1]. U realizaciji koncepta Interneta stvari, LPWAN tehnologija nadopunjuje, a u nekim slučajevima i nadmašuje konvencionalne mobilne tehnologije i bežične tehnologije kratkog dometa. U ovom diplomskom radu kroz nekoliko poglavlja bit će opisana LPWAN rješenja, koncept Interneta stvari i tehnologije za bežični prijenos podataka koje se koriste. Bit će detaljno opisane i uspoređene najrazvijenije LPWAN tehnologije te će biti prikazana i analizirana njihova primjena. Bit će detaljno opisan dizajn različitih LPWAN rješenja, čiji je cilj umrežavanje iznimno velikog broja uređaja i pokrivenost širokog područja uz minimalnu potrošnju snage [2,3].

1.1.Zadatak diplomskog rada

Ovaj diplomski rad treba sadržavati opis komunikacijskih tehnologija i standarda koji se primjenjuju u mrežama male snage širokog područja pokrivanja (engl. *Low Power Wide Area Network*, LPWAN). Potrebno je međusobno usporediti pojedina mrežna rješenja s obzirom na razlike u mogućim scenarijima njihove primjene. Isto tako, potrebno je analizirati neke postojeće primjere primjene ovih tehnologija u ruralnim scenarijima te istaknuti smjernice njihovog daljnjeg razvoja.

2. INTERNET STVARI

2.1. Koncept Interneta stvari

Koncept Interneta stvari donosi revoluciju u pogledu kvalitete života ljudi i njihovog načina rada. Primjenjiv je na svladavanje glavnih globalnih problema izazvanih enormnim porastom stanovništva - energetske krize, iscrpljivanja resursa i onečišćenja okoliša. Kako bi ovaj koncept bio moguć, uređaji moraju biti međusobno povezani, povezani sa svojom okolinom, međusobno komunicirati te komunicirati s ljudima u cilju donošenja inteligentnih odluka koje bi pozitivno utjecale na cjelokupan ekosustav. Internet stvari (*Internet of Things, IoT*) temelji se na ugrađivanju senzora u objekte – uređaje (poput onih koji se koriste u mnogim domaćinstavima i industrijskim strojevima), živa bića ili biljke; kao i na njihovom povezivanju na Internet [4]. Objekti s ugrađenim sensorima mogu međusobno komunicirati, a mogu se kontrolirati s bilo koje lokacije putem fiksnih ili mobilnih uređaja. Autonomna kontrola objekata pomoću algoritama koji primaju svoje parametre putem integrirane senzorske mreže u pametnom domu više nije novost i omogućuje, primjerice prilagodbu sustava grijanja u kući vremenskim uvjetima.

Izraz "Internet stvari" prvo su počeli koristiti istraživači s *Massachusetts Institute of Technology*-a (MIT) početkom devedesetih godina prošlog stoljeća. U to vrijeme, međutim, to je još uvijek bila jedna od prvih RFID (*Radio Frequency Identification*) mreža koja je omogućila računalima programirano prikupljanje i analizu podataka iz okoliša. RFID je korišten kao inteligentna tehnika lokalizacije tako da se senzori i uređaji mogu identificirati i pružiti informacije o svojem statusu i lokaciji. LPWAN mreže su jedinstvene zbog toga što omogućuju povezivanje uređaja rasprostranjenih na širokom području uz minimalnu snagu, za razliku od tradicionalnih bežičnih mreža kratkog dometa (kao što su Zig-Bee, Bluetooth, Z-Wave), bežičnih lokanih mreža (kao što su WLAN i Wi-Fi) i mobilnih mreža (kao što je globalni sustav za mobilne komunikacije - GSM, LTE (*Long-Term Evolution*) i slično) [5]. Raspon ovih tehnologija je, u najboljem slučaju, ograničen na nekoliko stotina metara, zbog čega se uređaji ne mogu proizvoljno premiještati kao što predviđaju nove tehnologije. Tradicionalne mrežne tehnologije zbog svoje sposobnosti brzog prijenosa podataka nisu energetske učinkovite. Koncept Interneta stvari uvodi pojednostavljenja u smislu složenosti obrade i brzine prijenosa podataka, što je energetske učinkovitije i ekonomski isplativije. LPWAN tehnologije omogućavaju domet od nekoliko desetaka kilometara, vijek trajanja baterija od deset godina, pa na više, te time i nisku cijenu i malu energetske potrošnju.

2.2. Razvoj koncepta Interneta stvari

Koncept Interneta stvari tijekom proteklog desetljeća dolazi sve više u fokus poslovnih organizacija i industrije. Senzorski podaci s uređaja i drugih fizičkih objekata koji se prenose i vrednuju putem Interneta omogućuju i tvrtkama i privatnim korisnicima precizno i prikladno udaljeno upravljanje procesima i uređajima [6]. Sljedeći korak predstavlja omogućavanje primjene Internetskih aplikacija u kućnim ili poslovnim mrežama na prostorima cijelih gradova i država. Iako je Internetska veza zahvaljujući suvremenoj mobilnoj tehnologiji izuzetno dobra, iziskuje visoke troškove pri integraciji velikog broja senzora. Osim toga, postoje područja gdje čak niti mobilni uređaji ne mogu ostvariti kvalitetan prijem signala, poput primjerice u podzemnim objektima kao što su kanalizacijski objekti ili podrumi velikih građevinskih kompleksa. Uz prednosti položaja takvih odašiljača i njihovih troškova priključenja u postojećim radijskim mrežama, napajanje prijenosnih jedinica uvijek igra važnu ulogu. Zbog toga sve više senzora upravlja električnom energijom proizvedenom u vlastitom okruženju.

2.3. Nedostatci koncepta Interneta stvari

Osim svih prednosti koje osigurava primjena koncepta Interneta stvari, tijekom posljednjih nekoliko godina sve su češće prisutne i kritike vezane uz njegovu primjenu. Posebice se često kritiziraju sigurnosne ranjivosti prisutne pri ostvarivanju komunikacije zasnovane na konceptu Interneta stvari između starijih uređaja. Veliki DDoS napad koji se odvio u 2017. godini uvelike se zasnivao na iskorištavanju ranjivosti komunikacije pametnih kućanskih aparata starije generacije. Val kritika uzrokovan takvim napadima doveo je do primjene naziva u "Internet pokvarenih stvari" [7].

2.4. Perspektiva razvoja radiotehnologija u Internet stvarima

U budućnosti će primjena bežičnih tehnologija za prikupljanje informacija i kontrolu procesa sve više dolaziti do izražaja. Umjesto priključivanja prekidača za svjetlo na električnu mrežu u kući, bežični prekidači mogu se već sada montirati na način da mogu paliti svjetlo putem *on* i *off* opcija. Osim toga, mnoge tvrtke već nude inteligentne žarulje kojima se upravlja putem WLAN-a pomoću pametnih kućnih aplikacija kao što su *Siri*, *Alexa*, *Cortana*, ili aplikacija pomoću kojih se upravlja svjetlinom ili bojom rasvjete.

U nastavku su navedeni izazovi vezani uz primjenu postojećih rješenja za bežične lokalne mreže.

a) Pasivni Wi-Fi

Pasivni Wi-Fi omogućava povezivanje uređaja s obližnjim pristupnim točkama kako bi se mogao analizirati WLAN signal u tom okruženju. Tako bi trebalo biti moguće locirati uređaje koji zrače WLAN signale pretraživanjem izvora radio signala ili mjerenjem snage signala u odnosu određenu lokaciju. Ukoliko bi se uz određeni promatrani Wi-Fi signal povezala osoba, ta bi se osoba mogla pratiti upravo prema korištenom Wi-Fi zapisu [8].

b) Potpuni dupleks

Veliki problem jednokanalnih radijskih frekvencija je takozvana samointerferencija, koju bi slanje podataka u potpunom dupleks modu moglo spriječiti. Samointerferencija znači da bi uređaj koji šalje signal istovremeno primao i dio vlastite energije u svom prijemniku i zbog toga ne bi bio u mogućnosti primiti ostale signale. Stoga je osmišljena tehnologija prilikom koje prijenosni signal i rezultirajući signal interferiraju u primopredajnicima na način da se moduliraju i razdvajaju jedan od drugoga. To otvara veliki prostor za dolazne signale i tijekom procesa prijenosa. Ova tehnologija je razvijena prvenstveno za buduće 5G mobilne uređaje, međutim ona je korisna i za bežične tehnologije kratkog dometa kao što su WLAN ili Bluetooth, kao i za mreže male snage koje se trenutno istražuju [8]. Ova je tehnologija posebno zanimljiva za Internet stvari jer omogućava prijenos jednosmjernog sustava u potpunom dupleks modu, što zauzvrat može utjecati na jediničnu cijenu opreme u pametnom domu.

3. KARAKTERISTIKE LPWAN TEHNOLOGIJA

Uspjeh LPWAN tehnologija zasniva se na njihovoj mogućnosti povezivanja velikog broja uređaja rasprostranjenih na širokim zemljopisnim površinama uz minimalan utrošak energije. U ovom odjeljku su opisane metode LPWAN tehnologija koje su ključne za postizanje ovih, uglavnom oprečnih, ciljeva. Za razliku od drugih bežičnih tehnologija čiji su primarni ciljevi velika brzina prijenosa podataka, manja kašnjenja i veća pouzdanost, cilj LPWAN tehnologija nije brzina prijenosa podataka, nego povezanost velikog broja uređaja na većoj površini. U nastavku su navedene osnovne značajke LPWAN tehnologija.

3.1. Široko područje pokrivanja signalom

LPWAN tehnologije su dizajnirane za pokrivanje širokog područja i izvrsno širenje signala na teško dostupna mjesta, kao što su primjerice podrumi. Cilj je povećanje dobitka za 20dB u odnosu na dosadašnje mobilne sustave [9]. To bi omogućilo krajnjim uređajima povezivanje s baznom stanicom i na udaljenosti od nekoliko desetaka kilometara, ovisno o okruženju u kojem se nalaze [1]. Frekvencijsko područje ispod pojasa od jednog giga herca, tzv. 'Sub-1GHz' frekvencijski pojasevi i posebne modulacijske sheme iskorištavaju se za postizanje tih ciljeva.

- 1) Korištenje Sub-1GHz frekvencijskih pojaseva: Uz iznimku nekoliko LPWAN tehnologija, većina ih koristi Sub-1GHz pojas koji omogućuje robusnu i pouzdanu komunikaciju uz minimalan utrošak energije [10]. U usporedbi s frekvencijskim pojasevima u 2,4 GHz-nom području, rad u nižem frekvencijskom području omogućuje primjenu signala s manjim slabljenjima i manjim gubitcima do kojih dolazi pri nailasku signala na prepreke, kao što su betonski zidovi i razne druge vrste čvrstih površina [9]. U Sub-1GHz pojasevima dolazi do manjih zagušenja, pa je omogućena veća pouzdanost prijenosa podataka uz dugotrajniji životni vijek baterija i širu površinsku rasprostranjenost uređaja. INGENU-ova RPMA tehnologija je iznimno još uvijek koristi 2,4GHz pojas zbog pojednostavljenih propisa vezanih uz radijske signale i maksimalne snage odašiljanja na širem regionalnom području [1].
- 2) Modulacijske tehnike: LPWAN modulacijske tehnike primjenjuju se kako bi se između uređaja ostvarile konekcije od 150+/- 10dB, na udaljenostima od nekoliko desetaka kilometara, kako u naseljenim, tako i u nenaseljenim područjima [9]. Fizički sloj ograničava brzinu prijenosa podataka te usporava brzinu modulacije kako bi se

više energije moglo prenijeti kroz svaki prijenosni bit, odnosno simbol [9, 11]. Zbog toga su prijemnici u mogućnosti dekodirati i jako slabe signale. Za širokopojasnu komunikaciju od iznimne je važnosti osiguravanje visoke modulacijske osjetljivosti [12]. LPWAN moduli imaju osjetljivost prijemnika blizu -150dBm [8], što je visoko u usporedbi s WPAN modulima čija je osjetljivost prijemnika oko -90dBm, te u usporedbi s osjetljivošću ZigBee prijemnika od -100dBm [12,13,14].

3.2. Vrlo niska snaga

Ultra niska potrošnja energije je ključ uspjeha na tržištu niskonaponskih baterijskih IoT, odnosno M2M uređaja. Dugi životni vijek baterija od oko 10 godina ključan je u snižavanju troškova vezanih uz održavanje uređaja. Na potrošnju energije utječe sljedećih nekoliko značajki.

- 1) Topologija: Mrežna topologija značajno utječe na mogućnost proširenja područja koje se pokriva bežičnim mrežama kratkog dometa, međutim trošak implementacije značajno utječe na mogućnost povezivanja velikog broja raspodijeljenih uređaja [1]. Kako se promet preusmjerava preko više čvorova, neki se čvorovi zagušuju prometom sa susjednih čvorova, ovisno o njihovim lokacijama ili količini prenešenog mrežnog prometa [15]. Stoga brže troše baterije, te ograničavaju ukupni životni vijek mreža na samo nekoliko mjeseci. S druge strane, veliki raspon LPWAN tehnologija nadilazi ovo ograničenje izravnim povezivanjem krajnjih uređaja s baznim stanicama, izbjegavajući potrebu za gustom i skupom implementacijom releja i prijemnika. Zvezdasta topologija se naveliko koristi u mobilnim mrežama jer pridonosi energetske učinkovitosti [16,17]. Uređaji više nisu primorani trošiti energiju slušanjem drugih uređaja koji kroz njih prenose svoj promet. Fiksna bazna stanica osigurava brzi pristup kada to zahtijevaju krajnji uređaji [11]. Osim zvezdaste topologije neke LPWAN tehnologije podržavaju i stablastu topologiju i neke druge vrste, ali uz dodatnu složenost u dizajnu protokola.
- 2) Radni ciklus (engl. *Duty Cycling*): Smanjenje potrošnje energije postiže se i povremenim isključivanjem komponenti koje troše energiju, kao što su primopredajnici podataka. Omogućava se isključivanje primopredajnika krajnjih uređaja u trenucima kada oni nisu potrebni. Samo za vrijeme prijenosa, odnosno primanja podataka oni su uključeni. Ukoliko aplikacija treba prenositi podatke samo preko uspostavljene veze, krajnji uređaji se aktiviraju samo kada su podaci spremni

za prijenos. Omogućen je mehanizam rasporeda slušanja. Primjerice, krajnji uređaji slušaju i određeno vrijeme nakon prijensa uzlazne veze kako bi mogli dobiti odgovor. Također, mogu se aktivirati i ovisno o vremenskom dogovoru s baznom stanicom. U području LPWAN tehnologija, radni ciklus primopredajnika nije samo mehanizam kojim se može potići ušteda energije, nego je i zakonodavno definirani okvir vezan uz raspodjelu spektra, kako bi se osigurala koegzistencija s drugim uređajima koji dijele isti kanal. Osim primopredajničkih komponenti, mehanizam se može prilagoditi i za ostale hardverske komponente, kao što su primjerice mikrokontroleri.

- 3) Kontrola pristupa: Najčešće korišteni protokoli za kontrolu pristupa na podatkovnom sloju, odnosno na MAC (*Medium Access Control*) podsloju za mobilne mreže ili bežične mreže kratkog dometa, su presloženi za LPWAN tehnologije. Primjerice, mobilne mreže sinkroniziraju rad baznih stanica i korisničke opreme kako bi imale koristi od složenih MAC shema. Međutim ta složena kontrola na MAC podsloju nije ekonomična za LPWAN tehnologije, te su za LPWAN tehnologije pogodniji jednostavniji sustavi za slučajni pristup. ALOHA protokol za slučajni pristup prijenosnom mediju koriste krajnji uređaji kada započnu prijenos podataka bez korištenja senzora za prijenos. Time se osiguravaju jednostavnost i niski troškovi prijensa. Međutim, tehnologije poput INGENU i NB-IoT također koriste i protokole temeljene na vremenskoj raspodjeli pristupa mediju (TDMA) kako bi učinkovitije raspodijelili radijske resurse, ali na uštrb složenosti strukture uređaja, te time i njihovih troškova [9,19].
- 4) Pojednostavljanje dizajna krajnjih uređaja: Većina tehnologija pojednostavljuje dizajn krajnjih uređaja prebacivanjem složenih zadataka na bazne stanice, odnosno na pozadinske sustave. Bazne stanice, podržavajući hardversku raznolikost, sposobne su za istovremeno primanje i odašiljanje signala preko više kanala i s više krajnjih uređaja. To omogućuje krajnjem uređaju slanje podataka pomoću bilo kojeg raspoloživog kanala, koji dolaze do bazne stanice, dakle bez potrebe za skupom signalizacijom za pokretanje komunikacije. Sustav pozadinske podrške je također odgovoran za pružanje podrške krajnjim uređajima prilikom slanja signala kroz više baznih stanica te pri suzbijanju duplikata, ukoliko postoje [20]. Ograničavanjem složenosti baznih stanica i sustava pozadinske podrške osiguravaju se niske cijene krajnjih uređaja. Osim pri uspostavu komunikacije, krajnji uređaji također mogu služiti pri obradi podataka. Međutim, dok neke aplikacije mogu zahtijevati učestal

obradu podataka, neke mogu zahtijevati samo povremenu obradu. Iz perspektive potrošnje energije, komunikacijski procesi troše puno više energije od same obrade podataka. Stoga se ispituje mogućnost samo lokalnih obrada i prijavljivanja obrađenih rezultata. Kada troškovi komunikacije ne ovise o količini podataka korisno je primjenjivati jednostavnije krajnje uređaje [20].

3.3. Niska cijena

Komercijalni uspjeh LPWAN mreža zasniva se na povezivanju velikog broja krajnjih uređaja uz zadržavanje iznimno niskih troškova hardvera, uz jako niske cijene pretplata [21]. LPWAN tehnologije omogućavaju nekoliko načina smanjenja kapitalnih i operativnih troškova, kako za krajnje korisnike tako i za mrežne operatore. Korištenje odgovarajućih topologije te jednostavnih MAC protokola i tehnika za pojednostavljenje dizajna krajnjih uređaja dovode do cjelokupne jednostavnosti uređaja, te time do njihovih nižih cijena [16].

- 1) Smanjenje složenosti hardvera: U usporedbi s mobilnim i bežičnim tehnologijama kratkog dometa, LPWAN primopredajnici trebaju obraditi manje složene valne oblike. Time se smanjuje brzina prijenosa podataka, veličina memorije, a samim time i složenost hardvera, te njegova cijena.
- 2) Nužna infrastruktura: Tradicionalne bežične i žične tehnologije ograničene su svojim maksimalnim dometom, što zahtijeva gusto raspoređivanje mrežne infrastrukture i povećava troškove implementacije. Međutim u slučaju LPWAN tehnologija, jedna bazna stanica povezuje nekoliko desetaka tisuća krajnjih uređaja raspoređenih na nekoliko kilometara, značajno smanjujući kapitalne troškove mrežnih operatora [1].
- 3) Korištenje nelicenciranih frekvencijskih pojaseva: Troškovi koji su potrebni za licenciranje novog frekvencijskog područja za primjenu LPWAN tehnologije su u suprotnosti s niskim operativnim troškovima, što je njihov primarni cilj.

3.4. Skalabilnost

Jedan od ključnih zahtjeva LPWAN tehnologija je podrška za veliki broj uređaja koji šalju malu količinu prometa. Ove tehnologije bi trebale raditi s velikim brojem gusto povezanih uređaja. U

razmatrajnu je nekoliko tehnika koje bi se trebale moći nositi s ovim problemom skalabilnosti [22].

- 1) Diverzifikacija: Kako bi se omogućilo povezivanje što većeg broja uređaja, od iznimne je važnosti učinkovito iskorištavanje postojećih komunikacijskih kanala, vremena, prostora te hardvera. Minimalan utrošak energije i kapitalni troškovi omogućeni su kroz izbor odgovarajuće mrežne opreme. LPWAN tehnologije koriste višekanalne i višesmjerne komunikacijske sustave za paraleliziranje procesa prijenosa podataka među povezanim uređajima. Komunikacija između uređaja je otporna na smetnje uzrokovane korištenjem više kanala istovremeno, kao i na smetnje uzrokovane redundantnim prijenosima.
- 2) Densifikacija: Kako bi bio omogućen gust raspored uređaja u određenim područjima, LPWAN mreže, kao i tradicionalne mobilne mreže, pronalaze rješenje u gustom rasporedu baznih stanica. Problem se nalazi u potrebi za izbjegavanjem interferencije između krajnjih uređaja i baznih stanica [23]. Ti problemi se rješavaju dobrom koordinacijom pri upravljanju radijskim resursima unutar i između baznih stanica.
- 3) Adaptivni odabir kanala i brzina prijenosa podataka: LPWAN sustavi, osim što trebaju omogućavati povezanost velikog broja uređaja, također trebaju osigurati i pouzdanu i energetski učinkovitu komunikaciju. Prilagodba je moguća s obzirom na odabir modulacijskih shema, odabir odgovarajućih kanala za uspostavu pouzdane komunikacije s obzirom na udaljenost uređaja, prilagođavanje kontrole snage prijenosa, sveukupno praćenje kvalitete povezivanja i koordinaciju između krajnjih uređaja i mreže. Udaljenost pri kojoj je moguća prilagodba kanala i shema ovisi o temeljnoj LPWAN tehnologiji [24]. U slučajevima kada bazna stanica ne može dati povratne informacije o kvaliteti *uplink* komunikacije i / ili obavijestiti krajnje uređaje o prilagodbi parametara komunikacije, krajnji uređaji zauzimaju vrlo jednostavni mehanizam za poboljšanje kvalitete veze. Takav mehanizam uključuje prijenos istog paketa više puta, često kroz više slučajno odabranih kanala, u cilju da barem jedna kopija dosegne baznu stanicu uspješno. Takvi mehanizmi povećavaju pouzdanost *uplink* veze, uz istodobno zadržavanje složenosti dizajna i troškova krajnjih uređaja. U slučajevima kada neka odlazna veza može omogućiti prilagodbu *uplink* parametara, bazne stanice ili pozadinski sustavi podrške mogu odigrati ključnu ulogu u odabiru optimalnih parametara,

kao što su odgovarajući komunikacijski kanali ili optimalna brzina prijenosa podataka u cilju poboljšanja pouzdanosti i energetske učinkovitosti. Postoji razmjena između skalabilnosti mreže i jednostavnosti krajnjih uređaja niske cijene. Većina LPWA tehnologija omogućuje da krajnji uređaji niske snage pristupaju ograničenim radijskim izvorima na uglavnom neusklađen i nasumičan način, ali uz ograničavanje broja uređaja koje mreža može podržati.

3.5. Očuvanje definiranih razina kvalitete usluga

LPWAN tehnologije omogućuju primjenu različitih aplikacija s različitim zahtjevima. S jedne strane postoji tolerancija na gubitke nastale u prijenosu podataka uz primjenu pojedinih aplikacija, dok se s druge strane primjenjuju i aplikacije kod kojih ne postoji tolerancija na odstupanja. Potrebno je definirati mehanizme za koegzistenciju različitih vrsta prometa. Trenutne LPWAN tehnologije ne pružaju konkretnu razinu kvalitete usluge (QoS), odnosno pružaju ograničeni QoS [25].

4. BEŽIČNI PRIJENOS PODATAKA

4.1. Osnove prijenosa podataka

4.1.1. Komunikacijski protokoli i slojeviti modeli

Uspostava komunikacijske veze u računalnim mrežama je zadatak komunikacijskih protokola. Čim se najmanje dva uređaja uključe u izvršavanje zadataka u mreži, njihova hardverska i softverska sučelja upotrebljavaju protokole. Protokol definira postupak i pravila mrežne komunikacije, opisuje oblik u kojem se prosljeđuju podaci, redoslijed i veličinu paketa koji se šalju. Autori *Kurose* i *Ross* [26] su pojasnili ovaj proces na sljedeći način:

"Protokol definira format i redoslijed razmjene podataka između dvaju ili više komunikacijskih entiteta, kao i radnje poduzete za prijenos i / ili primanje podataka."

Za strukturiranje komunikacijskog procesa protokoli se definiraju na pojedinim mrežnim slojevima. Svaki od slojeva, kao i povezanih protokola, ispunjava specifične zadatke. Na primjer, dok je najniži sloj odgovoran za fizički prijenos toka podataka preko komunikacijskih linkova, drugi slojevi su potrebni za zadatke kao što su odredišno adresiranje, pa sve do prezentacije paketa u krajnjoj aplikaciji. Prijenos podataka putem internetske mreže, definiran je pomoću slojevite mrežne arhitekture na kojoj se temelji komunikacija u mreži. TCP / IP referentni model, i ISO / OSI referentni model. U sljedećem odjeljku ukratko su opisani ovi modeli, a zatim bežični komunikacijski protokoli. [26]

4.1.2. TCP/IP- referentni model

TCP / IP model opisuje strukturu protokola s podjelom na četiri sloja: pristup mreži, pristup internetu, prijenos podataka i primjena. Po definiciji, ti su slojevi odvojeni, što znači da protokoli koji se koriste za izvršavanje zadataka mogu biti odabrani iz više mogućih protokola koji se koriste na svakom sloju. Podatci koji se šalju, nazvani porukom, za svaki sloj dobivaju određeno zaglavlje koje sadrži podatke potrebne za taj sloj. [27].

4.1.3. Peteroslojni stog - hibridni referentni model internetskog protokola

Peteroslojni internetski protokol, također poznat kao hibridni referentni model, temelji se na TCP/IP referentnom modelu, ali se razlikuje u podjeli slojnog pristupa mreži u dva neovisna

sloja te u preimenovanju internetskog sloja u prijenosni sloj. Mrežni sloj TCP / IP protokola dijeli se na fizički sloj i sigurnosni sloj hibridnog referentnog modela [27].

4.1.4. ISO/OSI referentni model

Krajem 1970-ih godina, međunarodna organizacija za normizaciju (ISO) predložila je podjelu računalnih mreža u sedam, umjesto u pet slojeva. Ovaj model nazvan je *Open Systems Interconnection Standard* (OSI). U usporedbi s hibridnim referentnim modelom, OSI model između aplikacijskog sloja i transportnog sloja nadopunjen je s dva dodatna sloja, to su prezentacijski sloj i sloj sjednice. Iako se taj se model koristi u istraživanju i poučavanju, pri sve značajnijoj primjeni Interneta izgubio je na važnosti, jer su izvorni zadaci dvaju dodatnih slojeva prebačeni u aplikacijski sloj [28]. Prezentacijski sloj definira način kompresije, enkripciju i opis podataka. Opis podataka odnosi se na tumačenje formata datoteka dostupnih u paketu, što se može razlikovati ovisno o uređaju ili operacijskom sustavu. Sloj sjednice opisuje strukturu i sinkronizacije pri razmjeni podataka i uključuje sheme *backup* i *recovery*.

Nedostatak tih dvaju slojeva u peteroslojnom modelu može se objasniti činjenicom da se svaka aplikacija ne oslanja nužno na usluge slojeva. Stoga, je svakom razvojnom programeru ostavljeno na izbor koju funkciju aplikacijski sloj treba sadržavati [26].

4.2. Slojevi mrežnih modela i njihovi zadatci

U nastavku se ukratko opisuju i objašnjavaju pojedini slojevi i njihovi zadaci u tzv. *top-down* pristupu. To znači da se započinje s aplikacijskim slojem i završava s fizičkim slojem.

a) Aplikacijski sloj

Ovaj sloj definira protokole koje koriste aplikacije u mreži. Najpoznatiji internetski protokoli obuhvaćaju protokol HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*) koji omogućuje uređajima da zahtijevaju ili prenose Internetske dokumente, FTP (*File Transfer Protocol*) za slanje datoteka, ili SMTP (*Simple Mail Transfer Protocol*) za slanje poruka elektroničke pošte. [26]

b) Transportni sloj

Protokoli tog sloja porukama, tj. segmentima dodaju zaglavlje s potrebnim informacijama. Ovo zaglavlje sadrži, pored informacija za pravilno sastavljanje poruke, i informaciju o broju porta na kojem informaciju treba biti primljena na prijemniku. Tamo se ovi segmenti ponovno prepoznaju i mogu se pravilno sastaviti pomoću odgovarajućeg zaglavlja. Dva protokola koja se koriste,

TCP (*Transmission Control Protocol*) i UDP (*User Datagram Protocol*) razlikuju se prema načinu prijenosa podataka [29].

TCP omogućuje konekcijsku uslugu. To znači da su prije slanja podataka klijent i poslužitelj već razmijenili kontrolne informacije koje obje strane koriste pri prijenosu. Osim toga, omogućuju i dodatne funkcije, kao što su kontrola protoka, mehanizmi kontrole preopterećenja te otkrivanje i popravak izgubljenih paketa. Kontrola protoka prilagođava brzine prijenosa podataka. Ako je mreža preopterećena zbog povećanog mrežnog prometa, to se može otkriti pomoću kontrolnog mehanizma i brzina prijenosa može se koordinirati. Zbog posebnih polja u TCP zaglavlju može se stvoriti kontrolni zbroj koji osigurava da su svi segmenti poruke stigli. Zahvaljujući tome, TCP se smatra pouzdanim [26].

S druge strane, UDP se krosti pri nepouzdanom prijenosu podataka. Ovaj protokol ne uspostavlja vezu između izvora i odredišta podataka. Za razliku od TCP-a, nema kontrolu protoka podataka, odnosno mehanizme kontrole preopterećenja. Tako je moguće da paketi bez obzira na preopterećenje pokušavaju stići na odredište. Pored toga, paketi mogu doći različitim redosljedom od onog kojim su poslani s poslužitelja. Budući da protokol nema mehanizam za potvrdu, prijenos segmenta se nikada ne može jamčiti. Međutim, UDP također može odrediti pomoću poslanog kontrolnog zbroja da li su svi segmenti poruke stigli. Aplikacije u realnom vremenu kao što je IP telefonija pridaju veliki značaj na kontinuiranoj brzini prijenosa i mogu podnijeti određeni gubitak paketa prije nego što se osjetio gubitak kvalitete. Upravo zbog toga, te aplikacije preferiraju primjenu UDP protokola. [26]

c) Mrežni sloj

Sljedeći sloj protokola je mrežni sloj. Odgovoran je za ispravno prosljeđivanje paketa kroz mrežu. Paketi mrežnog sloja nazivaju se i datagrami. Protokol za adresiranje i prosljeđivanje datagrama je IP (*Internet Protocol*). Baš kao što TCP i UDP paket mogu poslati podatke na točno odredište, tako je i IP u mogućnosti locirati primatelja na osnovu njegove IP adrese. Svi uređaji koji komuniciraju na Internetu zahtijevaju IP adresu kako bi komunikacija mogla biti omogućena. Osim IP protokola postoje i protokoli za adresiranje i usmjeravanje na mrežnom sloju. Ti protokoli koriste različite pristupe kako bi se uspostavili najučinkovitiji i najsigurniji načini komunikacije. [26]

d) Podatkovni sloj

Podatkovni sloj, odnosno pripadni MAC podsloj, odgovoran je za usmjeravanje dolaznog paketa s jednog mrežnog čvora na sljedeći na putu do primatelja. Usluge koje se specifično primjenjuju razlikuju se ovisno o vrsti korištenog protokola. U tom sloju, datagrami se pakiraju u okvire i prenose se, primjerice, pomoću Ethernet protokola. Na putu od odašiljača do prijemnika, može se dogoditi da okvir prođe preko nekoliko različitih puteva gdje se koriste različiti prijenosni protokoli. Obrada se vrši preko MAC adrese, koja predstavlja jedinstvenu fizičku adresu mrežnog uređaja [26].

Ta IoT rješenja je primjena ovog sloja od posebne važnosti, budući da veliki dio IoT protokola koristi ovaj sloj.

e) Fizički sloj

Dok podatkovni sloj prenosi cijeli okvir podataka s jednog čvora na drugi, fizički sloj omogućuje prijenos pojedinih bitova. Protokoli koji se ovdje koriste moraju se prilagoditi prijenosnom mediju koji će se koristiti, kao što je bakreni, svjetlovodni ili koaksijalni kabel. [26].

Za LPWAN aplikacije, ovaj prijenos se ne provodi putem kabela već putem radijskih veza. Ovisno o pružatelju usluga, vrste prijenosa se razlikuju prema različitim parametrima, kao što su modulacija ili frekvencijsko područje koje se koristi.

4.3. Tehnologije za bežični prijenos podataka u Internet stvarima

Koncept Interneta stvari već koristi mnoge tehnologije koje se prilagođavaju zahtjevima kao što su dugi vijek trajanja baterije i manja širina frekvencijskog pojasa. U zatvorenim prostorima upotrebljavaju se tehnologije poput Wi-Fi i Bluetooth, što je obično prikladno za kućne aplikacije. Za upotrebu u industriji, međutim, te tehnologije obično nisu dovoljne jer ne mogu zadovoljiti potrebne specifikacije u različitim aspektima.

Sljedeći odjeljak najprije opisuje trenutne bežične tehnologije u lokalnoj mreži pri komunikaciji kratkog dometa i primjeni tehnologija koje koriste mobilne širokopojasne mreže, te zatim specifične LPWAN tehnologije i njihovu razliku u odnosu na alternativna rješenja.

4.3.1. Tehnologije za bežični prijenos kratkog dometa

a) Bluetooth

Bluetooth je bežični standard za prijenos podataka na kratke udaljenosti putem radijske veze. Prenose se podaci između različitih uređaja koji su udaljeni od 10-ak do 100 metara. Nije bitno jesu li uređaji fiksni ili mobilni. Uz to, istovremeno se s Bluetooth-om može međusobno povezati više uređaja. Da bi se jasno prepoznale i druge radijske veze, svaki uređaj ima jedinstveni serijski broj. Osim toga, svaki uređaj ima mikročip koji uključuje jedinicu za odašiljanje i prijam signala te odgovarajući softver koji kontrolira prijenos podataka. Bluetooth se često koristi za pružanje bežičnog kontakta pomoću slušalica, te zvučnika ili printera. U automobilima Bluetooth se koristi za povezivanje pametnog telefona s *hands-free* setom [30].

b) IEEE802.x

IEEE je vodeća svjetska organizacija za standardizaciju. IEEE 802 Ethernet standard dio je projekta standardizacije koji se stalno proširuje. Na primjer, verzija 802.11 uključuje najšire korišteni standard za bežične mreže širom svijeta, WLAN. IEEE 802.11 koristi gotovo sve uređaje koji se žele povezati s bežičnim mrežama na frekvencijskom području od 2,4 GHz. [31] Standard 802.15 za Bluetoothu temelj je mnogih rješenja kao što su ZigBee i Thread. [32].

c) ZigBee

Idući standard za radijski prijenos putem Interneta distribuiran i razvija ZigBee savez osnovan 2002. godine. ZigBee tehnologija temelji se na IEEE 802.15.4 standardu koji je podijeljen prema primjeni i specifikacijama na ZigBee IP/920IP, ZigBee RF4CE i ZigBee PRO.

ZigBee IP/920IP je prvi otvoreni standard za IPv6 koji je baziran na bežične mreže. IP/920IP omogućuje komunikaciju umreženih uređaja i preko specifičnih regionalnih i besplatnih radijskih frekvencija od 1 GHz, pa sve do preko 2.4 GHz. Podatci koji se šalju putem IP/920IP mogu se zaštititi od pristupa treće strane putem AES-128-CCM, čime se osigurava siguran prijenos. Nadalje, ovaj protokol ima vrlo dobru interoperabilnost i može komunicirati preko mnogih standardnih Internetskih protokola, uključujući 6LoWPAN, IPv6, RPL, TCP i UDP. Osobito

kroz korištenje IPv6, moguće je osigurati svaki čvor s vlastitom IP adresom. Također TCP i UDP u kombinaciji s ZigBee IP-om omogućuje korištenje svih Internetskih aplikacija [33].

ZigBee RF4CE je dizajniran za upravljanje multimedijском elektronikom unutar kuće, kao i za upravljanje garažnim vratima i sustavima bez ključa. Dvije su tehnologije uključene - ZigBee daljinski upravljač i ZigBee *Input Device*. Omogućuje funkciju kontrole uređaja kao što su TV, DVD / *Blu-ray* ili uređaja za kontrolu glazbenih sustava, bežičnih miševa i tipkovnica [34].

ZigBee PRO je stvoren posebno za IoT aplikacije. Omogućuje nisku potrošnju energije u bežičnoj mreži i podržava do 64 000 uređaja u mreži. Može prenositi podatke i na frekvencijama bez licence kao i na frekvencijama unutar licenciranog 2,4 GHz područja [35].

d) NFC

NFC je dizajniran da omogući beskontaktnu dvosmjernu interakciju između električnih uređaja. Za razliku od već predstavljenih tehnologija, NFC se temelji na ISO/IEC 14443 beskontaktnoj standardnoj pametnoj kartici. Od svih mogućnosti za bežičnu komunikaciju, NFC ima najmanji učinak jer uređaji s ovom tehnologijom mogu slati ili primiti podatke na udaljenost do 10 cm [36].

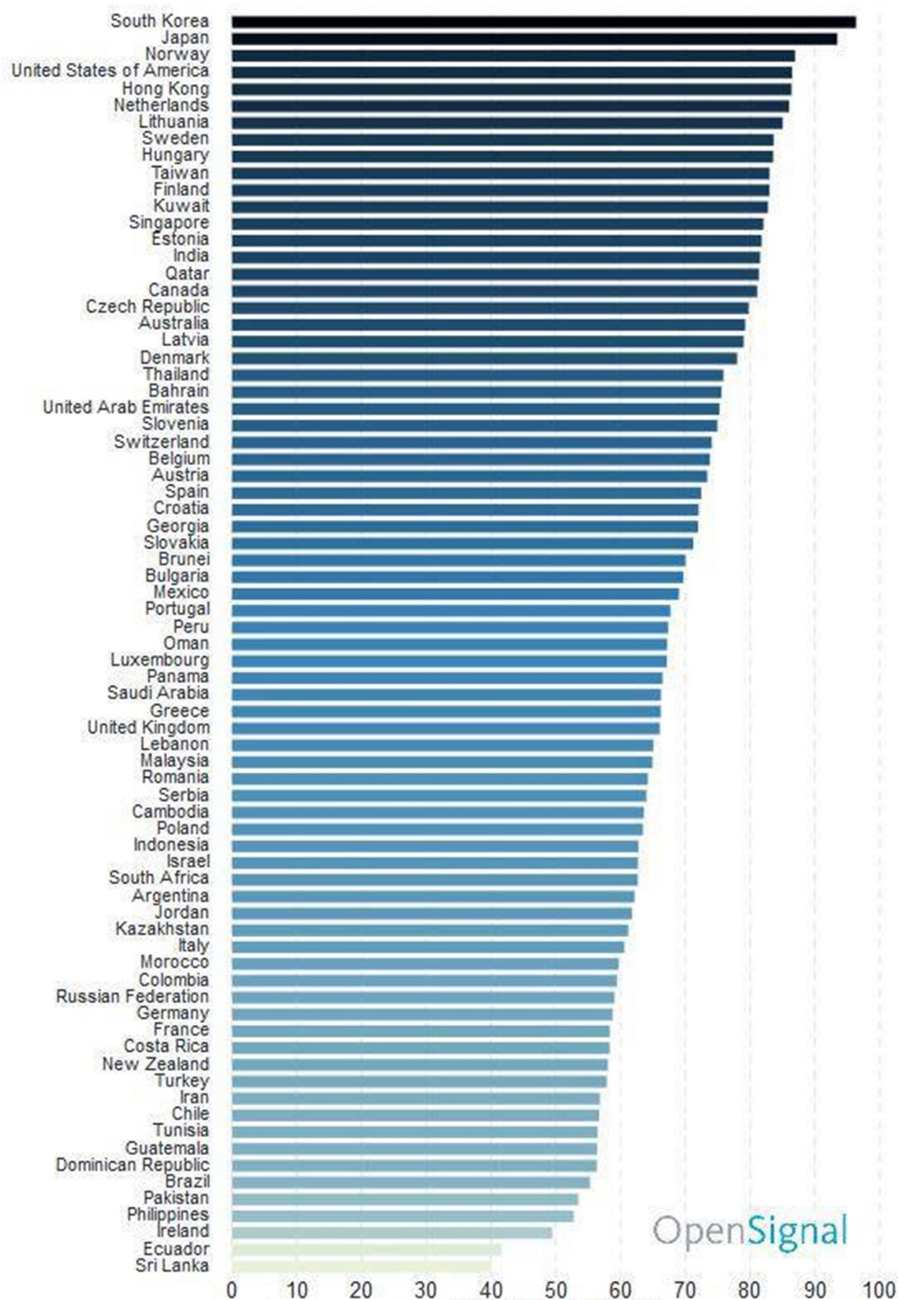
Pogotovo zbog kratkog dometa, NFC je uvjetno upotrebljiv samo za komunikaciju temeljenu na konceptu Interneta stvari, ali može se, na primjer, integrirati u postojeće mrežne proizvode, kako bi se proširili aplikacijama kao što je kontrola pristupa.

e) RFID

RFID je jedna od najstarijih tehnologija prijenosa radijskih signala i potječe iz vojne radarske tehnologije. RFID je automatski identifikacijski sustav koji se može poistovijetiti s globalnim sustavom bar kodova. Ove dvije tehnologije imaju sličan način rada, ali kod RFID tehnologije ne mora postojati izravna vidljivost između čitača i objekta za čitanje [37].

4.3.2. Mobilne mreže

Mobilni je radio signal danas gotovo sveprisutan, a posebno u razvijenim zemljama. Veliki dio područja u državama širom svijeta već je pokrivena 4G mobilnom mrežom. Slika 4.1. daje pregled rezultata studije iz lipnja 2017. godine [38]. Republika Hrvatska je na 13. mjestu među prikazanim državama s 58% dostupnošću LTE signala.



Slika 4.1. LTE rasprostranjenost, *OpenSignal.com* [38]

Iako se stopa pokrivenosti od 50-ak posto možda ne čini velikom, signalom su pokrivena najgušće naseljena područja. Na područjima na kojima postoji pokrivenost područja signalom mobile mreže taj je signal adekvatan za ostvarivanje komunikacije i upravljanje IoT sensorima i uređajima. Međutim, troškovi nabave nove mrežne infrastrukture u cilju pokrivanja novih područja mobilnim signalom obično su previsoki za instalaciju mrežnih senzora.

3GPP (*The 3rd Generations Partnership Project*) je globalna inicijativa za standardizaciju mobilnih tehnologija. Ona stoji, između ostalog, iza poznatih mobilnih standarda kao što su UMTS, GPRS i EDGE, kao i LTE i LTE-*Advanced*. Riječ je o suradnji sedam međunarodnih normiranih tijela:

- ARIB (Udruga radijskih industrija i poduzeća, Japan)
- ATIS (Savez za telekomunikacijska industrijska rješenja, Sjedinjene Američke Države)
- CCSA (Kinesko komunikacijsko udruženje za standardizaciju, Kina)
- ETSI (Europski institut za telekomunikacijske norme, Europa)
- TSDSI (Telekomunikacijski standardi za razvoj društva, Indija)
- TTA (Udruga telekomunikacijskih tehnologija, Koreja)
- TTC (Telekomunikacijski tehnološki odbor, Japan)

3GPP doprinosi razvoju bežične mrežne tehnologije razvijajući nove kodeke, sigurnosne prijenosne standarde i osiguravanje kvalitete prijenosa. Svi podaci i studije razvijaju se u suradnji s tvrtkama članicama te inicijative, te u suradnji s organizacijskom grupom TSG. Radna skupina TSG CT rješava temeljna pitanja vezana uz 3GPP tehnologiju. Trenutno, 3GPP radi na razvoju 4G standarda (LTE *Advanced*), kao i na uvođenju nove generacije, 5G standarda [39].

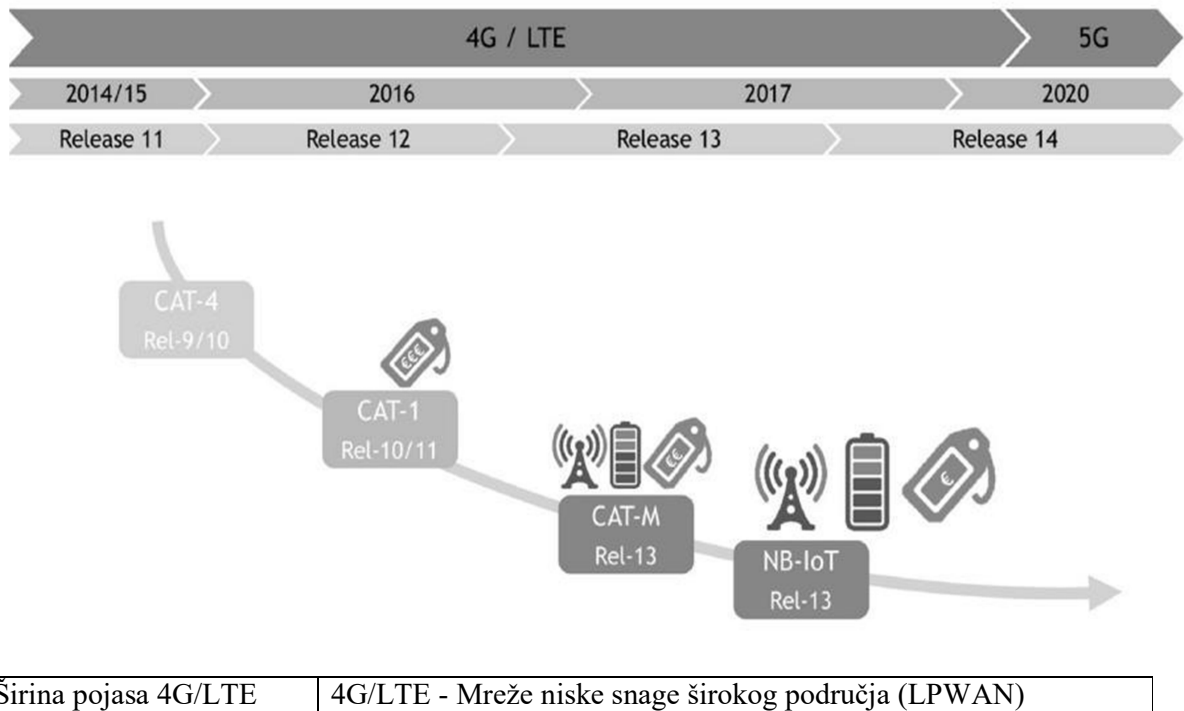
U nastavku su dodatno ukratko navedene mobilne tehnologije i nekoliko generacija standarda.

a) Tehnologije četvrte generacije (4G) mobilnih mreža

LTE je široko poznat kao mobilna komunikacijska tehnologija četvrte generacije, visoke propusnosti i visoke brzine prijenosa podataka. Mobilnu telefoniju karakteriziraju velike širine frekvencijskih pojasa i time omogućene *streaming* i druge napredne komunikacijske mogućnosti.

b) *NarrowBand* IoT tehnologije

Visoka snaga odašiljanja uređaja uključuje veliku potrošnju energije. *NarrowBand*-IoT, također poznat kao LTE-Cat-NB1, značajka je LTE *Advanced* standarda izdanog u 13. izdanju 3GPP-a. Izdanje 13. obuhvaća oko 170 studija i značajki, s jasnim fokusom na razvoj kao poboljšanja postojećih standarda vezanih uz potrošnju energije pri ostvarivanju M2M komunikacije. Evolucija LTE tehnologije prikazana je na slici 4.2. [40].



Slika 4.2. Razvoj mobilnog signala u mrežama (prema LPWAN, Kainz, Bürger) [28]

c) Tehnologije pete generacije (5G) mobilnih mreža

3GPP je odgovoran za razvoj službenog nasljednika 4G tehnologije. Tehnologija 5G je u razvoju, ali se najavljuje kao nasljednik 4G tehnologije, posebice u odnosu na M2M komunikaciju. Konačna tehnologija 5G mora se razlikovati od svog prethodnika *LTE-Advanced*, posebice u pogledu vezanom uz uštedu energije, jer se radi na smanjenju potrošnje energije i u pogledu povećanja brzine prijenosa podataka. Posebno niska potrošnja energije i visoke brzine prijenosa podataka u pravilu su u suprotnosti jedna s drugom. Stoga se pretpostavlja da se obje funkcije ne mogu koristiti istodobno i da je potrebno odlučiti za svaku aplikaciju na čemu je fokus. Za tehničke detalje još nisu spomenuti fiksni podatci. Objavljivanje standarda 5G trenutno se planira za razdoblje između 2020. i 2025. godine [39].

5. LPWAN RJEŠENJA

LPWAN mreže posebno su dizajnirane za radijske IoT veze, kako bi riješili probleme i postojeće ranjivosti prisutne kod drugih sustava, poput WLAN ili mobilnih telefona. Stoga se prema pojedinim svojstvima razlikuju od uobičajenih mobilnih mreža, kao što su Bluetooth ili Wi-Fi.

Tablica 5.1. Razlika između bežičnih tehnologija

| Bežične mreže kratkog dometa (Bluetooth, Wi-Fi) | LPWAN | Mobilne radio veze |
|--|--|--|
| + | + | + |
| Široka rasprostranjenost Primjena u zatvorenim prostorima | Energetska učinkovitost Minimalni troškovi Mobilnost | Velika pokrivenost Visoka propusnost |
| - | - | - |
| Energetska potrošnja Troškovi postavljanja Domet | Niska propusnost Konkurentski standardi | Nedostatak autonomije Visoki troškovi |

Tablica 5.1. prikazuje prednosti i nedostatke odgovarajućih tehnika koje koriste IoT koncept. Wi-Fi i Bluetooth su najčešće tehnologije koje se primjenjuju. Zbog stalnog prijenosa i usmjeravanja podataka stalna opskrba električnom energijom je nužna. LPWAN-ovi imaju iznimno malu brzinu podatkovnog prijenosa, međutim brzina prijenosa podataka dovoljna je za omogućavanje komunikacije zasnovane na konceptu Interneta stvari, jer takve mreže nisu namijenjene za prijenos velikih količina podataka. Za razliku od Wi-Fi ili Bluetooth tehnologije, LPWAN može prenositi podatke na puno veće udaljenosti. Te udaljenosti uz odgovarajuću tehnologiju bez ikakvih problema mogu prelazi 10 km. Također je energetska učinkovitost puno veća zbog znatno niže potrošnje energije senzora, kao i zbog samih troškova nabavke istih.

Struktura LPWAN rješenja temelji se na komunikaciji preko protokola M2M (*Machine to Machine*), koji se često nalazi i na području Interneta stvari, poput MQTT ili CoAP. LPWAN mreže su dizajnirane tako da se sastoje od vrlo velikog broja uređaja [41]. LPWAN mreža se

obično sastoji od nekoliko senzora, koji komuniciraju putem radijske veze s baznom stanicom. Oprimljeni su antenama koje se nazivaju čvorovi. Podatke koje je potrebno prenositi, šalju putem niskofrekvencijskih radijskih valova do baznih stanica, tzv. pristupnika (*gateway*) uređaja, koji služe kao sučelje između čvorova i Interneta. Pristupnik prosljeđuje prikupljene podatke na web poslužitelj u oblaku. Ondje se podaci pohranjuju ili dalje obrađuju. Budući da LPWAN-ovi omogućuju dvosmjernu komunikaciju upute se mogu slati s poslužitelja kroz pristupnik do čvorova. Slika 5.2 prikazuje strukturu LPWAN mreže [12].

U usporedbi s Wi-Fi ili mobilnim rješenjima, LPWAN-ovi omogućuju sljedeće [12]:

- nisku potrošnju energije kako bi se osiguralo dulje trajanje baterije
- nisku cijenu po jedinici osjetnika / pogona
- malu veličinu čvorova
- vrlo visok domet bežičnog signala na račun smanjenja brzine prijenosa podataka
- široku rasporstranjenost mreže.

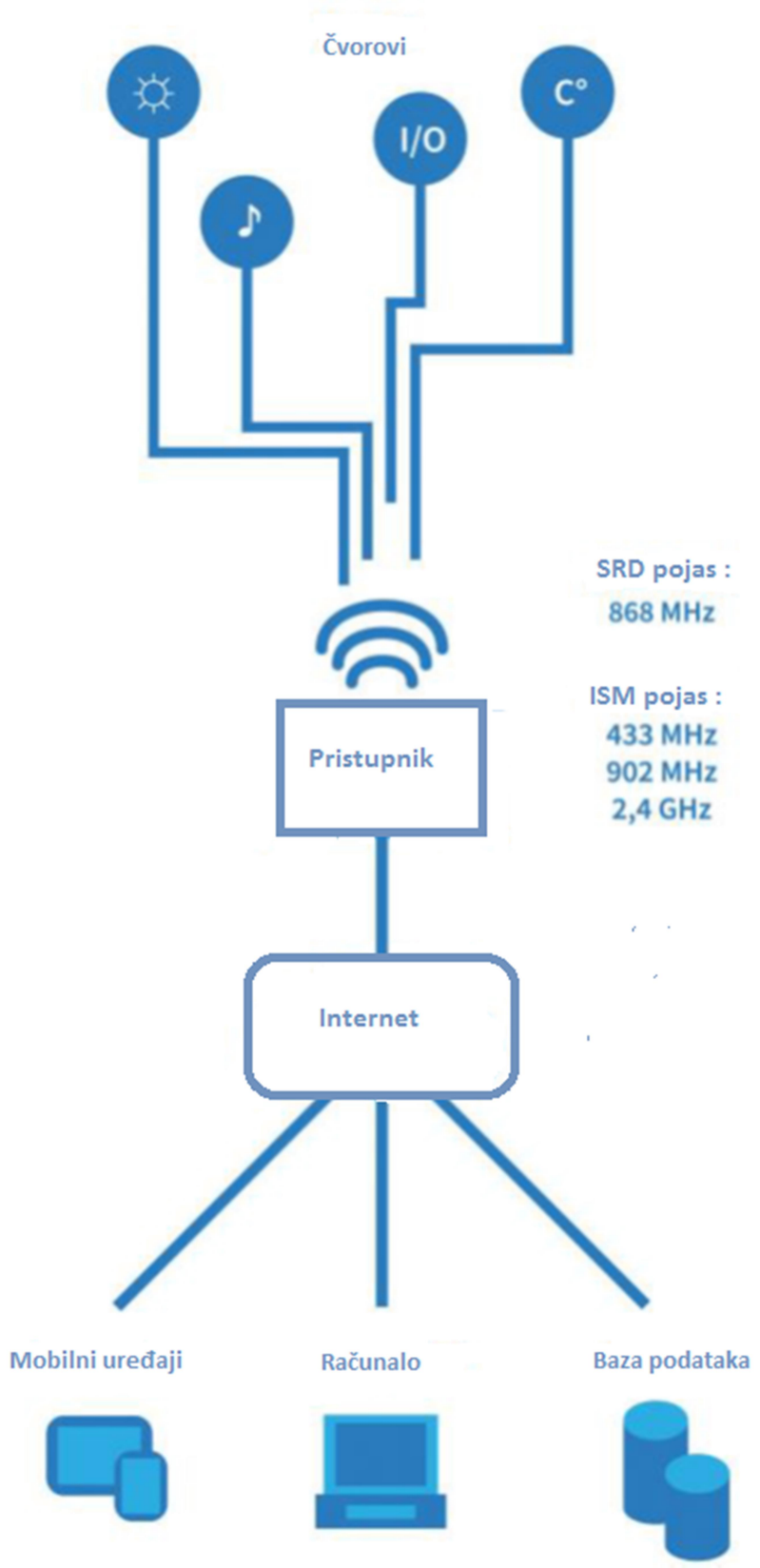
Pristupnici u LPWAN-ovima obično koriste svoje protokole za prijenos podataka na povezane čvorove, ali uglavnom mogu koristiti neke od uobičajenih IoT protokola za obradu i prevođenje. Najčešće korišteni IoT protokoli su CoAP i MQTT.

5.1. LPWAN tehnologije

Sljedeći odjeljak opisuje vodeće dobavljače i programere LPWAN-a. Prikazane su tehnologije koje su zanimljive ili bi mogle postati zanimljive za koncept Interneta stvari. Ovdje nisu razmatrani davatelji mobilnih usluga, s obzirom da njihova rješenja uključuju veliku potrošnju energije i visoke troškove spajanja IoT uređaja s istim. Uz velike organizacije, i mnoge manje tvrtke rade na vlastitim "standardima", međutim u ovom radu će biti iznesene i uspoređene samo najznačajnije alternative.

5.1.1. LoRa Alliance

LoRa Alliance je osnovana od strane vodećih tvrtki koje se bave standardizacijom LPWAN-ova. Preko četrsto tvrtki bavi se specificiranjem LoRa protokola, kao i širenjem znanja o istom.



Slika 5.2. Struktura LPWAN mreže

a) Fizički sloj

Fizički sloj LoRa protokola prenosi podatke preko raznih regionalnih frekvencijskih pojaseva. LoRa podržava frekvencijske pojaseve od 868MHz i 433MHz u Europi, 904MHz u SAD-u, 915MHz u Australiji i 430MHz u Aziji. Radio prijenos radi po principu *Listen-before-Talk* i šalje podatke samo kada je medij za prijenos slobodan. Na slici 5.3. prikazano je kako se šalje *uplink* poruka. U slučaju *downlink* poruke ne postoji CRC. Nakon *PREMBELA* slijedi fizičko zaglavlje iza kojeg slijedi *CRC* zaglavlje. Na kraju istih slijede podaci za prijenos u *PHY_Payload*-u [41].

| | | | | |
|----------|------|----------|-------------|-----|
| PREAMBLE | PHDR | PHDR_CRC | PHY_Payload | CRC |
|----------|------|----------|-------------|-----|

Slika 5.3. Format poruke u prijenosnom sloju LoRaWAN [9]

Podaci koji se prenose su zatim podijeljeni u *PHY_Payload* u MAC zaglavlje, *MAC-Payload* ili u *Join-Request/Response* i u *Message-IntegrityCode* (MIC), prikazano na slici 5.4.

| | | |
|------|---------------|-----|
| MHDR | MACPayload | MIC |
| MHDR | Join-Request | MIC |
| MHDR | Join-Response | MIC |

Slika 5.4. Struktura PHYPayload [9]

Nakon određenog vremenskog perioda, LoRa uređaji otvaraju dva kratka prijemna prozora koji ovise o regionalnim prijenosnim frekvencijama. Podaci se mogu nastaviti slati tek nakon što je u jednom od prethodnih prozora pristigla poruka ili je istom isteklo vrijeme [42].

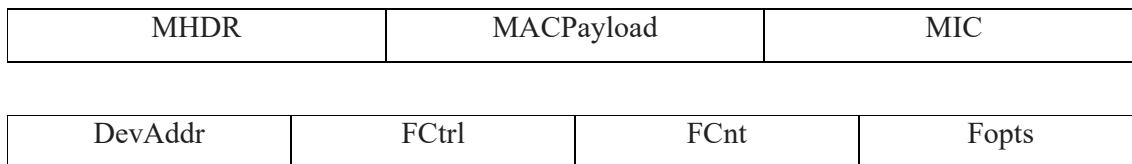
b) LoRaWAN modulacija

LoRa modulacija temelji se na fizičkom sloju odgovarajućeg frekvencijskog područja i povezuje tok podataka s odgovarajućom frekvencijom. LoRa modulacija je jedini vlasnički dio *LoRaWabs*, dok je aplikacijski sloj LoRa slobodno dostupan.

c) MAC sloj

Mrežni sloj LoRaWAN-a obrađuje *MAC Payload* koji su donji slojevi prosljedili kao takozvani *data frame*. Struktura *MAC Payloads* i *Frameheaders*-a je vidljiva na slici 5.6. sastoji se od

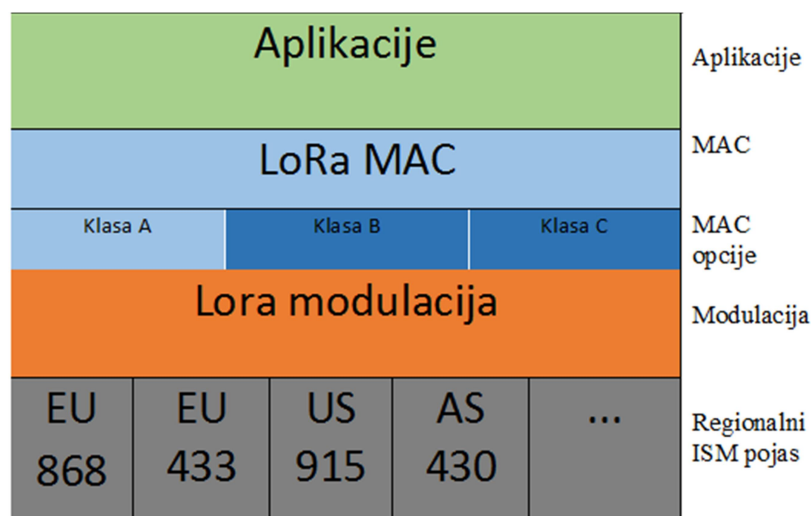
Frameheader-a, Frame Porta i Frame Payloada. Frameheader sadrži adresu krajnjeg uređaja, 8-bitnu Frame kontrolu, 16-bitni FrameCounter i do 124 bita dodatnih Frame opcija koje sadrže usmjeravajuće podatke [44].



Slika 5.5. *Struktura MACPayload i FHDR [42]*

d) Mrežne klase u LoRaWAN-u

Mrežne klase u LoRaWAN-u mogu biti podijeljene u klase A, B ili C kao na slici 5.6. klasa A je osnovna klasa, dok se klase B i C proširuju kao bi uvele dodatne mogućnosti.



Slika 5.6. *LoRaWAN klase [41]*

5.1.2. SigFox

SigFox je francuska tvrtka osnovana 2009. godine, koja ima svoj vlastiti protokol za korištenje u LPWAN-u. SigFox je jedina tvrtka koja osim vlastitih protokola ima i vlastitu mrežu. Sa svojim SigFox protokolima omogućava komercijalnu upotrebu mreže koju gradi sama tvrtka. Podrška za privatne LPWAN mreže nisu planirane, certificirani hardveri s LPWAN-om mogu se koristiti isključivo sa SigFox mrežom. Da bi se komuniciralo s uređajima uz korištenje SigFox-a potrebno je biti u području koje pokriva SigFox. Primarni cilj tvrtke je izgraditi globalni *radio-based* LPWAN. SigFox konstanto unaprjeđuje svoju postojeću mrežu dodavanjem pristupnika s već instaliranim radijskim vezama [45].

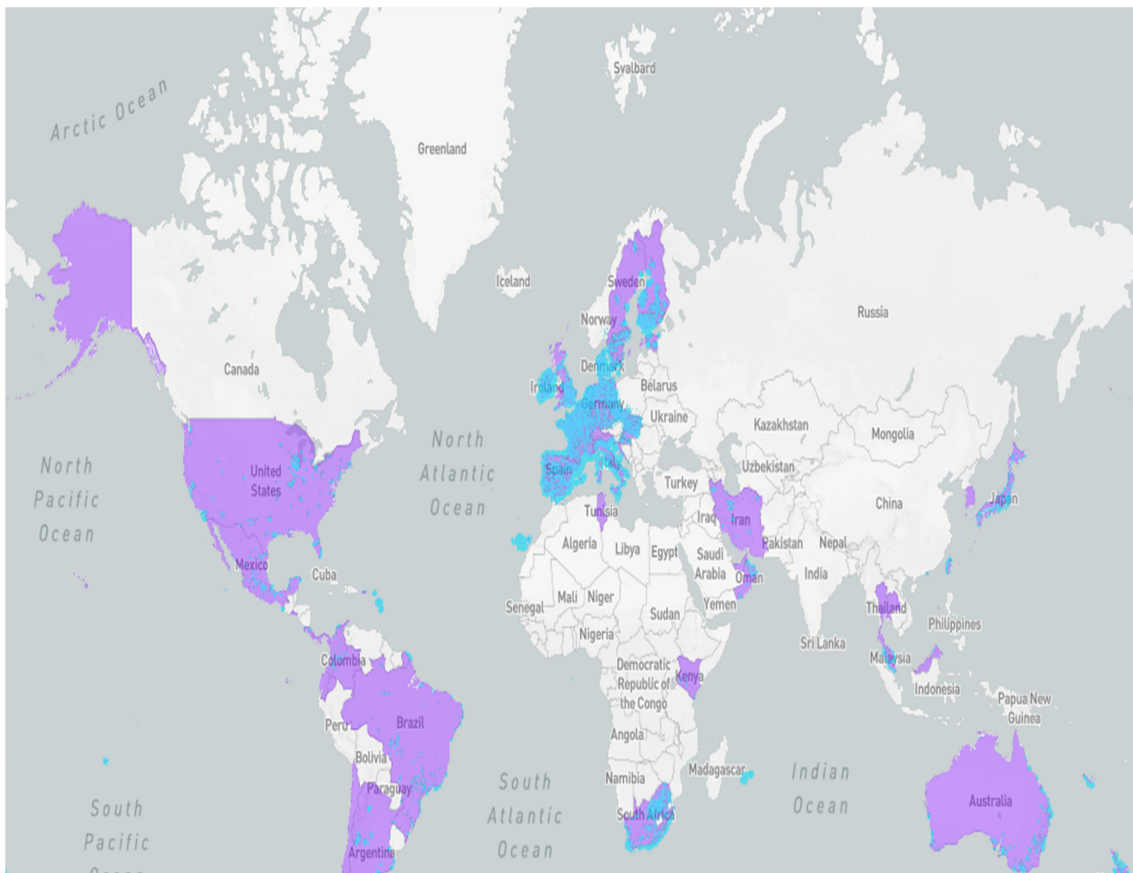
Rješenje ove tehnologije je u pronalasku jeftinog hardwarea i niske potrošnje energije. Kako bi se postalo dijelom SigFox mreže potrebno je, osim prijave, plaćati mjesečnu naknadu. SigFox nije objavio niti jedno svoje tehnološko rješenje, odnosno svoje specifikacije i protokole. Međutim, jedan od načina komunikacije s javnošću koje firma podržava je postavljanje videa na YouTube koji umjesto tekstova pružaju uvid u nove tehnologije [46].

a) SigFox protokoli

SigFox protokoli pokrivaju slojeve za prijenos bitova, sigurnosne slojeve i mrežne. Na mrežnom sloju se podaci koji potječu iz određene aplikacije organiziraju u radijske okvire, sa sekvencijskim brojevima i adresama te s kodom za ispravljanje grešaka. Fizički sloj za *uplink* podatke koristi DBSK modulaciju, odnosno GFSK modulaciju za *downlink* prijenos podataka. Naposljetku se podaci šalju brzinom od 100-600 bps preko jedne od mogućih frekvencija [47].

b) Pokrivenost SigFox mrežom

Prva zemlja koja je gotovo u potpunosti pokrivena je Francuska, od siječnja 2014. godine. Skoro u svim zemljama Europe nalaze se mreže SigFox-a u čemu je iznimno visoki udio u Irskoj, zemljama Beneluxa i na Kanarskim otocima.



Slika 5.7. Svjetska pokrivenost SigFox mrežom [37]

Plava područja su aktivna područja SigFox mreže koja se naveliko na tim područjima koristi. Ljubičasta područja su područja sa smanjenom pokrivenošću ali sa planom o napretku u tom smjeru. Firma je rasprostanjena na čak šezdeset država.

5.1.3. Ingenu

Ingenu je američka tvrtka sa sjedištem u San Diegu. Bavi se M2M komunikacijama, bežičnim prijenosom i razvojem tehnologija za Internet stvari. Ingenu je razvio IoT protokol RPM koji je namijenjen isključivo komunikacijama između strojeva. Na RPMA se temelji javna bežična mreža firme *The Machine Network*. Ingenu sam sebe vidi kao pionira LPWAN tehnologija [48].

a) Random Phase Multiple Access-RPMA

RPMA tehnologije se ne razlikuju puno od ostalih tehnologija u LPWAN sektoru. Ne koriste radio frekvencije ispod 1 GHz, nego široko rasprostranjenu frekvenciju od 2,4 GHz. Prijenosni sloj koristi tehnologiju *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS), metodu spektralnog širenja koju je koristila vojska u svrhu sigurnog prijenosa podataka. Ova tehnologija koristi matematičko moduliranje slanja podataka sa stringom, što joj omogućava siguran i nesmetan prijenos podataka, jer se podaci moraju dešifrirati s odgovarajućim ključem. Varijanta koju koristi DSSS je nešto bolja od varijante koju koristi LPWAN. Siguran prijenos podataka zahtijeva nešto duži prijenos, međutim intrnet stvari ne zahtijevaju veliku brzinu prijenosa. Pomoću RPMA-a je omogućena iznimno visoka vrijednost povezivanja podatka do 177dB. Od standardnih metoda kao što su WLAN ili Bluetooth, Ingenu se razlikuje po većoj širini prijenosa. Veliki dio Amerike vezan uz naftna polja ili umrežavanje država, koristi Ingenu, odnosno RPMA [48].

b) Komunikacija putem AMQP i REST

Ingenu obično za upravljanje uređajima ne koristi protokole, međutim podupire prijenosne protokole kao što je *Advanced Messaging Queuing Protocol* (AMQP). AMQP je certificirani ISO Internetski protokol za prijenos poruka [50]. Za komunikaciju umreženih jedinica koristi se metoda imena *Representation State Transfer* (REST). Temelji se na adresiranju uređaja putem URL-a kao i usmjeravanjem podataka putem HTTP naredbi. Svaki uređaj sadrži vlastiti ID, te se kroz naredbe HTTP-a ili metoda kao što su GET, POST, DELETE i PUT može stavljati u različita stanja. REST ima sposobnost interpretirati JSON i XML podatke, te time može univerzalno komunicirati s umreženim uređajima i web poslužiteljima [43].

5.1.4. EnOcean

EnOcean GmbH je najveća njemačka tvrtka koja se bavi aplikacijama koje ne koriste baterije i radiotehnologijama za automatizaciju zgrada i industrija, pametnih kuća i interneta stvari. Nudi sustave bez baterija, koji zahvaljujući učinkovitom korištenju energije koriste minimalnu struju. Potiču što jednostavnije instalacije, visoku učinkovitost ograničenih resursa i slično. Tvrtka je razvila bežični standard bez baterije u frekvencijskom području od 1 GHz.

a) EnOcean bežična tehnologija [42].

EnOcean radio tehnologija sastoji se od dva dijela. Patentirani radio standard s normiranim oznakama ISO/IEC 14543/3-1X čiji protokoli opisuju slojeve prijenosnih bitova, sigurnosni sloj i mrežni sloj, kao i takozvani *EnOcean-Equipment-Profiles* (EEP), koji komunikacijske profile postavljaju preko aplikacijskih slojeva. Prijenosni protokol se naziva *EnOcean Radio Protokol* (ERP) [43].

| | | |
|-----------------|-------|---|
| Mrežni sloj | Paket | Sub Telegram Timing, Media Access CSMA-CA (LBT) |
| Podatkovni sloj | Okvir | Sub-Telegram Structure, Hash Algorithms, Header Compression |
| Fizički sloj | Bit | Frequency, Modulation, Preamble, Sync, Coding, Length |

Slika 5.8. Arhitektura sloja [14]

b) EnOcean fizički sloj

U fizičkom sloju se šalju podaci o slobodnim frekvencijskim područjima. Prijenos se odvija putem okvira. Svaki od okvira se sastoji od PRAAMBELA, sinkronizacijskih riječi, duljine prijenosnog podatka, te od poruke koja se prenosi. [44]. Sinkronizacijska riječ se sastoji od 16 bitova, duljina poruke je sačuvana u prvom bitu nakon sinkronizacijske riječi. Poruka mora imati minimalno jedan bit i može sadržavati maksimalno 255 bitova [45].



Slika 5.9. Struktura pod-telegrama duljine ≤ 6 bajta [45]

c) EnOcean podatkovni sloj

Duljina poruke kao i poruka, šalju se na sigurnosni sloj. Sigurnosni sloj prenosi poruku u takozvane podtelegrame, od kojih se tri šalju dalje. Kako bi se izbjegao njihov sudar, koristi se tehnologija *Listen Before Talk*. Pošiljalatelj preslušava liniju, te ukoliko je slobodna, šalje podatke.

Podtelegrami koji se sastoje od duljina i sadržaja poruka mogu se graditi na dva načina, ovisno o tome je li duljina podatka veća od 6 bajtova [45].



Slika 5.10. Struktura datagrama duljine > 6 bajta [42]

Slika 5.10. prikazuje strukturu podtelegama veličine preko šest bajtova. Zaglavlje sadrži informacije o veličini ID-ova. Prošireno zaglavlje sadrži dodatne informacije o broju ponovnih pokušaja i je li izvorna poruka primljena, kao i moguće dodatne podatke, kao što je vrsta podtelegama. Ako je riječ o štednji energije, ovo zaglavlje nije najoptimalnije. ID pošiljatelja kao i primatelja nalaze se u odjeljcima *Inicijator-ID* i odijeljku *Odredišni-ID*. Dok je ID prijemnika uvijek 32-bitni, ID odašiljača može biti 24, 32 ili 48 bita. U podacima DL pohranjuje se poruka koja se prenosi. Sadržaj dodatnih podataka nije fiksna. Međutim, informacije o specifičnoj aplikaciji mogu se smjestiti u tim 0-3 bita, ako je potrebno. Podtelegram zatvara *Cyclic Redundancy Check (CRC)*, koji uključuje prethodno generiranu HASH vrijednost poruke. Tako se nakon toga može provjeriti ispravan prijenos, a duplikati se mogu odbaciti [41].

d) EnOcean mrežni sloj

Mrežni sloj bavi se adresiranjem i prosljeđivanjem telegrama. Ovi telegrami sadrže informacije o tome koliko su se često ponavljali. *EnOcean* ima dvije razine repetitora. Ponavljači razine 1 ponavljaju samo izvorne poruke, a repetitori razine 2 također ponavljaju poruke koje su već jednom bile ponovljene. Više ponavljanja nije moguće. Adresiranje se upravlja mehanizmom za kapsuliranje u telegramu. U ovom slučaju, telegram daje informacije o mjestu gdje se nalaze informacije o adresi, koje se zatim mogu pronaći i iščitati [46].

5.1.5. Weightless

Weightless je bežična tehnologija temeljena na GSM tehnologiji posebno dizajnirana za LPWAN i Internet stvari kako bi se nadoknadili nedostaci kratkog dometa kao kod su Bluetooth-a ili WLAN-a. *Weightless* nudi dvije različite inačice svog standarda: *Weightless-N* i *Weightless-P*. *Painless-N* temelji se na ideji svog prethodnika *Weightless-W*, zvjezdastoj LPWAN topologiji koja komunicira preko takozvanih bijelih prostora. Bijeli prostori su frekvencije oslobođene

ukidanjem zemaljskih radijskih programa na TV-u ili radiju. Standard nudi visoku otpornost na smetnje, jer se u slučaju smetnji mijenja frekvencija i time osigurava nastavak prijenosa.

Painless-P je daljnji razvoj te ideje, koja je pokušavala podići sustav *Weightless-N* i učiniti ga uspješnijom. Zato je P za performanse. Ova tehnologija poboljšava *Weightless-N* mrežne značajke kao što su *Forward Error Correction* (FEC) ili *Automatic Retransmission Requests* (ARQ) [47].

5.1.6. IEEE 802.11ah/Wi-Fi-HaLow

Standard Wi-Fi *HaLow* proširuje funkcionalnost IEEE 802.11 WLAN kroz to da može slati preko 900 MHz u prostoru 1 GHz. Doseg ove tehnologije je do duplo veći nego li u WLAN standardu. Plan je ovu tehnologiju svim *Wi-Fi-Allianz* uređajima približiti kako bi se uređajima omogućilo mrežnu učinkovitost od preko 2,4GHz, 5GHz kao i 900MHz. Zadržavajući mnoge protokole i značajke zasnovane na prethodnim standardima, *HaLow* omogućava povezanost i preko tisuću uređaja putem jednog Wi-Fi čvora. *HaLow* također ima niske snage potrošnje što mu omogućava suradnju s Internet stvarima [48].

5.2. Međunarodna rasprostranjenost LPWAN rješenja

LPWAN-ovi su trenutno novo rješenje koje se uvodi širom svijeta. Budući da su LPWAN-ovi još uvijek u fazi razvoja i nema uspostavljenih standarda prijenosa i obrade, postoji nekoliko tvrtki i saveza koje su uključene u profiliranje uređaja koji omogućuju LPWAN i njihove protokole. Primjene Ingenu obično obuhvaćaju velike industrijske lokacije kao što su naftna polja. Nadalje, tehnologija se koristi za povezivanje cijelih gradova. SigFox postupno širi svoju mrežu u Europi, ali izvan Europe dostupne pristupne točke su rijetke [39].

EnOcean nije namijenjen za veliko pokrivanje područja i koristi se isključivo u uskom području. Teško je procijeniti pokrivanje privatnih LoRaWAN mreža, ali LoRaWAN već ima javne mreže koje su dostupne za korištenje.

6. PRIMJERI PRIMJENE IoT REJEŠENJA

Čimbenici i tehničke razlike IoT tehnologija Sigfox, LoRa i NB-IoT ključni su za određivanje najprikladnije tehnologije za određene primjene. Kao što je opisano u ovom radu, jedna tehnologija ne može jednako služiti svim programima i svim aplikacijama Internet stvari. U ovom odjeljku će biti navedeni različiti primjeri primjena i najbolje korištene tehnologije za svaku pojedinu primjenu.

6.1. Električno mjerenje

Na tržištu električnog mjerenja tvrtke obično zahtijevaju čestu komunikaciju, malo kašnjenje i visoku brzinu prijenosa. Obično im nije potrebna ni niska energetska potrošnja niti dugotrajnost baterije jer električni mjerači imaju neprekidno napajanje. Međutim, tvrtke trebaju kontinuirano praćenje u realnom vremenu kako bi donosile odluke u realnom vremenu, primjerice u slučaju opterećenja ili raznih prekida. Sigfox je neprikladan za ovu aplikaciju, jer ne zadovoljava uvjete malog kašnjenja. Međutim kako bi se osiguralo malo kašnjenje za električne mjerače može se koristiti LoRa tehnologija C klase. Najbolja tehnologija bi bila NB-IoT jer zadovoljava i potrebe visoke brzine prijenosa podataka i ima mogućnost konstante komunikacije. Također, električni mjerači se obično nalaze na stacionarnim lokacijama u gusto naseljenim područjima, čiju je pokrivenost lako osigurati pomoću mobilnih operatera NB-IoT tehnologijom.

6.2. Pametna poljoprivreda

U poljoprivredi je dug životni vijek baterije od iznimne važnosti. Senzori za temperaturu, vlažnost i alkalnost bi značajno mogli smanjiti potrošnju vode i poboljšati poljoprivredne prinose. Uređaji ažuriraju podatke senzora nekoliko puta u satu kada se uvjeti okoline ne mijenjaju naglo, a ukoliko se mijenjaju naglo, senzori odmah ažuriraju podatke. LoRa i Sigfox su idealni za ovu primjenu, dok NB-IoT nije najprikladnije rješenje ukoliko na farmi ne postoji LTE mobilna pokrivenost.

6.3. Automatizacija poljoprivrede

Praćenje stanja strojeva u realnom vremenu poboljšava industrijsku proizvodnju i omogućava daljinko upravljanje u cilju povećanja učinkovitosti. U tvorničkoj automatizaciji, postoje razne vrste senzora i komunikacijskih uređaja. Neke aplikacije zahtijevaju stalnu komunikaciju i visoku kvalitetu usluga, zbog čega je NB-IoT bolje rješenje nego Sigfox i LoRa. Neke aplikacije zahtijevaju nisku cijenu senzora i dug vijek baterija u cilju praćenja stanja i u tom slučaju su Sigfox i LoRa bolja rješenja. Zbog različitih zahtjeva, mogu se koristiti i hibridna rješenja.

6.4. Pametna gradnja

Senzori za temperaturu, vlažnost, protok vode, i električne energije te fizički pristup lokaciji mogu upozoravati upravitelje nekretnina kako bi spriječili štetu i odmah odgovorili na trenutni zahtjev. Ovi senzori imaju nisku cijenu i dug vijek trajanja baterije. Ne zahtijevaju održavanje određenih razina kvalitete usluge niti čestu komunikaciju, te se LoRa i Sigfox bolje uklapaju u ovu klasu aplikacija.

6.5. Prodajna mjesta na malo

Sustavi prodajnih mjesta zahtijevaju konstantan protok informacija, odnosno konstantu komunikaciju. Ovi sustavi koriste kontinuirani izvor napajanja, tako da nema ograničenja vezanih uz životni vijek baterija. Veliki su zahtjevi vezani uz malo kašnjenje, jer dugotrajno kašnjenje ograničava broj transakcija koje trgovina može realizirati. Stoga je NB-IoT najbolja tehnologija za to.

6.6. Praćenje palete za logistiku

Praćenje paleta za određivanje lokacije i stanja robe su vrlo poželjni u logistici. Najviše traženi zahtjevi odnose se na troškove uređaja i vijek trajanja baterije. Praćenje paleta dobar je primjer hibridne obrade rješenja. Logističke tvrtke mogu imati svoje mreže kako bi osigurali pokrivenost svih objekata. Uređaji niske cijene lako bi se mogli postaviti na vozila. Sigfox i LoRa javno dostupne bazne stanice mogu se koristiti kada su vozila izvan ustanova ili kada roba pristigne na

lokaciju krajnjeg korisnika. Međutim, prilikom velikih brzina, LoRa omogućava pouzdaniju komunikaciju od Sigfox tehnologije. Zbog niske cijene, dugog trajanja baterije i pouzdane mobilne komunikacije, LoRa je dobro rješenje za navedeno. NB-IoT moguće je koristiti u ovu svrhu ukoliko je LTE mreža dostupna.

7. PRIMJENA IoT KONCEPTA U RURALNIM PODRUČJIMA

7.1. Pametna poljoprivreda

Postoji mnogo načina na koje se omogućuje primjena suvremenih tehničkih rješenja u poljoprivredi. Na primjer, *AgriTech* se odnosi na primjenu tehnologije u poljoprivredi općenito. S druge strane, pojam 'pametna poljoprivreda' se uglavnom veže uz mogućnost primjene koncepta Interneta stvari u poljoprivredi. Isto se odnosi i na definiciju pametne poljoprivrede.

Iako je koncept Interneta stvari u inteligentnoj poljoprivredi, kao i u industrijskoj proizvodnji vrlo obećavajuće rješenje, kod potrošača se još uvijek nije javio dovoljan interes za primjenom pametnih uređaja. Međutim, tržište se jako brzo razvija i radi se i na porastu stope usvajanja LPWAN tehnologija u poljoprivredi. Naime, *BI Intelligence* predviđa da će broj poljoprivrednih postrojenja s IoT uređajima do 2020. godine dosegnuti 75 milijuna, što će značiti godišnji porast od oko 20%.

Istodobno, prema istom izvoru očekuje se da će se globalno tržište pametne poljoprivrede udvostručiti do 2025. godine i time dosegnuti 15,3 milijarde dolara (u usporedbi s nešto više od 5 milijardi dolara u 2016. godini). Iza ovih platformi za pametnu poljoprivredu stoji niz tehnoloških rješenja koje uključuju senzore, mikrokontrolere, odašiljače, energiju, LED svjetla i još mnogo toga.

7.2. Prednosti pametne poljoprivrede

S obzirom da se radi o intenzivnom razvoju LPWAN tehnologija i njihovoj primjeni u inteligentnoj poljoprivredi, tehnologije Interneta stvari imaju potencijal za preobrazbu poljoprivrede u mnogim aspektima. Naime, postoji minimalno pet načina na koje LPWAN tehnologije mogu poboljšati poljoprivredu:

- Senzori za pametnu poljoprivredu koji su u mogućnosti prikupljati velike količine podataka: na primjer, o vremenskim uvjetima, kakvoći tla, napretku rasta usjeva ili zdravlju stoke. Ti se podaci mogu koristiti za općenito praćenje stanja poslovanja, kao i za praćenje učinkovitosti osoblja, učinkovitosti opreme itd.

- Bolja kontrola nad unutarnjim procesima i kao rezultat toga manjak rizične proizvodnje: sposobnost preciznijeg predviđanja izlazne proizvodnje omogućuje bolje planiranje distribucije proizvoda. Ako točno znate kolika će žetva usjeva biti, moguće je osigurati da proizvod ne ostane neiskorišten.
- Upravljanje troškovima i smanjenje viškova zahvaljujući povećanoj kontroli proizvodnje: mogućnost praćenja bilo kakvih anomalija u rastu usjeva ili zdravlju stoke, zahvaljujući čemu bi rizik od gubitka prinosa bio minimalan.
- Povećana učinkovitost poslovanja kroz automatizaciju procesa: pomoću pametnih uređaja moguće je automatizirati više procesa u proizvodnom ciklusu, npr. navodnjavanje, gnojidbu ili kontrolu štetočina.
- Poboljšana kvaliteta proizvoda i količine: moguće je postići bolju kontrolu nad proizvodnim procesom i održavanje višeg standarda kvalitete kultura i kapaciteta rasta kroz automatizaciju. Kao rezultat toga, svi ti čimbenici mogu na kraju dovesti do većeg prihoda.

7.3. Razvijanje IoT rješenja

Pimjeri primjene Interneta stvari u poljoprivredi su brojni. Postoji mnogo načina na koje pametni uređaji mogu pomoći pri povećanju učinkovitost i prihoda od poljoprivrednih i stočarskih djelatnosti. Međutim, razvoj aplikacija koje će se koristiti u tu svrhu nije jednostavan zadatak. Postoje određeni izazovi koji se moraju uzeti u obzir pri ulaganju u pametnu poljoprivredu, neki od kojih su navedeni u nastavku.

- Izbor hardverskih rješenja: obvezno je odabrati senzore za svoj uređaj (ili stvoriti prilagođeni), ovisno o vrsti informacija koje se žele prikupiti i općenito o svrsi krajnjih rješenja. U svakom slučaju, kvaliteta senzora ključna je za uspjeh sustava, odnosno ključ uspjeha ovisi o točnosti prikupljenih podataka i njihovoj pouzdanosti.
- Provedba analize podataka: analiza podataka bi trebala biti u osnovi svake pametne poljoprivredne djelatnosti. Potrebno je dobro analiziranje podataka i primjena adekvatnih algoritama te strojno učenje kako bi se dobio adekvatan uvid u prikupljene podatke.
- Održavanje hardvera: održavanje predstavlja izazov koji je od primarne važnosti za ITER-a proizvode u poljoprivredi, jer se senzori obično koriste u polju i mogu se lako oštetiti. Dakle, potrebno je osigurati izdržljivost i jednostavnost hardvera kako bi bio jednostavan za održavanje te kako bi se izbjeglo preučestalo mijenjanje senzora.

- Ostvarivanje mobilnosti: aplikacije bi trebale biti prilagođene za uporabu u polju. Vlasnik tvrtke ili upravitelj farmi trebao bi imati omogućen pristup informacijama na određenom web-mjestu ili pristup na daljinu putem pametnog telefona ili stolnog računala. Osim toga, svaki povezani uređaj mora biti samostalan i imati dovoljan domet za komunikaciju s drugim uređajima i slanje podataka prema centralnom poslužitelju.
- Implementacija mrežne infrastrukture: kako bi se osiguralo da IoT aplikacije dobro funkcioniraju te kako bi se osiguralo optimalno opterećenje velikom količinom podataka, potrebna je fiksna infrastruktura. Također, interni sustavi moraju biti sigurni. Od iznimne je važnosti pravilno osiguranje sustava, kako bi se smanjila vjerojatnost da netko pristupi sustavu, odnosno kako bi se onemogućila krađa podataka ili čak preuzimanje kontrole nad sustavima.

7.4. Primjena pametne poljoprivrede

Postoji niz različitih IoT aplikacija koje se koirste u različite svrhe, dio kojih je opisan u nastavku.

- Praćenje stoke: LPWAN tehnologije omogućuju cjelovremeni nadzor kompletne farme. Korisniku upozorenja o nepravilnostima, odnosno odstupanjima od unaprijed postavljenih parametara, stižu na pametni telefon u obliku SMS poruke ili elektroničke pošte. Primjerice tvrtka *Moocall* pomaže poljoprivrednicima pratiti krave koje se pripremaju za teljenje. Senzor s baterijom otkriva nepravilna gibanja, te zatim šalje upozoravajuću SMS obavijest. Baterija senzora traje do 60 dana, a uređaj upozorava kada razina baterije padne na 15%.

Druga aplikacija za praćenje stoke je *CattleWatch*. Ova tehnologija temeljena na sustav u oblaku koristi senzore i platformu za daljinski nadzor zdravstvenog stanja i lokacije stoke. Kao rezultat toga, korisnici imaju pristup podacima u stvarnom vremenu u svojim domovima ili uredima koristeći pametne telefone. *CattleWatch* sustav postavlja ogrlice, ovratnike ili oznake na ušnim resama koje koriste litijeve baterije. Na uređajima se nalaze fotonaponske ćelije koje koriste solarnu energiju koja se pohranjuje u litijske punjive baterije, serije TLI. Litijske baterije iz navedene serije mogu raditi do 20 godina. U mogućnosti su isporučivati impulse od 15 A kako bi ogrlice bile u mogućnosti bežično komunicirati sa satelitskom mrežom. Sadrže realan uvid u ponašanje goveda,

njihovu lokaciju, vrijeme ispaše te vrijeme odmora. Sustav je čak u stanju signalizirati i prijetnje od predatora.

- Precizan uzgoj: S robusnim i preciznim IoT sensorima, poljoprivrednici mogu prikupljati podatke o vremenu, tlu, kakvoći zraka i zrelosti usjeva, omogućujući donošenje pametnijih odluka. Na primjer, tvrtka *Cropx* koristi podatke i senzorske uređaje kako bi omogućila zemljoradnicima bolje razumijevanje uporabe vode i njezino efikasno iskorištavanje. Tvrtka također obavještava poljoprivrednike o količini gnojiva i pesticida potrebnih za određenu površinu u određeno vrijeme, te omogućava automatizaciju rješavanja dnevnih odluka za poljoprivrednike. Algoritmi i tehnologije za prepoznavanje uzoraka koriste se za analizu poljoprivrednog zemljišta i definiranje različite visine zemljišta (lokacija na kojima su brdoviti ili ravni tereni). Važno je razlikovati podatke vezane uz pojave iznad tla i podatke o mjerenjima u zemlji. Podaci iznad zemlje se odnose na snimke dronova, satelitske slike, slike koje dolaze s fotoaparata koji su postavljeni na meteorološkim stanicama itd.. No to su snimke koje prikazuju površinsko stanje biljaka koje već pate. Mnogo je veći izazov izvući podatke iz tla koji su mnogo bitniji i korisniji za proizvodnju. *Analog Devices Inc.* (ADI) radi na vrlo zanimljivom projektu pod nazivom "*Internet rajčica*". Ovaj precizan poljoprivredni pokus koristi tehnologije poput mikroeletromehaničkih sustava (MEMS) i senzora. Primjerice, senzori za inercijsko mjerenje (IMU), bazirani na multiaksijskim kombinacijama na osnovu preciznih žiroskopa, akcelerometri, magnetometri i senzori tlaka, koriste se za procjenu okoliša i praćenje okoliša što uvelike pridonosi kvaliteti poljoprivrednih radova. ADI integrira hardverska rješenja s platformom tvrtke *ThingWorx* koja koristi Internet stvari zasnovana na rješenjima u oblaku.
- Autonomni traktori: Proizvođači traktora kao što su *John Deere* i *Case IH* nude poljoprivrednicima traktore s automatskim upravljanjem. Traktori koji samostalno voze, na tržištu su dugi niz godina - čak i duže od poluautonomnih automobila na cestama. Jedna od prednosti samohodnih traktora je njihova sposobnost da se izbjegne obrađivanje zemljišta koje je prethodno već obrađeno, čime se smanjuje vjerojatnost preklapanja radova. Kao rezultat toga, dolazi se do manjeg broja prolaza na zemljištima, dakle štedi se vrijeme, a time i novac. Osim toga u mogućnosti su obavljati vrlo precizne okretaje čak i bez da vozač dodirne

upravljač. Potpuni autonomni traktori navigirali bi se pomoću lasera koji koriste odbijajuće signale s nekoliko mobilnih transpondera koji se nalaze na području zemljišta. Postoji i mogućnost takozvanih traktora supervizora, koje vozi osoba, međutim za razliku od uobičajenih traktora, slijede ga autonomni strojevi. Autonomni strojevi, kopiraju upravljač i brzinu prvog traktora. Ova vrsta traktora nudi prednost u smislu smanjenja ljudske pogreške pri obavljanju zadataka kao što je špricanje insekticidima. Trenutno nema autonomnih traktora na tržištu, ali svi glavni proizvođači traktora imaju ih u planu. Primjerice, *Case IH* je usjeve soje odrađivao pomoću koncepta samostalnih traktora. Traktor bez vozača neće biti dostupan na tržištu barem još nekoliko idućih godina. Međutim, kroz eksperimente i prezentacije poljoprivrednici i proizvođači dobivaju bolju predodžbu o tome što su karakteristike i mogućnosti autonomnih traktora. Kako napredak aplikacija Internet stvari kreće naprijed u smislu razvijanja baterija, tehnologija za pohranu, te kompletnih IoT rješenja, farme će također dobiti mogućnost povećanja svoje produktivnosti.

Aplikacije u pametnoj poljoprivredi:

Nekoliko internetskih aplikacija u pametnoj poljoprivredi dizajnirane su za poboljšanje produktivnosti prilikom poljoprivrednih radova. Neke od glavnih IoT aplikacija za pametnu poljoprivredu uključuju sljedeće pristupe:

- **Precizni uzgoj:** precizni uzgoj je pristup koji obuhvaća upravljanje poljoprivrednim gospodarstvom na osnovu korištenja IoT informacijskih i komunikacijskih (ICT) tehnologija zahvaljujući čemu se optimiziraju povratne informacije i koristeza očuvanje resursa. Precizna poljoprivreda podrazumijeva dobivanje pravovremenih podataka o usjevima, odnosno o uvjetima tla i temperaturi. Ovaj pristup ima za cilj osigurati isplativost proizvodnje uz očuvanje okoliša.
- **Tehnologije promjenjivih brzina:** ovaj pristup odnosi se na sve tehnologije koje omogućavaju proizvođačima kontrolu kako bi se sjetva moglaa odvijati u točno definirano vrijeme, na točno definiranom prostoru određenom brzinom.
- **Pametno navodnjavanje:** Potreba za povećanjem učinkovitosti procesa navodnjavanja i smanjivanja gubitaka vode je sve veća. Postoji sve veća svijest o potrebi očuvanja postojećih vodnih resursa implementacijom održivih i učinkovitih sustava navodnjavanja.

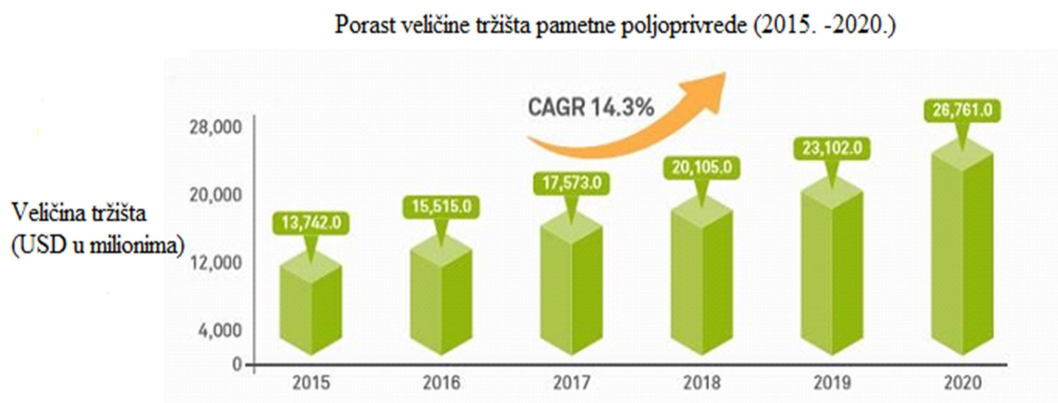
Pametno navodnjavanje bazirano na Internet stvarima mjeri različite parametre kao što su vlaga, vlažnost tla, temperatura i intenzitet svjetlosti.

- Dronovi u poljoprivredi: bespilotna zračna vozila mogu se koristiti u poljoprivredi na više načina jeromogućuju praćenje stanja usjeva, snimanje fotografija, nadzor u realnom vremenu, komunikaciju sa raznim senzorima.
- Pametan staklenik: Pametni staklenik omogućuje poljoprivrednicima uzgoj uz minimalnu ljudsku intervenciju. Klimatski uvjeti kao što su temperatura, vlažnost, svjetlost i slično mogu se kontinuirano nadzirati. Varijacije tih uvjeta bit će automatizirane, te će se procjenjivati buduće promjene i sustav za osiguravanje kontinuirano adekvatnih uvjeta.
- Nadzor prinosa: Praćenje prinosa je mehanizam za praćenje različitih aspektata koji definiraju poljoprivredni prinos, kao što je maseni protok žita, sadržaj vlage i ukupna količina žetve. Ideja je dobivanje informacije o praćenje prinosa u stvarnom vremenu kako bi poljoprivrednici mogli donositi pravilne i profitabilne odluke. Praćenje stanja omogućilo bi smanjivanje troškova i povećanje produktivnosti.
- Sustavi upravljanja poljoprivrednim gospodarstvom (FMSs): FMSs omogućuje poljoprivrednicima i ostalim sudionicima prikupljanje, pohranjivanje i analizu informacija koje dolaze s različitih senzora i uređaja.
- Sustavi za nadzor tla: Takvi sustavi mogu pomoći u praćenju i poboljšavanju kvalitete tla, te pri izbjegavanju degradacije. Oni omogućuju praćenje fizičkih, kemijskih i bioloških svojstava tla, kao što su tekstura, kapacitet vode koji se može kontrolirati i mogućnost apsorpcije tla. Time se smanjuje erozija tla, salinizacija, zakiseljavanje i onečišćavanje toksičnim elementima.
- Precizno stočarstvo: precizna stočarska proizvodnja podržava praćenje proizvodnje, zdravlja i dobrobiti stoke u stvarnom vremenu, kako bi se osigurao optimalan doprinos. Napredne tehnologije omogućavaju kontinuirano praćenje stanja, te time olakšavaju poljoprivrednicima donošenje odluka.

7.5. LPWAN pružatelji usluga

Budući da u poljoprivredi postoji jako veliki broj različitih mogućnosti primjene IoT rješenja, LPWA predstavlja veliki potencijal za telekomunikacijske operatore. LPWA tehnologije karakterizira niska cijena uz sveprisutnu povezanost uređaja u mrežu koja može pokriti i najudaljenije lokacije. Mobilni operatori mogu upotrijebiti postojeću infrastrukturu, sustave

testiranja i sl. Objedinjavanje ovih elemenata osigurava integraciju LPWAN-a u postojeće platforme.



Slika 7.1. Procijenjeni prihodi koje je generirao telekom u poljoprivredi u partnerstvu s LPWA pružateljima usluga

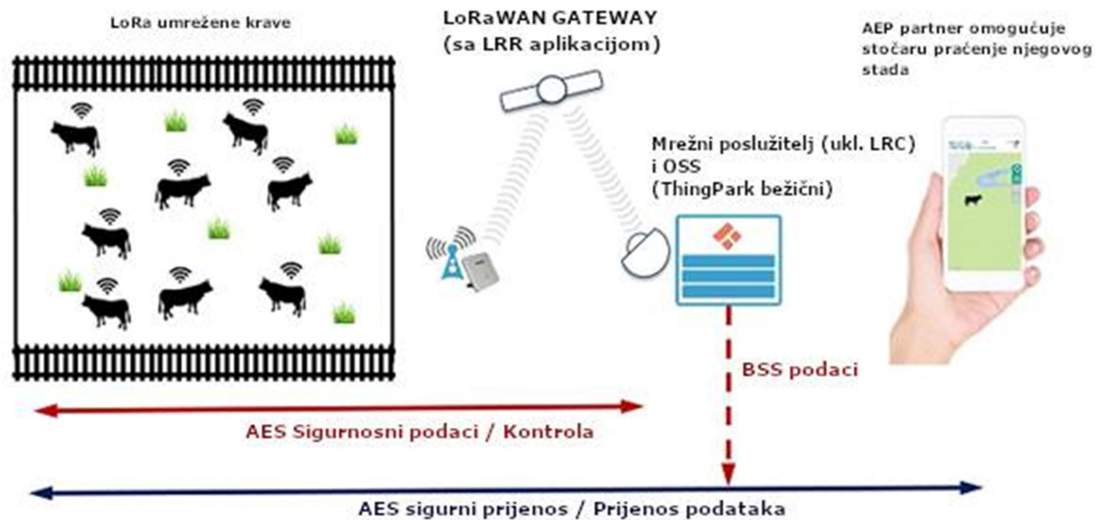
Telekom operateri su u mogućnosti riješiti brojne izazove uz primjenu IoT koncepta u području pametne poljoprivrede i stočarstva.

7.6. Primjeri primjene pametne poljoprivrede

Za tehnologije kao što su LoRaWAN i Ingenue primjena u agrikulturi je od velike važnosti. Farme i poljoprivredne površine vrlo često se rasprostiru preko širokog područja, primjerice u Australiji se farme mogu protezati na površinama koje prelaze i tisuću kvadratnih kilometara. Sama veličina farmi otežava upravljanje, a tome se može dodati i činjenica da mnoge poljoprivredne površine nisu prekrivene mobilnom mrežom, te unutar takvog područja nema nikakve mogućnosti komunikacije. Ne samo da postoji vrlo malo opcija za ostvarivanjem komunikacije za poljoprivredne radnike, već i za mrežne senzore koji bi se mogli postaviti na takve, često izolirane površine - udaljene farme ili poljoprivredna zemljišta . Rješenje se zasniva na primjeni LPWAN tehnologija.

LoRaWAN End to End pregled rješenja

Umrežavanje farmi u budućnosti



7.2. Primjer primjene LPWAN tehnologija u pametnoj poljoprivredi [54]

7.6.1. Lociranje objekata

Pomoću kombinacije *Inmarsat*ovih BGAN i LoRa mreža koje omogućava *Actility*, moguće je pratiti objekte koji se kreću kroz određeno područje. S obzirom da LoRa mreže mogu prekriti do 700 km² u ruralnim područjima, one su prikladno rješenje za praćenje stoke. Dodavanjem male oznake na svako govedo, farmer može jednostavno preko aplikacije na svom pametnom uređaju pratiti gdje se nalaze. Također, može postaviti granice kretanja s geografskim koordinatama tako da, ukoliko životinja prelazi granicu, farmeru stiže upozorenje. Time mu je omogućen nadzor nad ponašanjem stoke, te nadzor nad istom u slučaju krađe.

7.6.2. Nadzor izvora vode

Dodatna korist na farmama koja se može dobiti zahvaljujući Internet stvarima je vezana uz kontrolu izvora vode. Izvori vode su na farmi međusobno udaljeni i raštrkani preko velike površinom. Kako čovjek ne bi morao ići od izvora do izvora i provjeravati ima li u njemu vode, može ugraditi senzore te daljinski nadzirati svoje izvore. Senzori koji imaju izuzetno dug vijek baterije, čak do deset godina, mogu pratiti pH vrijednost vode, njezinu kvalitetu i količinu vode, odnosno postoji li ona u izvoru u danom trenutku.

7.6.3. Praćenje zaposlenika farme

Pomoću ininternet stvari, odnosno senzora mogu se također pratiti i zaposlenici farme kao i njihova vozila. Omogućeno je praćenje kosača preko razine goriva u spremniku vozila, otvaranje vrata na ulazu farme i slično.

7.7. Neki od publiciranih primjera primjene LPWAN rješenja

Primjer 1:

Poljoprivredno gospodarstvo u Indiji Nano-Ganesh: primjena koncepta temeljenog na mobilnom daljinskom bežičnom sustavu kontrole crpke za vodu s alarmnim sustavom , dizajniranim za prevenciju protiv nepovoljnih uvjeta pri navodnjavanju. Cilj je rješavanje rutinskih problema kao što su fluktuacije napajanja, nepristupačan teren, neovlašteno rukovanje pumpama i dr.. Također se rješava i pitanje vezano uz koordinaciju između razine spremnika i izvora vode.

- Prednosti:
 - ušteda vode, struje, goriva i tla
 - uštedu u troškovima rada.

Primjer 2:

Poljoprivredna gospodarstva u Kolumbiji: Kolumbijski telekomi podržali su više gospodarstava u procesu praćenju usjeva banane. Poljoprivredna gospodarstva u Kolumbiji riješila nekoliko prepreka uključujući poplave, smanjenje razine kisika u tlu, visoku vlažnost i niske temperature.

- Prednosti
 - povećanje produktivnosti od 15%
 - unaprijeđenje održive ekološke poljoprivrede - unaprijeđenje sljedivosti usjeva.

Primjer 3:

Poljoprivredna gospodarstva u Vijetnamu: Telekom operateri podržali su implementaciju rjesenja pametne poljoprivrede u domeni ribarstva.

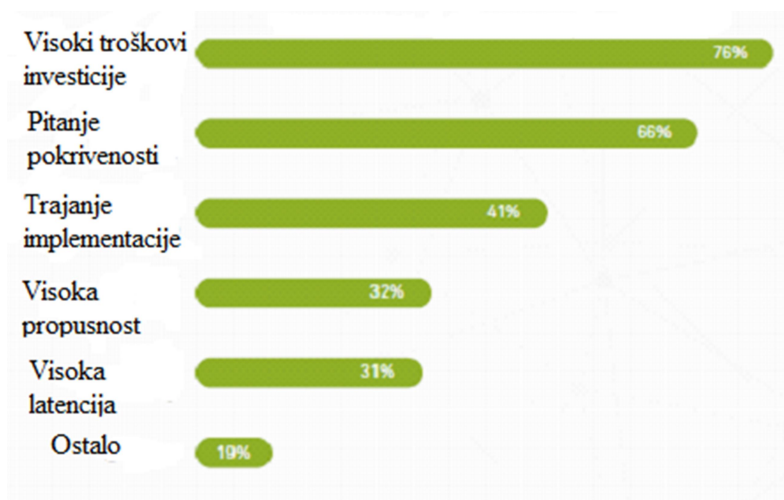
- Prednosti: 40% do 50% smanjenje smrtnosti ribe nakon korištenja sustava praćenja u stvarnom vremenu.

Primjer 4:

Poljoprivredna gospodarstva u Španjolskoj: U Španjolskoj je telekom operator osigurao sustav automatiziranog navodnjavanja koji je povezivao hidraulične ventile, brojila i mjerila pomoću GPRS-a na desetak farmi. Omogućeno je daljinsko upravljanje sustavom navodnjavanja na način da je omogućeno povezivanje računala i mobilnih telefona. Rješenje se temeljilo na mobilnoj mrežnoj telefoniji i daljinskim čitanjem s odabranim GPRS komunikacijama.

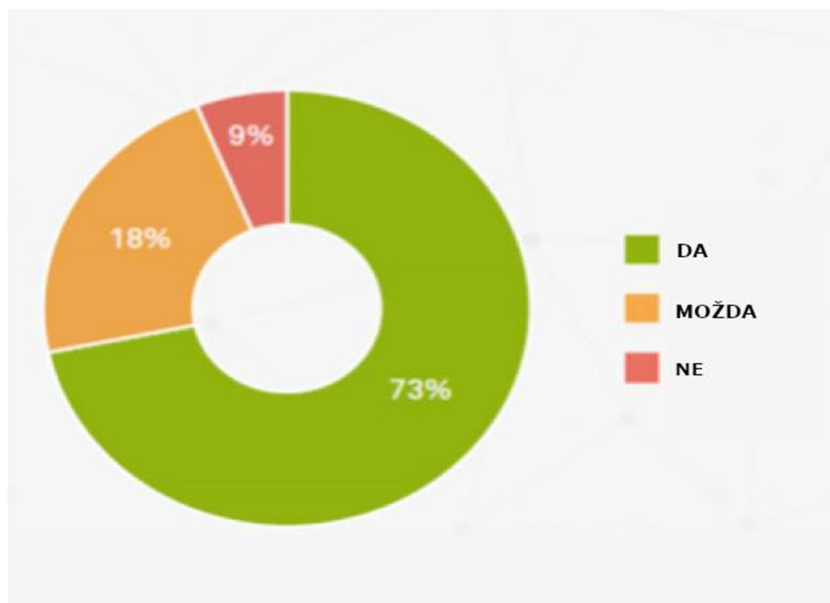
- Prednosti:
 - uštedapotrošnje vode
 - povećanje dobiti od poljoprivrede
 - smanjenje računa za struju

7.8. Istraživanje uspjeha LPWAN rješenja u pametnoj poljoprivredi



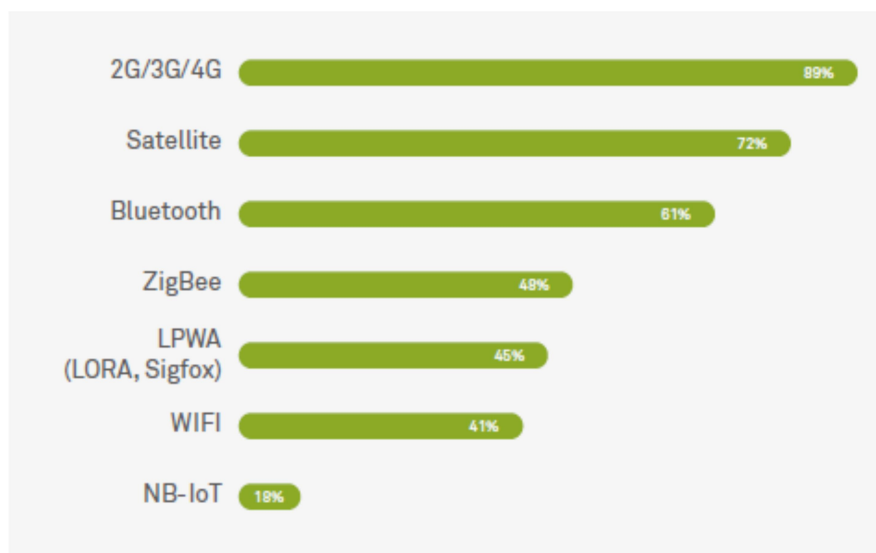
Slika 7.3. Parametri komunikacijskih tehnologija [54]

Preko 60% poljoprivrednika se slaže da je najveći nedostatak u visokoj cijeni implementacije tehnologije. Idući nedostaci su dugo razdoblje za implementaciju rješenja i nedostatna pokrivenost područja.



Slika 7.4. Investicije u agrikulturi [54]

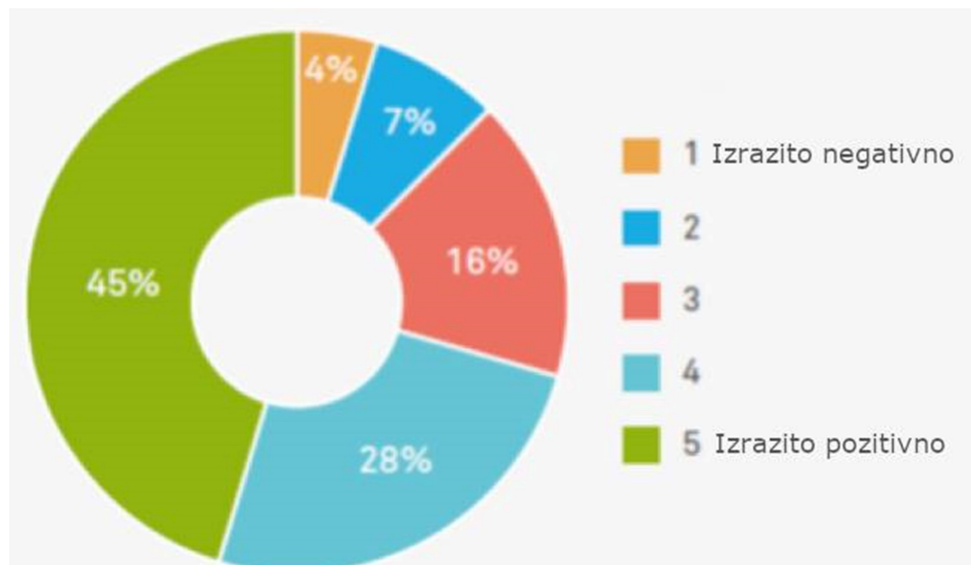
Preko 70% poljoprivrednika je spremno uložiti u pametnu poljoprivredu kako bi poboljšali produktivnost, odnosno dobit od proizvodnje.



Slika 7.5. Komunikacijske tehnologije u agrikulturi [54]

Preko 45% poljoprivrednika koristi LPWA rješenja. Koriste se satelitskim telekomunikacijama prilikom prikupljanja podataka, a3G ili 4G mobilnim aplikacijama za prijenos podataka s farme i za analizu istih.

ZigBee i Bluetooth su često korištene tehnologije koje se koriste uz Wi-Fi. Te tehnologije su trenutno najkorištenije za aplikacije koje su vezane uz automatizirano navodnjavanje i korištenje pametnih staklenika.



Slika 7.6. LPWAN tehnologije u agrikulturi [54]

Preko 70% poljoprivrednika ima pozitivan stav prema primjeni LPWA tehnologija u poljoprivredi jer omogućuju nadzor zemljišnih površina i ostalih poljoprivrednih resursa. Veliki porast primjene LPWA tehnologija u pametnoj poljoprivredi se očekuje u narednom periodu.

8. USPOREDBA POSTOJEĆIH LPWAN SUSTAVA

8.1. Parametri za opis LPWAN sustava

Pri opisu LPWAN rješenja moguće je koristiti nekoliko parametara navedenih u nastavku.

a) Povezivanje uređaja

Pri usporedbi značajki LPWAN sustava iznimno je bitno definirati broj uređaja koji se može umrežiti. Također, bitno je omogućiti i jednostavnu integraciju novih uređaja u postojeću mrežu.

b) Osjetljivost na smetnje

Na prijenos podataka putem bežičnih mreža često djeluje interferencija od strane drugih radijskih aplikacija zbog preklapanja u frekvencijama i slični čimbenici. Suvremeni protokoli primjenjuju odgovarajuće metode za suzbijanje takvih smetnji i prebacivanje na druge frekvencijske pojaseve ili za prijenos. Kroz ovo poglavlje definirana je osjetljivost pojedinih sustava i smetnje koje je moguće prepoznati, spriječiti i otkloniti od strane pružatelja usluga.

c) Potrošnja energije

Kod LPWAN-a naglasak se stavlja na mogućnosti smanjenja potrošnje energije. Pri prijenosu podataka uz primjenu koncepta Interneta stvari potrošnja energije predstavlja osnovni kriterij. Senzori već godinama imaju mogućnost uključivanja na struju putem tipke. Međutim, prijenos podataka putem radio signala na velike udaljenosti zahtijeva puno veću količinu resursa. Potrebno je uvijek provjeriti koliki su dostupni resursi pružatelja usluge prijenosa i je li moguć prijenos podataka uz uštedu energije.

d) Pokrivanje područja signalom

Osim o samoj tehničkoj izvedbi sustava, dostupna širina prijenosnog pojasa ovisi i o kombinaciji preostalih energetske resursa, dostupnim mogućnostima prijenosa i vrsti antena. Međutim, unatoč tome, postoje razlike u definiranim širinama prijenosnog pojasa za određene tehnologije.

Raspon ovisi, između ostalog, o osjetljivosti prijemnika i o strukturi samog signala. Signal velike snage može i preko velikih udaljenosti biti primljen i na osjetljivim prijemnicima.

e) Frekvencijsko područje

Širom svijeta različiti se frekvencijski rasponi koriste za povezivanje IoT objekata. Dok mali uređaji u Europi često odašilju na frekvencijama od 868MHz ili 414MHz, u Americi i Aziji druge frekvencije su rezervirane za takvu komunikaciju. Osim toga, moraju se poštivati različiti regionalni propisi o slobodnom korištenju frekvencija, koji se mogu razlikovati od jedne do druge zemlje, ali su također regulirani međunarodnim ugovorima o radijskim frekvencijama. Internetske usluge trebaju biti korisne na međunarodnoj razini, pa bi pružatelji usluga trebali omogućiti adekvatno korištenje odgovarajućih frekvencijskih pojasa širom svijeta.

f) Brzina prijenosa podataka

U principu, LPWAN-ovi ne zahtijevaju veliku brzinu prijenosa. Međutim, zanimljivo je vidjeti koje područje pokriva određena testirana tehnologija i na kojoj je brzini prijenos podataka moguć.

g) Sigurnosni aspekti

Nedostatak primjene nelicenciranih radijskih frekvencija nalazi se u činjenici da slobodne frekvencije može koristiti bilo tko u bilo kojem trenutku. Naravno, to je korisno i za IoT aplikacije jer im je omogućen bežični prijenos podataka preko određenih frekvencija bez licenciranja. Takav način prijenosa otvara mogućnost da podatke poslane na određenim frekvencijama može prislušivati ili primati bilo tko. Stoga se treba provjeriti da li su i kako pružatelji usluga omogućili šifriranje podataka koji će se slati.

h) Troškovi

Gledajući cijene različitih LPWAN sustava, one se dijele na dvije vrste troškova. Najznačajniji troškovi su kapitalni, odnosno troškovi nabave koji uključuju nabavu hardvera (odašiljača, prijemnika, antena i dr.). Drugi su operativni troškovi u koje ulaze troškovi održavanja. To bi mogle biti, na primjer, mjesečne naknade za korištenje mrežne infrastrukture.

i) Trenutni razvoj i planirani budući razvoj

Iako je područje LPWAN-ova u Internetu stvari još uvijek relativno novo i trenutno nije uistinu standardiziran način prijenosa podataka, svaki pružatelj sustava želi pokriti što šire područje svojom infrastrukturom. U ovom se poglavlju ukratko opisuje trenutni razvoj tehnologija i provjerava da li se i kako one već koriste.

8.2. Opis odabranih rješenja

U sljedećem odjeljku teksta, LoRa, SigFox, Ingenu i EnOcean rješenja su opisana prema navedenim parametrima. Izostavljena je usporedba drugih rješenja jer su izdvojena ona trenutno najnaprednija.

8.2.1. LoRaWAN

a) Povezivanje uređaja

LoRaWAN koristi dvije primarne tehnologije za povezivanje novih uređajabežičnim putem - OTAA i personalizirani ABP. Za OTAA metodu, proizvođač je već osigurao odgovarajući senzor s jedinstvenim identifikatorom uređaja i identifikatorom aplikacije s kojim se uređaj može samostalno prijaviti na mrežu. Odgovarajući pristupnik prepoznaje koji uređaj želi birati mrežu za koji zadatak i uspostavlja sigurnu vezu preko koje se podaci mogu razmjenjivati. U ABP metodi veći dio procesa je unaprijed konfiguriran odgovarajućim parametrima i sigurna veza može se odmah uspostaviti. Osim toga, nekoliko stotina čvorova se lako može integrirati u pravilno stvorenu LoRaWAN mrežu [32].

LoRaWAN uređaji mogu se prijaviti na postojeće mreže i poslati svoje podatke na pristupnike. Ovdje se primjenjuje funkcija "*Dumb Gateway Smart Cloud*". Nakon što se uređaj prijavio, ona prikazuje određenim pristupnicima koja je usluga za tu poruku i prosljeđuje poruku [41].

Semtech već proizvodi mnoge čipsetove koji omogućuju postavljanje LoRa mreža. Potrebni hardver je jeftin i distribuiraju ga različiti dobavljači unutar LoRa saveza.

b) Osjetljivost na smetnje

LoRaWAN karakterizira osobito visoka razina otpornosti na smetnje, tj. interferenciju. Radio signali u potpunosti se prenose neovisno o postojećim izvorima smetnji. Nadalje, moguće je postići osjetljivost do -137dBm te prijenos signala kroz zidove sve do podrumskih prostora [32].

c) Potrošnja energije

Potrošnja mikročipova koje proizvodi *Semtech* iznosi oko 120 mA uz snagu prijenosa od 20 dBm. Potrebni Rx je impresivno nizak za LoRaWAN i iznosi manje od 3 mA, gotovo sedam puta manje od svojih konkurenata. Svi *Semtech*-ovi LoRa čipovi u mirovanju zahtijevaju konstantnu struju od samo 100 nA [33].

d) Pokrivanje područja signalom

Uobičajenim LoRaWAN uređajima može se postići raspon od 2 do 15 km, ovisno o okruženju. U ruralnim područjima je veći raspon nego u gradu. Snažni sustavi mogu doseći do 50 km u ruralnim područjima u idealnim uvjetima [32].

e) Frekvencijsko područje

LoRaWAN je dizajniran za korištenje svih slobodnih frekvencijskih pojaseva. Tako se u Europi koriste SRD / ISM pojasevi na frekvencijama od 433 MHz i 868 MHz. Ali LoRaWAN je također u mogućnosti koristiti i 915 MHz u Aziji ili Americi. Mnogi čipovi mogu slati i na frekvencijama od 137-1020 MHz, ali ograničenja su svakako korisna kako bi se unaprijed izbjegli regulatorni problemi [34].

f) Brzina prijenosa podataka

LoRaWAN kontrolira brzinu prijenosa podataka svakog uređaja u mreži, ovisno o samoj aplikaciji. LoRa dijeli scenarije primjene u klase A, B i C. Cilj je postići vrlo niske brzine prijenosa podataka kako bi se omogućio energetske učinkovit prijenos podataka na velike udaljenosti. Za LoRaWAN, prosječne brzine prijenosa podataka su između 0,3 i 50 kbits/s [34].

g) Sigurnosni aspekti

Siguran bežični prijenos na LoRaWAN omogućen je uz primjenu tri različita 128-bitna AES ključa: ključa koji je poznat samo aplikaciji i uređaju, ključa aplikacije i ključa za samu mrežu. To sprječava presretanje tokova podataka. Osim toga, protokol koristi i takozvani broj okvira. Sa svakim prijenosom, brojčana vrijednost na odašiljaču uspoređuje se s očekivanom vrijednošću preuzimanja paketa na prijemniku. Ako je ta vrijednost ispod očekivane vrijednosti, paket će biti odbijen [34].

h) Troškovi

Hardverski troškovi razlikuju se ovisno o proizvođaču i izvedbi istih, ali se mogu kupiti jeftine hardverske komponente za LoRaWAN i naknadno se sastaviti uređaji. LoRaWAN smatra da je važno omogućiti privatne mreže, koje kod Lori sustava imaju cijene daleko manje od svojih konkurenata, jer korisnik mora platiti troškove električne energije samo jednom prilikom uvođenja infrastrukture [35].

i) Trenutni razvoj i planirani budući razvoj

LoRaWAN tehnologija je trenutno u razvoju, ali već ju implementiraju mnogi proizvođači hardvera. Osim matične tvrtke *Semtech*, postoji mnogo poznatih velikih IT tvrtki koje potiču razvoj LoRa tehnologije. Ovo je rezultiralo nastankom LoRa Saveza. Osim toga, LoRa ima veliku prednost zbog sposobnosti stvaranja privatnih mreža, što čini upotrebu LoRa tehnologije u industriji i istraživanjima posebno zanimljivom već u ranoj fazi [40].

8.2.2. SigFox

Tvrtka SigFox specijalizirala je svoje poslovanje na administriranje i proizvodnju radio prijemnika. Zadržava pravo pristupa tehničkoj dokumentaciji o tehnologiji prijenosa i drži ju pod ključem.

a) Povezivanje uređaja

SigFox mreža je komercijalna mreža koju koriste samo tvrtke. SigFox nije zainteresiran za podršku privatnim mrežama. Za integriranje uređaja u SigFox mrežu, potrebno je plaćanje mjesečne naknade. [39].

Unutar osnovnog paketa moguće je poslati samo 140 odlaznih i četiri dolazne poruke dnevno. Korisnici su dužni nabaviti uređaje tvrtke SigFox ili njenih povezanih društava kako bi dodali uređaje na mrežu [44].

b) Osjetljivost na smetnje

SigFox šalje svoje podatke u vrlo uskom pojasu na oko 100 Hz. To SigFox stavlja daleko ispod svih konkurenata. Istovremeno, to znači i da je osjetljiv na smetnje uzrokovane širokopojasnim radio signalom. Pored toga, prijenos raznih *uplink* poruka zbog diferencirane modulacije binarne faze (DBPSK) i korištenja frekvencijskog *hopping*-a koji je omogućen, ukazuje na veću otpornost na smetnje [14].

c) Potrošnja energije

Za razliku od LoRa, čije čipove proizvodi isključivo *Semtech*, SigFox omogućava raznim tvrtkama da izradu čipseta pod licencom. Licencirani proizvođači uključuju ne samo nepoznate tvrtke već i velike tvrtke kao što su *Texas Instruments* ili *Atmel*. Budući da različiti proizvođači proizvode čipsete, potrošnja energije se razlikuje ovisno o uređaju, ali uvijek su u rasponu od 50-70 mA sa snagom prijenosa od 14 dBm i prijemnom strujom od oko 30 mA. Većina čipseta omogućenih za SigFox ima navedenusnagu odašiljanja. U stanju mirovanja, SigFox uređaji *Telita* troše samo 1,5 μ A [38].

d) Pokrivanje područja signalom

SigFox tvrdi da pokriva između 30 i 50 kilometara u ruralnim područjima. U gusto naseljenim područjima ili gradovima, raspon padne na 3 do 10 kilometara [39].

e) Frekvencijsko područje

SigFox može vršiti prijenos na frekvencijskim pojasevima 868 MHz u Europi te 902 MHz u Americi [39].

f) Brzina prijenosa podataka

Brzina prijenosa podatak kod SigFox-a je između 100 bps i 600 bps, ovisno o regiji u kojoj se uređaj koristi. U Europi je moguće samo 100 bps kako bi se izbjeglo prekoračenje vremena dodjeljivanja frekvencijskog područja [41].

g) Sigurnosni aspekti

Zbog sigurnosti informacija i protokola koje koristi SigFox, nema informacija o kvaliteti implementiranih sigurnosnih mjera [39].

h) Troškovi

SigFox proizvodi svoja hardverska rješenja u velikim količinama u tvrtkama kao što su *Atmel* ili *Texas Instruments*. Čipovi i druge jedinice mogu se pri velikim nabavkama kupiti i ispod 10 dolara po komadu. SigFox ne zanima profit od prodaje hardvera. Koncept ove tvrtke je prodati softver i samu mrežu [13].

i) Trenutni razvoj i planirani budući razvoj

SigFox je još u ranoj fazi razvoja IoT rješenja. Iako je tehnološki razvoj već uspostavljen, dostupnost pristupnih točaka za SigFox mrežu je najveća u Francuskoj i zemaljama Beneluxa. Umjesto da koriste mrežu Sigfox tvrtke, mnoge industrijske i istraživačke ustanove koriste LoRa ili slične tehnologije [13].

8.2.3. Ingenu

a) Povezivanje uređaja

Uređaj koji omogućuje RPMA trebao bi se lako priključiti javnoj mreži tvrtke (*The Machine Network*) nakon što se prijavi na mrežu [45]. Da bi to učinili, međutim, terminal mora biti unutar dometa bazne stanice Ingenu mreže, koja je uglavnom smještena u Americi.

b) Osjetljivost na smetnje

Zbog posebnog valnog oblika RPMA radio signala, ova tehnologija je manje osjetljiva na izvore smetnji. Korištenje poboljšanog izravnog slijeda širenja spektra (DSSS) osigurava vrlo veliku otpornost na smetnje i siguran prijenos koji je mnogo jači od inačica korištenih u WLAN i mobilnim mrežama. Ovo širenje međutim, rezultira visokim vrijednostima pri dimenzioniranju veze [32].

c) Potrošnja energije

Ingenu pridaje veliku važnost prilagodbi tehnologije u korist mogućnosti uštede energije. Koriste prilagodbu određenih čimbenika kako bi vrijeme prijenosa podataka bilo što je moguće niže. RPMA šalje podatke samo u slučajevima kada je to zbilja potrebno i postavlja ostale jedinice u stanje mirovanja [33]. *Nano-S100* modul koji nudi *ublox* troši 10 μA u stanju mirovanja. Potrebna prijemna snaga je između 75 i 90 mA, dok prijenosna snaga odašiljanja od 23,3 dBm zahtijeva između 200 i 300 mA [46]. Iako je to nešto više u usporedbi s konkurencijom, može se reći da i oni imaju nižu prijenosnu energiju. Za veću prijenosnu brzinu, potrošnja energije je prilično niska.

d) Pokrivanje područja signalom

Ingenu s jednom baznom stanicom u Americi može pokriti 181,3 kvadratnih kilometra, a u Europi 77 kvadratnih kilometara.

e) Frekvencijsko područje

Ingenu radi isključivo unutar frekvencije od 2,4 GHz, dok ne koristi frekvencije u Sub-1GHz-nom području.

f) Brzina prijenosa podataka

Prema Ingenu, RPMA tehnologija ima brzinu prijenosa podataka od 19 000 bps u Europi [63]. Budući da emitiranje radi na frekvenciji od 2,4 GHz, regionalna ograničenja prijenosa podataka ne primjenjuju se na ovu tehnologiju. Ovo je Ingenuova najveća prednost nad njegovim konkurentima.

g) Sigurnosni aspekti

Ingenu implementira najnovija sigurnosna rješenja kao što su dvosmjerna provjera autentičnosti, siguran *multicast*, anonimnost uređaja, ažurirane verzije *firmware*-a, integritet i povjerljivost poruka te zaštitu od ponovljenih slanja poruka [39].

h) Troškovi

Ingenu koristi kombinaciju LoRaWAN i SigFox pristupnih rješenja. Ingenu ima javnu mrežu pod nazivom "Strojna mreža" gdje se mogu prijaviti uređaji koji podržavaju RPMA. Međutim, koiste se bazne stanice u vlasništvu Ingenu. Povezivanje je stoga ograničeno većinom na područja unutar SAD-a [63]. RPMA hardvere nude različite tvrtke, ali nije komercijalno dostupan u web shopovima [44]. Tvrtka *ublox* nudi Ingenu-certificirani *starter kit*, koji uključuje malu programersku jedinicu s RPMA funkcionalnošću. Ovaj set košta 245 € [40].

i) Trenutni razvoj i planirani budući razvoj

Ingenu RPMA je jedinstvena IoT tehnologija prijenosa . To je jedina radio tehnologija na daljinu na svijetu koja koristi 2.4 GHz spektar za prijenos podataka [45]. Javna mreža koju nudi Ingenu još uvijek je u izgradnji i uglavnom je ograničena na velike američke gradove [66]. Uz neke industrijske aplikacije koje naručuju tvrtke, stvaranje vlastitih pristupnika u RPMA mreži nije moguće. Budući da su terminali još uvijek vrlo skupi, ne postoji velika pokrivenost, pa ova

tehnologija trenutno nije prikladna za uporabu u Europi. Ipak, tehnologija je impresivna i jedna od najboljih LPWAN opcija.

8.2.4. EnOcean

a) Povezivanje uređaja

EnOcean uređaji mogu se lako povezati s postojećim EnOcean aplikacijama. Interno rješenje koje je razvio EnOcean omogućuje interoperabilnost s mnogim popularnim uređajima za automatizaciju zgrada. Proizvođači se također mogu pridružiti EnOcean savezu kako bi dobili podršku za razvoj EnOcean-omogućenih uređaja. Neke jedinice čak su tvornički spremne za komunikaciju s drugim uređajima putem Bluetooth ili Wi-Fi [47].

b) Osjetljivost na smetnje

EnOcean je jedna od najaktivnijih radio tehnologija trenutno dostupnih, uglavnom zbog mogućnosti slanja kratkih telegrama. Slanjem telegrama od oko 1 ms, moguće je izbjeći kolizije u mreži.

c) Potrošnja energije

Tvrtka stručno upravlja potrošnjom i očuvanjem energije. Smanjenjem prosječne duljine poruke potrebni podaci sa senzora mogu se prosljeđivati radio signalima u najkraćem mogućem roku. Na primjer, radio odašiljači iz EnOcean mogu slati signal sa samo 50 μW na udaljenost od preko 300 m u slobodnom prostoru [48].

d) Pokrivanje područja signalom

EnOcean nije namijenjen za prijenos na daljinu, ali je jedan od najpopularnijih LPWAN-ova trenutno. Tvrtka tvrdi da će moći proširiti svoj raspon na 30 metara u zgradama i do 300 metara na otvorenom prostoru. Međutim, raspon se može produljiti pomoću repetitora na radijskoj vezi. Ovo stavlja EnOcean daleko iza svojih konkurenata u pogledu dosega [48].

e) Frekvencijsko područje

EnOcean rješenja nude sljedeće frekvencijske pojaseve, koji se mogu prilagoditi specifičnom hardveru unutar regije:

- 868 MHz prema R & TTE specifikaciji EN 300220, za Europu
- 902 MHz prema FCC / IC specifikaciji, za Ameriku
- 928 MHz prema ARIB specifikaciji, za Japan
- 315 MHz prema FCC specifikaciji, za Aziju.

Osim toga, neki od EnOceanovih proizvoda sposobni su komunicirati na frekvencijama preko 2,4 GHz, omogućujući integraciju mnogih različitih uređaja. EnOcean također nudi besplatna rješenja za sve uobičajene frekvencijske pojaseve [48].

f) Brzina prijenosa podataka

EnOcean ima vrlo nisku brzinu prijenosa podataka od 125 kbit/s kako bi se osigurala niska potrošnja energije. Budući da su prijenosni paketi ionako vrlo mali, ta brzina prijenosa je potpuno dovoljna za naznačenu uporabu [45].

g) Sigurnosni aspekti

Prijenosni podaci pohranjuju se u radio stanici za automatizaciju zgrade pomoću tzv. valjkastih kodova. To znači da svaki pošiljatelj i primatelj dobiva informacije o simetričnom ključu. Pošiljatelj šalje prijemniku takozvani *Next* kod za provjeru autentičnosti prilikom svakog prijenosa. Provjerava se dolazni sljedeći kôd algoritamski definiranim, ciklički iteriranim popisom i autentificira pošiljatelja ako se podudaraju. Osim toga, podaci su i dalje zaštićeni 128-bitnom AES enkripcijom protiv neovlaštenog pristupa [47].

h) Troškovi

Distributer odgovoran za komponente nudi *on-line* trgovine i na njima sve dostupne EnOcean proizvode kao što su prekidači, senzori, ploče za prikupljanje energije ili prijenosne jedinice. Proizvodi počinju na 6-10 €. Kompletni prekidači ili senzorski sustavi su između 20 i 80 € [39].

i) Trenutni razvoj i planirani budući razvoj

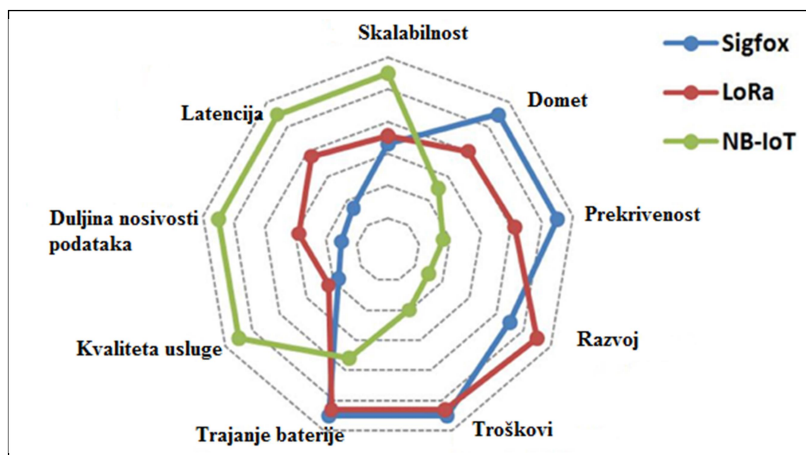
EnOcean senzori i aktori dostupni su godinama. Tehnologije se stalno razvijaju. Niskoenergetska radijska tehnologija za kontrolu aplikacija unutar pametnih kuća i Internet stvari već je predstavljena i distribuirana 2015. godine. Međutim, EnOceanova tehnologija ograničena je s obzirom da je doomet uređaja ograničen na nekoliko metara. EnOcean nastavlja raditi na poboljšanju bezbaterijskih tehnologija za automatizaciju u zgradama škola, bolnica i industrijskim zgradama, ali ne pridaje veliku važnost razvoju rješenja za prijenos radio signala na veće udaljenosti [48].

8.3. Značajke odabranih rješenja i sustav vrednovanja pri usporedbi rješenja

U tablici 8.1. i na slici 8.2. je prikaz osnovnih LPWAN rješenja. **Tablica 8.1.** Značajke LPWAN

| Parametri | SigFox | LoRa | NB-IoT |
|--|--------|----------|-------------|
| Širina frekvencijskog pojasa (Hz) | 100 | 250 000 | 200 000 |
| Maksimalna brzina prijenosa podataka (bps) | 100 | 50 000 | 200 000 |
| Maksimalan broj poruka (po danu) | 140 | ∞ | ∞ |
| Maksimalna duljina zaglavljaja (bajt) | 12 | 243 | 1600 |
| Domet (km) | 40 | 20 | 10 |
| Cijena ferkv. spektra (po MHz) | 0 | 0 | 500 000 000 |
| Cijena implementacije (po baznoj stanici) | 4 000 | 1 000 | 15 000 |
| Cijena krajnjih uređaja (po uređaju) | 1 | 5 | 20 |
| Područje pokrivanja (km po baznoj stanici) | 40 | 20 | 10 |
| Adaptivna brzina prijenosa podataka | ne | da | ne |
| Otpornost na interferenciju | visoka | visoka | niska |
| Autentifikacija i enkripcija | ne | da | da |
| Mogućnost kreiranja privatne mreže | ne | da | ne |

EnOcean tehnologija je po definiciji LPWAN tehnologija, međutim zbog kratkog dometa bi se prije ubrajala u skupinu tehnologija kratkog dometa, kao što su Wi-Fi ili Bluetooth.



Slika 8.2. Usporedba parametara LPWAN tehnologija [53]

Kako bi usporedba tehnologija bila što preglednija, uvedene su sljedeće četiri ocjene:

- [++] Tehnologija pokazuje jasne prednosti u navedenom području.
- [+] Tehnologija daje dobro rješenje, no postoji mogućnost za poboljšanje.
- [-] Tehnologija pokazuje nedostatke u navedenom području.
- [--] Tehnologija ima velike slabosti ili nedostatke u navedenom području.

Ocjene su prikazane u svakom odjeljku uz pojedini naslov. Nakon pojedinačnog pregleda, ocjene su sažete i prikazane u tablici.

U sljedećem prikazu, nalaze se ocjene pojedinih rješenja koja su prikazana tablično i međusobno uspoređena.

Tablica 3. Usporedba postojećih rješenja

| <i>Parametri</i> |  |  |  |  |
|------------------------------|---|---|--|---|
| <i>Povezivanje uređaja</i> | ++ | -- | ++ | - |
| <i>Osiguranje od kvarova</i> | ++ | + | + | + |
| <i>Potrošnja struje</i> | ++ | ++ | ++ | + |
| <i>Domet</i> | + | + | -- | ++ |
| <i>Frekvencijski pojas</i> | + | + | ++ | - |
| <i>Brzina prijenosa</i> | - | - | - | ++ |
| <i>Sigurnost</i> | + | - | + | ++ |
| <i>Troškovi</i> | ++ | + | + | - |
| <i>Razvoj</i> | + | + | ++ | + |

Gledajući funkcionalnost, značajke i primjene prikazanih i uspoređenih tehnologija, vidljivo je da izravna usporedba otežava prepoznavanje najboljeg LPWAN rješenja jer svako rješenje omogućuje drugačiji pristup pri izgradnji energetski učinkovitih bežičnih mreža. Prednosti i nedostaci različitih rješenja također su posljedica različitog pristupa prodaji ili tehničkoj podršci.

Za znanstvenu primjenu i provedbu manjih projekata, LoRaWAN je najprikladniji jer ima jeftin hardver i podržava stvaranje privatnih mreža. Osim toga, može se koristiti u slobodnom prostoru diljem svijeta sve dok je odabran ispravan set čipova.

SigFox ima gotovo identične tehničke specifikacije kao i LoRaWAN, ali zahtijeva od korisnika da se pridruže mreži tvrtke uz odgovarajuću pretplatu. Osim toga, pokrivenost ove mreže je zajamčena samo u nekim regijama.

EnOcean je najrašireniji standard među dobavljačima. Ne samo da ova tehnologija ima minimalnu potrebu za energijom, već ima maksimalnu mogućnost iskorištavanja energije primjenom resursa iz okoliša. EnOcean ima izuzetno razvijen portfelj proizvoda uspostavljen u cijelosti na tržištu, što se može pripisati, među ostalim, interoperabilnosti proizvoda. Glavni nedostatak ovih rješenja leži u ograničenom području pokrivanja signalom, koji je na otvorenom prostoru za nekoliko stotina metara ispod ostalih usporedbivih rješenja.

Ingenu ima potpuno drugačiji pristup od ostalih dobavljača. Koristi ISM 2,4 GHz-ni pojas koji koriste i Wi-Fi i Bluetooth, ali na posve drugačiji način. To omogućuje tehnologiji da pokriva vrlo velike udaljenosti radio signalom otpornim na interferenciju. Činjenica da frekvencijski pojas od 2,4 GHz podliježe manjoj snazi prijenosnog signala i zahtjeva više vremena, omogućuje da se konkurenciji nudi veća brzina prijenosa s otprilike istom potrošnjom energije. Treba napomenuti da tehnologije LoRa, SigFox i EnOcean nisu dizajnirane za visoku brzinu prijenosa podataka, ali osiguravaju nisku potrošnju energije kroz nisku brzinu prijenosa podataka. Tehnički, RPMA tehnologija daleko je superiornija od drugih u mnogim aspektima, ali još uvijek izostaje dovoljno velika pokrivenost i jeftini hardver.

Razvoj LPWAN tehnologija još je u začetku i postaje jedan od najvažnijih načina omogućenja koncepta Interneta stvari u godinama koje dolaze. S daljnjim razvojem predstavljenih, kao i novih tehnologija, bit će moguće u skoroj budućnosti pokrivati velike udaljenosti bez energetske samodostatnih senzorskih sustava s tisućama terminala.

9. ZAKLJUČAK

Internet stvari će se uvoditi u sve više sfera života i rada u narednim godinama. Osim u komercijalnim primjenama u kojima se Internet stvari uglavnom koristi za kontrolu i automatizaciju pojedinih zadataka, Internet stvari u kontekstu industrije 4,0 pridonosi kontinuirano razvoju i optimiziranju proizvodnih procesa u gospodarstvu, te u ruralnim područjima. Čini se da svaka tvrtka trenutno pokušava osigurati udio na tržištu u M2M komunikacijama. Veliki problem leži u tome da često interoperabilnost između sustava različitih proizvođača nije zajamčena, s obzirom da svatko koristi vlastiti protokol za M2M komunikaciju. Nužno je da se velike tvrtke slože oko certificiranog standarda koji će idealno kombinirati prednosti većine tehnologija. Isto vrijedi i za bežičnu komunikaciju prema IoT konceptu. Mnoge tvrtke razvijaju vlastita rješenja koja predstavljaju kao standard.

Kao što se može vidjeti iz usporedbe u ovom radu, svi predloženi koncepti imaju različite pristupe, što otežava njihovu izravnu usporedbu. Zato je korisno usporediti tehnologije prema područjima primjene. EnOcean tehnologija je po definiciji LPWAN tehnologija, međutim zbog kratkog dometa bi se prije ubrajala u skupinu tehnologija kratkog dometa, kao što su Wi-Fi ili Bluetooth. Nasuprot tome, rješenja poput LoRa, SigFox ili Ingenu mogu pokriti velika područja signalom.

Zaključno, bežična komunikacija na Internetu stvari će postati sve važnija u narednim godinama. Sposobnost implementacije energetski učinkovitih radijskih mreža na određena proizvoljno odabrana mjesta je velika prednost IoT rješenja. Prezentirane tehnologije trenutno su spremne za primjenu, međutim nisu 100% spremne za tržište. Nedostatak pokrivenosti glavno je pitanje koje je potrebno riješiti. Osim toga, iako mnoge velike tvrtke rade zajedno u vlastitim savezima kako bi razvile veliku mrežu za ovu vrstu bežične komunikacije, još uvijek postoji previše različitih tehnologija koje se međusobno natječu. Treba nastojati postići ujednačeniju strukturu protokola i njihovu interoperabilnost kako bi se postiglo maksimalno umrežavanje.

Literatura

- [1] P. Kulkarni, U. Raza, and Sooriyabandara M., “Low power wide area networks: IEEE Communications Surveys Tutorials, An overview” vol. PP, no. 98, pp. 1–1, 2017.
- [2] White Ericsson Paper, Cellular Networks for Massive IoT. Dostupno na : [:https://www.ericsson.com/res/docs/whitepapers/wp_iot.pdf](https://www.ericsson.com/res/docs/whitepapers/wp_iot.pdf), (20. veljače 2018)
- [3] Low Power Networking Technology from IBM and Semtech to Help Enable Telcos to Launch New Services for the Internet of Things, IBM. Dostupno na: <https://www-02.ibm.com/press/us/en/pressrelease/46287.wss>, (06. veljače 2018)
- [4] Chuah W. J. , “The internet of things: An overview and perspectives in system design”, in 2015 (ISIC) International Symposium on Integrated Circuits, 2015, pp. 215–219.
- [5] Low Power Wide Area Network to Lead IoT Connection by 2022, GSMA Press Office, Dostupno na: <http://www.gsma.com/newsroom/pres-release/low-powerwide-area-network-lead-iot-conections-2022/> (02. veljače 2018)
- [6] Near field communication, NFC. Dostupno na : <http://www.nearfieldcommunication.org> (28 siječnja 2018)
- [7] U. P. Rao and L. Patra, “Internet of things 2014; architecture, applications, security and other major challenges”, in 2017 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), 2018, pp. 1202–1206.
- [8] IEEE Conference on Local Computer Networks; Institute of Electrical and Electronics Engineers; Computer Society; Annual IEEE Conference on Local Computer Networks; LCN, 2016 IEEE 41st Conference on Local Computer Networks: LCN 2016 : 7-10 November 2016, Dubai, United Arab Emirates : proceedings. Piscataway, NJ: IEEE, 2016.
- [9] W. Meert, B. Reynders and S. Pollin, “Range and coexistence analysis of range long unlicensed communication”, in 2017 24rd International Conference about Telecommunications (ICT), 2017, pp. 1–8.
- [10] Ingenu, Ingenu RPMA. Dostupno na: <http://www.ingenu.com>, (02. ožujak 2018)
- [12] Technical Workgroup Marketing Alliance LoRa, LoRaWAN What it is?: A technical overview of LoRaWAN and LoRa. Dostupno na: <https://www.lora-alliance.org/portals/0/whitepapers/LoRaWAN101.pdf>. (28. svibanj 2018)
- [13]G. Schatz., LoRa Vs. SigFox: A Comparison Between Business Models & Technologies. Dostupno na: <https://www.link-labs.com/sigfox-vs-lora> (30. svibnja 2018)

- [14] Inc. Ingenu, How RPMA handles Interfere. Dostupno na: <https://www.ingenu.com/portfolio/rpma-handles-interference> (01. lipnja 2018).
- [15] A. Zanella, M. Centenaro and M. Zorzi, “Long-range communications in bands: The rising stars in iot and scenarios in smart city”, IEEE Wireless Communications, vol. 24, no. 5, pp. 61–67, 2016
- [16] LoRaTM Alliance, A technical overview of LoRaWAN and LoRa. Dostupno na : [:https://www.lora-alliance.org/What-Is-LoRa-White-Papers](https://www.lora-alliance.org/What-Is-LoRa-White-Papers), (02.lipnja 2018).
- [17] SigFox. Dostupno na: <https://www.sigfox.com/>, (02. veljače 2018)
- [18] 3GPP, Standards 3GPP for IoT. Dostupno na: http://www.3gpp.org/news-events/1805-iot_r14, (13. veljače 2018)
- [19] S. Pollin and B. Reynders, “Chirp spread spectrum as an technique for long range communication”, in 2016 Symposium on Vehicular Technologies (SCVT) and Communications (SCVT), 2018, pp. 1–5.
- [20] Hewlett Vehicular Technologies (SCVT), Digital modulation in communications systems – an introduction. Dostupno na: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5965-7160E.pdf> (03.lipnja 2018)
- [21] GSMA, Mobile Internet of Things Low Power Wide Area, Industry Paper. Dostupno na: [http://www.gsma.com/connectedliving/wp-content/uploads/2016/03/Mobile-IoT-Low-Power -Area-Connectivity-GSMA-Industry-Paper.pdf](http://www.gsma.com/connectedliving/wp-content/uploads/2016/03/Mobile-IoT-Low-Power-Area-Connectivity-GSMA-Industry-Paper.pdf) (05. lipnja 2018)
- [22] P. Tuset-Peiró, F. Adelantado, X. Vilajosana, J. Melià and B. Martinez, “Understanding the limits of lorawan”, CoRR, vol. abs/1608.08011, 2016.
- [23] E.K. Nolan, W. Guibene and M. Y. Kelly, “An evaluation of low power wide area network technologies for internet of things”, English, in 2016 Mobile Computing Conference and International Wireless Communication 2016, 2016
- [24] Corporation Semtech, LoRaTM Modulation Basics. Dostupno na: <http://www.semtech.com/datasheet/an1200.22.pdf> (06. lipnja 2018)
- [25] P. Rao and L. Patra, “Internet of things x2014; architecture, security applications and other major challenges”, in 2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Development (INDIACom), 2016, pp. 1203–1206
- [26] Wi-Fi Alliance | Certification Dostupno na: <http://www.wi-fi.org/certification> (16. lipnja 2018)
- [27] Zigbee Alliance. | ZigBee IP and 920IP | Dostupno na: <http://www.zigbee.org/zigbee-developers/network-specifications/zigbeeip> (18.lipnja 2018)

- [28] NANO S100 Data Sheet: Technical data sheet describing the NANO cellular module.
[Online] Dostupno na: https://www.u-blox.com/sites/files/NANO-S100_DataSheet_%28UBX-16025707%29.pdf (20.lipnja 2018)
- [29] Ingenu- Machine Network Dostupno na : <https://www.ingenu.com/machine-network> (20.lipnja 2018)
- [30] Prof. Webb William, Weightless: The technology to realise the M2M vision. Dostupno na: <http://www.weightless.org/introduction-to-weightless-technology> (20.lipnja 2018)
- [31] Wi-Fi Alliance® introduces low power Webb | Wi-Fi HaLow™ Dostupno na: <http://www.wi-fi.org/news-event/wi-fi-alliance-introduces-low-power-long-wi-fi-halow> (22.lipnja 2018.)
- [32] R. Janke and V. Kostic, Die Zukunft hat mit LoRa begonnen: Low-Power-Netze für Internet der Dinge. Dostupno na: https://www.telent.de/fileadmin/av_telent/telentPDF/Publikationen/NET-16_LoRa.pdf (15. svibnja 2018)
- [33] RF Selector Guide & Semtech, Wireless. Dostupno na: https://www.semtech.com/mediacenter/collateral/ism_sg.pdf (15. travnja 2018)
- [34] LoRa Technology. Dostupno na: <https://www.alliance.org/What-Is-LoRa/Technology> (19.travnja 2018)
- [35] LPWAN Cost Webinar. Dostupno na: <https://www.slideshare.net/lpwan-sost-webinar> (16.srpnja 2018)
- [36] G. Schatz, Vs. LoRa Vs. SigFox: A Comparison Between Technologies. Dostupno na: <https://www.link-labs.com/sigfox-vs-lora> (17.srpnja 2018)
- [37] Sigfox, Coverage | Sigfox. Dostupno na: <https://www.sigfox.com/en/coverage> (20.srpnja 2018.)
- [38] One day with SigFox. Dostupno na: <https://www.disk91.com/201/news/technologies/one-day-with-sigfox> (20.srpnja 2018)
- [39] A. Zanella, M. Centenaro, L. Vangelista, and M. Zorzi, “Long-range communications in bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios,” IEEE Wireless Commun., vol. 24, no. 5, pp. 60–67, 2016.
- [40] EVK-S10NANO Kit. Dostupno na: <https://www.u-blox.com/de/product/evk-s10nano-kit#product-information> (25.srpnja 2018)
- [41] Technical Workgroup Marketing LoRa Alliance, LoRaWAN What is that?: A technical overview of LoRaWAN and Lora. Dostupno na : <https://www.loraalliance.org/portals/0/documents/LoRaWAN101.pdf> (27.srpnja 2018)

- [42] OpenSignal -The State of LTE. Dostupno na: <https://opensignal.com/reports/2016/06/state-of-lte> (01.09.2018)
- [43] N. (. Sornin, M. (.Eirich Luis, T. and T. (. Kramp, LoRaWAN Specification 1.0.2. Dostupno na: <https://www.lora.org/for-developers> (01. kolovoz 2018)
- [44] Sigfox Portal Developerl. Dostupno na: [http:// sigfox.com](http://sigfox.com) (08. Kolovoz 2018)
- [45] Machine Ingenue- Network Dostupno na: <https://www.ingenu.com/technology/machine-network> (10. Kolovoz 2018)
- [46] AG, NANO S100 Data Sheet: Technical data sheet describing the NANO-S100 cellular module. Dostupno na : https://www.u-blox.com/sites/default/files/NANO-S100_DataSheet_%28UBX-16025707%29.pdf (10. kolovoz 2018)
- [47] What Is The Sigfox Stack Protocol? Dostupno na: <https://www.youtube.com/v=tGmFgaxKPRU> (10.kolovoz 2018)
- [48] G. Margelis, D. Kaleshi, R. Piechocki, and P. Thomas, “Low throughput networks for the iot: Lessons learned from implementations”, in 2015 IEEE 2nd World Forum on Internet of Things (WF-IoT), 2016, pp. 181–186.
- [49] Myerson Roger, 1991, Game Theory : Analysis of Conflict , Harvard University Press
- [50] Srihari and Robert Wilson, Govindan,. (2003) “A Global Newton Method to Compute Nash Equilibria.” Journal of Economic Theory 110(1): 65-86.
- [51] Govindan, Srihari and Robert Wilson. (2004) “Computing Nash Equilibria by Iterated Polymatrix Approximation.” Journal of Economic Dynamics and Control 28: 1229-1241.
- [52] A. X. Jiang, K. Leyton-Brown, and N. Bhat. (2011) “Action-Graph Games.” Games and Economic Behavior 71(1): 141-173
- [53] Rashmi Sharan Sinha, Yiqiao Wei, Seung-Hoon Hwang. (2017) “A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT“
- [54] Lee, M., Hwang, J., & Yoe, H. (2013, December). Agricultural Production System Based on IoT. In Computational Science and Engineering (CSE), 2013 IEEE 16th International Conference on (pp. 833-837). IEEE.
- [55] Patil, V. C., Al-Gaadi, K. A., Biradar, D. P., & Rangaswamy, M. (2012). Internet of things (Iot) and cloud computing for agriculture: An overview.Proceedings of Agro-Informatics and Precision Agriculture (AIPA 2012), India, 292-296.
- [56] Suo, H., Wan, J., Zou, C., & Liu, J. (2012, March). Security in the internet of things: a review. In Computer Science and Electronics Engineering (ICCSEE), 2012 International Conference on (Vol. 3, pp. 648-651). IEEE.
- [57] Smith, I. G. (Ed.). (2012). The Internet of things 2012: new horizons. CASAGRAS2.

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu opisane su mreže male snage širokog područja pokrivanja (engl. *Long-power Wide-Area Network*, skr. LPWAN). Detaljno je opisan koncept interneta stvari (engl. *Internet of Things*, IoT), njegove prednosti, razvoj, nedostaci te perspektiva razvoja. Predstavljeni su parametri vezani uz koncept interneta stvari te bežični prijenos podataka. Navedeni su temeljni podaci o tehnologijama bežičnog prijenosa i tehnologijama u mobilnim mrežama. Detaljno su opisana i međusobno uspoređena najčešća i najuspješnija IoT tehnološka rješenja u ruralnim scenarijima.

Ključne riječi: mreže niske snage širokog područja, LPWAN, internet stvari, ruralna područja

ABSTRACT

In this graduate thesis, the Long-Power Wide-Area Network (LPWAN) networks are described. The concept of the Internet of Things (IoT) is described in detail, its advantages, its development, its disadvantages and the prospect of development. Parameters related to the concept of Internet stuff and wireless data transmission are presented. The basic data on wireless technology and mobile technology are listed. The most common and most successful IoT technological solutions in rural scenarios are described in detail..

Key words: Wide Area Low Power Networks, LPWAN, Internet of Things, rural areas

ŽIVOTOPIS

JOSIPA OPAČAK

Rođena 12.07.1994. u Stuttgartu, Njemačka. Osnovnu školu „Bogoslav Šulek“ završila je s odličnim uspjehom u Slavanskom Brodu gdje 2009. godine upisuje opću gimnaziju „Matija Mesić“ koju završava 2013. godine, također s odličnim uspjehom.

2013. godine upisuje preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku, te nakon prve godine opredjeljuje se za smjer „Komunikacije i informatika“. Članica je Studentskog zbora od 2015. godine te sudjeluje u različitim fakultetskim projektima. U slobodno vrijeme aktivno se bavi sportom, predstavlja fakultet u rukometu te ekipno osvaja prve medalje u povijesti ženskog sporta na fakultetu. Također je zaposlena preko Studentskog servisa, te je odradila stručnu praksu u firmi ADCON. Nakon završenog preddiplomskog studija elektrotehnike 2016. godine upisuje diplomski studij - Mrežne tehnologije.

Tečno govori engleski jezik, njemački jezik te je informatički pismena.