

USPOREDBA PERFORMANSI PRI PRIJENOSU PODATAKA NA RADIJSKOJ PRISTUPNOJ MREŽI U SUSTAVIMA EGPRS I NB-IOT

Otočan, Filip

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Algebra
University College / Visoko učilište Algebra**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:225:051756>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-12**



Repository / Repozitorij:

[Algebra University - Repository of Algebra University](#)



VISOKO UČILIŠTE ALGEBRA

ZAVRŠNI RAD

**USPOREDBA PERFORMANSI PRI
PRIJENOSU PODATAKA NA RADIJSKOJ
PRISTUPNOJ MREŽI U SUSTAVIMA
EGPRS I NB-IOT**

Filip Otočan

Zagreb, siječanj 2020.

„Pod punom odgovornošću pismeno potvrđujem da je ovo moj autorski rad čiji niti jedan dio nije nastao kopiranjem ili plagiranjem tuđeg sadržaja. Prilikom izrade rada koristio sam tuđe materijale navedene u popisu literature, ali nisam kopirao niti jedan njihov dio, osim citata za koje sam naveo autora i izvor, te ih jasno označio znakovima navodnika. U slučaju da se u bilo kojem trenutku dokaže suprotno, spreman sam snositi sve posljedice uključivo i poništenje javne isprave stečene dijelom i na temelju ovoga rada“.

U Zagrebu, 5.1.2020.

Predgovor

Zahvaljujem mentoru Dr. sc. Albertu Tekoviću na ukazanom povjerenju i pruženoj pomoći i savjetima pri izradi ovog rada.

Zahvaljujem svojoj obitelji na bezuvjetnoj podršci i potpori tijekom cijelog školovanja.

Prilikom uvezivanja rada, Umjesto ove stranice ne zaboravite umetnuti original potvrde o prihvaćanju teme završnog rada kojeg ste preuzeli u studentskoj referadi

Sažetak

Cilj ovoga rada je napraviti analizu i usporedbu performansi prijenosa podataka kod komercijalnih EGPRS i NB-IoT sustava s aspekta pokrivenosti signalom, uz veoma niske potrebne brzine prijenosa podataka, uz minimalnu potrošnju energije. Opisane su najznačajnije komercijalne LPWAN i EGPRS tehnologije, te njihove razlike. U praktičnom djelu rada izneseni su rezultati i analiza mjerenja performansi NB-IoT i EGPRS sustava u rubnim područjima dostupnosti usluge, te na kraju zaključak.

Ključne riječi: EGPRS, GPRS, LPWAN, LoRA, NB-IoT, Sigfox

This paper aims to analyze and compare the performance of data transmission in commercial EGPRS and NB-IoT systems from the aspect of signal coverage, with very low data rates required, with minimal energy consumption. The most significant commercial LPWAN and EGPRS technologies and their differences are described. The practical part of the paper presents the results and analysis of performance measurements of NB-IoT and EGPRS systems in the marginal areas of service availability, and conclusion.

Keywords: EGPRS, GPRS, LPWAN, LoRA, NB-IoT, Sigfox

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Bežični prijenos podataka sustavom 2G.....	2
2.1. Pregled tehnologije prijenosa podataka u sustavu 2G.....	2
2.1.1. General Packet Radio Service (GPRS).....	2
2.1.2. Enhanced General Packet Radio Service (EGPRS)	4
3. Bežični prijenos podataka sustavom Narrowband Internet of Things (NB-IoT)	7
3.1. Pregled komercijalnih Low Power Wide Area Network (LPWAN) tehnologija..	7
3.2. Sustav NB-IoT	11
4. Opis mjerne metodologije	15
5. Analiza mjerenja i mjernih rezultata	17
Zaključak	26
Popis kratica	27
Popis slika.....	29
Popis tablica.....	30
Literatura	31

1. Uvod

U eri Interneta stvari (engl. *Internet of Things*) razni uređaji postaju pametni, ili barem pametniji nego što je to ranije bio slučaj. Omogućavajući im da autonomno funkcioniraju ti uređaji mogu prikupljati, analizirati i prenositi ljudima korisne informacije tipa informacije o zagađenju okoliša ili napraviti jednostavne aktivnosti poput okretanja ventila nekoga sustava. Kada takvi pametni uređaj budu instalirani u sve dijelove kuće, vlasnik će moći preko svojega mobitela nadgledati i upravljati svim uređajima i sustavima kuće. Naziv za takve kuće je pametna kuća (engl. *Smart Home*). No zašto se zaustaviti samo na domove ljudi, kada taj koncept možemo proširiti na veće sustave, područja, pa čak i cijele gradove. Ukoliko se taj koncept da se što je više moguće povezanih uređaja i procesa automatizira, te primijeni na razna područja ljudskog djelovanja mogućnosti su neograničene. Neke od brojnih mogućih primjena Interneta stvari su izgradnja Pametnih gradova (engl. *Smart Cities*), gdje bi se pomoću različitih vrsta povezanih elektroničkih senzora prikupljali, skladištili, analizirali i prosljeđivali podatke u svrhu učinkovitog upravljanja imovinom, resursima i uslugama. To bi uključivalo podatke prikupljene od građana, uređaja i imovine pomoću kojih bi se kvalitetnije upravljalo i donosilo odluke vezane za budućnost prometnih sustava, elektrana, komunalna poduzeća, vodoopskrbne mreže, gospodarenje otpadom, sprječavanje i otkrivanje kriminala, informacijske sustave, škole, vrtiće, bolnice, knjižnice i druge usluge u zajednici.

Glavni problem kod izgradnje pametnih gradova je taj da je ključni preduvjet bežična povezivost senzora putem dostupnih i pouzdanih podatkovnih mreža. Potrebno je pokriti cijele gradove signalom kako bi uređaji mogli biti povezani, a dodatni izazov predstavlja zahtjev za minimalnim utroškom energije, budući da bi bilo gotovo nemoguće mijenjati baterije na sensorima ili kompletne senzore na području cijeloga grada kada se baterije tih uređaja potroše.

Cilj ovoga rada je usporediti performanse sustava NB-IoT i sustava EGPRS kako bi se moglo zaključiti je li stvarno NB-IoT bolja tehnologija od EGPRS-a u domeni Interneta stvari koja bi se vrlo skoro mogla implementirati u izgradnju pametnih gradova.

2. Bežični prijenos podataka sustavom 2G

2.1. Pregled tehnologije prijenosa podataka u sustavu 2G

Sustavi 2G (engl. *Second Generation*) mobilnih mreže su komercijalno pokrenute na GSM (engl. *Global Systems for Mobile Communications*) standardu u Finskoj 1991.godine. Glavna poboljšanja 2G mreža u odnosu na starije mreže su: kriptirani telefonski razgovori, znatno učinkovitija uporaba radiofrekvencijskog spektra koja omogućava istovremeno posluživanje više korisnika u jednom frekvencijskom kanalu (FDMA+ TDMA), te podatkovne usluge za mobilne uređaje gdje je najpoznatiji predstavnik SMS (engl. *Short Message Service*) poruka.

2.1.1. General Packet Radio Service (GPRS)

GPRS (engl. *General Packet Radio Service*) je tehnologija komutacije paketa (engl. *Packet Switching technology*) 2.5G generacije koja omogućuje prijenos podataka putem mobilnih mreža. Koristi se za mobilni internet, MMS (engl. *Multimedia Messaging Service*) i ostale podatkovne komunikacije. Kako bi se povećala učinkovitost GPRS-a mora postojati simultana raspodjela paketa višestrukim korisnicima, a otvoreni okviri se distribuiraju na više korisnika. Maksimalna brzina GPRS-a iznosi 171.2 Kbit/s koristeći svih 8 vremenskih okvira u isto vrijeme. To je otprilike tri puta brže od brzina prijenosa putem fiksnih telekomunikacijskih mreža i deset puta brže od brzine prijenosa putem podatkovnih usluga na GSM mrežama [1].

2.1.1.1 Povijesni pregled GPRS-a

GPRS je razvijen kako bi omogućio GSM operaterima da zadovolje rastuće zahtjeve za uslugom bežičnog paketnog prijenosa podataka koji je rezultat je rezultat naglog rasta interneta i korporativnih intranet-ova. Aplikacije koje koriste te mreže zahtijevaju relativno veliku propusnost i odlikuju ih razni obrasci prometa i potrebe asimetričnog protoka. Aplikacije poput pretraživanje interneta tipično karakteriziraju značajni mrežni podatkovni protok dok se informacija prima ili odašilje nakon čega slijede dugački mirni periodi dok se

ti podatci pregledavaju. Također na klijentski uređaj obično dolazi mnogo više informacija nego što je poslano s klijentskog uređaja na server. GPRS sustavi bolje su udovoljili ovim potrebama za naletom podataka nego što to mogu tradicionalni bežični podatkovni sustavi. GPRS raspoređuje propusnost (engl. *Bandwidth*) neovisno o silaznom i ulaznom linku, a naplata se vrši prema količini prenesenih podataka, a ne po vremenu trajanja veze, kako je slučaj bio prije uvođenja GPRS-a. Drugi cilj GPRS-a je omogućiti GSM operaterima ulazak u tržište bežičnih podatkovnih usluga na ekonomičan način. Prvo operateri moraju biti u mogućnosti pružiti podatkovne usluge bez promjene cjelokupne infrastrukture. Početni GPRS standardi koristili su standardne GSM radio sustave, to uključuje GSM standardne modulacijske sheme kao i TDMA (engl. *Time-division multiple access*) strukture uokvirivanja. Drugo GSM operateri moraju imati fleksibilnost za implementaciju GPRS-a bez da mu moraju posvetiti cjelokupnu mrežu. GPRS pruža dinamično raspoređivanje i dodjeljivanje radijskih kanala paketnim uslugama prema potražnji [2].

Ciljevi koje je GPRS morao ispuniti i za Korisnike (engl. *Users - U*) i za Pružatelje mrežnih usluga (engl. *Network providers - NP*) bili su:

- a) Omogućiti pristup LAN-u firme i Internetu (U).
- b) Pružanje razmjerno visokih brzina prijenosa podataka (U).
- c) Omogućiti pretplatniku da bude dostupan cijelo vrijeme, ne samo za telefonske pozive, nego i za novu Elektroničku poštu, te najnovije vijesti (U).
- d) Nuditi fleksibilan pristup, bilo za mnoge pretplatnike s nižim brzinama prijenosa ili za manje pretplatnika s većim brzinama prijenosa kako bi se optimiziralo mrežno korištenje (NP).
- e) Nuditi jeftin pristup novim uslugama (U+NP).

U vrijeme uvođenja GPRS je bio jedina usluga koja je uspjela postići sve navedene ciljeve. Ostale GSM i druge tehnologije nisu mogle postići sve ciljeve [3].

2.1.1.2 GPRS Arhitektura

Standardna GSM mreža morala je biti nadograđena kao bi mogla podržati GPRS budući da nije bila sposobna prenositi podatke u načinu rada Komutacije paketa (engl. *Packet Switched*). Kao što je već ranije spomenuto, GPRS se potpuno razlikuje od standardnog prijenosa podataka jer se podatci šalju u obliku paketa. Kada god treba poslati paket, resursi (radijski kanal na zračnom sučelju, vremenski odsječak u vremenskoj domeni) se alociraju i pripadajući paket može biti dodijeljen. U sustavu GSM promet se komutira (engl. CS –

Circuit Switching) s određenom brzinom prijenosa podataka ovisno o aplikaciji i radijskim uvjetima.

Prelazak na GPRS tehnologiju izveden je na način tako da mrežni operatori kod uvođenja GPRS tehnologije trebaju dodati nekoliko novih infrastrukturnih čvorova, te nadograditi softver pojedinih postojećih mrežnih elemenata [4].

GPRS se bazira na GMSK (engl. *Gaussian Minimum-Shift Keying*) modulaciji. Brzina GPRS sustava uvelike ovisi o korištenoj shemi kodiranja, a postoje 4 različite sheme kodiranja od CS-1 do CS-4, koje su definirane za radio blokove nose RLC (engl. *Radio Link Control*) blokove podataka. Svaka shema ima različite brzine, brzina je usko povezana sa smanjenjem zaštita od grešaka, tako da što je veća brzina, to je manja zaštita od grešaka. Brzina je povezana i s dometom, tako da povećanje brzine dovodi do smanjenja dometa ćelije kao i obrnuto. Drugi element koji utječe na brzinu GPRS sustava je broj vremenskih odsjeka (engl. *Time slot*) koje je operator definirao za GPRS. Kod korištenja osam vremenskih odsjeka te CS-4 sheme maksimalna korisnička brzina prijenosa podataka iznosi 171.2 Kbit/s.

Glavni nedostaci GPRS sustava su:

- a) Nije moguće utvrditi uzrok kvara kod GPRS-a.
- b) Na mrežu se može utjecati kada više GPRS korisnika istovremeno koristi GPRS usluge na istome području. To dovodi do zagušenja što rezultira sporijom konekcijom.
- c) Za teoretsku maksimalnu brzinu od 171.2 kbit/s potrebno je koristiti svih osam vremenskih odsječaka, međutim to nije realno očekivati, budući da na tržištu nema terminala koji podržavaju korištenje više od 5 istovremenih vremenskih odsječaka, a nit mobilnom operateru nije u interesu tako veliki kapacitet rezervirati za nekoliko GPRS korisnika. Stoga su u pravilu prosječne realne brzine značajno manje.

2.1.2. Enhanced General Packet Radio Service (EGPRS)

EGPRS (engl. *Enhanced General Packet Radio Service*) u literaturi se još naziva EDGE (engl. *Enhanced Data rates for global evolution*). EDGE se izvorno smatrao evolucijskim korakom za GSM, akronim je stajao za enhanced data for GSM evolution, međutim TDMA zajednica je od tada prihvatila EDGE kao 2.75G rješenje, te EDGE sada stoji za enhanced data rates for global evolution. EDGE se smatra i kao migracijski korak prema 3G standardima poput UMTS-a (engl. *Universal Mobile Telecommunications System*) i kao

dodatna tehnologija koja će podržavati takve mreže u budućnosti. Jednako kao GPRS i EDGE koristi veliki dio temeljnog GSM sustava, uključujući i postojeći frekvencijski pojas [5].

2.1.2.1 EGPRS Arhitektura

EDGE uvodi devet novih kodno-modulacijskih shema preko zračnog sučelja. Četiri od tih kodnih shema koristi 8-PSK (engl. *Phase Shift Keying*) tehniku.

Tom novom 8-PSK modulacijom kreira se 3-bitni simbol za svaku promjenu u fazi nosioca što dovodi do toga da se brzina prijenosa na zračnom sučelju povećava samo promjenom modulacijske tehnike u odnosu na GPRS 3 puta [4].

Teoretski može se podržati korisnička brzina do 473 Kbit/s koristeći svih osam vremenskih odsječaka, ali da bi se iskoristile mogućnosti sistema, bazna stanica mora biti nadograđena. Mobilni uređaji također moraju biti sposobni za rad s EDGE zračnim sučeljem i signalima [6]. Kao i kod GPRS funkcionalnosti i za EDGE terminali ne podržavaju više od 5 istovremenih odsječaka, pa su realne brzine bliže vrijednostima 100 do 200 Kbit/s.

Za radijski kanal najlošije kvalitete (velika udaljenost od bazne stanice ili visoka interferencija) koristit će se MCS-1 shema, te će zbog toga brzina prijenosa biti najmanja. Sukladno tome za radijski kanal najbolje kvalitete koristit će se MCS-9 shema koja ujedno i definira maksimalnu brzinu podataka po jednom vremenskom odsjeku od 59.2 Kbit/s [4]. U Tablica 2.1 prikazane su kodno-modulacijske sheme, te odgovarajući tipovi modulacije i brzine prijenosa podataka.

Tablica 2.1 EDGE sheme [5]

Kodno-modulacijska shema	Tip modulacije	Brzina prijenosa podataka za 1 vremenski odsječak (Kbit/s)
MCS-1	GMSK	8.8
MCS-2	GMSK	11.2
MCS-3	GMSK	14.8
MCS-4	GMSK	17.6

MCS-5	8-PSK	22.4
MCS-6	8-PSK	29.6
MCS-7	8-PSK	44.8
MCS-8	8-PSK	54.4
MCS-9	8-PSK	59.2

Uz 12 postojećih multi-slot klasa terminala za GPRS, za EDGE je definirano novih 5 klasa, za koje se povećava maksimalan broj vremenskih odsjeka koje terminal može koristiti u silaznoj vezi, te maksimalan broj istodobno (silazna i uzlazna veza) aktivnih vremenskih odsjeka.

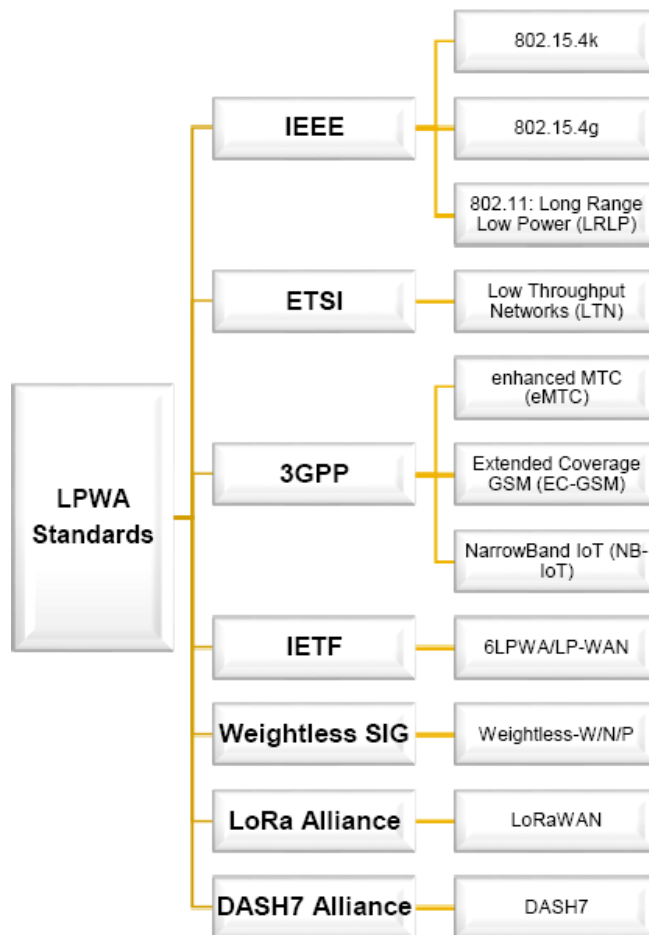
Neke prednosti EDGE tehnologije su:

- a) Nije potreban dodatan hardware, čime se izbacuje potreba za istraživanjem i razvojem novih sistema za rad, što dovodi do manjeg troška.
- b) Radi na postojećem frekvencijskom spektru od 800MHz, 1800MHz i 1900MHz.
- c) EDGE je isplativ za instalaciju na mrežu budući da zahtjeva malena poboljšanja na postojećoj mreži.
- d) Do tri puta veće brzine od GPRS tehnologije.

3. Bežični prijenos podataka sustavom Narrowband Internet of Things (NB-IoT)

3.1. Pregled komercijalnih Low Power Wide Area Network (LPWAN) tehnologija

IoT primjene imaju posebne zahtjeve poput dugog dometa, niske brzine prijenosa podataka, niske potrošnje energije i ekonomičnosti. Klasične i široko korištene tehnologije kratkog dometa: ZigBee, Bluetooth nisu prilagođene za scenarije koji zahtijevaju prijenos dugog dometa. Rješenja koja se temelje na celjskoj komunikaciji: 2G, 3G, 4G mogu pružiti veću pokrivenost ali ne ispunjavaju uvjet niske potrošnje baterije uređaja. Iz tog razloga su zahtjevi IoT aplikacija potaknuli nastanak nove bežične komunikacijske tehnologije: LPWAN (engl. *Low Power Wide Area Network*) [7]. Aktualne LPWAN tehnologije i standarde možemo vidjeti na Slika 3.1.



Slika 3.1 LPWA Standardi [7]

LPWA mreže predstavljaju novu komunikacijsku paradigmu koja će nadopuniti tradicionalne ćelijske i kratko dometne bežične tehnologije kako bi se uspješno odgovorilo na zahtjeve modernog doba. LPWA tehnologije nude jedinstvena svojstva poput širokopojasne povezivosti za uređaje male snage i niske brzine prijenosa.

Za razliku od 3G, 4G ili WiFi mreža, ovim sustavima nije glavni cilj omogućavanje visokih brzina prijenosa podataka po uređaju ili minimiziranje kašnjenja, umjesto toga, pokazatelji uspješnosti za LPWAN su energetska učinkovitost te sposobnost skaliranja i pokrivenost [9].

Vrijedno je pojasniti da LPWA tehnologije postižu dugi domet i malu snagu na štetu niske brzine podataka (obično veličine nekoliko desetaka kilobita u sekundi) i veće kašnjenje (obično veličine nekoliko sekundi do nekoliko minuta). Stoga je jasno da LPWA tehnologije nisu namijenjene za korištenje u svakom IoT slučaju. Specifično za LPWA tehnologije je da

se mogu koristiti za slučajevne uporabe koji su tolerantni na kašnjenje, ne trebaju visoke brzine podataka i obično zahtijevaju malu potrošnju energije, te niske troškova ugradnje.

LPWAN sve više dobiva na popularnosti u industrijskim i znanstvenim zajednicama zbog svoje niske snage, dugog dometa i jeftinih komunikacijskih karakteristika. Pruža komunikaciju na udaljenostima do 10-40 kilometara u ruralnim zonama i 1-5 kilometara u gradskim zonama. Pored toga, vrlo je energetski učinkovit pa baterijsko napajanje unutar nekog senzora može potrajati i više od 10 godina, Osim toga, niska je i cijena opreme. Primjerice trošak chipseta iznosi manje od 2 eura, a trošak upravljanja je tipično 1 euro po uređaju po godini [6], što je izuzetno važno kada znamo da u jednom pametnom gradu koji samo za potrebe daljinskog upravljanja parkirališnim kapacitetima može imati više tisuća instaliranih senzora.

Razne LPWAN tehnologije pojavile su se u licenciranom i nelicenciranom frekvencijskom području. Najpoznatije među njima su: Sigfox, LoRa i NB-IoT koje su danas vodeće tehnologije područja.

Sigfox tehnologija je razvijena u 2010. godini od strane francuske start-up kompanije Sigfox, koja je i kompanija i LPWAN mrežni operater. Sigfox je tvrtka koja osim vlastitih protokola ima i vlastitu mrežu. Protokoli tvrtke omogućuju komercijalnu upotrebu mreže koju gradi sama tvrtka.

Sigfox koristi svoje interno razvijene bazne stanice opremljene kognitivnim software-defined radio stanicama i povezuju ih s povratnim poslužiteljima pomoću IP mreže. Fizički sloj SigFoxa koristi DBIT/SK (engl. *Differential Binary Phase-shift Keying*) modulaciju za uplink, te GFSK (engl. *Gaussian Frequency-shift Keying*) modulaciju za downlink prijenosa podataka. Sigfox koristi nelicencirane pojaseve, primjerice 868 MHz u Europi, 915 MHz u SAD-u, te 433 MHz u Aziji. Upotrebom ultra uskog pojasa, Sigfox učinkovito i efikasno koristi frekvencijski pojas, a istovremeno zbog uskopojasnosti doživljava vrlo nisku razinu šuma, što omogućava vrlo nisku potrošnje energije, niske zahtjeve na osjetljivost prijemnika i relativno jeftin dizajna antene uz osiguravanje propusnosti do 100 bitova po sekundi [6].

LoRa Alliance je osnovana od strane kompanija koje se bave standardizacijom LPWAN-ova. LoRa je fizički sloj ili bežična modulacija koja se koristi za stvaranje velikog raspona komunikacijskog linka. Mnogi stariji bežični sustavi koriste FSK (engl. *Frequency Shifting*

keying) modulaciju kao fizički sloj jer je vrlo učinkovita modulacija za postizanje male snage. LoRa je bazirana na CSS (engl. *Chirp spread spectrum*) modulaciji, koja održava iste karakteristike kao i FSK modulacija, ali značajno povećava raspon komunikacija. CSS modulacija se već desetljećima koristi u vojnoj i svemirskoj komunikaciji zbog velikih udaljenosti koje se mogu postići, kao i visoke otpornosti na smetnje, ali LoRa je prva jeftinija implementacija tehnologije namijenjena širokoj primjeni. Prednosti LoRa je sposobnost velikog dometa tehnologije. Jedna bazna stanica može pokriti cijele gradove ili stotine kilometara kvadratnih [9].

LoRaWAN definira komunikacijski protokol i sistemsku arhitekturu mreže, dok LoRa fizički sloj omogućuje komunikacijsku vezu dugog dometa. Protokol i mrežna arhitektura imaju najviše utjecaja pri određivanju vijeka trajanja baterije čvora, kapacitet mreže, te kvalitetu usluge.

Fizički sloj LoRa protokola prenosi podatke putem nelicenciranih pojaseva. LoRa koristi frekvencijske pojaseve od 433MHz i 868MHz u Europi, 430MHz u Aziji i 915 MHz u Sjevernoj Americi. Prijenos radi na principu da se podatci šalju samo kada je medij za prijenos slobodan.

Glavne razlike Sigfox i LoRaWAN tehnologija prikazane su u Tablica 3.1.

Tablica 3.1 Tehnološke specifikacije LPWA tehnologija [7]

Tehnologija	Sigfox	LoRaWAN
Modulacija	DBIT/SK (uzlazno), GFSK (silazno)	CSS
Brzina prijenosa	100 bit/s (uzlazno), 600 bit/s (silazno)	0.3-37.5 kbit/s (LoRa), 50 kbit/s (FSK)
Range	10 km (urbano), 50 km (ruralno)	5 km (urbano), 15 km (ruralno)
Enkripcija	Enkripcija nije podržana	AES 128bit

3.2. Sustav NB-IoT

Sustav NB-IoT (engl. *Narrow Band Internet of Things*) je LPWAN ćelijska tehnologija koju je standardizirao 3GPP (engl. *Third Generation Partnership Project*) unutar verzije standarda 13. Glavni ciljevi koje NB-IoT ispunjava su smanjenje opterećenja na radijskom sučelju, veći domet, duže trajanje baterije, niska cijena uređaja, te podrška za velik broj uređaja (više od 50 000 po ćeliji). NB-IoT podržava i IP promet i non-IP prometa. Zbog svoje visoke latencije NB-IoT nije najbolja opcija za aplikacije koje ne trpe velika kašnjenja, a kako nije implementiran mehanizam handover-a (samo reselekcija u idle stanju) nisu pogodni za rješenja koja podrazumijevaju mobilne scenarije (nadzor vozila i plovila i slično).

NB-IoT je dizajniran za povezivanje velikog broja uređaja u domenama Interneta Stvari. Povezani uređaji trebaju moći komunicirati putem ćelijske infrastrukture. NB-IoT je LPWAN rješenje koje radi u licenciranim frekvencijskim pojasevima. Ne samo da 5G tehnologija poboljšava postojeću ćelijsku uporabu, nego ona i proširuje scenarije i slučajeve korištenja: pametne kuće, pametni gradovi, pametni prijevoz, pametni mreže, alati, brojlara, senzori, odjeća, autonomna vožnja, praćenje objekata, avijacija i robotika. Predviđa se će do 2025.godine. više od 5 milijardi uređaja biti spojeno putem NB-IoT mreža [11].

U nastavku su objašnjeni ciljevi i primjene NB-IoT sustava. NB-IoT uređaji su dizajnirani sa sljedećim ciljevima:

- a) Veliki broj niskopropusnih uređaja: Podrška za najmanje 52 457 povezanih uređaja unutar sektora. Ovaj cilj se temelji na korištenju 40 uređaja po kućanstvu s gustoćom kućanstava baziranom na pretpostavci za Londonsku gustoću kućanstava.
- b) Mala potrošnja energije: Omogućeno je IoT uređajima da troše niske razine struje (reda veličine nanoampera) kako bi se omogućilo da jedna baterija unutar senzorskog sklopa može trajati dulji niz godina (10 godina i više).
- c) Duži vijek trajanja baterije: Cilj je osigurati vijek trajanja baterije za 10 godina, za baterije kapaciteta 5 Wh (engl. Watt-hour).
- d) Poboljšana unutarnja i vanjska pokrivenost: Cilj je postići proširenu pokrivenost od 20 dB (decibel) u usporedbi s GPRS uređajima. Podržana je brzina od najmanje 160 bitova po sekundi uzlazno i silazno.
- e) Niska složenost: Cilj je pružiti ultra nisko složene uređaje koji podržavaju IoT namjene što rezultira nižim ukupnim troškovima.

- f) Latencija: Cilj je imati latenciju od 10 sekundi ili nižu za 99% uređaja.
- g) Niska cijena: Ciljani trošak je 5 USD po uređaju [10].

Mnogi NB-IoT scenariji korištenja će uključivati korištenje senzora. Senzori su u zadnjim godinama postali krajnji uređaji za NB-IoT mreže, skupljajući sve veći broj informacija. Ti NB-IoT uređaji će se koristiti kao senzori u sljedećim primjenama.

Primjeri korištenja NB-IoT uređaja kao senzora:

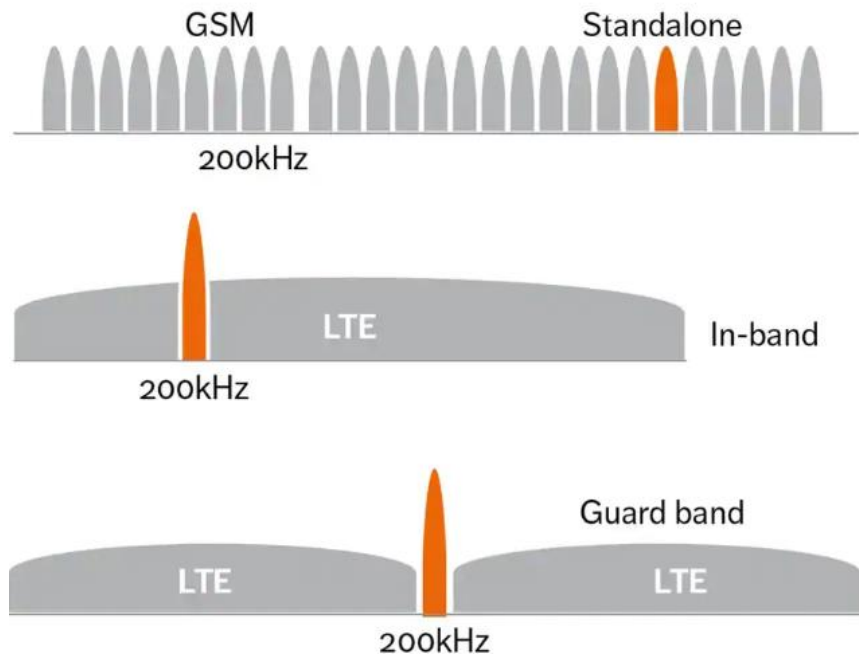
- a) Mjerenje potrošnje struje, vode i plinova.
- b) Mjerenje vremenskih uvjeta poput: temperature, vlažnosti, pritiska, jačine i smjera vjetra, te UV (engl. *Ultra-Violet*) indeksa.
- c) Mjerenje razine zagađenja živom, radioaktivne emisije.
- d) Mjerenje razine buke, peludi, prašine, kao i solarnih aktivnosti [10].

NB-IoT uređaji se mogu koristiti i kao aktuatori. Aktuatori se koriste za kontroliranje i upravljanje uređajima (semafori, kućanski aparati, razni industrijski strojevi).

Primjeri korištenja NB-IoT uređaja kao aktuatora :

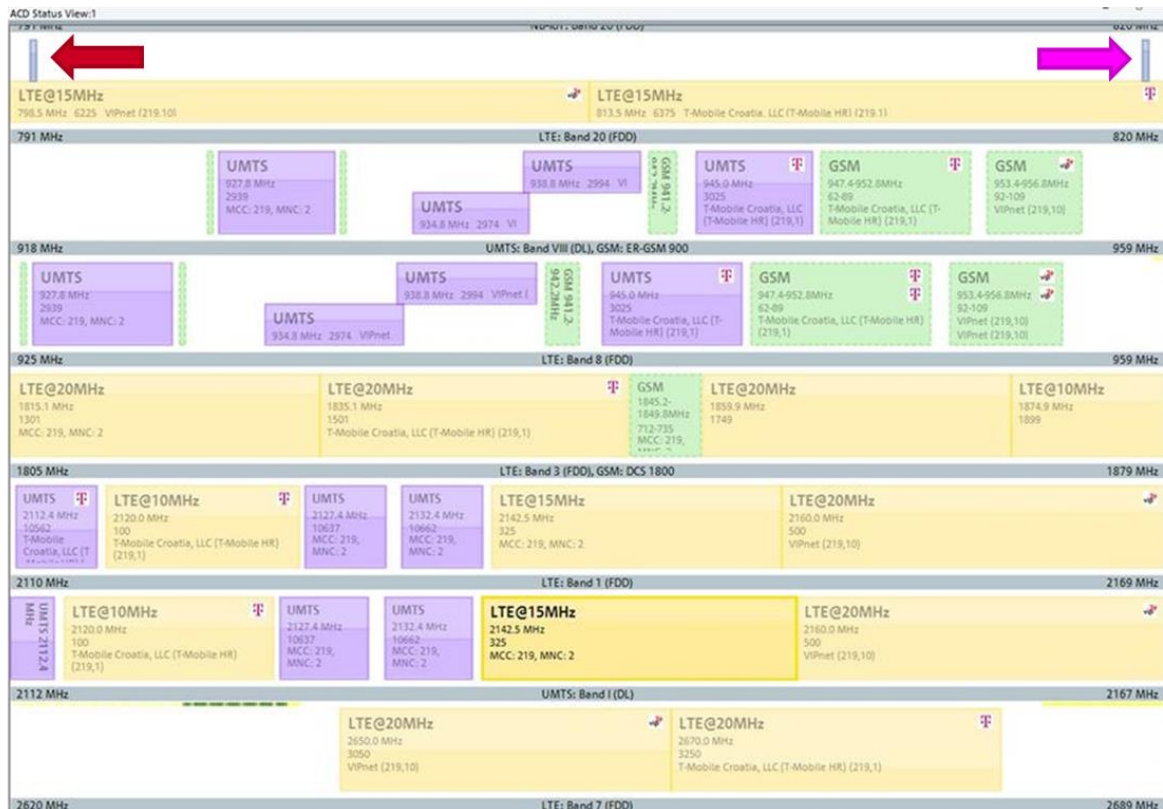
- a) Pametni gradovi: Nadgledanje svjetala na cestama, nadgledanje raskrižja, nadzor i kontrola infrastrukturnih mreža (struja, plin, kanalizacija), upravljanje sustavima javne sigurnosti, video nadzor ulica.
- b) Pametne kuće: Osvjetljenje, pametni uređaji, povezani TV uređaji, igraće konzole, audio sustavi, alarmni sustavi, te sustavi za nadzor dima, uređaji za nadzor djece i kućnih ljubimaca.
- c) Pametni prijevoz: Komunikacija između vozila, pješaka i biciklista radi dobivanja informacija o upozorenjima, sudarima i nesrećama, provođenje prometnih znakova, informacije o autobusima, vlakovima i podzemnom prijevozu [10].

Širina frekvencijskog pojasa kod NB-IoT-a je 200KHz što odgovara jednom resursnom bloku u GSM i LTE (engl. *Long Term Evolution*) prijenosu. NB-IoT podržava Samostalan rad, Rad u zaštitnom bandu i Unutarpojasni rad kao što je prikazano na Slika 3.2. Kod Scenarija samostalnog rada moguća je upotreba trenutno korištenih GSM frekvencijskih pojaseva. Kod scenarija rada u zaštitnom bandu koriste se neiskorišteni resursni blokovi unutar zaštitnog pojasa LTE nosioca. Scenarij unutarpojasnog rada koristi resursne blokove LTE nosioca [6].



Slika 3.2 Načini rada NB-IoT nosioca [11]

Kako bi se istražilo koji su od navedenih frekvencijskih NB-IoT scenarija mobilni operateri u Republici Hrvatskoj odabrali napravljeno je terensko mjerenje (Slika 3.3).



Slika 3.3 Frekvencijski načini rada koje koriste operateri

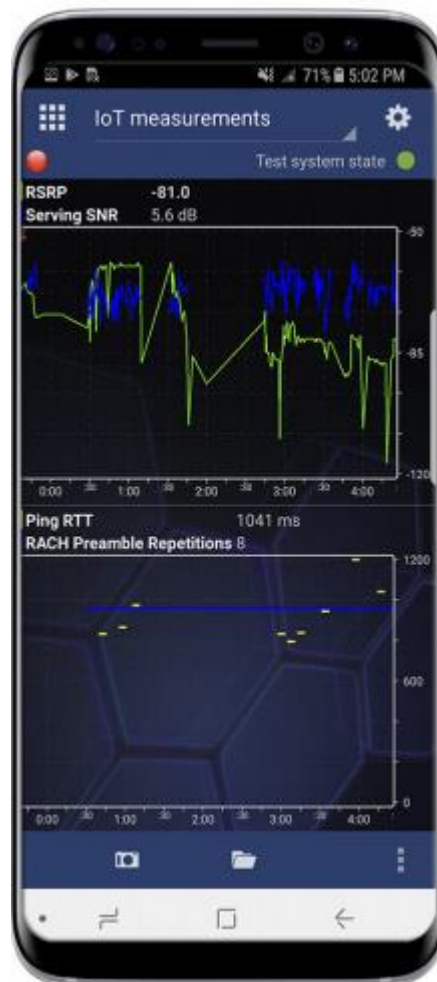
Mjerenje spektralnim analizatorom TSMW tvrtke Rohde&Schwarz uz korištenje aplikacije ROMES i funkcionalnosti ACD (engl. *Automatic Channel Detection*) napravljeno na širem području grada Zagreba. Iz mjerenja sa Slika 3.3 može se jasno vidjeti (označeno strelicama) kako su oba operatera Tmobile i A1 Hrvatska za NB-IoT odabrali način rada u zaštitnom pojasu (engl. *Guard band*). To je za mobilne operatere preferirani način rada jer jedino u tom slučaju korisniku podatkovnih usluga koje zahtijevaju veliku brzinu prijenosa mogu dodijeliti čitav frekvencijski pojas.

4. Opis mjerne metodologije

Mjerna oprema koju smo koristiti sastojala se se od :

1. Opreme za terenska mjerenja.
2. Opreme za analizu mjernih zapisa.

Od opreme za terenska mjerenja koristili smo NEMO Handy IoT aplikaciju (Slika 4.1) tvrtke Keysight technologies postavljenu na pametni telefon. Aplikacija se koristila za mjerenje NB-IoT mreže.



Slika 4.1 NEMO Handy IoT aplikacija [12]

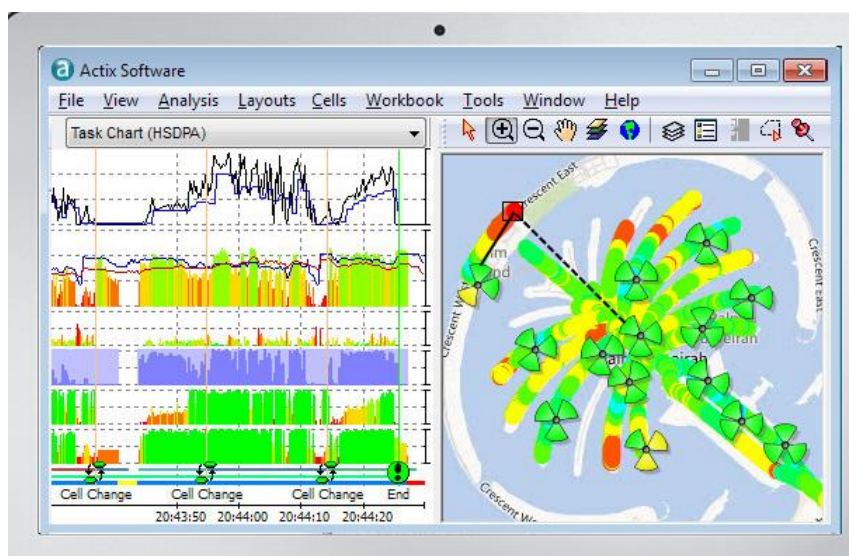
Također koristili smo i Rohde&Schwarz TSMW Universal Radio Network Analyzer (Slika 4.2) zajedno sa R&S ROMES4 aplikacijom.



Slika 4.2 Rohde&Schwarz TSMW skener i ROMES mjerna aplikacija [13]

Snažna platforma osigurava 2 osjetljiva 20 MHz sučelja za sve ulazne frekvencije od 30 MHz do 6 GHz. Koristit ćemo i aplikaciju TEMS Investigation koja se koristi za skupljanje podataka, real-time analizu i postprocessing podataka, aplikacija podržava mnoge tehnologije, neke od njih su: LTE, HSPA, GSM, GPRS, EGPRS. Na aplikaciju ćemo spojiti dva Quectel BG96 uređaja, jedan uređaj će mjeriti sustav NB-IoT, a drugi će mjeriti sustav GPRS. Quectel moduli su kompatibilni s drugim Quectel modulima, tako da je moguće korištenje NB-IoT modula, UMTS/HSPA modula, GSM/GPRS modula kao i drugih.

Za analizu mjernih zapisa koristili smo Actix Analyzer aplikaciju (Slika 4.3) za postprocessing napravljenih terenskih mjerenja.



Slika 4.3 Actix Analyzer aplikacija

5. Analiza mjerenja i mjernih rezultata

5.1. Mjerenje u mobilnom scenariju

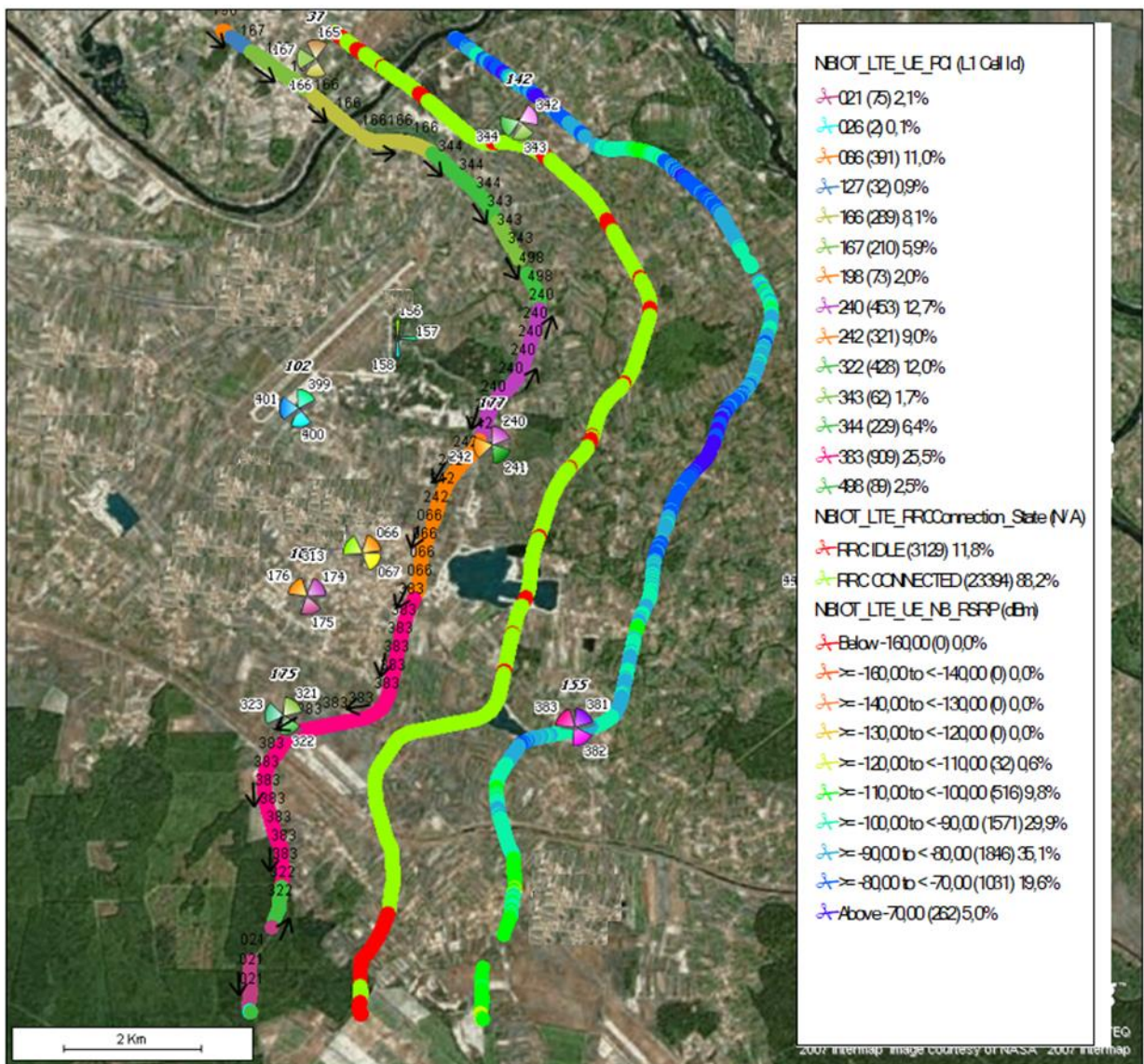
Napravljeno je mobility mjerenje kako bi utvrdili ponašanje NB-IoT terminala u pokretu (Slika 5.1). Lijeva ruta na Slika 5.1 prikazuje stvarnu rutu na kojoj je istaknut parametar PCI (engl. *Physical Cell Identity*). PCI nam daje identitet poslužujuće ćelije u svakom trenutku trajanja testiranja. Crne strelice pored te rute prikazuju smjer vožnje za vrijeme testiranja. Središnja ruta prikazuje parametar vRRC (engl. *Radio Resource Connection*) Connection State, koji nam daje informaciju je li terminal u stanju čekanja (engl. *Idle*) ili aktivan (engl. *Dedicated*). Središnja ruta ima offset u odnosu na stvarnu rutu za 500 metara u desno, radi bolje preglednosti. Desna ruta prikazuje parametar RSRP (engl. *Reference Signal Received Power*), koji nam daje informacije o razini signala, offset u odnosu na središnju, RRC Connection State rutu je dodatnih 500 metara u desno.

Na Slika 5.1 možemo vidjeti kako postoji reselekcija i ona se događa u stanju čekanja. U sustavu NB IoT ne postoji mehanizam *handover-a* (aktivan prijenos podataka kakav postoji u 2G (GPRS i EDGE), 3G i 4G sustavima) koji se događa u Aktivnom stanju. Isto tako preko središnje rute možemo vidjeti da terminal svako malo prelazi u stanje čekanja (crveni dijelovi rute) u kojima se dogodi reselekcija.

U mjerenju NB-IoT sustavom, u kojem nije implementiran mehanizam za handover (jer to i nije namjena tehnologije) za vrijeme aktivne veze, terminal ostaje na udaljenoj ćeliji iako prolazi pored nove ćelije u kojem bi uvjeti za tu vezu bili puno bolji. Na slici (Slika 5.1) se vidi da se zbog loših radijskih uvjeta ne završava Ping transmisija i terminal ostaje u Dedicated stanju, zbog čega se ne može dogoditi reselekcija. Zbog toga terminal prolazi ispod bazne stanice ID 0175 ali, iako su ćelije sa PCI 321 i 322 u tom trenu najjače, ne dolazi do reselekcije, što dovodi do rasta degradacije kvalitete signala (SINR).

Na temelju dobivenih rezultata jasno je vidljivo da NB-IoT sustav nije dobar za scenarije mobilnosti, budući da za razliku od GPRS (EDGE) sustava nema mehanizam handovera.

S druge strane kod sustava GPRS (EDGE), mobility radi jednako kao i za govornu uslugu jer postoji mehanizam handovera, te u slučaju aktivne veze, GPRS uređaj u pokretu prebacuje svoju aktivnu vezu s jedne ćelije na kojoj nam udaljavajući se od nje slabi razina signala (RxLev) na drugu ćeliju kojoj se približavamo.

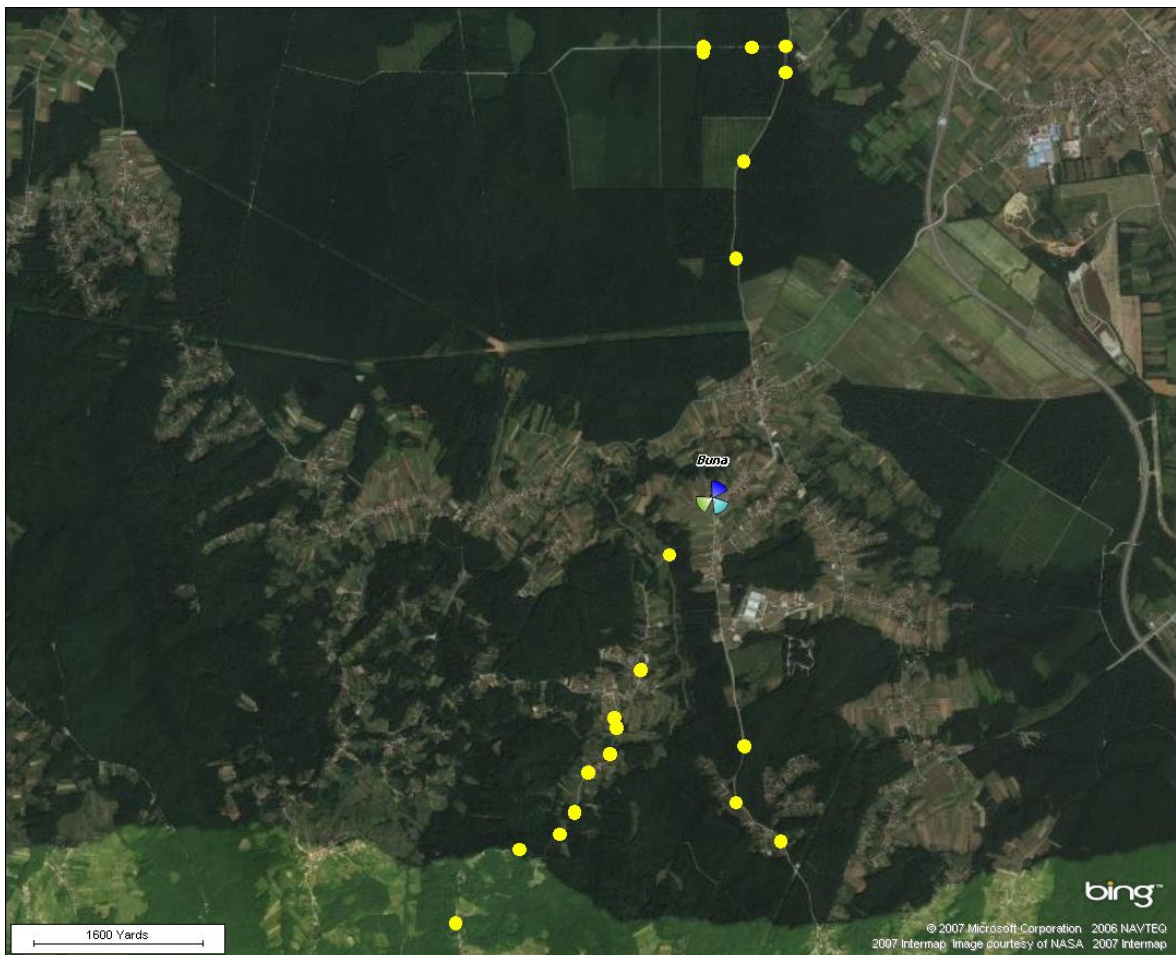


Slika 5.1 Mobility mjerenje NB-IoT terminala u pokretu

Iz ovog testiranja možemo zaključiti da sustav NB IoT ne može biti zamjena sustavu GPRS (EDGE) kada su primjenjene u aplikacijama koje podrazumijevaju *mobility* scenarije poput daljinskog nadzora vozila i plovila.

5.2. Mjerenje u stacionarnom scenariju

Stacionarno mjerenje je napravljeno u ruralnom području u okolici bazne stanice „Buna“, koja se nalazi u blizini grada Velika Gorica. Odabrano je dvadeset mjernih točaka prikazanih na Slika 5.2, a na svakoj od točaka je napravljeno mjerenje u trajanju od 2 minute.

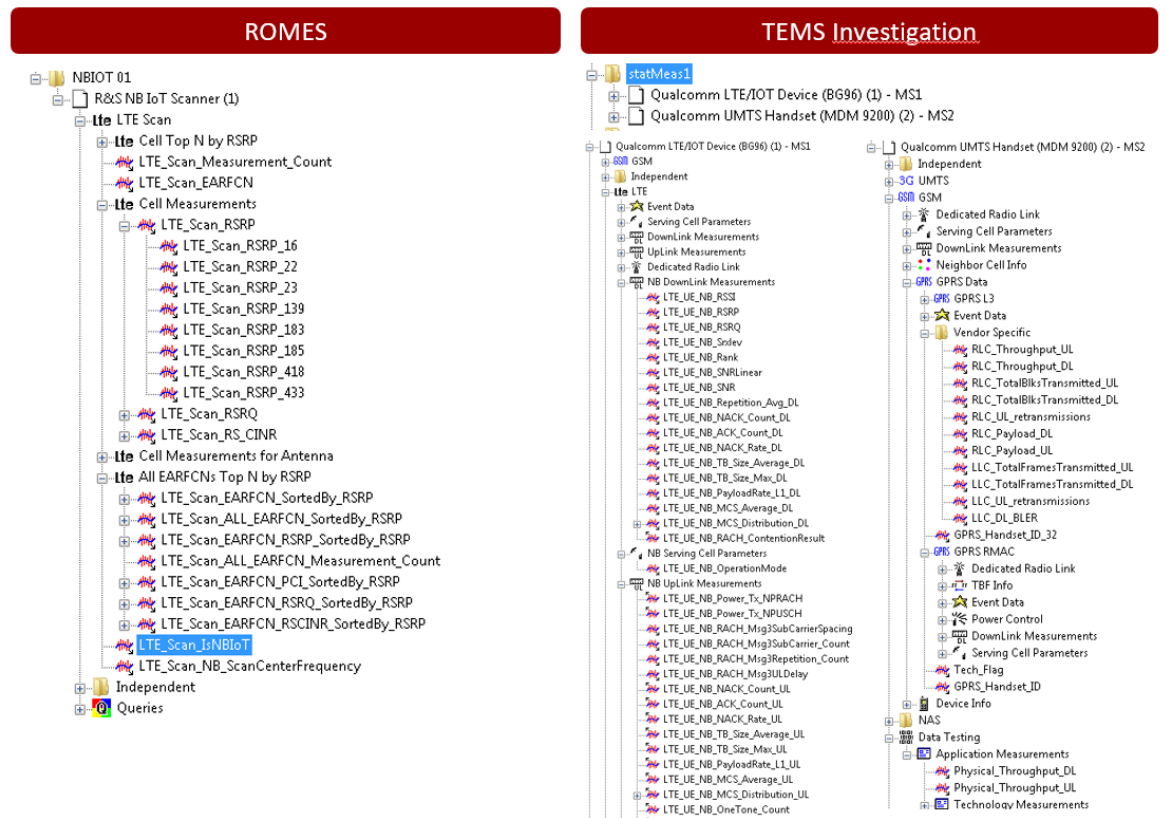


Slika 5.2 Mjerenje u stacionarnom scenariju

Mjerenje je napravljeno s dva paralelna sustava:

- Aplikacija ROMES s TSMW skenerom (vanjska GPS antena i prijemna antena)
- Aplikacija TEMS Investigation sa spojena dva paralelno spojena Quectel modula, jedan u NB-IoT načinu rada, a drugi u GPRS načinu rada.

Korištenjem ta dva mjerna sustava, dobiven je mjerni zapis s nizom radijskih atributa potrebnih kako bi se napravila analiza performansi na radijskom sučelju. Neki od važnijih dostupnih atributa prikazani su na Slika 5.3.

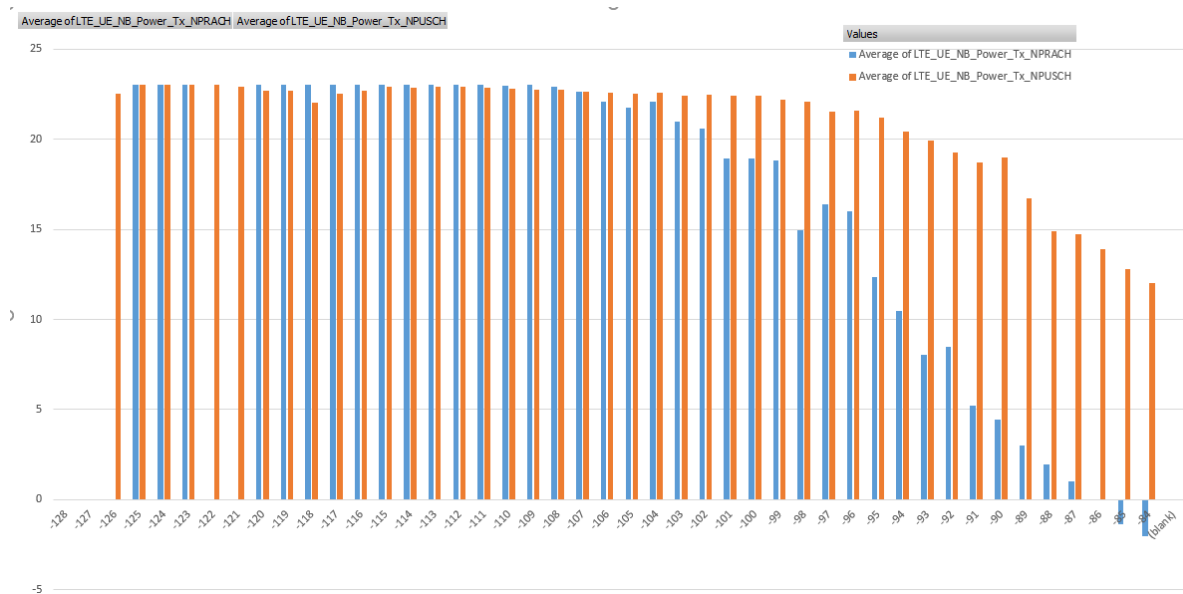


Slika 5.3 Rezultati mjerenja u stacionarnom scenariju

5.3. Analiza rezultata stacionarnog mjerenja

Mjerenje je napravljeno na rubovima ćelija, u rubnim radijskim uvjetima. Servis koji se koristio za testiranje je ping. Na laptopu je bila postavljena TEMS Investigation aplikacija, jedan QUectel modul je bio mjerio sustav GPRS, a drugi sustav NB-IoT. Dvadeset mejrnih točaka je bilo odabrano tako da dobijemo rub ćelije, tj. napravljeno je na mjestima gdje je QUectel ostao bez GPRS mreže, a u tim točkama je onda napravljeno dvominutno testiranje za sustav NB-IoT. Na svih je dvadeset točaka NB IoT mjerenje je bilo uspješno, tj. ping paketi su uspješno poslani.

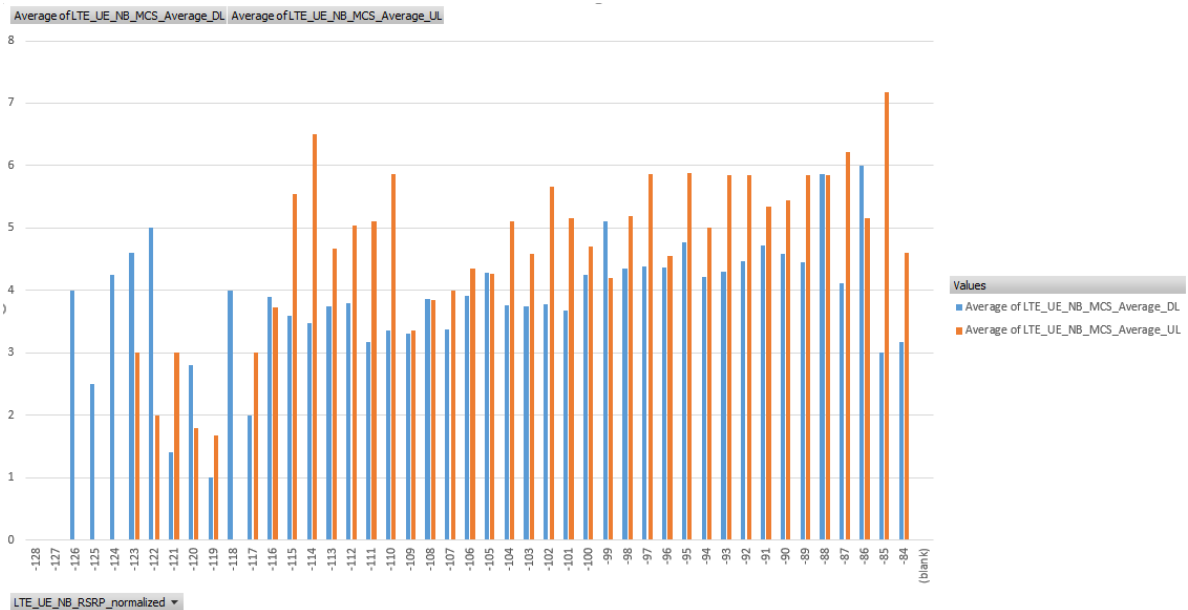
Na Slika 5.4 možemo vidjeti usporedbu parametra razinu signala RSRP (engl. *Reference Signals Received Power*) te parametra izlazne snage mobilne stanice Nb_PWR_TX, odnosno zanima nas s kolikom je snagom bilo odašiljano u odnosu na razinu prijemnog signala.. Znamo da se GPRS uređaji moraju spojiti do -104 dBm, što je vrijednost definirana standardom. Sa grafa sa slike vidimo da je NB IoT modul bilježio prijemnu razinu signala do -126 dBm. Nadalje, vidimo da do RSRP -100 dBm radi kontrola snage, neprestano rastući do vrijednosti Nb_PWR_TX 23 dBm, što je maksimalna dozvoljena snaga. Zaključujemo da u lošim radijskim uvjetima (RSRP < -100 dBm= NB IoT modul i dalje ispravno radi, radi i do razina -126 dBm, ali pritom troši jako puno energije, što dovodi u pitanje dugovječnost baterijskog napajanja NB IoT modula instaliranog na takvom mjestu. NPRACH stoji za (engl. *Narrowband Physical Random Access Channel*), dok NPUSCH stoji za dijeljeni kanal (engl. *Narrowband Physical Uplink Shared Channel*).



Slika 5.4 RSRP vs Tx Power

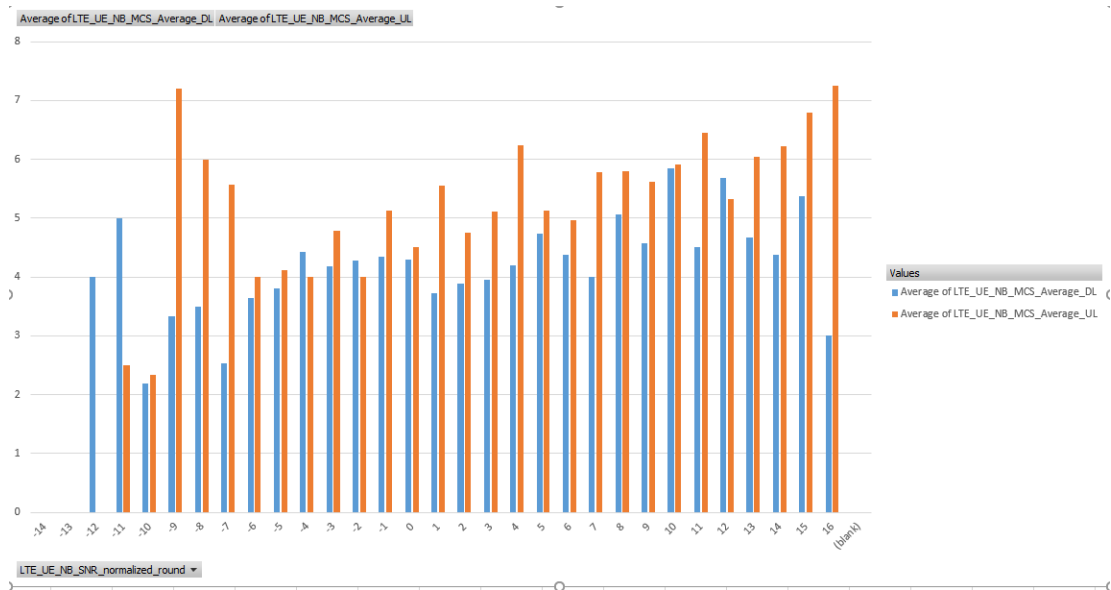
Na Slika 5.5 možemo vidjeti korelaciju Modulacijsko kodne sheme (engl. MCS – *Modulation Coding Scheme*) i razine signala RSRP. Imamo ukupno devet modulacijskih shema označenih brojevima od 0 do 8 na y osi, te jednako kao i na prethodnoj slici razinu signala na x osi. Plavom bojom je označena modulacija na silaznoj vezi (engl. DL - *Downlink*), dok je narančastom bojom označena modulacija na uzlaznoj vezi (engl. UP - *Uplink*).

Uplink). Očekivalo se da u dobrim radnim uvjetima ostvarujemo modulacije višeg reda, a u lošim radnim uvjetima niže modulacije. Može se nadalje vidjeti da za uzlaznu vezu sustav radi dobro, no za silaznu vezu sustav ne funkcionira dobro, što možemo pripisati tome da su pločice s kojima je rađeno mjerenje u trenutku mjerenja bile prototipovi, te da će se s vremenom kako se tehnologija bude razvijala i taj aspekt poboljšati.



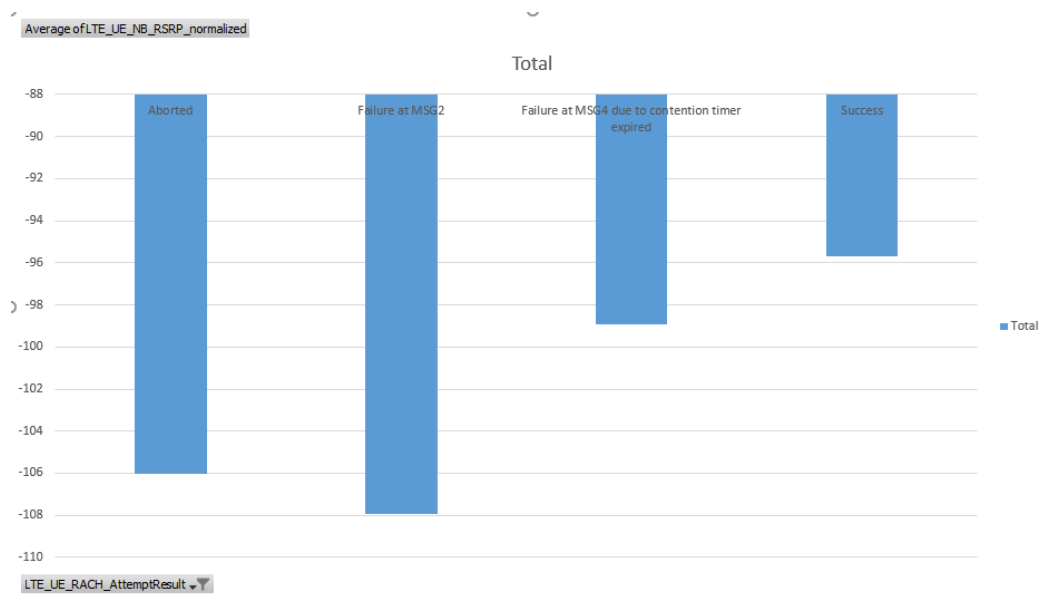
Slika 5.5 RSRP vs MCS

Na Slika 5.6 prikazana je korelacija između pokazatelja kvalitete signala (engl. SNR – *Signal to Noise Ratio*) i modulacijsko kodne sheme (engl. MCS). Na x osi se nalazi pokazatelj kvalitete signala, a na y osi se nalaze modulacijsko kodne sheme. Dobar signal to noise ratio je od 10 na dalje. Radi se o rubnim uvjetima, od 16 do -12, što je blizu praga šuma. Iz ovih podataka ne možemo vidjeti da mehanizam funkcionira.



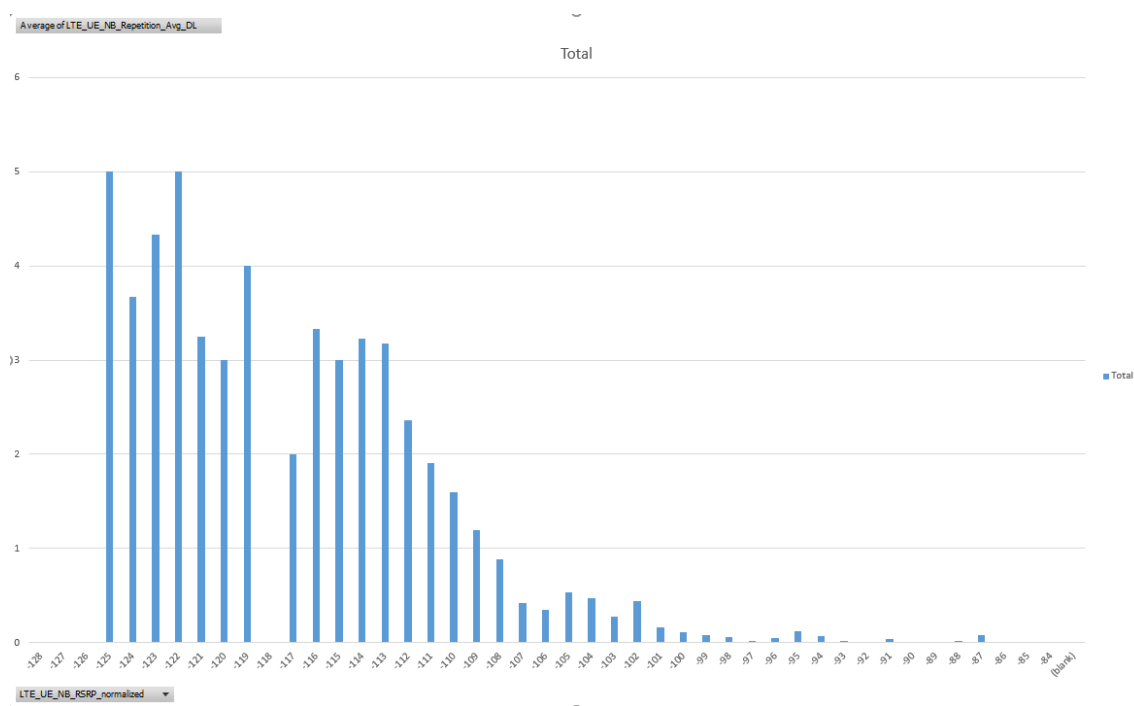
Slika 5.6 SNR vs MCS

Na Slika 5.7 možemo vidjeti odnos između razloga neuspjeha (engl. *Failure reason*) kada nam nije prošao ping i razine signala (RSRP). Može se vidjeti da postoje 4 opcije, prestanak (engl. *aborted*), neuspjeh na poruci 2 (MSG2), neuspjeh na poruci 4 zbog isteklog (engl. *Contention timer*), i uspjeh (engl. *Success*). Možemo vidjeti da do razine signala od -96 dBm nema nikakvih problema, konekcija signala prolazi bez ikakvih problema. Nakon RSRP -96 dBm signalizacija na RACH (engl. *Random Access Channel*) ponekad bilježi greške.



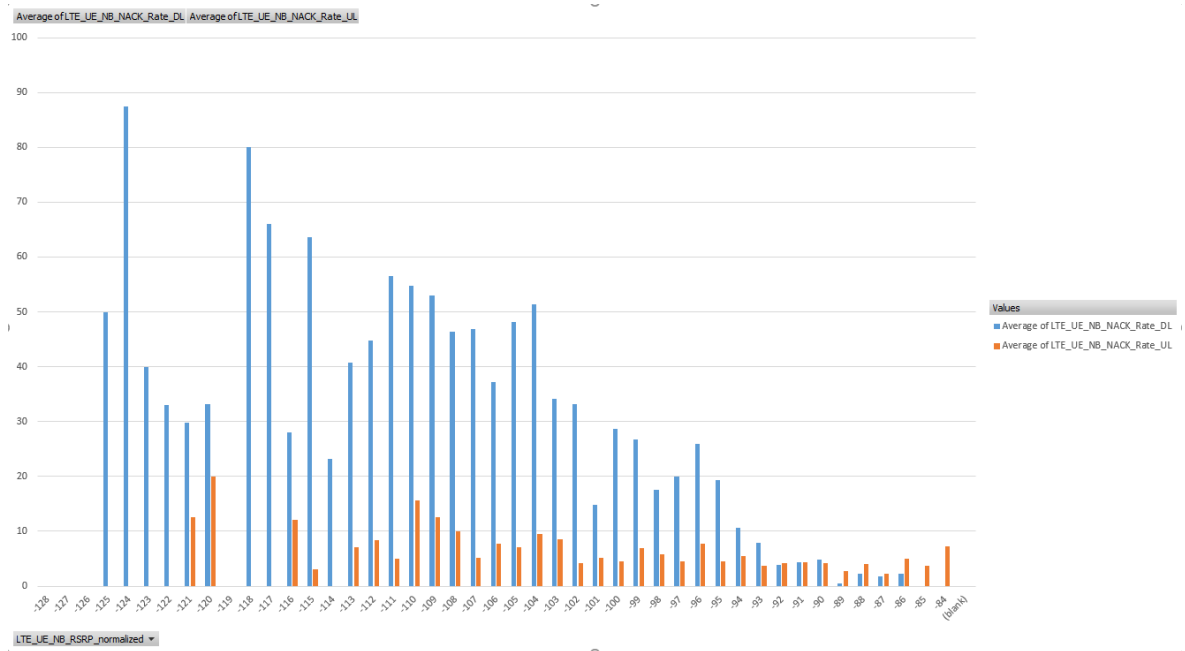
Slika 5.7 RSRP vs Failure reason

Na Slika 5.8 može se vidjeti korelaciju između razine signala RSRP i broja ponavljanja (engl. *Repetition*), odnosno koliko je puta bilo pokušano spajanje na sustav. Plavom bojom je označen broj pokušaja spajanja na sustav. Krajnji broj pokušaja je 5 zato što se nakon prvog neuspješnog pokušaja spajanja uređaj pokušava spojiti još 4 puta, a nakon toga ide u prestanak (engl. *Abort*).



Slika 5.8 RSRP vs Repetition

Na Slika 5.9 se vidi odnos između razine signala RSRP i silazne i uzlazne veze za NACK (engl. *Non-Acknowledgement*). Vidimo da uzlazna veza (engl. *Uplink*) koja je označena narančastom bojom prolazi bolje na radijskim uvjetima, dok je silazna veza (engl. *Downlink*) „usko grlo“, te nas limitira, budući da je osjetljiviji nego uzlazna veza.



Slika 5.9 RSRP vs NACK DL i UL

Zaključak

NB-IoT je nova tehnologija koja služi za bežično povezivanje uređaja a pritom trošeći minimalnu snagu. NB-IoT podržava velik broj konekcija na velikom području.

Iz napravljenih mjerenja možemo zaključiti kako sustav NB-IoT ne može zamijeniti sustav GPRS (EDGE) u scenarijima koji zahtijevaju mobilnost, kao što su nadzor vozila, nadzor plovila, ili nadziranje bilo čega što je u pokretu budući da tehnologija nema mehanizam handovera (prekapčanje veze s jedne ćelije na drugu u vrijeme aktivne veze). Iz izvršenih mjerenja vidimo da sustav NB-IoT radi daleko ispod granice -104dBm koja predstavlja prag osjetljivosti za GPRS module. Zabilježili smo na sustavu NB IoT mjerne zapise za parametar RSRP sve do -126 dBm. Međutim, treba napomenuti da u području -110 dB, do -126 dBm, u jako lošim radijskim uvjetima NB IoT modul radi s maksimalnom snagom, a bilježimo i povećani broj grešaka na signalizacijskom kanalu. To dovodi do toga da predviđeni vijek trajanja baterije unutar NB IoT modula od 10 godina nije niti blizu, a u prvim testnim implementacijama pokazalo se da se radi o samo nekoliko mjeseci.

Zaključili smo i da mehanizmi adaptivne modulacije u testiranom NB IoT modulu ne rade dobro, no pretpostavljamo da će se s vremenom sigurno promijeniti budući da smo mi na raspolaganju imali prve prototipove uređaja, koji u vrijeme izrade rada nisu bili hardverski potpuno optimizirani.

Popis kratica

2G	<i>2nd Generation</i>
3G	<i>3rd Generation</i>
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
4G	<i>4th Generation</i>
ACD	<i>Automatic Channel Detection</i>
CS	<i>Circuit Switching</i>
CSS	<i>Chirp spread spectrum</i>
DBIT/SK	<i>Differential Binary Phase-shift Keying</i>
EDGE	<i>Enhanced Data rates for Global Evolution</i>
EGPRS	<i>Enhanced General Packet Radio Service</i>
FSK	<i>Frequency Shifting keying</i>
GFSK	<i>Gaussian Frequency-shift Keying</i>
GMSK	<i>Gaussian Minimum-Shift Keying</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
IOT	<i>Internet of Things</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
LPWA	<i>Low Power Wide Area</i>
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Network</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MCS	<i>Modulation Coding Scheme</i>
MMS	<i>Multimedia Messaging Service</i>
NB-IoT	<i>Narrow Band - Internet of Things</i>
PCI	<i>Physical Cell Identity</i>

RRC	<i>Radio Resource Connection</i>
RSRP	<i>Reference Signals Received Power</i>
SMS	<i>Short Message Service</i>
TDMA	<i>Time-division multiple access</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
Wh	<i>Watt-hour</i>

Popis slika

Slika 3.1 LPWA Standardi [7].....	8
Slika 3.2 Načini rada NB-IoT nosioca [11].....	13
Slika 3.3 Frekvencijski načini rada koje koriste operateri.....	13
Slika 4.1 NEMO Handy IoT aplikacija [12]	15
Slika 4.2 Rohde&Schwarz TSMW skener i ROMES mjerna aplikacija [13].....	16
Slika 4.3 Actix Analyzer aplikacija.....	16
Slika 5.1 Mobility mjerenje NB-IoT terminala u pokretu	18
Slika 5.2 Mjerenje u stacionarnom scenariju.....	19
Slika 5.3 Rezultati mjerenja u stacionarnom scenariju.....	20
Slika 5.4 RSRP vs Tx Power	21
Slika 5.5 RSRP vs MCS	22
Slika 5.6 SNR vs MCS	23
Slika 5.7 RSRP vs Failure reason.....	23
Slika 5.8 RSRP vs Repetition.....	24
Slika 5.9 RSRP vs NACK DL i UL	25

Popis tablica

Tablica 2.1 EDGE sheme [5].....	5
Tablica 3.1 Tehnološke specifikacije LPWA tehnologija [7]	10

Literatura

- [1] Pratima M, Shaveta T, Chakresh K, Performance Analysis of GPRS/EDGE, Research India Publications, 2010, 2 stranice [online], citirano 2020-2-7, dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/310442287_Performance_Analysis_of_GPRSEEDGE
- [2] Bates R, GPRS (General Packet Radio Service), McGraw-Hill Professional, 2001.
- [3] Sanders G, Thorens L, Reisky M, Rulik O, Deylitz S, GPRS Networks, Wiley, 2003.
- [4] Teković A, Bežične računalne mreže Priručnik, Algebra d.o.o, 2010.
- [5] Bannister J, Mather P, Coope S, Convergence Technologies for 3G Networks (IP, UMTS, EGPRS and ATM), Wiley, 2004.
- [6] KAIS M, EDDY B, FREDERIC C, FERNAND M, A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment, *ScienceDirect*, prosinac 2017, 7 stranica [online], citirano 2020-2-7, dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/322018958_A_comparative_study_of_LPWAN_technologies_for_large-scale_IoT_deployment
- [7] Raza U, Kulkarni P, Sooriybandra M, Low Power Wide Area Networks: An Overview, IEEE, siječanj 2017, 19 stranica [online], citirano 2020-2-7, dostupno na: <https://arxiv.org/pdf/1606.07360.pdf>
- [8] YONGHUA S, JIN L, MING T, SHUFENG D, An Internet of Energy Things Based on WIRELESS LPWAN, *Elsevier*, 1. kolovoz 2017, 7 stranica [online], citirano 2020-2-7, dostupno na: <https://www.engineering.org.cn/EN/10.1016/J.ENG.2017.04.011>
- [9] LoRaTM Alliance, A technical overview of LoRaWAN and LoRa, LoRa Alliance, (05. siječnja 2020.), 20 stranica [online], citirano 2020-2-7, dostupno na: <https://loralliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf>
- [10] Hossam F, 5G LTE Narrowband Internet of Things (NB-IoT), CRC Press, Listopad 2018.
- [11] Landström S, Bergström J, Westerberg E, Hammarwall D, NB-IoT: a sustainable technology for connecting billions of devices (Volume 93), Ericsson (ožujak 2016.), 12 stranica [online], citirano 2020-2-7, dostupno na: <https://www.ericsson.com/49ead5/assets/local/reports-papers/ericsson-technology-review/docs/2016/etr-narrowband-iot.pdf>
- [12] Nemo Handy IoT In-Depth Measurements and Troubleshooting of the IoT Network, Keysight Technologies, (26.lipnja 2018.), 2 stranice [online], dostupno na: <https://dmtel.ru/files/Nemo-Handy-IoT.pdf>
- [13] R&S TSMW and R&S RFMF Universal Radio Network Analyzers User Manual, 82 stranice [online], dostupno na: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_manuals/gb_1/t/tsmw_1/TSMW_UserManual_en_08.pdf