

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Infotehnoloogia teaduskond

Arseni Bogoljubov 164816IALB

NB-IoT võrgu leviala hindamine

Bakalaureusetöö

Juhendaja: Marika Kulmar

Tehnikateaduste
magister

Kaasjuhendaja: Muhammad Mahtab
Alam

Tallinn 2019

Autorideklaratsioon

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Arseni Bogoljubov

20.05.2019

Lõputöö ülesande püstitus

Lõputöö ülesandeks on mõõta ja hinnata tegelik kitsaribalise asjade interneti võrgu leviala (signaali tugevuste alusel) erinevates mõõtepunktides, eelkõige siseruumides ja maa alustel korrustel. Saadud info põhjal analüüsime leviala ning toome välja kõige rohkem signaali levimist takistavad asjaolud.

Lisaks sellele, võrdleme saadud asjade interneti võrgu signaali tugevusi traditsiooniline LTE (4G) signaali tugevustega (RSSI). LTE võrgu mõõtmised on plaanis teha samades mõõtepunktides. Huvi pakub just LTE võrk, kuna LTE ja NB-IoT võrgud töötavad mõlemad ühel sagedusel - 800 MHz, kuid kasutavad erinevat ribalaiust ja võimendust saatja poolt.

NB-IoT mõõtmiste läbiviimisel saadame anduri abil tühja andmepaketi ning salvestame võrgu parameetreid signaali tugevuse määramiseks serverisse. LTE võrgu leviala määramiseks kasutame ruuteriga SIM-kaarti ning lukustame 800 MHz peale. Andmed paneme kirja käsitsi.

Annotatsioon

Käesoleva töö eesmärk on mõõta ja hinnata tegelik NB-IoT võrgu leviala (signaali tugevuste alusel) erinevates kohtades, nii siseruumides kui ka väljaspool. Levi mõõtmiste jaoks on kasutatud võrgumoodul ja SIM-kaart, mille abil saame NB-IoT võrguga ühendust. Valmistatud skeemi abil saadame tühja andmepaketi ning vaatame võrgu parameetreid signaali tugevuse määramiseks.

NB-IoT võrgu arendamise tulemusena saab mobiilset leviala, eriti siseruumides, suurel määral laiendada. NB-IoT võrku kasutatakse andurite jaoks, mis edastavad väikseid andmeid paar korda päevas. Andurid ei vaja pidevat ühendust, vaid nad loovad andmeside sessiooni ainult andmete saatmise nõudmisel. Tavaliselt asuvad andurid keldris või maa-aluses parklas, kus tavalised 2G, 3G ja 4G võrgud pole levialaga kaetud. NB-IoT-võrku kasutatakse suurte pindade katmiseks ja siseruumides läbi seinte tungimiseks. Väidetavalt on NB-IoT-võrgus saatjal suurem võimendus (+6dB) ning see tagab vastuvõtja poolt andmeside kasutamise ka kriitilise tugevuse all.

Lisaks sellele, oli tehtud ka mõõtmised LTE võrgus 800 MHz sageduse peal. Tulemuste analüüsimise käigus tõestasime, et NB-IoT võrk signaali tugevuse järgi on igas mõõtepunktis vähemalt 6,02 dB võrra suurem.

Käesoleva töö teevad võimalikuks mitmed tehnoloogiad, mis on viimase kolme aasta jooksul jõudsalt arenenud. NB-IoT võrku kasutavad tänapäeval juba kõik Eesti operaatorid.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab 27 lehekülge teksti, 4 peatükki, 22 joonist ja 2 tabelit.

Abstract

This Bachelor's thesis is based on evaluation of Narrowband IoT network coverage and analysis. With theoretical part it gives an overview of the need and characteristics of NB-IoT network and what this network is used for. The theoretical basis also gives an overview of alternatives for NB-IoT network.

NB-IoT network is used for sensors that send small amount of data few times a day. Sensors do not need constant connection so they only connect on demand from sending data. Usually sensors are located in the basement or underground parking where standard 2G, 3G and 4G networks do not have any coverage. NB-IoT network is used to cover large area and to penetrate through indoor walls. It is said that NB-IoT network has more gain (+6dB) and can work under critical signal strength.

The outcome of this thesis is to check whether NB-IoT network signal strength is better compared to LTE network. Both networks work on 800 MHz frequency.

The thesis is in Estonian language and contains 27 pages of text, 4 chapters, 22 figures, 2 tables.

Lühendite ja mõistete sõnastik

2G	<i>Second generation mobile standard</i> , Teise põlvkonna mobiilside standard
3G	<i>Third generation mobile standard</i> , Kolmanda põlvkonna mobiilside standard
3GPP	<i>Third generation partnership Project</i> , Mobiilside tehnoloogia standardeid arendavate organisatsioonide liit
4G	<i>Fourth generation mobile standard</i> , Neljanda põlvkonna mobiilside standard
CellID	<i>Cell identification code</i> , Tugijaama tunnuscode
eDRX	<i>Extended idle mode</i> , Laiendatud ooterežiim
eNB	<i>Evolved NodeBs</i> , Arenenud tugijaam (LTE)
eSIM	<i>Embedded Subscriber Identification Module</i> , Sisseehitatud kasutaja tuvastusmoodul
E-UTRA	<i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access</i> , Arenenud universaalne raadio juurdepääsuvõrk
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i> , Sagedusjaotusega dupleksimine
GPS	<i>Global Positioning System</i> , Satelliitnavigatsiooni süsteem
GSMA	<i>Global System for Mobile Association</i> , Operaatoreid ja seadmetootjaid ühendav organisatsioon
IoT	<i>Internet of Things</i> , Asjade internet
IP	<i>Internet Protocol</i> , Interneti protokoll
LTE	<i>Long-Term Evolution</i> , Neljanda põlvkonna mobiilside standard
MAC	<i>Media Access Control</i> , Meedia juurdepääsu kontroll
MCL	<i>Maximum Coupling Loss</i> , Maksimaalne lubatud signaalikadu
MNC	<i>Mobile network code</i> , Mobiilvõrgu operaatorikood
NB-IoT	<i>Narrowband Internet of Things</i> , Kitsaribaline asjade internet
OFDM	<i>Orthogonal frequency-division multiplexing</i> , Ortogonaalne sagedusjaotuse multipleksimine
P2P	<i>Peer-to-peer</i> , Partnervõrk või võrdõigusvõrk
PRB	<i>Physical resource block</i> , Füüsiliste ressursside plokk
PSD	<i>Power spectrum density</i> , Võimsusspektri tihedus
PSM	<i>Power Saving Mode</i> , Energiasäästurežiim
QoS	<i>Quality of Service</i> , Teenuse kvaliteet
RAN	<i>Radio Access Network</i> , Raadio juurdepääsuvõrk
RDCP	<i>Packet Data Convergence Protocol</i> , Pakettandmeside lähenemise protokoll
RLC	<i>Radio Link Control</i> , Raadioühenduse juhtimine
RRC	<i>Radio Resource Control</i> , Raadioressursi juhtkiht

RSSI	<i>Received signal strength indicator</i> , Vastuvõetud signaali tugevuse indikaator
SC-FDMA	<i>Single-Carrier Frequency-division multiple access</i> , Üksikkandjaga sagedusjaotusliku ühispöördusega süsteem
SIM	<i>Subscriber Identification Module</i> , Abonendi identifitseerimismoodul
SNR	<i>Signal-to-noise ratio</i> , Signaal-müra suhe
TDD	<i>Time Division Duplex</i> , Ajajaotusega dupleksimine
Wi-Fi	<i>IEEE 802.11 standard based wireless access network</i> , IEEE 802.11 standarditel põhinev traadita juurdepääsuvõrk

Sisukord

1 Sissejuhatus.....	11
1.1 NB-IoT (asjade interneti) kasutuselevõtmise vajadus.....	12
1.2 Töö struktuur.....	13
2 NB-IoT võrgu struktuur.....	14
2.1 E-UTRA.....	14
2.2 NB-IoT.....	15
2.3 NB-IoT seadmete säästurežiimid.....	16
2.4 NB-IoT sagedusressurssi eraldamine.....	16
2.5 NB-IoT võrgu leviala.....	18
2.6 LTE-M.....	21
3 Mõõtmised.....	24
3.1 NB-IoT võrgu mõõtmiste läbiviimise ettevalmistus.....	24
3.2 Mõõtmiste läbiviimine.....	25
3.3 Katsetulemuste analüüs.....	28
3.4 Katsetulemuste võrdlemine LTE võrguga.....	33
4 Kokkuvõte.....	38
Summary.....	40
Kasutatud kirjandus.....	42

Jooniste loetelu

Joonis 1. Stand-alone sagedusressurssi eraldamise näide [5]	17
Joonis 2. In-Band sagedusressurssi eraldamise näide [5]	17
Joonis 3. Guard-Band sagedusressurssi eraldamise näide [5]	18
Joonis 4. Band 20 ehk LTE 800MHz kiirustesti tulemus	19
Joonis 5. NB-IoT ja LTE FDD võimsuse spektraaltiheduse sõltuvus ribalaiusest [12]	20
Joonis 6. BG96 raadiomoodul tootja veebilehelt	24
Joonis 7. Sensorite ja tugijaama asukoht kantud kaardile (Google Maps).	25
Joonis 8. Sensori 17 (Ehitajate tee 23A) SNR ja RSSI graafikud.	26
Joonis 9. Sensori 8 (Akadeemia tee 44) SNR ja RSSI graafikud.	27
Joonis 10. Sensori 7 (Vilde tee 129) SNR ja RSSI graafikud.....	27
Joonis 11. Sensori 12 (Akadeemia tee 30) SNR ja RSSI graafikud.	28
Joonis 12. Sensori 15 (Akadeemia tee 20) SNR ja RSSI graafikud.	28
Joonis 13. Mõõtepunkti kaugus tugijaamast ning signaali RSSI ja SNR väärtused.....	29
Joonis 14. Sensori 7 (Vilde tee 129) hoone väljast.....	30
Joonis 15. Mõõtepunkti kaugus (meetrites) tugijaamast ning NB-IoT signaali RSSI väärtuste graafik.	31
Joonis 16. BG96 mikrokiip koos NB-IoT SIM kaardiga ja juhtplaat	32
Joonis 17. Ruuteri Huawei B315 veebiliides koos vajaliku informatsiooniga	33
Joonis 18. Mõõtepunkti kaugus tugijaamast ning signaali RSSI ja kiirustesti tulemused.....	34
Joonis 19. Mõõtepunkti kaugus (meetrites) tugijaamast ning LTE signaali RSSI väärtuste graafik.	35
Joonis 20. Signaali tugevuse ja tugijaama ID võrdlemine läbi ruuteri veebilehe.....	36
Joonis 21. Mobiilioperaatoril kasutatavad tugijaamad meie uuringualal [14].....	36
Joonis 22. LTE ja NB-IoT RSSI väärtuste võrdlemine	37

Tabelite loetelu

Tabel 1. LTE ja NB-IoT võrkude signaali tugevuste võrdlemine [4][12]	20
Tabel 2. LTE-M ja NB-IoT võrguparameetrite võrdlus [11] [15]	22

1 Sissejuhatus

Teaduse ja tehnoloogia pideva arendamise ja edasiarendamise tagajärjel vajab ühiskond laiemaid tehnoloogilisi lahendusi ja võimalusi. Tehniliselt on võimalik tagada kvaliteetset mobiilside teenust igal pool, kuid majanduslikult ei ole see otstarbekas ega kuluefektiivne. Antud töös vaatleme andmeside võimalust raadioetri kaudu anduritele, sensoritele ja teistele seadmetele, mis saadavad andmeid harva, väikeses mahus ja vajavad energiasäästu (kaua kestvat akut).

Selleks, et tagada stabiilset ühendust maa või vee all, paksude seintega ruumides, maa-alustes parklates, keldrites, tunnelites jne on kasutusele võetud NB-IoT (*Narrowband Internet of Things*) ehk IoT lühend omab eesti keeles mitu tõlget – nutistu, asjade internet, esemevõrk ja värvvõrk. *Narrowband* tähendab eesti keelde tõlgituna kitsaribaline. Kitsaribaline asjade interneti võrk annab meile võimaluse kasutada mitmesuguseid süsteeme, mis lihtsustavad meie elu ja säästavad meie aega. NB-IoT võrgu idee seisneb selles, et ta kasutab madalaid sagedusi ning andmeedastuseks kitsast sagedusriba, tagades raadiosides tugevama levi ka suurtel vahemaadel. NB-IoT ning tavalise mobiilsidevõrgu (2G, 3G ja 4G) kasutamiseks on vajalik aktiivne SIM-kaart.

Näitena võib välja tuua näiteks süsteemi, mis tuvastab liikumise sissetungide korral ja võimaldab käivitada helisignaali, et hirmutada sissetungijaid ja hoiatada naabreid ning loomulikult teavitada ka omaniku. Andureid, mis kasutavad asjade interneti võrku on väga palju ning iga andur vajab stabiilset internetiühendust seal, kus muu (2G, 3G ja 4G) andmeside ei levi.

Käesolev bakalaureusetöö kirjeldab tegeliku NB-IoT võrgu leviala (signaali tugevuste alusel) erinevates kohtades, nii siseruumides kui ka väljaspool. Mõõtmiste abil saab täiendada kaarti, mis hakkab näitama NB-IoT signaali tugevust sõltuvalt sensori asukohast ning tugijaama sektori suunast. Anduri abil saadame tühja andmepaketi ning vaatame võrgu parameetreid signaali tugevuse määramiseks. Signaali parameetrid on omakorda kantud kaardile

1.1 NB-IoT (asjade interneti) kasutuselevõtmise vajadus

Asjade interneti võrk tähendab peamiselt seda, et kõik SIM-kaardi toega seadmed võivad olla internetti ühendatud. Need võivad olla nii gaasi- ja veemõõturid, biosensordid ja näiteks temperatuuri ja õhuniiskuse andurid. Täna peamised mobiilsidevõrgu standardid 2G, 3G ja 4G (LTE) võimaldavad asjade internetti juba aastaid, kuid milleks on vajalik eraldi NB-IoT võrk.

Eelnevalt oli mainitud, et NB-IoT võrk töötab madalatel sagedustel, mis võimaldavad kasutada võrku kohtades, kus peamised mobiilsidevõrgud ei levi või on nõrgad. Kuna Eestis on palju probleeme siseleviga, siis väikeste andmepakettide edastamiseks sensorite abil NB-IoT võrk on suurepärase lahendus. NB-IoT võrku kasutatavad seadmed on väga väikese energiatarbega ning töötavad akumulaatori abil, mida tuleb laadida umbes iga 10 aasta tagant. Antud omadus võimaldab teha seadmetest täisautomaatseid lahendusi, kus inimeste poolt on vajalik ainult esmane paigaldus ja seadistamine. Lisaks eelnevalt toodud põhjustele asjade interneti võrk võimaldab korraga teenindada ühe tugijaama alt kuni 10 000 seadet.

NB-IoT võrk töötab madalal sagedusel ehk väikese läbilaskevõimega. Antud omadus ühelt poolt teeb võrgu leviala oluliselt tugevamaks ja suuremaks ning teiselt poolt läbilaskevõimet väga väikseks. NB-IoT võrk ei ole mõeldud suurte failide/andmete üles- ega allalaadimiseks ja samuti P2P- (kasutajalt kasutajale, ingl *peer-to-peer*) kasutamiseks, seega ei sobi näiteks videokaameratesse või teistesse suurte mahu edastamiseks mõeldud seadmetesse.

Kuna enamus mobiilside seadmetest on füüsilise SIM-kaardi toega ning NB-IoT seadmete arv kasvab iga päevaga, siis GSMA tuli välja eSIM lahendusega, mis võimaldab integreerida SIM-kaardi funktsionaalsuse elektroonikasse. Füüsilisest kaardist loobumine säästab loodust ja raha. Tulevikus kõik kasutatavad sensorid lähevad üle eSIM lahendusele, kuna füüsiline SIM-kaart võtab sensoris välja palju ruumi. Ainus Eesti teenusepakkuja, kes pakub klientidele eSIM võimaluse on Telia Eesti AS.

1.2 Töö struktuur

Esimeses lõputöö peatükis oli ülevaade tehtavast tööst - mida täpsemalt uurima hakkame, miks NB-IoT võrk on vajalik ning millised seadmed seda kasutavad. Lisaks kirjeldasime ka eSIM kasutuselevõtmise vajadust sensorites, mis kasutavad mobiilsidevõrku andmepakettide saatmiseks.

Järgnevas kahes peatükis keskendutakse NB-IoT teenuste teoreetilistele alustele. Antud peatükides kirjeldatakse lähemalt NB-IoT olemust ja võimekust, sageduste jaotumist ning maksimaalseid allalingi ja üleslingi kiirusi. Lisaks, võrdleme NB-IoT võrgu parameetrid peamiste mobiilsidevõrgu standardidega (2G, 3G ja 4G). Peatüki lõpus selgitatakse olukorda, kuidas saavad NB-IoT võrku kasutatavad sensorid tagada stabiilset ühendust paksude seintega ruumides või maa all. Samuti toome välja, mis võiks olla keskmine NB-IoT tugijaama võrgu raadius kilomeetrites (linnas ja maal) ning kuidas arvutatakse signaali tugevust.

Järgnevates peatükkides tegeleme NB-IoT võrgu testimise ja leviala hindamisega. Leviala hindamine hakkab toimuma tühja andmepaketti saatmisel, mille käigus mõõdame võrgu signaali tugevuse (RSSI - received signal strength indicator) kindlas asukohas. Kõik andmed on salvestatud tabelisse koos GPS koordinaatidega. Leviala hindamise testi tulemusena saab valmis kaart, kuhu on peale kantud tugijaama sektorid (antennid) koos nende suundadega ning leviala hindamise käigus saadud tulemused (kantud värvidena). Kuna testid toimuvad nii väljas kui ka sees siis katsetuste põhjal saab valmis kaks TTÜ NB-IoT leviala kaarti.

Kõik läbiviidud testid on tehtud ühe mobiilioperaatori SIM-kaardiga ning ühe tugijaama küljes, kuid erinevate sektoritega. Kuna leviala sõltub tugijaama asukohast siis teiste operaatorite SIM-kaardiga on võimalik saada teistsugune tulemus. Töös kasutatud ettevõttesisesed materjalid on lisatud muudetud kujul. Tööst on samuti eemaldatud info, mis viitaks ühele konkreetsele operaatorile.

Bakalaureusetöö kirjutamiseks ja testide läbiviimiseks on peamiste allikatena kasutatud Perry Lea poolt kirjutatud raamatut "*Internet of Things for Architects*". Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

2 NB-IoT võrgu struktuur

Antud peatükis kirjeldatakse lähemalt NB-IoT võrku ja selle põhjaliku ehitust.

2.1 E-UTRA

E-UTRA (*Evolved Universal Terrestrial Radio Access*) on raadiosidevõrk (RAN), mis on mõeldud UMTS ja HSDPA / HSUPA tehnoloogiate asendamiseks. E-UTRA on välja tulnud 3GPP (*3rd Partnership Project*) Rel-5-s ehk viiendas väljaandes ning pakub suuremaid andmeedastuskiirusi, madalamat latentsust ja optimeerib pakettandmeside. E-UTRA protokollid jagunevad kahte rühma: juhtimise tasand (vastutab transpordikanali haldamise eest) ja kasutajatasand (vastutab kasutajaandmete edastamise eest). [9]

EUTRAN koosneb võrgu poolt ainult tugijaamadest (eNodeB). eNodeB tugijaam täidab erinevaid ülesandeid, mis olid eelnevalt UTRANis (HSPA, UMTS) täidetud raadiovõrgu kontrolleri (RNC) poolt. Süsteemi lihtsustamine andis võimaluse vähendada lõppkasutajal latentsust ja kiirust. [9]

EUTRAN protokoll koosneb:

- **Füüsiline kiht** - Antud alamkihis sisaldub kogu teave MAC-transpordikanalite kohta. Alamkiht tegeleb võimsuse juhtimise, vabade plokkide otsimisega ja mõõtmistega RRC kihi jaoks.
- **MAC (*Media Access Control*)** - pakub RLC alamkihile loogilisi kanaleid, mida ta multipleksib füüsilise kihi transpordikanaliteks. Lisaks antud alamkiht tegeleb ka veakorrektsiooniga.
- **RLC (*Radio link control*)** - Alamkiht tegeleb RDCP andmepakettide transportimisega. Lisaks tegeleb veakorrektsiooni, andmepakettide segmenteerimise ja koondamisega ning duplikaatide tuvastamisega.
- **RDCP (*Packet Data Convergence Protocol*)** - Alamkiht tegeleb RRC-kihi edastatavate andmete jaoks krüpteerimist ja kaitset.

- **RRC (*Radio Resource Control*)** - Lisaks teistele alamkihtidele tegeleb tuumikvõrgu ja kasutajaseadme vahel informatsiooni edastamisega, turvavõtmete haldamisega ja QoS (*Quality of Service*) jne. [9] [10]

2.2 NB-IoT

NB-IoT (*Narrow Band Internet of Things*) on mobiilside LPWAN (*Low Power Wide Area Network*) standard, mis on mõeldud eelkõige seadmete jaoks, mis edastavad vähe andmemahu, kuid vajavad stabiilset ühendust võrguga. NB-IoT võrku tutvustas 3GPP (*3rd Partnership Project*) ning aastal 2015 alustati esimeste katsetustega Euroopas, mis olid läbi viidud mobiilside firma Vodafone poolt. Aastal 2016 oli valmis NB-IoT tehnoloogial põhinev võrk.

Selle võrgu põhimõttel on võimalik efektiivselt kasutada mobiilside teenust, kuna NB-IoT võrgu eelisteks on:

- suur võrgu maht (kümneid kuni sadu tuhandeid ühendatud seadmeid tugijaama kohta)
- odavad NB-IoT võrguseadmed
- optimeeritud modulatsioon signaali vastuvõtmiseks
- väike vastuvõtja energiatarve [5]

NB-IoT võrk kasutab signaali vastuvõtmiseks ortogonaalset sagedusjaotusega multipleksimist OFDM (*Orthogonal frequency-division multiplexing*) ning signaali saatmiseks ühe kandjaga sagedusjaotusega multipleksimist SC-FDMA (*Single-carrier Frequency Division Multiple Access*). Sisuliselt kasutab NB-IoT võrk sama sagedust LTE-ga, kuid piirab läbilaskevõimet väikese ribalaiusega. Lisaks sellele, on NB-IoT võrk võimeline töötama kõrge müratasemega. [5]

Võrreldes NB-IoT võrku LTE (4G) võrguga tuleb samuti mainida seda, et NB-IoT puhul ei ole vastuvõtja seadmel võimalik hõivata kogu saadaval olevat raadioressurssi ehk ülejäänud raadioressurssi saab tugijaam kasutada teiste seadmetega suhtlemiseks.

2.3 NB-IoT seadmete säästurežiimid

NB-IoT võrk on tuntud energiasäästlikuse poole pealt. Tegelikult asjade interneti seadmetel on kaks režiimi: *Power Saving Mode* (PSM) ja *Extended idle mode* (eDRX). [6] [7]

PSM-i puhul lülitab seade ennast välja, kuid jääb mobiilivõrku registreerituna. Maksimaalne teoreetiline aeg PSM režiimis on 413 päeva ja 8 tundi, kuid enne välja lülitamist küsib seade võrgu käest, millised on taimerite väärtused, mida tohib kasutada. Kui seade on PSM režiimis, pole ta võrgu poolt kättesaadav. Seadmel on võimalik iga hetk PSM režiimist väljuda, kui tekib vajadus andmete saatmiseks. [6] [7]

Teine võimalik energiasäästlikkuse režiim on eDRX, mis tegelikult tähendab katkendliku vastuvõtmist (*Discontinuous Receiving*). Antud meetod on mobiilsides tuntud, ning energiasäästlikkuse idee seisneb selles, et seadme ja võrgu vahel luuakse andmetee iga kindla perioodi tagant ning suurema osa ajast on andmetee kinni. Võrk on sellest teadlik, ning saadab andmeid ainult "õigetel ajahetkedel". eDRX režiimi on võimalik kasutada samaaegselt PSM režiimiga. [6] [7]

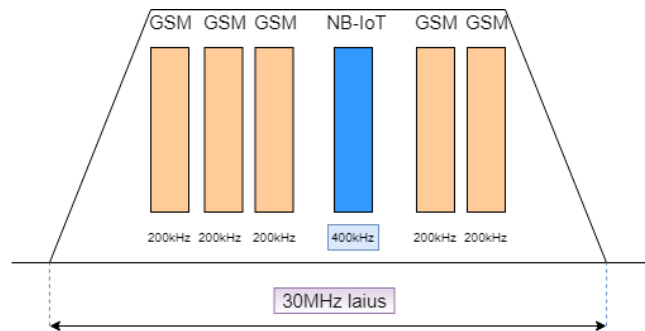
2.4 NB-IoT sagedusressurssi eraldamine

NB-IoT võrgu jaoks on võimalik kasutada erinevaid sagedusi: sh B20 (800MHz), B8 (900MHz), B3 (1800MHz). Suuremaid sagedusi ei ole mõistlik kasutada signaali suure sumbuvuse tõttu. [5]

NB-IoT sagedusressurssi eraldamiseks on kolm võimalust:

1. *Stand-alone*

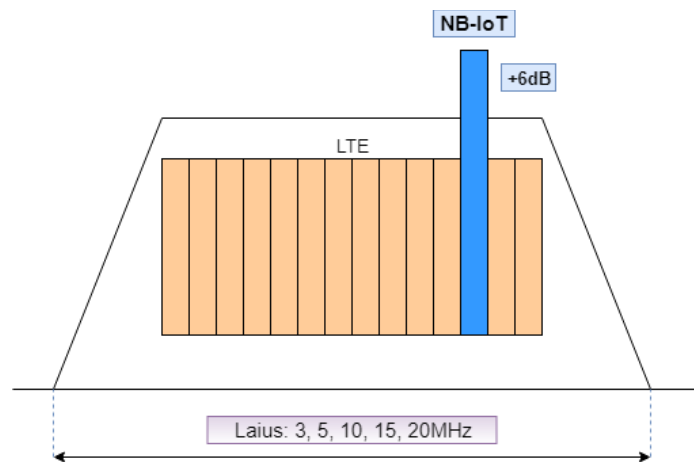
Kasutades *Stand-alone* põhimõtet sagedusressurssi eraldamisel, eraldatakse kanal ainult NB-IoT võrgu jaoks suurusega 200kHz, mis mobiilsides on väga hindamisväärne. NB-IoT jaoks sagedusvahemiku eraldamine viib erinevate võrkude vahel interferentsi peaaegu nulli.[5]



Joonis 1. Stand-alone sagedusressurssi eraldamise näide [5]

2. *In-Band*

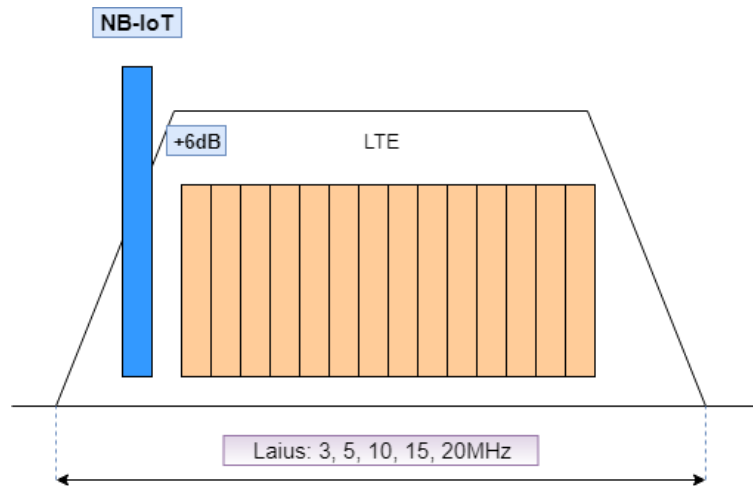
In-Band põhimõtet kasutades, eraldatakse ressursi LTE kandja sees, kuid NB-IoT kandjal on suurendatud võimsus +6dB võrreldes LTE plokkidega. Antud võimalus säästab raha ja ressursi, kuid tekib interferents LTE ja NB-IoT võrkude vahel. [5]



Joonis 2. In-Band sagedusressurssi eraldamise näide [5]

3. *Guard-Band*

OFDM-is kasutatakse kaitseintervalli selleks, et parandada ortogonaalsust signaalide eraldamiseks. *Guard-Bandi* puhul asub NB-IoT võrk kaitseriba sees. See on sagedusriba, mis jäetakse kasutamata, et kaitsta kõrval olevat sagedusriba teisel pool kõrval olevas sagedusribas tekkivate häirete eest. Antud olukorras NB-IoT kandjal on suurendatud võimsus +6-9 dB võrreldes LTE plokkidega. [5]



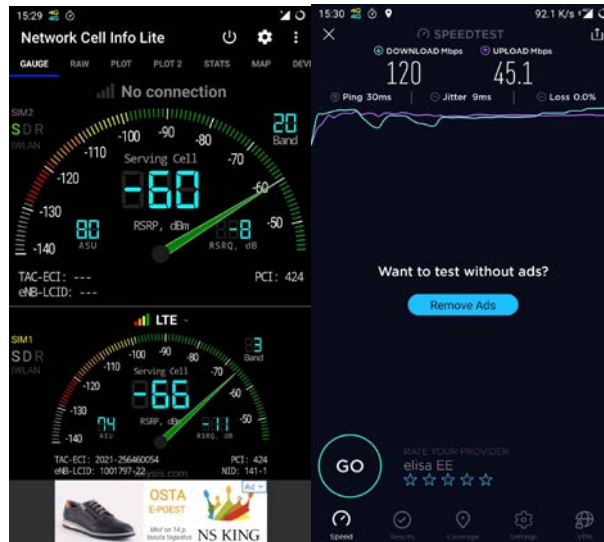
Joonis 3. Guard-Band sagedusressurssi eraldamise näide [5]

2.5 NB-IoT võrgu leviala

Eesti mobiilsideoperaatorid kasutavad järgmisi töösagedusi erinevate mobiilsidetehnoloogiate puhul:

- GSM (2G) – 900 MHz, 1800 MHz
- UMTS (3G) – 900 MHz, 2100 MHz
- LTE (4G) – 800 MHz, 1800 MHz, 2600 MHz

Kuid mille poolest erineb siis tavaline LTE 800MHz võrk NB-IoT 800 MHz võrgust? Töö käigus tehtud katsetuste järgi, tavalise LTE 800MHz võrguga on võimalik saavutada kuni 100 Mbit/s allalingi kiirust ja kuni 50 Mbit/s üleslingi kiirust, kuid maksimaalne kiirus NB-IoT võrgus on ~375Kbps, mis on umbes 266 korda väiksem. Kust tuleb see erinevus?



Joonis 4. Band 20 ehk LTE 800MHz kiirustesti tulemus

Erinevus seisneb tegelikult selles, et NB-IoT võrk on loodud pakkuma laiemat võrgu leviala võrreldes traditsiooniliste UMTS või LTE võrkudega, kasutades ribalaiust, mis on kõigest 180 kHz võrreldes andmesideks kasutatava 30 MHz-ga. Näiteks tavalise LTE 800MHz puhul on ribalaius ligikaudselt võrdne 30 MHz (erinevate sageduste puhul on ribalaius samuti erinev), mis on eelpoolt mainituga ligikaudselt 166 võrra suurem. [1]

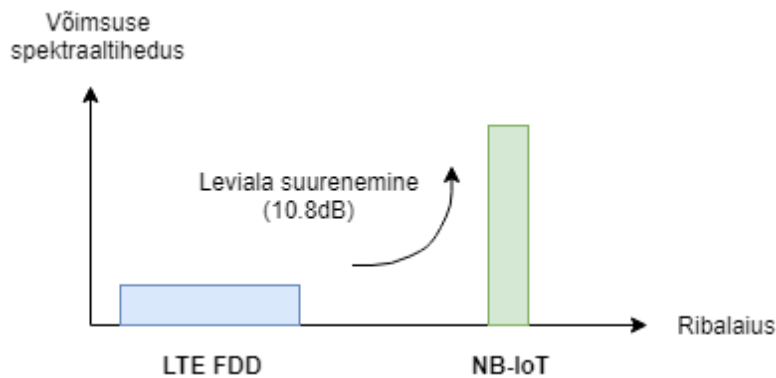
Võrreldes tavapärase LTE (4G) pakub NB-IoT võrk lisaks täiendavat +20 dB võimendust, mis tähendab seda, et vastuvõetav signaal võib olla 20 dB võrra nõrgem NB-IoT korral, et andmeedastus oleks võimalik. Antud omadus võimaldab suurendada tugijaama leviala umbes kümnekordselt võrreldes tavalise tugijaama katvusega ning annab võimaluse ühel tugijaama sektoril katta suuremat maatükki. [1]

3GPP standardi organisatsioon toob välja, et GSM ja LTE puhul MCL (*Maximum Coupling Loss*) on minimaalseks signaali väärtuseks -144 dBm, kuid NB-IoT puhul on sama väärtus -164 dBm. Ehk antud andmete järgi võib öelda, et NB-IoT võrgul on 20dB täiendavat võimendust. Võimendus koosneb võrgu spektraaltihenduse võimsusest ning taasedastamise võimsusest. NB-IoT võrk on kohaldatav äärmuslike levitingimuste puhul, kus vastuvõtja signaali-müra suhte (SNR) nõuded on väga madalad. Sellises olukorras ei saa tavaline ühekordne edastamine täita demoduleerimisnõudeid ning tuleb tavalise andmeedastuse ja vastuvõtu saavutamiseks teha mitmeid andmete saatmisi vastavalt tehnoloogia nõudmistele ja olukorrale. [12]

Tabel 1. LTE ja NB-IoT võrkude signaali tugevuste võrdlemine [4][12]

NB-IoT	LTE	Signaali tugevus
> -60 dBm	> -65 dBm	Suurepärane
-60 dBm kuni -90 dBm	-65 dBm kuni -85 dBm	Hea
-90 dBm kuni -125 dBm	-85 dBm kuni -110 dBm	Rahuldav
-125 dBm kuni -164 dBm	-110 dBm kuni -144 dBm	Kehv
< -164 dBm	< -144 dBm	Andmeside pole võimalik

NB-IoT võrk pakub paremat katvust kui LTE FDD, suurendades kordus saatmisi ehk saadakse parem katvus sama paketi korduv saatmisega. Võrreldes tavapäraste mobiilsidesüsteemidega NB-IoT võrk korrigeerib signaali tugevuse alusel pakettide korduv saatmise arvu ning vajadusel suurendab seda, tagades efektiivse ja stabiilse ühenduse tugijaama ja vastuvõtja vahel. Iga kord, kui taasedastuste arv kahekordistub, vähendatakse ribalaiust poole võrra ja samal ajal lisatakse 3dB võimendust. Kõik see on võimalik tänu sellele, et edastatakse väga väikest andmemahtu. [12]



Joonis 5. NB-IoT ja LTE FDD võimsuse spektraaltiheduse sõltuvus ribalaiusest [12]

Eelnevalt mainitud omaduste põhjal võib öelda, et NB-IoT võrk on väga madala andmeedastuskiirusega, madala hinnaga ning on mõeldud seadmete jaoks, mis aeg-ajalt saadavad väikseid andmepakette.

NB-IoT võrgu ehitamise eeliseks on see, et ei pea võrgu jaoks midagi füüsiliselt ehitama. Võrgu “ehitamiseks” on vaja igas saatjas ehk tugijaama sektoris eraldada kanal väga väikese ribalaiusega. Väikese investeeringu põhjuseks on see, et NB-IoT töötab juba valmisoleval LTE

800 MHz platvormil, millel peab eraldi kanali looma. Just see võimaldab mobiilsidevõrgu operaatoritel NB-IoT tehnoloogiat kasutada ilma uue infrastruktuuri ehitamiseta ning tuua turule uus võrgu tehnoloogia minimaalsete investeeringutega. Väike investering NB-IoT võrku lubab telekommunikatsiooni operaatoritel müüa NB-IoT teenust väikse hinnaga. Eesti näitel võib öelda, et NB-IoT teenus maksab ligikaudselt ~1.20 € (hinnale lisandub käibemaks). [8]

NB-IoT võrgu arendamist teeb lihtsalt asjaolu, et 4G 800 MHz on kõige suurema kasutusega sagedusala Eestis, mis on kasutusel kõikidel Eesti mobiilioperaatoritel. LTE 800 MHz levib hästi siseruumides ning võrk on suurema levialaga (võrreldes näiteks LTE 1800 või LTE 2600). Kõik need omadused on vajalikud tavakasutaja jaoks - kiire 4G võrk levib peaaegu kõikjal ning kiirus on tunduvalt suurem võrreldes näiteks UMTS (3G) tehnoloogiaga. LTE 800 MHz võrk vastab kõikidele tavakasutaja vajadustele.

Lisaks sellele, erinevad LTE (4G) võrgud dupleksimise poole pealt: vastavalt FDD (*Frequency Division Duplex*) ja TDD (*Time Division Duplex*). Üldiselt ei pruugi selle erinevuse lõppkasutaja märgata, kuid tehnoloogiliselt on FDD ja TDD võrgud selles osas põhimõtteliselt erinevad. Sagedusjaotusega dupleksimine ehk FDD (*Frequency Division Duplex*) kasutamisel on sissetulev ja väljuv liiklus sageduseraldatud, st andmed laaditakse alla ühel sagedusel ja laaditakse üles teisel. Ajajaotusega dupleksimine ehk TDD (*Time Division Duplex*) kasutamisel toimub nii andmete laadimine kui ka mahalaadimine samal sagedusel, ainult vaheldumisi. Operaatori vaatenurgast on kasulikum ajajaotusega dupleksimisega võrgu olemasolu, kuna vajab ainult ühte sagedusala nii alla- kui ka üleslaadimise jaoks. [3] Tavakasutaja seisukohast on sagedusjaotusega dupleksimisega võrgus töötamine teoreetiliselt kasulikum, sest liiklus toimub eraldi (erinevatel sagedustel) ja ei häiri üksteist. Kuid praktikas, katsetuste põhjal kinnitatud, et erinevus nähtamatu.

2.6 LTE-M

Sarnaselt NB-IoT võrgule, tagab LTE-M (*Long-Term Evolution Machine*) standard väikest mahtu tarbivatele võrguseadmetel ligipääsu internetivõrku. LTE-M on mobiilside LPWAN standard, mis töötab NB-IoT sarnasel põhimõttel ning töötab olemasoleval LTE võrgu peal. Võrgu eeliseks on asjaolu, et LTE-M võrk pakub kiiremat allalingi ja üleslingi kiiruseid, kasutades sealhulgas ka suuremat ribalaiust. Lisaks sellele LTE-M võrgul on väiksem viivitus,

mis tagab kiirema informatsiooni vahetuse seadmete vahel ning võimaldab võimaldab reaalajas suhtlemist. [11] [13]

Tabel 2. LTE-M ja NB-IoT võrguparameetrite võrdlus [11] [15]

	LTE-M	NB-IoT
Ribalaius	1400 kHz ehk 1.4 MHz	180 kHz ehk 0.18 MHz
Viivitus	50-100 (ms)	1.5 - 10 (s)
Seadme patareid	+/- 10 aastat	+/- 10 aastat
Levimine siseruumides	Hea	Suurepärane
Kõnede tegemise võimalus	Jah (sh VoLTE)	Ei
Sageduste eraldamine	LTE sagedustes	Paindlik

Mõlemad LTE-M ja NB-IoT mobiilside standardid on litsentseeritud 3GPP poolt, mis tegeleb mobiilsidevõrkude standardiseerimisega. 3GPP peamine eesmärk oli välja töötada standardid uue põlvkonna mobiilsidevõrkude jaoks (E-UTRA), pakkudes suuremaid andmeedastusvõimalusi ja andmeedastuskiirusi. LTE-M võrgu täisväärtuslikuks toimimiseks on see vajalik see integreerida läbi LTE tuumikvõrgu. [11]

LTE-M võrgu puuduseks võib välja tuua *Guard-band* sageduseraldamise võimaluse puudust ehk LTE-M võrk ei saa hetkel töötada LTE kaitseriba sees. Lisaks sellele, kuna LTE-M võrgu ribalaius on NB-IoT võrgust suurem, tähendab tehniliselt seda, et LTE-M võrk toetab ühe tugijaama küljes vähem ühendatud seadmeid. Suuremates riikides, kus on suur rahvastikutihedus, võib see osutada oluliseks probleemiks. [11] [13]

Võrreldes NB-IoT ja LTE-M võrke omavahel võib öelda, et LTE-M on paindlikum, kuna LTE-M saab toetada kõiki NB-IoT kasutamise juhtumeid, samas kui NB-IoT ei toeta ühtegi LTE-M kasutamise juhtumeid. Lühidalt öeldes on NB-IoT mõeldud ainult lihtsa staatilise anduri tüüpi rakenduste jaoks, samas kui LTE-M abil on võimalik käsitleda laia valikut kasutusjuhtumeid.

LTE-M võrku on näiteks võimalik kasutada konteinerite jälgimiseks, sõidukite ühendamiseks jne ehk peaaegu igaks otstarbeks. [13]

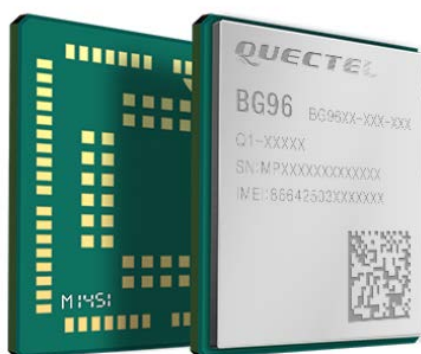
GSMA andmete järgi, 2018. aasta septembri seisuga ainult 14 mobiiloperaatorit avasid LTE-M teenuse enda mobiilivõrkudes. Euroopa Liidu riikides olevad operaatorid eelistavad NB-IoT võrku LTE-M võrkudele. LTE-M võrgu tehnoloogiast on kõige rohkem huvitatud Ameerika Ühendriikides asuvad mobiiloperaatorid [13]

3 Mõõtmised

Antud peatükis kirjeldatakse lähemalt mõõtmiste läbiviimise protsessi ja sellega seotud probleemide kirjeldusi.

3.1 NB-IoT võrgu mõõtmiste läbiviimise ettevalmistus

NB-IoT võrgu leviala hindamiseks on kasutatud Quectel LTE BG96 Cat.M1/NB1 & EGPRS raadiomoodul, mis võimaldab edastada andmepakette maksimaalse kiirusega kuni 375Kbps allalaadimisel ja 375Kbps üleslaadimisel. Antud raadiomoodul on väike (suurused 23.6mm × 19.9mm × 2.2mm) ning saab töötada erinevates sagedusalades. [2]



Joonis 6. BG96 raadiomoodul tootja veebilehelt

BG96 raadiomoodul töötab kolmes NB-IoT sagedusalas, mis võimaldab kasutada seda erinevate mobiilioperaatorite puhul. Moodul toetab järgmisi töösagedusi:

- BC95-B8: 900MHz
- BC95-B5: 850MHz
- BC95-B20: 800MHz
- BC95-B28:700MHz[2]

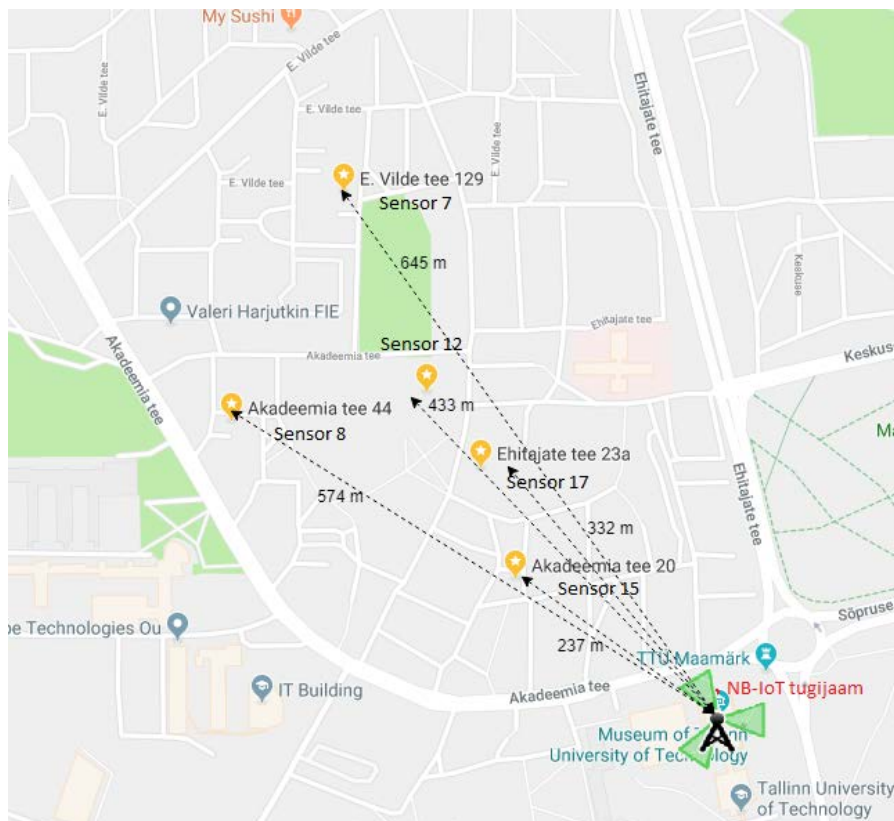
Tallinna Tehnikaülikooli NB-IoT võrgu leviala hindamiseks on kasutatud sagedus *Band 20* ehk 800 MHz. Kõik mõõtmised on läbi viidud ühe tugijaama küljes, kuid erinevate sektorite vahel. Katsetuste jaoks on kasutatud kahte tugijaama sektorit.

Katsetusi hakkame läbi viima nii väli tingimustes kui ka siseruumides. Tulemuste võrdlemiseks mõõdame samuti neljanda põlvkonna mobiilside standardi LTE 800MHz levitugevust erinevates mõõtepunktides (RSSI). Koostame tabeli ning võrdleme omavahel NB-IoT võrgu signaali tugevust tavalise LTE 800 võrguga.

3.2 Mõõtmiste läbiviimine

NB-IoT võrgu leviala hindamiseks olid sensorid paigaldatud viide erinevasse asukohta ning viimased kogusid andmeid terve ööpäeva jooksul:

- Sensor 17 - alates 13:00 (4. Aprill) kuni 18:00 (5. Aprill) - Ehitajate tee 23a
- Sensor 12 - alates 12:00 (4. Aprill) kuni 13:00 (5. Aprill) - Mustamäe SPA
- Sensor 7 - alates 13:00 (4. Aprill) kuni 18:00 (5. Aprill) - Vilde tee 129
- Sensor 8 - alates 12:00 (4. Aprill) kuni 18:00 (5. Aprill) - Akadeemia tee 44
- Sensor 15 -alates 13:00 (4. Aprill) kuni 13:00 (5. Aprill) - Akadeemia tee 20



Joonis 7. Sensorite ja tugijaama asukoht kantud kaardile (Google Maps).

Iga sensor oli seadistatud saatma tühja andmepaketi iga 10 minuti tagant, mille tulemusena oli serverisse kogutud signaalide RSSI ja SNR väärtused. Selle aja jooksul õnnestus igal sensoril saata ligikaudselt 90 andmepaketi. Sagedusressursi eraldamiseks oli kasutatud *Guard-Bandi* meetodi ehk selle meetodi puhul NB-IoT võrk asub kaitseriba sees. Tugijaamas, millega viisime läbi katsetusi, on kasutusel 3 erinevat sektorit. Mõõtmiste jaoks ja tulemuste analüüsimiseks oli kasutatud ainult ühte tugijaama sektorit, mis annab hea ülevaade ühe tugijaama sektori levialast.

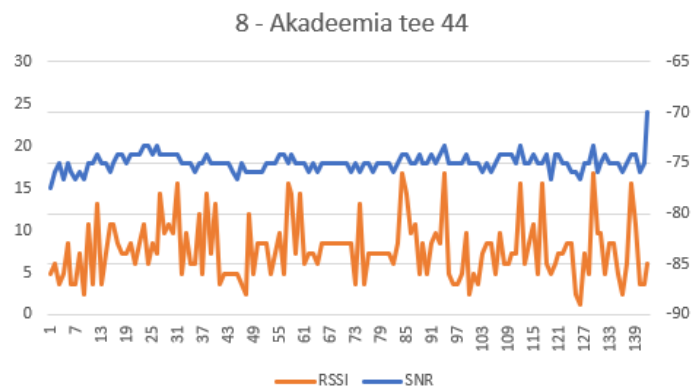
Aadressil **Ehitajate tee 23A** oli paigaldatud üks meie sensoritest keldrisse. Ööpäeva RSSI keskmiseks oli saadud väärtus -89,54 dBm ning SNR väärtuseks 18,69. Mõõtepunkti SNR ja RSSI graafik on välja toodud järgmisel joonisel.



Joonis 8. Sensori 17 (Ehitajate tee 23A) SNR ja RSSI graafikud.

Teine sensor oli paigaldatud aadressil **Akadeemia tee 44** esimesele korrusele. Ööpäeva signaali tugevuse RSSI keskmiseks väärtuseks oli -83,60 dBm ja signaali-müra suhe väärtuseks 18,08. Võrreldes esimese mõõtepunktiga on tulemused oluliselt paremad ning erinevus võib seisneda selles, et antud mõõtepunkt oli esimesel korrusel, mitte keldris.

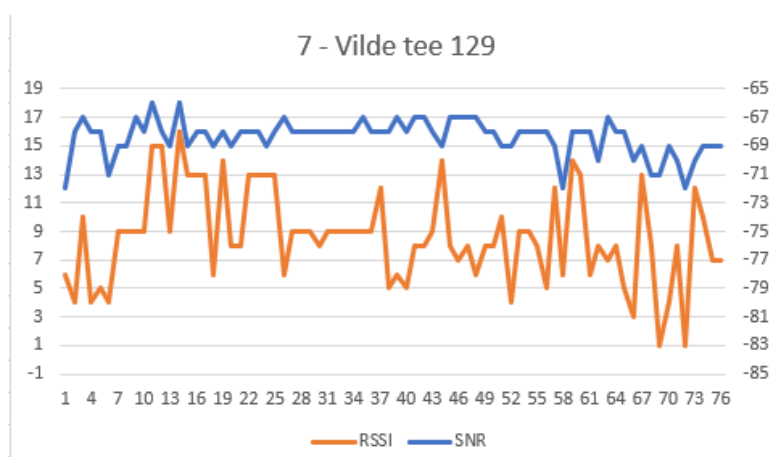
Akadeemia tee 44 mõõtepunkti SNR ja RSSI graafik on välja toodud allpool.



Joonis 9. Sensori 8 (Akadeemia tee 44) SNR ja RSSI graafikud.

Kolmas sensor oli paigaldatud aadressile **Vilde tee 129** esimesele korrusele. Ööpäeva keskmise signaali tugevuse RSSI väärtuseks on -75,36 dBm ning signaali-müra suhe väärtus SNR on 15,61. Tugeva signaali põhjuseks on asukoht (asub suunadiagrammi keskel) ning akendega siseruum.

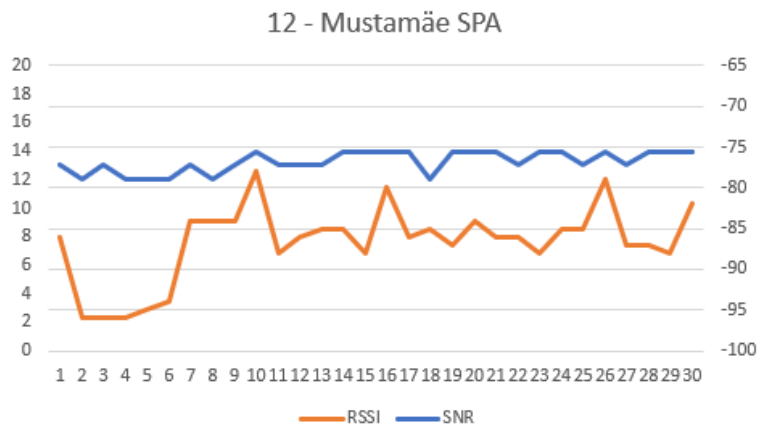
Vilde tee 129 mõõtepunkti SNR ja RSSI graafik on välja toodud allpool.



Joonis 10. Sensori 7 (Vilde tee 129) SNR ja RSSI graafikud.

Neljas sensor oli paigaldatud aadressile **Akadeemia tee 30** (Mustamäe SPA) esimesele korrusele. Ööpäeva keskmise signaali tugevuse RSSI väärtuseks saime -86,67 dBm ning signaali-müra suhe väärtuse SNR saime 13,27.

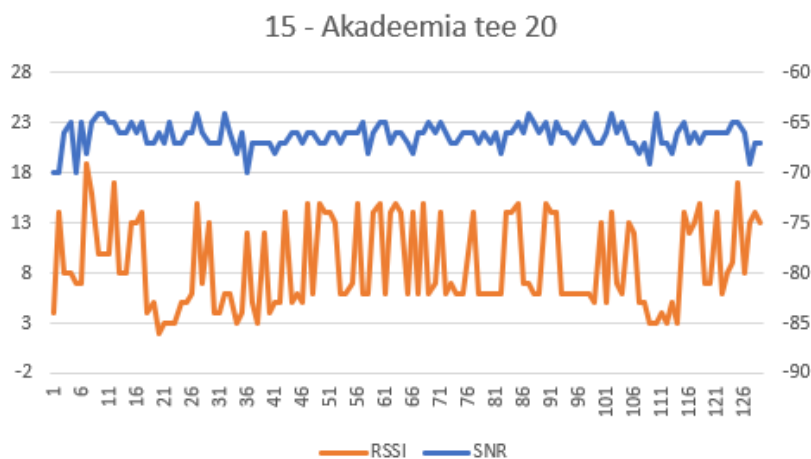
Akadeemia tee 30 mõõtepunkti SNR ja RSSI graafik on välja toodud allpool.



Joonis 11. Sensori 12 (Akadeemia tee 30) SNR ja RSSI graafikud.

Viies ehk viimane sensor oli paigaldatud aadressile **Akadeemia tee 20** esimesele korrusele. Ööpäeva keskmise signaali tugevuse RSSI väärtuseks saime -79,22 dBm ning signaali-müra suhe väärtuse SNR saime 21,69.

Akadeemia tee 20 mõõtepunkti SNR ja RSSI graafik on välja toodud allpool.



Joonis 12. Sensori 15 (Akadeemia tee 20) SNR ja RSSI graafikud.

3.3 Katsetulemuste analüüs

Katsetulemuste analüüsimise aluseks on võetud 5 mõõtepunkti, mis on eelpool kaardi peal välja toodud. Analüüsimise käigus on väga oluline arvestada, et kõik sensorid asusid siseruumides, kuid iga hoone erineb teistest enda struktuurist ja samuti ehitusmaterjalist. On väga oluline arvestada lisaks seda, et üks sensoritest olid paigaldatud keldrisse, kuid suurem osa kogusid andmeid esimesel korrusel.



Joonis 13. Mõõtepunkti kaugus tugijaamast ning signaali RSSI ja SNR väärtused.

Kõige nõrgema signaaliga asukoht oli aadressil Ehitajate tee 23A, kus sensor oli paigaldatud hoone esimese korruse alusesse hoiuruumi. Mõõtepunkt asus 332 meetri kaugusel tugijaamast. Antud sensori keskmiseks väärtuseks oli saadud -89,54 dBm ning SNR 18,69. Tegemist on väga loogilise ja ootuspärase tulemusega, kuna signaali pääsemine keldrisse on takistatud mitme seinaga võrreldes esimese korrusega, kus signaalil on võimalik pääseda ruumi näiteks läbi akna. Minimaalseim signaali tugevuse väärtus RSSI ööpäeva jooksul oli -95 dBm ning suurimaks väärtuseks oli -83 dBm. Siinkohal on oluline välja tuua ka seda, et vaatamata sellele, et mõõtepunktis on kõige nõrgem RSSI signaali tugevus, signaal-müra suhe on edetabelis teisel kohal ehk vaatamata nõrgale signaalile, signaali kvaliteet on väga heal tasemel.

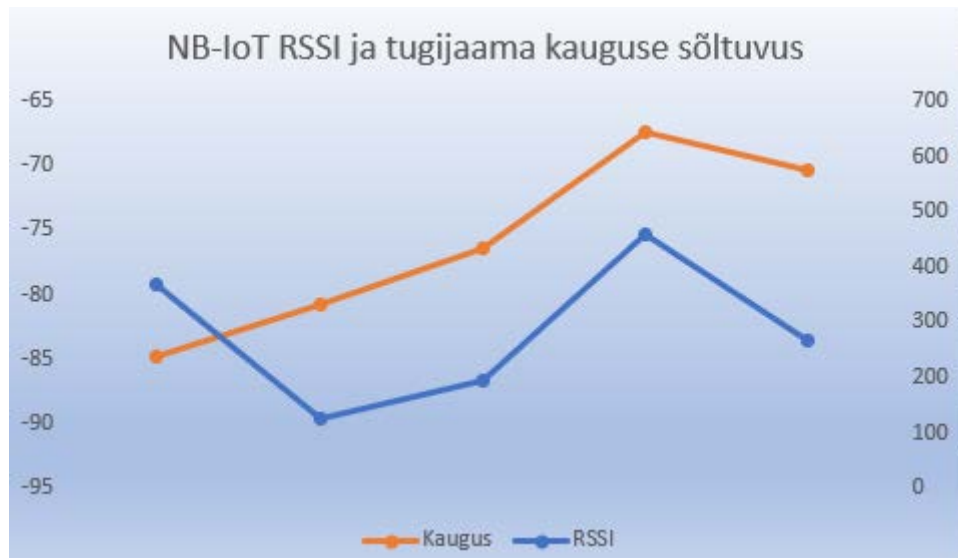
Võib kõlada küll paradoksaalselt, kuid kõige parema signaali tugevuse RSSI väärtusega mõõtepunkt asus kõige kaugemal signaali saatjast ehk tugijaamast. Mõõtepunktis aadressil Vilde tee 129 oli saavutatud kõige parem signaali tugevus, mis võib olla tingitud hoone peal olevate akende arvust ehk signaal pääses lihtsasti siseruumidesse. Lisaks, kuna tugijaama lähedal asuvad mõõtepunktid saavad signaali kätte sektori suunadiagrammi äärega, kuid kõige tugevam signaal on koondatud suunadiagrammi keskele. Tugijaamast eemaldudes suunadiagramm läheb laiemaks ning katab suurema maatükki.



Joonis 14. Sensori 7 (Vilde tee 129) hoone väljast

Aadressil Akadeemia tee 20 asus kolmas mõõtepunkt, mis oli vahemaa mõttes kõige lähedamal tugijaamale. Antud mõõtepunktis oli saavutatud kõige parem signaal-müra suhe, mis on võrdne 21,69. Signaal-müra suhet võis mõjutada väike vahemaa, mida signaal peab läbima jõudes saatjast vastuvõtjani. Omakorda tähendab see seda, et signaali kvaliteet, vaatamata sellele, et signaali tugevus RSSI ei ole just kõige parem, on parim võrreldes teiste mõõtepunktidega. Signaali tugevus RSSI oli võrdne -79,22 dBm.

Neljäs mõõtepunkt asus aadressil Akadeemia tee 30, Mustamäe Elamuste keskuse hoones. Sensor oli paigaldatud alumisele korrusele, kus sisuliselt, peale väljapääsu, aknad puuduvad. Antud mõõtepunktis signaal-müra suhe on kõige väiksem ehk 13,27, mis tähendab seda, et signaali kvaliteet oli antud mõõtepunktis kõige halvem. RSSI väärtus kõige halvem ei olnud ning vastas väärtusele -86,67 dBm. Mõõtepunkt asub suunadiagrammi keskel. kuid maa-alusel korrusel, kus puuduvad aknad - kõik see mõjutab signaali tugevust ja signaal-müra suhet ehk antud tulemused on üsna oodatavad.

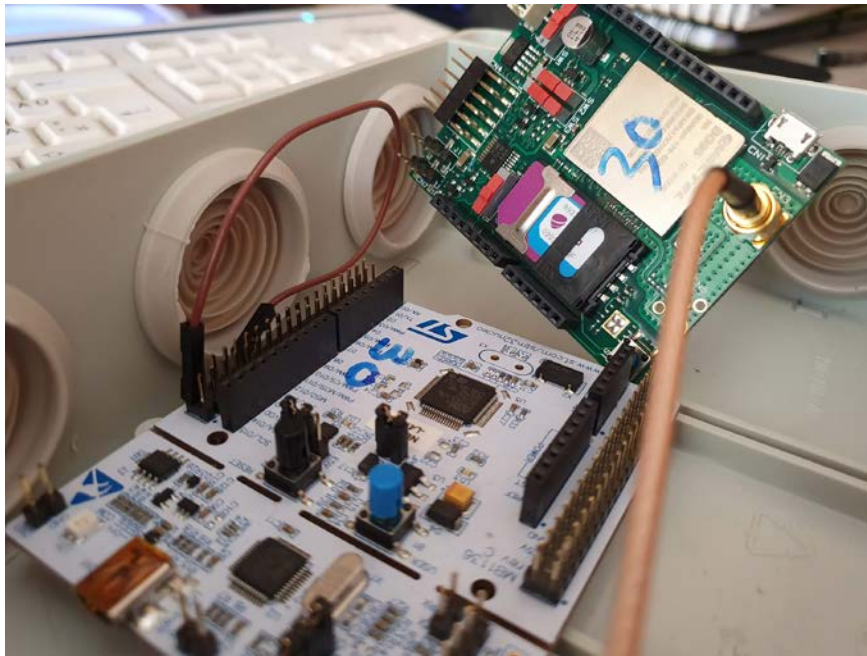


Joonis 15. Mõõtepunkti kaugus (meetrites) tugijaamast ning NB-IoT signaali RSSI väärtuste graafik.

Viimane mõõtepunkt asus aadressil Akadeemia tee 44 hoones, kus on palju aknaid. Antud mõõtepunktis saime tugeva signaal-müra suhte, mis vastab väärtusele 18,08 ning RSSI väärtuse, mis on -83,60 dBm. Viimase mõõtepunkti asukoht ei asu suunadiagrammi keskel ehk kuhu signaal koondatud on.

Tabelis 1 olevate andmete põhjal võib järeldada, et kõikides mõõtepunktides oli saavutatud “suurepärase” või “hea” signaal ehk RSSI väärtus ei ületanud -90 dBm piiri, mis on tegelikult NB-IoT võrgu mõttes väga hea näitaja. Tugijaama ja mõõtepunktide vahel vahemaa NB-IoT võrgu mõttes on üsna väike, seega head võrgu SNR ja RSSI näitajad olid saavutatud ka maa-alustes tingimustes. Tehniliselt on raske lukustada kindel SIM-kaart kindla tugijaama külge ning see vajab läbirääkimisi SIM-kaardi pakkuva mobiilsideoperaatoriga. Suurema raadiusega mõõtmisi tehes on suur oht, et võrk vahetab tugijaama, kuna linnas on tugijaamade arv üsna suur, et ära teenindada kõiki kliente nii õues, kui ka siseruumides.

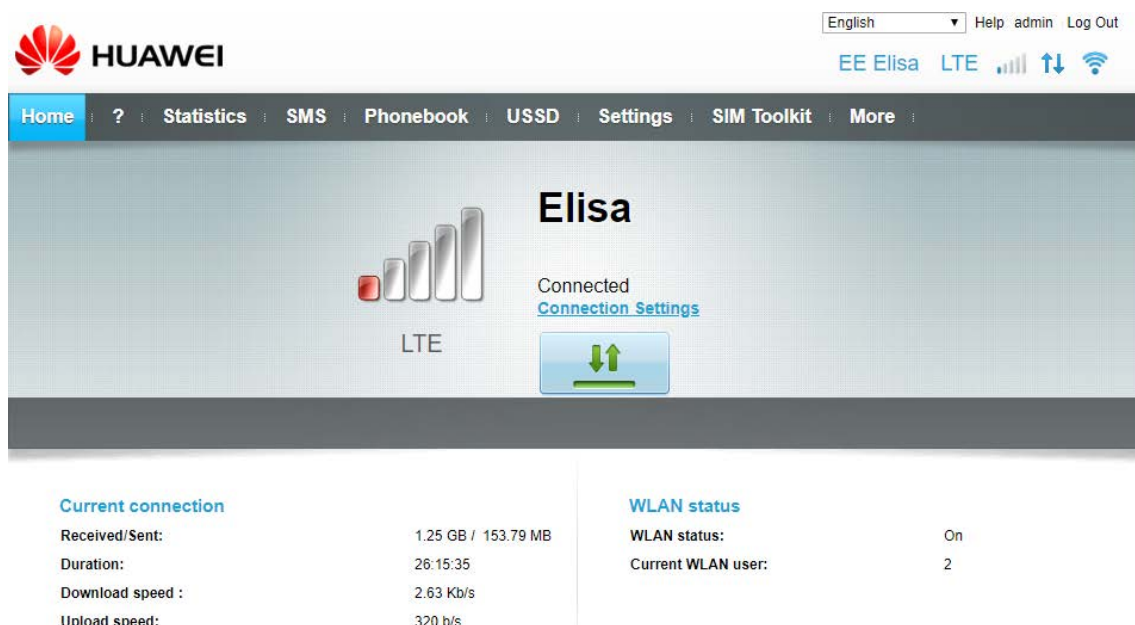
Kõik mõõtmised olid tehtud ühe tugijaama sektori küljes ning tulemuste analüüsimisel oli võrreldud CellID õige tugijaama ID-ga. Kuna signaali tugevus oli kõikides mõõtepunktides piisavalt tugev, ei vahetanud sensorid tugijaamasid ehk oli stabiilne ühendus ainult ühe tugijaama sektoriga. Tugijaama vahetus toimub sellisel juhul, kui teise tugijaama küljest seade saab parema signaali tugevuse võrreldes olemasoleva tugijaamaga.



Joonis 16. BG96 mikrokiip koos NB-IoT SIM kaardiga ja juhtplaat

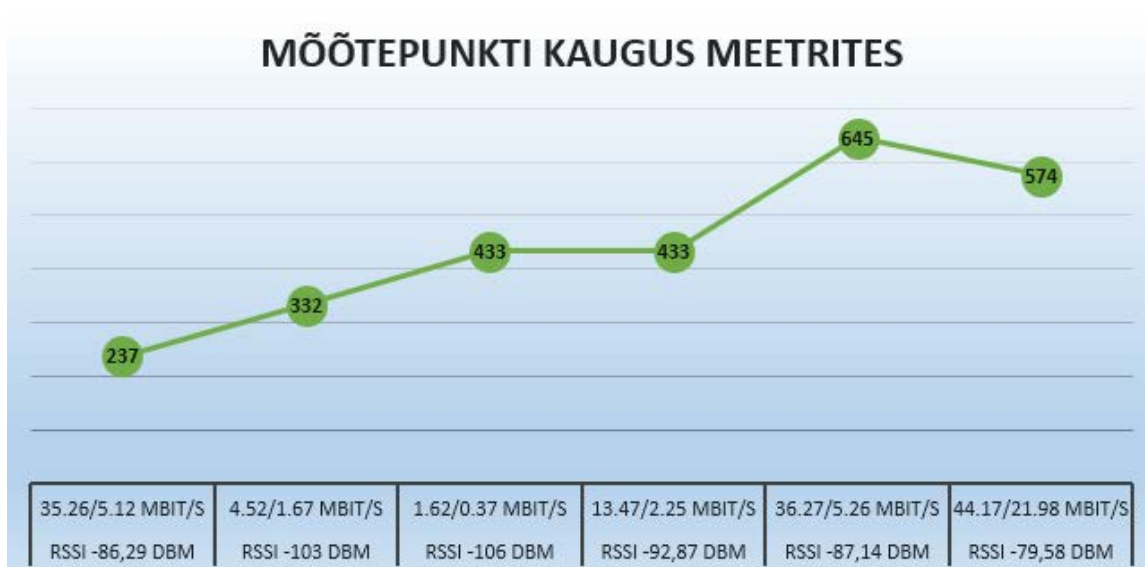
3.4 Katsetulemuste võrdlemine LTE võrguga

NB-IoT katsetulemuste võrdlemiseks LTE võrguga olid tehtud mõõtmised samades mõõtepunktides ning kasutades sama tugijaama ning sama LTE 800 sagedust. Tänapäeva nutitelefonid valivad ise parema signaali tugevusega tugijaama ning pendeldavad erinevate LTE sageduste vahel, tagades parimat kiirust ja signaali tugevust. Kuna NB-IoT võrk töötab 800MHz peal, oli vajadus teha LTE mõõtmisi samal sagedusel ning sama tugijaama sektori peal. Kaasaegset nutitelefoni ei ole võimalik lukustada kindlasse sagedusse ehk kasutusele oli võetud Huawei B315 ruuter, mille tarkvara võimaldab lukustada seade LTE 800 MHz peale, lisaks näitab tarkvara millise tugijaama küljes seade töötab (Cell ID). Kuna vajalik informatsioon on kasutajale nähtav, võib olla kindel, et kõik mõõtmised saavad olema tehtud kasutades sama sagedust ning sama tugijaama sektorit.



Joonis 17. Ruuteri Huawei B315 veebiliides koos vajaliku informatsiooniga

Mõõtmised olid läbi viidud samades mõõtepunktides ning täpselt samadel tingimustel - ruuter oli asetatud kas esimesele korrusele või keldrisse. Informatsiooni kogumiseks oli ruuter asetatud kindlasse asendisse 20 minuti jooksul ning vajalik informatsioon oli käsitsi kirja pandud. Ruuter ei olnud ühendatud andmebaasiga, et automaatselt vajalikud andmed salvestada.



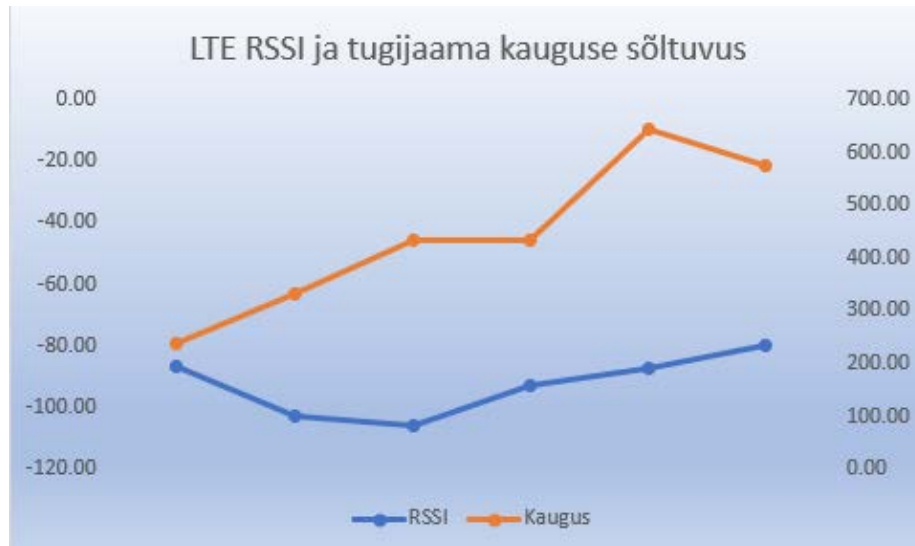
Joonis 18. Mõõtepunkti kaugus tugijaamast ning signaali RSSI ja kiirustesti tulemused.

LTE võrgu mõõtmised olid teostatud *Band 20* (FDD 800) sagedusalas esimene mõõtmine oli Mustamäe SPA hoones. Antud hoones õnnestus teha mõõtmisi nii esimesel korrusel, kui ka keldris. Keldris oli saavutatud keskmine RSSI väärtus -106 dBm ning ühendus ei olnud stabiilne. Andmeside testides oli saavutatud keskmiseks väärtuseks 1,62 Mbit/s allalingi ja 0,37 Mbit/s üleslingi kiirus. Esimesel korrusel läbi viidud katsetuste järgi oli kätte saadud keskmiseks RSSI tulemuseks -92,87 dBm, mis on 6,2 dB võrra nõrgem võrreldes NB-IoT võrgus saadud tulemusega.

Nagu on näha tulemustest, siis signaali tugevus keldris on oluliselt väiksem võrreldes esimesel korrusel asuva mõõtepunktiga. Signaalide erinevused on ligikaudselt 13,13 dB. Ehk samas hoones, kuid erinevates ruumides asuvad seadmed võivad saada väga erineva signaali tugevuse ühest tugijaamast.

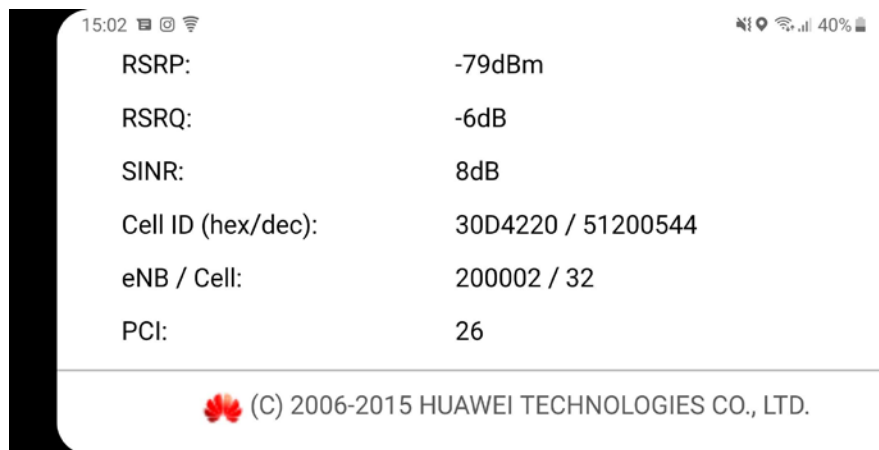
Aadressil Ehitajate tee 23a siseruumides oli läbi viidud teine LTE signaali tugevuse mõõtmine, mille käigus oli saavutatud keskmine RSSI väärtus -103 dBm. Tegemist oli keldriga, kus puuduvad aknad ehk signaali pääsemine siseruumidesse on raskendatud. Võrreldes antud väärtust NB-IoT signaali tugevusega samas mõõtepunktis võib öelda, et NB-IoT võrgus signaali väärtus oli kordades parem ehk võrkude signaalide erinevused on 13,46 dB. Selline suur erinevus võib olla tingitud kellaajast - kui tugijaamal on tavapärasest rohkem kasutajaid. Sellises juhul leviraadius väheneb ehk muutuvad ka kättesaadavad signaali tugevuse väärtused.

Järgmine mõõtepunkt oli aadressil Vilde tee 129, mis on vahemaa mõttes kõige kaugemal tugijaama saatjast. Antud mõõtepunktis oli saavutatud keskmiseks RSSI väärtuseks -87,14 dBm. Kolmandas mõõtepunktis LTE ja NB-IoT võrkude signaali tugevuse võrdlemisel tuleb välja, et NB-IoT võrk pakub seadmele ligikaudselt 11,78 dB võimsamat signaali.



Joonis 19. Mõõtepunkti kaugus (meetrites) tugijaamast ning LTE signaali RSSI väärtuste graafik.

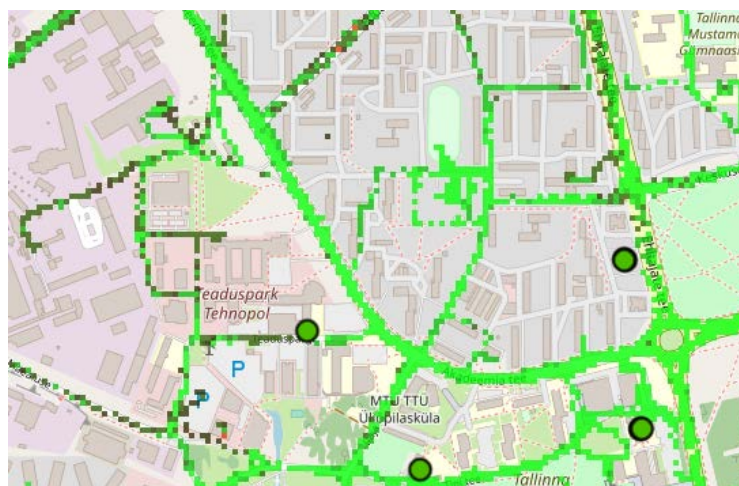
Aadressil Akadeemia tee 44 ei õnnestunud teha mõõtmisi meie vajaliku tugijaamaga. Nagu eespool oli mainitud, SIM-kaarti sidumine kindla tugijaamaga nõuab kontakti mobiilioperaatoriga ning tehnilist lahendust mobiilioperaatori poolt. Meie vajaliku tugijaama asemele Huawei B315 ruuter ühendas teise tugijaama külge ehk kõrval olev tugijaam võimaldas edastada parema tugevusega signaali. Antud mõõtepunktis oli saavutatud signaali tugevuse väärtuseks -79,58 dBm, mis võrreldes NB-IoT võrgu katsetustega, on 4,02 dB võrra võimsam. Kindlasti on vaja rõhutada seda, et erinevus oli saadud tänu sellele, et NB-IoT ja LTE võrgu mõõtmisel antud mõõtepunktis teenindas kaks erinevat tugijaama.



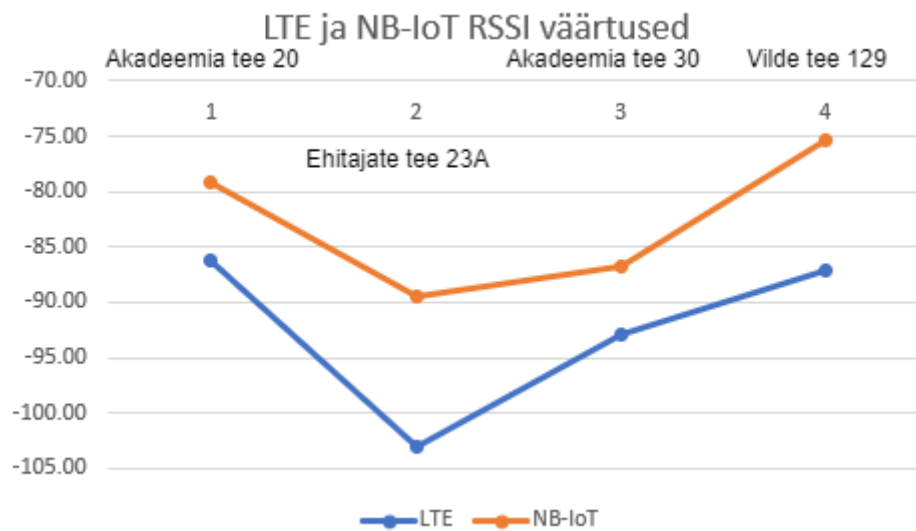
Joonis 20. Signaali tugevuse ja tugijaama ID võrdlemine läbi ruuteri veebilehe

Viimane LTE mõõtepunkt asus aadressil Akadeemia tee 20, kus saime keskmiseks RSSI väärtuseks -86,29 dBm. Signaali tugevus oli piisav ning andmeside läks ilusti ruuterist läbi: kiirustesti tulemusena oli saavutatud 35 Mbit/s allalingi ja 5 Mbit/s üleslingi kiiruseks. Võrreldes NB-IoT võrguga signaali tugevus oli 7,07 dB võrra nõrgem.

Tulemuste analüüsimisel tuleb välja, et kõikidel mõõtepunktides (välja arvatud üks mõõtepunkt, kus tehniliselt ei olnud võimalik saada ühendust vajaliku tugijaamaga) LTE võrgus saavutatud signaali tugevus oli minimaalselt 6,2 dB võrra nõrgem ning maksimaalne erinevus oli 13,46 dB. Mõõtetulemustes võib esineda ebatäpsusi, kuna LTE ja NB-IoT võrgu mõõtmised olid tehtud erinevatel kuupäevadel ja kellaaegadel, kuid täpselt samadel väli tingimustel. Tuleb samuti rõhutada seda, et mõõtmised olid teostatud erinevate seadmetega.



Joonis 21. Mobiilioperaatoril kasutatavad tugijaamad meie uuringualal [14]



Joonis 22. LTE ja NB-IoT RSSI väärtuste võrdlemine

4 Kokkuvõte

Käesolev töö andis ülevaate NB-IoT võrgust ja selle parameetritest ja omadustest, oli läbi viidud nii NB-IoT kui ka LTE võrgus mõõtmised signaali tugevuse osas, bakalaureusetöös on samuti välja toodud NB-IoT võrgu alternatiivid. Antud bakalaureusetöö valmimise ajaks kõik kolm Eesti mobiilioperaatorid pakuvad NB-IoT teenust era- ja/või äriklientidele ehk kõikidel soovijatel on võimalik Eestis neid teenuseid kasutada.

Tänapäeva võrgutehnoloogiad kasutavad korraga mitmeid sagedusi selleks, et tagada kasutajale kiiremat ja stabiilset ühendust välismaailmaga. Küll aga, on mobiilioperaatoril võimalik kasutada ühte sagedust mitme erineva teenuse jaoks ehk see võimaldab sagedusressursse efektiivsemalt kasutada ning potentsiaalsetelt klientidelt rohkem raha teenida. Täiendava võrgu seadistamise tulemusena võivad valmida sellised võrgud nagu NB-IoT või LTE-M, mis sisuliselt ei nõua füüsilist võrgu ehitamist, kuid saavad anda mobiilioperaatorile suure kasumi. Euroopa Liidu riikides (sh Eestis) on mobiilioperaatorid edasi arendanud NB-IoT võrke ning suurem osa mobiilioperaatoritest ei võtnud veel kasutusele LTE-M võrgutehnoloogiat. LTE-M võrgu puudumine ei andnud võimaluse võrrelda NB-IoT ja LTE-M võrke reaalsetes tingimustes.

NB-IoT kasutuselevõtmine loob võimaluse ühendada erinevaid lülitid ning andurid, mis tarbivad väga vähe energiat ning saadavad väikest andmemahu üks-kaks korda päevas. NB-IoT võrku teeb eriliseks asjaolu, et madala voolutarbega seadmete aku kestab kuni 10 aastat ning ideaalsetel tingimustel seadmetel on võimalik ühenduda NB-IoT võrguga isegi 25 km kauguselt. Loomulikult linnas ja siseruumides on näitajad oluliselt teised. Täiendavalt suudab NB-IoT puhul ühe tugijaama all töötada ligikaudselt 10000 ühendatud seadet. Lisaks sellele, pakub NB-IoT võrk võrreldes tavalise LTE võrguga täiendavat +20 dB võimendust ehk teoreetiliselt andmeside on võimalik ka väga halva -163 dBm signaali tugevuse korral (LTE võrgus piir on -144 dBm). Signaali pääsemine maa-alustesse parklatesse, kus puuduvad aknad, on oluliselt raskendatud ehk suurendatud NB-IoT puhul MCL väärtus annab võimaluse sensoritel saata informatsiooni ka ülikehva signaali puhul. NB-IoT võrk omab kaks head omadust: esiteks signaal on tugijaama poolt võimendatud ning vastuvõtja saab andmeside ühendust luua ka väga väikese signaali tugevuse puhul.

Töö eesmärgiks oli tõestada, kas tõe poolest NB-IoT võrgu leviala on LTE levialast suurem ning kas NB-IoT reaalsetes tingimustes pakub kliendile paremat signaali tugevust. Eesmärkide tõestamiseks oli läbi viidud mitu mõõtmiskampaaniat, mille käigus oli mõõdetud nii NB-IoT kui ka LTE signaali tugevuse väärtused mitmes mõõtepunktis. Ühes mõõtepunktis oli läbi viidud mõõtmised kahe erineva võrgutehnoloogia puhul ning hiljem tulemused olid analüüsitud.

Töö eesmärk oli hinnata NB-IoT leviala. Hindamiseks tehti katsed NB-IoT seadmetega. Katsetamise ajal kahe päeva jooksul viies erinevas mõõtepunktis mõõdeti vastuvõetud signaali tugevust RSSI ja signaal-müra suhet SNR. Võrdluseks mõõdeti samades mõõtepunktides LTE ruuteriga signaalitugevust ning üles- ja allalaadimise kiiruseid. Analüüsi tulemusena oli tõestatud, et NB-IoT RSSI väärtus on suurem vähemalt 6,2 dB võrra kui LTE RSSI. NB-IoT anduri asukoha muutmine esimeselt korrusel keldrisse muudab signaali kvaliteeti sama palju kui anduri asetamine esimesel korrusel tugijaamast 141m kaugemal asuva hoone esimesele korrusele. Mõlemad võrgud töötavad 800 MHz sageduse peal, kuid kasutavad erinevat ribalaiust ning NB-IoT on tugijaama antenni poolt rohkem võimendatud. Asjaolu, et tugijaama saatjas on NB-IoT signaal rohkem võimendatud, annab vastuvõtjale saada parema signaali tugevusega signaali.

Tehniliselt oleks võimalik võrrelda saadud tulemusi ka LTE-M võrgutehnoloogiaga, kuid kahjuks Eesti mobiilioperaatorid ei ole võtnud antud võrgutehnoloogiat kasutusele ehk mõõtmine ei ole füüsiliselt võimalik.

Summary

This Bachelor's thesis provided an overview of the NB-IoT network and its parameters and properties, measurements of signal strength were performed in both NB-IoT and LTE networks, and alternatives to the NB-IoT network were also highlighted in the bachelor's thesis. By the time this bachelor's thesis is completed, all three Estonian mobile operators offer NB-IoT service to customers, this means that all willing customers can use this service.

Today's network technologies use multiple frequencies at the same time to provide the user with a faster and more stable internet connection. However, it is also possible for a mobile operator to use one frequency for a number of different technologies, that means using frequency resources more efficiently and to earn more money from potential customers. As a result of the additional network setup, networks such as NB-IoT or LTE-M can be setup that do not essentially require physical network building, but can give the mobile operator great profits. In EU countries (incl. Estonia) mobile operators have further developed NB-IoT networks, and have not yet introduced LTE-M network technology. The lack of LTE-M network did not allow comparison of NB-IoT and LTE-M networks under real conditions.

The introduction of NB-IoT provides the opportunity to connect different sensors that consume small amount of energy and send a small amount of data once or twice a day. The special feature of the NB-IoT network is that the low-power equipment battery lasts up to 10 years and in the ideal conditions devices can connect to the NB-IoT network even at a distance of 25 km. Of course, the parameters in the city and indoors are significantly different. Additionally, in the case of NB-IoT, approximately 10000 connected devices can be operated under one base station. In addition, the NB-IoT network offers an additional +20 dB gain compared to a conventional LTE network, or theoretically, data communication is also possible with a high -163 dBm signal strength (LTE network limit is -144 dBm). Signal penetration to underground car parks or building indoors is greatly hampered. With the help of NB-IoT technology, the increased MCL value provides an opportunity for sensors to send information even in the case of a very weak signal. The NB-IoT network has two good features: first, the signal is amplified by the base station, and the second, that the receiver can also establish a data connection at a very low signal strength.

The purpose of this Bachelor's thesis was to prove whether the coverage area of the NB-IoT network is higher than the LTE coverage and whether the NB-IoT provides better signal strength to the customer under real conditions. Several measurement campaigns were carried out to prove the goals, in which both the NB-IoT signal strength values were measured at several measuring points, but using the LTE technology. At one measurement point, measurements were made for two different network technologies and later the results were analyzed and compared.

The results obtained during the work confirmed that in practice, on the same base station and mobile operator example, the NB-IoT signal is at least 6.2 dBm stronger than the conventional LTE FDD signal strength. Both networks operate at a frequency of 800 MHz, but use different bandwidth, and NB-IoT is more amplified by the base station antenna. The fact that the NB-IoT signal in the base station is more amplified gives the receiver a signal with better signal strength.

Technically, it would be possible to compare the results with the LTE-M network technology, but unfortunately, Estonian mobile operators have not adopted the given network technology, that means that the measurement is not physically possible.

Kasutatud kirjandus

- [1] Perry Lea, „Internet of Things for Architects“, 2018.
Saadaval: <https://proquestcombo.safaribooksonline.com/book/hardware/9781788470599>
- [2] Quectel Wireless Solutions Co., Ltd, “LTE BG96 Cat.M1/NB1 & EGPRS Module”, 2017
[WWW] Saadaval: <https://www.quectel.com/product/bg96.htm>
- [3] Techno-guide, „Режимы связи LTE FDD и TDD“, 2019 [WWW].
Saadaval: <http://techno-guide.ru/informatsionnye-tekhnologii/mobilnaya-svyaz/rezhimy-svyazi-lte-fdd-i-tdd.html>
- [4] NB-IoT Network Trial: Indoor, Outdoor and Underground Coverage Campaign, 2018
[WWW]. Saadaval: https://www.researchgate.net/publication/332142971_NB-IoT_Network_Field_Trial_Indoor_Outdoor_and_Underground_Coverage_Campaign
- [5] Inur Fauzuev, “NB-IoT: как он работает? Часть 1”, 2018 [WWW].
Saadaval: https://habr.com/ru/company/ru_mts/blog/430496/
- [6] Andrei Anisimov, “NB-IoT, Narrow Band Internet of Things. Режимы энергосбережения и команды управления”, 16 jaanuar 2019 [WWW]. Saadaval: <https://habr.com/ru/post/435722/>
- [7] 3GPP, „Low Power Wide Area Technologies“, 2016 [WWW].
Saadaval: <https://www.gsma.com/iot/wp-content/uploads/2016/10/3GPP-Low-Power-Wide-Area-Technologies-GSMA-White-Paper.pdf>
- [8] Elisa Eesti AS, “Narrowband IoT”, 2018 [WWW].
Saadaval: <https://www.elisa.ee/et/ariklient/internet/mobiilsed-lahendused/narrowband-iot>
- [9] Dom Elektronika “Протоколы доступа LTE E-UTRAN. Часть 1” [WWW].
Saadaval: <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/2187/doc/57795/>
- [10] Tutorials’ point “LTE Protocol Stack Layers” [WWW].
Saadaval: https://www.tutorialspoint.com/lte/lte_protocol_stack_layers.htm
- [11] Accent Advanced Systems “Differences between NB-IoT and LTE-M”, 2018 [WWW].
Saadaval: <https://accent-systems.com/blog/differences-nb-iot-lte-m/>
- [12] BZDWW, “Listen to the classmates about the things of NB-IoT”, 2019 [WWW].
Saadaval: <https://bzdww.com/article/102589/>
- [13] Sacha Kavanagh, “What is LTE-M?” [WWW]. Saadaval: <https://5g.co.uk/guides/what-is-lte-m/>
- [14] Cellmapper Association, [WWW]. Saadaval: <http://cellmapper.net>
- [15] Rohde & Schwarz Hong Kong Limited, “LTE-M – the new GSM” [WWW].
Saadaval: https://www.rohde-schwarz.com/hk/solutions/test-and-measurement/wireless-communication/iot-m2m/lte-m/lte-m-theme_234034.html