

TARTU ÜLIKOOL
Arvutiteaduse instituut
Informaatika õppekava

Kert Tali

Tartu LPWAN võrkude võrdlus ja kasutusmallid

Bakalaureusetöö (9 EAP)

Juhendaja: Alo Peets

Tartu 2020

Comparison and use cases of LPWAN networks in Tartu

Abstract:

Valmib lõpus

Keywords:

IoT, LPWAN, LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, service comparison, use cases

CERCS: T180 Telecommunication engineering; P170 Computer science, numerical analysis, systems, control

Tartu LPWAN võrkude võrdlus ja kasutusmallid

Lühikokkuvõte:

Valmib lõpus

Võtmesõnad:

IoT, LPWAN, LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, teenusvõrkude võrdlus, kasutusmallid

CERCS: T180 Telekommunikatsioonitehnoloogia; P170 Arvutiteadus, arvutusmeetodid, süsteemid, juhtimine (automaatjuhtimisteooria)

Sisukord

1	Sissejuhatus	4
2	Tausta ülevaade	5
2.1	Kasutusmallid	6
2.2	Side optimeerimise meetodid	7
2.3	Olemasolevad tehnoloogiad	9
2.3.1	Sigfox	9
2.3.2	LoRaWAN	10
2.3.3	NB-IoT	11
2.3.4	Muud tehnoloogiad	13
2.4	Seotud tööd	13
3	Keskkonna ülesseadmine	15
3.1	Arendusplaat FiPy	15
3.2	LoRaWAN tugijaam	16
3.3	Metoodika	17
3.3.1	Maapiirkond	17
3.3.2	Linnapiirkond	17
3.3.3	Liikuv tugijaam	18
4	Tulemused	19
5	Diskussioon	20
6	Kokkuvõte	21
	Viidatud kirjandus	28
	Lisad	29
	I. Lõppseadme testskriptid	29
	II. Litsents	30

1 Sissejuhatus

Nutistu üha suurem tähtsus äri- ja mugavusrakendustes põhjustavad ühest küljest võidujooksu uute lahenduste leiutamisele, teisest küljest võitluse tehnoloogiliste ja füüsiliste piirangutega. Üks sellistest pudelikaeladest hõlmab seadmetevahelist suhtlust (M2M), mille puhul tuleb valida olemasolevate sideprotokollide seast oma rakendusele sobivaim. Traadita andmeside tehnoloogiate seas on populaarsust kogumas uus klass — LPWAN (Low Power Wide Area Network), mis on mõeldud just rakendustele, mis eeldavad nii madalat voolutarvet kui laia leviala. Populaarseimad LPWAN tehnoloogiad on Sigfox, LoRa, NB-IoT, LTE-M, Ingenu ja Weightless.

Kuigi tehnoloogiad on orienteeritud ühele niššile, erinevad need oma tehnilise spetsifikatsiooni ja võimekuse poolest märkimisväärselt. Uurimistöö eesmärk on hinnata Tartus kättesaadavate teenuste sobivust erinevatele LPWANide kasutusmallidele. Selline ülevaade on väärtuslik lähtekoht väiksematele teenusepakkujatele, kes kaaluvad kaugloetavate seadmete kasutuselevõttu, kuid ei saa lubada ulatuslikku eeltööd erinevate võrkude testimiseks oma vajaduste põhisel.

Uuringu meetod on riistvara katsetamine, mille käigus mängitakse läbi iga võrgu lõppseadme käitumine erinevates raskendatud levi ja ligipääsuga paikades. Eelkõige jälgitakse sidekanali võimekust kanda üle sõnumeid mittetäiuslikes oludes, võttes arvesse ka selleks kuluvat latentsi. Kasutusmallide omistamisel võetakse arvesse katseid maa- ja linnakeskonnas, kus valitud olustikud kirjeldavad reaalseid töötingimusi lõppseadmetele. Katsed ei puuduta võrkude koormustaluvuse ega tehnoloogiate voolutarbe võrdlemist, samuti ei kaardistata täpset teenuste leviala, vaid piirduakse piisava valimiga, mis annaks ettekujutuse halvimast juhust üksikule seadmele. Katsed toimuvad reaalsete teenusvõrkude peal, mistõttu pole kohane neid liigselt koormata.

Töö teoreetiline osa jaotub kaheks – esimene neist lahkab LPWANide tausta ning teine eraldi tehnoloogiaid. Neljas peatükk hõlmab töö lahenduskäiku, alates kasutatava riistvara kirjeldusega ning lõpetades metoodika ja testimiste asukohavalikute põhjendustega. Viiendas peatükis koondatakse kokku ja visualiseeritakse olulisemaid tulemusi katsetelt. Kuuendas peatükis arutletakse teenuste sobilikkuse üle erinevatele kasutusmallidele.

2 Tausta ülevaade

Gaddami ja Rai väitel on LPWANi võrgud loodud, pidades silmas neid võrku ühendata-
vaid seadmeid ja nende kasutusmalle, millele ei sobi traditsioonilised traadita andmeside
tehnoloogiad nagu 802.11 (WiFi) perekond, Bluetooth või senised 3GPP mobiilside
standardid [1]. Tuuakse välja, et uute sidelahenduste välja töötamine on tingitud eel-
käijate võtmeomadustest, keskendudes eelkõige suuremale andmeedastuskiirusele ja
minimaalsele latentsile.

Gubbi jt visioonis asjade interneti (*Internet of Things* ehk IoT) tuleviku kohta defineeritak-
se seda kui võrgustikku omavahel ühenduses olevaid seadmeid — sensorid, mis koguvad
oma keskkonna kohta infot ning aktuaatorid interaktsiooniks teise seadmega, kusjuures
suhtlus toimub üle olemasolevate Internetistandardite [2]. Augustin jt. eristavad Internetti
ja asjade interneti arutledes, et IoT seadmetel on palju vähem ressursse, kui Interneti
seadmetel [3]. Ressurssidena tuuakse välja eelkõige jõudlus ja mälu, kuid eraldiseisvate
üksuste puhul ka vooluallikas, milleks on sageli akud või näiteks päikesepatareid [4].

Chang jt esitavad pilvepõhise IoT süsteemide disainis viis väljakutset: kitsas ribalaius,
kõrge latents, side ebastabiilsus, ressursside piiratus ja turvalisus [5]. Kolm esimest on
otseselt seotud kasutatava võrgu omadustega, ehk võrgu tehnoloogia valik on vältimatu
osa uute süsteemide loomisel. Nilsson ja Svensson, kes keskenduvad oma artiklis raa-
diotranssiiverite voolutarbe optimeerimisele, omistavad eelnevalt mainitud probleemid
just IoT seadmete vooluallikatele, mis ei suuda ära toita võimsat ja keerukat raadiokom-
munikatsiooni [6]. Sama väidet toetavad Chen jt, kes tõdevad, et värgvõrgu minimaalne
riistvara on kujundanud sellise olustiku, kus väga erinevate parameetrite ja piirangutega
IoT tüüplahendustele disainitakse uusi, võimalikult optimeeritud sidetehnoloogiaid [7].
Näiteks tuuakse energiasäästlikud LPWAN tehnoloogiad, mis on suunatud IoT lahen-
dustele, mis koosnevad suurest hulgast akutoitega seadmetest, laialijaotatuna suurele
maa-alale.

Selles peatükis antakse põgus ülevaade LPWANide olemusest üldiselt. Esimeses ala-
peatükis tuuakse teaduslikust kirjandusest näiteid erinevatele kasutusmallidele. Teises
alapeatükis kirjeldatakse levinud tehnilisi võtteid, mida rakendatakse selliste tehnoloo-

giate puhul, et saavutada seatud eesmärgid. Viimaks võetakse seotud tööde alapeatükis kokku sarnased uurimused, mis kõrvutavad mitut tehnoloogiat.

2.1 Kasutusmallid

Vajadus autonoomsete mõõtmisseadmete järele on paljudel eluvaldkondadel. Enim paistavad silma LPWANI jaoks soodsa tegevuspiirkonnaga põllumajandusrakendused, mis tingivad andmete kogumist suurel pindalal ning suurelt arvult sensoritelt, milleni pole otstarbekas vedada kaableid. Jawad jt. [8] toovad välja põhilised rakendusala, mis aitavad planeerida täppispõllumajandust ning on saavutatavad suurel mastaabil vaid traadita seadmetega: pinnase ja õhu niiskuse, temperatuuri ja mulla viljakuse mõõtmine. Lisaks vajaliku info üleslink saatmisele tuleb teatud põllumajanduslikele rakendustele kasuks, kui seadmed on võimelised ka allalink suhtluseks ehk kuulama instruksioone. Seda omadust on uuritud põllumajanduses näiteks tarkade niisutussüsteemide või kasvuhoonetes tuulutussüsteemide rakendamisel [9].

Samasugustes mastaapsetes tingimustes kasutatakse IoT sensoreid keskkonnanäitajate kogumiseks. Selleks paigaldatakse looduskeskonda — näiteks jõgedesse, veekogudesse, metsadesse, lagendikele või linnade äärealadele sensoreid, mis raporteerivad jõe voolu [10], vee kvaliteeti [11], vee taset [12], õhukvaliteeti [13] ja muud. Samuti on sellistel sensorvõrkudel potentsiaal kaardistada ja ennustada looduskatastroofe, nagu maastikupõlengud [14].

Sarker jt. sõnastavad Smart-city kui ühe IoTga tihedalt seotud kontseptsiooni — rakendada suurel hulgal erinevaid mõõtmissüsteeme linnaplaneerimise hõlbustamiseks [14]. Viidatakse sellele, et see pole küll uus idee, kuid LPWAN tehnoloogiate tulekuga on tekkimas üha enam uusi ettepanekuid targa linna süsteemidele. Staatilisi sensoreid saab linnapildis rakendada näiteks prügikonteinerite täituvuse, liiklustiheduse, helireostuse ja parklate täituvuse raporteerimiseks [15]. GPRS baasil kaugloetavad elektriarvestid on Eesti kodudes kohustuslikud alates 2017. aastast [16] ning 2021. aastaks peavad välja vahetatud olema ka küttegaasi arvestid [17]. Sealjuures on raskendatud leviga kortermajade või keldrite arvestid enamasti ühendatud kontsentraatoritega, mis kannavad andmed

traadita andmesideks sobivamasse keskkonda.

Staatiliste seadmete kõrval on olulisel kohal ka mobiilsed rakendused, mis eelnevale sarnaselt monitoorivad ennast kandvat sõidukit või looma. Väikseid akutoitega seadmeid on kerge kinnitada loomale või inimesele, et saada automaatseid tervisenäitajaid loomapidamises [18, 19] või tervishoius [20, 21]. Samuti on mis tahes objektide koordinaatide raporteerimine GPS mooduli abil potentsiaalne kasutusala LPWANi põhiseks positsioneerimiseks, mille potentsiaali on demonstreeritud jalgrattaringluse kontekstis [22] või dementse inimese leidmiseks [23]. Liikuvate seadmete ohud väljenduvad erijuhtudena, kui seadmed liiguvad levialast välja või satuvad läbistamatute takistuste taha ja andmeside katkeb, mistõttu kasutatav tehnoloogia peab olema piisavalt robustne ja laia katvusega.

Kusuda ja Iwata esitavad idee liigutada hoopis tugijaamu paiksete lõppseadmete suhtes [24]. Potentsiaalsete otstarvetena pakuvad autorid välja: prügiauto ja prügikastide vahelist suhtlust, et optimeerida korjeteekonda, drooniga pestitsiidide kasutuse tuvastamine ülisuurelt alalt ning kulleri ja majapidamise vaheline eelhoiatust, kui auto jõuab naabruskonda. Sellise süsteemi eelis on levi kindlustamine ettenähtud kohtades, samalaadsetelt lõppseadmetele pikka eluiga garanteerides.

2.2 Side optimeerimise meetodid

Lai leviulatus korraga akusäästlikusega on vasturääkivus, sest eeldab justkui võimsa ja kuluka raadiosignaali genereerimist. Selleks, et tehnoloogia täidaks LPWANi tingimusi, on eelkõige oluline, et sideprotokoll võimaldaks lõppseadmele pikka eluiga. Sealjuures on oluline küll distants, kuid muude tegurite osas võib teha olulisi kärpimisi. Selles alapeatükis käsitletakse tehnilisi iseärasusi ehk võtteid, mida kasutatakse LPWAN tehnoloogiate disainis. Järjestuse aluseks on analoogiline loetelu Raza jt [25] 2017. aasta ülevaatest LPWAN tehnoloogiatest.

Signaali levi- ja läbistavusomaduse põhiline tegur on kasutatav sagedus — madalamad sagedused on vastupanelikumad takistuste ja hajumise osas, mistõttu on mitmed LPWAN tehnoloogiad loodud töötama alla 1 GHz sagedustel, mitte enamlevinud 2,4 GHz spektris,

mida kasutavad WiFi ja Bluetooth ning ka mõned IoT võrgud nagu Zigbee [26]. Teine viis levivõimekuse suurendamiseks hõlmab signaali kodeerimise- ja modulatsioonitehnikat, ehk OSI mudeli mõistes võrgu esimest (e. füüsilist) kihti. Selleks, et suurendada seadme võimalust demoduleerida ka väga nõrka signaali, luuakse sageli spetsialiseeritud modulatsiooniskeemid, mis on piisavalt vastupanelikud raadiohäiretele ja signaali hajumisele [27]. Selline üle raadioside kantav bitijada peab piltlikult olema selge ja robustne, omades väikest andmeedastuskiirust.

Voolutarbes saavutatakse võit enamasti tänu lõppseadme suurele passiivses olekus veedetud aja osakaalule, kui andmeid ei saadeta ega võeta vastu. Anastasi jt [28] uurimuses IoT silmusvõrkude voolutarbest tõdetakse, et raadio on eranditult suurim tarbija lõppseadmes, mille ärkvelolekut tuleb võimalikult palju piirata. Kui silmusvõrkudes kulub suur osa lõppseadme ressursist naaberseadme retransleerimisele, siis LPWAN võrgud töötavad üldiselt vaid tähtvõrguna, milles lõppseade suhtleb ainult tugijaamadega [29]. Selle tõttu on LPWANidel palju vabam süvaune planeerimine, sest iga seade hoolitseb vaid enda andmevahetuse eest. Voolutugevus, kui seade on süvaunes, peaks olema umbes 1 μA [30].

Levinud voolusäästmise meetod on ALOHA meediumipöördus, mille puhul ei kasutata meetmeid, et vältida naaberseadmega konfliktimist, vaid minnakse eetrisse esimesel ettejuhtuval ajal [25]. Ühelt poolt on see käitumine odav, kuid suureneb pakettide põrkumise tõenäosust ja seetõttu on tarvis lisameetmeid side usaldusväärsuse tagamiseks, nagu pakettide kordamine suvalistel kanaliltele Sigfoxi näitel [25].

Ultrakõrgsagedusalas sobilikud litsentseerimata sagedusvahemikud on enamasti ISM (*Industrial-Scientific-Medical*) ribad, mis on reguleeritud seadmete eetrihõive ja kiirgusvõimsuse osas — Euroopas kehtib näiteks Sigfoxi ja LoRa poolt kasutatavale 868 MHz sagedusele seadusega sätestatult 1% maksimaalne päevane täitetegur ja 25 mW kiirgusvõimet seadme kohta [31]. See tähendab, et transsiiver võib olla eetris kokku kuni ühe sajandiku ööpäevast, sealhulgas mitte ületada sätestatud võimsust. LPWAN kasutusala suurest eetrihõivest ei võida, vastupidi on piirangud kooskõlas madala voolutarbe nõudega.

2.3 Olemasolevad tehnoloogiad

Käesolevas peatükis antakse üksikasjalik ülevaade hetkel aktuaalsetest LPWANi perekonda kuuluvatest tehnoloogiatest, nende eelistest ja puudustest.

2.3.1 Sigfox

Sigfox on 2010. aastal Prantsusmaa start-upi poolt loodud tehnoloogia, mis loojate visiooni kohaselt tagab ühenduse miljarditele IoT seadmetele, luues minimaalne telekommunikatsioonistandardi pisikeste sõnumite edastamiseks [15]. Ettevõtte pakub tehnoloogiat ja pilvekeskkonda komplektse teenusena.

Sigfox töötab Euroopas 868,0–868,2 MHz mittelitsentseeritud sagedusalas ning kasutab ül kitsaribalist (Ultra-Narrow-Band ehk UNB) side, milles iga üleslink ülekanne kasutab vaid 100-hertsi laiust riba [32]. Kalfusi ja Hegri [33] hinnangul võimaldab UNB Sigfoxil teiste tehnoloogiate seas esile tõusta mürataluvuse ja saavutatava distantssi osas. Põhjusteks on, et kitsale vahemikule satub harvemini raadiohäireid, mis omakorda alandab üldist ülekanne nurjumise tõenäosust ja laseb edukalt vastu võtta kuni -142 dBm hääbunud signaali (RSSI). 100 Hz laiused sõnumid jaotatuna 0,2 MHz ribale tähendab, et pääsupunkt kuulab samaaegselt ligi 2000 teoreetilisel vahemikul, pakkudes küllaldaselt ribalaiust samaaegseteks ülekanneteks ka kasutataval ALOHA mehhanismil.

Teenus lubab maksimaalselt 12 baidi pikkuseid sõnumeid, seadme kohta kuni 140 üleslink ja nelja kaheksabaidist allalink paketti päevas, kusjuures allalink suhtlus on võimalik ainult vastuvõtuaknas, mis avaneb lühidalt peale üleslink sõnumi saatmist. Piirangutega vähendatakse seadmete eetriaega, sõnumite põrkumise tõenäosust ning kokkuvõttes tagatakse võrgu töökindlus ka suurema liikluse puhul. Ühe 12 baidise paketi saatmine võtab aega 2,08 sekundit, mida korratakse kolmel erineval sagedusel, mis tähendab halvimal juhul kuni 6,24 sekundilist latentsi.

Sigfoxi tehnoloogia kasutamine on võimalik ainult läbi ettenähtud ökosüsteemi. Kasutaja peab registreerima end, oma seadmed ning tasuma seadmepõhist ühendustasu. Leviala eest vastutavad Sigfoxi partnerid erinevates riikides, kes haldavad tugijaamu — Eestis

Connected Baltics [34]. Rakendusliidesega on võimalik korraldada suhtlust füüsiliste seadmetega, suunates kuulnud paketid oma rakendustesse ning saata lõppseadmetele sõnumeid tagasi.

2.3.2 LoRaWAN

LoRa (tuletatud *Long Range*) on nimetus füüsilisele kihile, mille on välja arendanud USA ettevõtte Semtech [35]. LoRaWAN (Wide Area Network) on sellele loodud protokoll, mis defineerib võrgu arhitektuuri ning võrgu- ja transpordikihi [36]. Protokoll edendaja on ülemaailmne mittetulundusühendus LoRa Alliance – grupp ettevõtteid, kelle ühine eesmärk on luua üldine LPWAN digitaalne ökosüsteem, mis toetaks mastaapsete IoT lahenduste juurutamist litsenseerimata raadiosagedusvahemikes [37].

LoRa modulatsioon on firmaomane ning kuigi selle spetsifikatsiooni pole ametlikult avaldatud, on signaali analüüsitud mitmetes teadustöodes, sh Vangelista [38] poolt. Vangelista iseloomustab seda kui sagedusnihkega sirtsmodulatsiooni, sest bitivoogu kantakse üle sirtsudega (lühikeste tõusude ja langustega sageduses), mis on sümboliteks kodeeritud sagedushüpetega. LoRa võimaldab saatjatel vabalt valida laotustegurit (ingl spreading factor), saavutamaks paremat signaali robustsust andmekiiruse arvelt [39]. Laotustegur on parameeter signaali bitikiiruse arvutamisel ehk teisisõnu määrab see aja, mis kulub ühe sümboli saatmiseks — suurendades laotustegurit on saadetavad sirtsud venitatud pikema aja peale ning kaotatakse kiiruses, seevastu piisab andmete edukaks demoduleerimiseks nõrgemast signaalist. Oulu ülikoolilinnakus läbi viidud katsete kohaselt on LoRa seadmed võimelised suhtlema laotusteguri suurenedes -116 dBm kuni -137 dBm signaalitugevustel [21]. Laotustegur on täisarv vahemikus 7–12 ning vastavad tavapärases 125 kHz kanalis 27–0,3 kbps andmekiirustele [40].

LoRaWAN rõhub lihtsusele ja paindlikkusele, kasutades tähekujulist topoloogiat ning sümmeetrilist signaali üles- ja allalink suhtluseks, mis võimaldab sama riistvara kasutada nii pääsupunkti kui lõppseadme rollis [36]. Protokoll on üksikasjalikult kirjeldatud avalikus LoRaWANi spetsifikatsioonis [41], mistõttu on kõigil võimalik luua universaalselt ühilduvaid seadmed või koguni omaenda võrk. Spetsifikatsiooni kohaselt on seadmetel kolm töörežiimi, mis pakuvad erinevaid võimalusi latentsi või voolutarbe vähendamiseks:

- “A”-klass seadmetele ALOHA meetodil sõnumeerimiseks, mis ei sõltu latentsitundlikutest allalink sõnumitest ehk võtavad infot vastu ainult üleslink saatele järgnevas ajaaknas, veetes muu aja energiasäästlikus olekus,
- “B”-klass sisaldab “A”-klassi funktsionaalsusi, kuid võimaldab eelnevalt kokku leppida seadme kättesaadavuse ajaaknad, kulutades rohkem energiat sidekanali perioodilisele kuulamisele,
- “C”-klass tähendab pidevat kuulamist ehk kahepoolne sõnumeerimine võib toimuda igal ajal.

Avatud protokollitõttu loob LoRaWAN unikaalse maastiku LPWAN teenustele. Eesti esimene ja suurim LoRaWAN teenusvõrk on Levikomi NORAnet, mille tugijaamad asuvad kõigis maakonnakeskustes [42]. Alternatiivselt võib kasutada kogukonnale tuginevat The Things Network (TTN) võrku, või hostida avaliku lähtekoodiga rakendusserverit nagu ChirpStack koos isiklike tugijaamadega. TTN on tasuta LoRaWAN teenus mille leviala pakkujateks on vabatahtlikud üle maailma.

2.3.3 NB-IoT

Mobiilsidestandardite looja 3GPP avaldas 13. väljaandes spetsifikatsiooni mitmele IoT rakendustele suunatud tehnoloogiatele: LTE-M, NB-IoT ja EC-GSM-IoT [43]. Xu jt [44] hinnangul on tegemist mobiilside ettevõtete vastusega vaba sagedusala põhiste LPWAN tehnoloogiatele, pakkudes sobilikku lahendust ka mobiilsidespektrisse. Nimetatud tehnoloogiatest on antud töö kontekstis märkimisväärsim NB-IoT, mis on disainitud töötama sügaval sisetingimustes ja maapiirkonna nurgatagustes [45].

NB-IoT võtab disainilt eeskujult LTEst, kuid sellegipoolest pole tegemist omavahel ühilduvate standarditega [46]. Tehnoloogia eristub oma eelkäijatest voolutarbe ja levi optimeerimiseks tehtud muudatuste poolest, mille hulka kuuluvad uus energiat säästev olek (PSM) ja seadme allalink kättesaadavuse planeerimine (eDRX), lisaks ribalaiuse kitsendamise ja tsükkelkoodikontrolli suurendamine, millega saavutatakse 20 dB efektiivne signaalivõimendus üle LTE [44]. Nagu LTE, tugineb suhtlus internetiprotokollile, mis

tähendab seadme eksplitsiitset võrguga liitumist ja otse rakendusserveriga suhtlemist, suurendades üldkulu, kuid samas päritakse ennast tõestanud LTE turvamehhanismid [47]. Mitu uurimust [48, 49] soovib siiski NB-IoT puhul kasutada UDP-põhiseid sideprotokolle nagu CoAP (Constrained Application Protocol), mis sobivad paremini piiratud ressurssidega seadmetele ja kannatavad väiksema paketikao all.

Tehnoloogia pakub konkurentsi ka Sigfoxi ja LoRa robustsetele protokollidele. Analoo- giliselt LoRaWANi “B”-klassile saab eDRX abil allalink valmidust ka ette planeerida, hoides muul ajal PSM režiimiga kordades kokku transsiiveri tööaega ja saavutada 10 aastast aku eluiga, kui saata päevas keskmiselt 200 baiti [46]. Modem otsustab side kvaliteedile vastavalt ise, kui suure energia ja koodikontrolliga eetrisse minna, paranda- des signaali levi raskestipääsetavates kohtades, kusjuures koodikontrolli funktsionaalsus sarnaneb LoRa laotusteguriga, pikendades latentsi robustsema side eest [45]. Mozny jt [50] katsetustest tuleb välja, et tavapärastes oludes võib 500 baidise sõnumi latents küündida kuni seitsme sekundini, samas näitavad Martinez jt [45], et kõige halvema levi korral pole välistatud kuni 270 sekundiline viivitus, mis võib osutuda probleemiks latentsitundlikele rakendustele. NB-IoT üleslink andmekiirus on keskmiselt 20 kbps mis on LPWAN rakendusteks piisav, samas on allalink andmevahetus ebasümmeetrilise side tõttu igast küljest parem ja litsenseeritud mobiilside spektri tõttu ei toimu sidekanalil üldjuhul suuremaid raadiohäireid ega pörkumisi [46].

Wang jt [46] toovad välja, et sarnasused kahe standardi vahel on sihilikud kiirendamaks tehnoloogia kasutuselevõttu telekomiettevõtete ja kiibistike tootjate poolt. Esiteks on leviala juurutamine võimalik omistades ühe standardse 200kHz laiuse vahemiku ole- masolevas LTE rakus teenindama NB-IoT, mis tähendab, et tehnoloogia on lihtsasti integreeritav olemasolevatesse tugijaamadesse ja töötab paralleelselt LTEga. Teiseks ennustatakse, et riistvara ja tarkvara tarnimine on olemasolevatele LTE moodulite toot- jatele lihtsam. Üleüldiselt on protokolle lihtsustatud, et alandada kiibistike keerukust ja omakorda riistvara maksumust [44]. Eestis pakub NB-IoT leviala ainsana Telia, lubades katta kogu Eesti [51].

2.3.4 Muud tehnoloogiad

Kirjeldatud tehnoloogiad on töö kirjutamise hetkel kõige suurema mõju ja kajastusega LPWANid. Küll aga leidub sellesse võrguklassi pretendeerivaid tehnoloogiaid rohkem, osa neist mitte nii õnnestunud ning osa alles populaarsust kogumas.

Litsentseeritud sagedusalas leidub NB-IoTga samaaegselt loodud LTE-M, mille puhul on sarnaselt tegemist LTE vähendatud kujuga. Voolu säästmiseks kasutab tehnoloogia samu meetodeid, mis NB-IoT, kuid levivõimekus jääb tavalise LTE ja NB-IoT vahele [52]. Lauridseni jt [53] võrdlusest avaldub, et efektiivne signaalitugevus on 8 dB nõrgem, kuid seevastu saavutatakse kuni 1 Mbps andmeedastuskiirus, utiliseerides tervelt 1,4 MHz laiust riba. LTE-M on seetõttu vähemoptimeeritum sügavates siseruumides töötamisele kui NB-IoT, kuid sobilik harvade kuid suuremate andmete ülekandeks, kui leviala seadmeni ulatab.

Litsentseerimata sagedusalas

2.4 Seotud tööd

LPWAN on uus ja kiiresti arenev võrkude klass ning iga järjekordse tehnoloogia tulekuga põhjendab tihenev konkurents vajadust neid võrrelda ja verifitseerida. Võrdlevate uurimuste hulka kuuluvad enamjaolt erinevaid tehnoloogiaid kõrvutavad kirjandusülevaated ning simulatsioonimudeli analüüsid. Käesolevaga analoogilisi töid, kus kõrvutatakse mitut tehnoloogiat katselisel meetodil, on vähe publitseeritud. Sealhulgas ei leidu autorile teadaolevalt analüüsi, mis looks seoseid välikatsete tulemuste ja erinevate kasutusmallide vahel.

Eeskujulikuimad katsed on need, mis annavad ettekujutuse tehnoloogia piirjuhtudest saavutatava levi osas. Selliseid töid tehakse üldiselt ühele tehnoloogiale keskendudes – LoRaWANi puhul näiteks Petäjärvi jt välis- [54] ja sisetingimuste [21] levianalüüsid ning analoogiliselt Kalfuse ja Hégri [33] Sigfoxi võrgu testimine. Igas näites on põhiline küsimus signaali levimine reaalsetes oludes, mõõtes selleks signaalitugevust (RSSI), signaali ja müra suhet (SNR) ning kaotatud pakettide osakaalu. Ka käesolev töö arvestab

neid parameetreid hinnangute tegemisel, kuid asetab vähem rõhku katsete hulgale.

Erinevaid tehnoloogiaid korraga on kirjanduses katsetatud mitmel põhjusel. Del Campo jt [55] monitoorivad LoRaWANI ja Sigfoxi sensoreid paralleelselt ühes targa elektrivõrgu rakenduses, võrreldes peamiselt RSSI ja SNRi muutumist ajas, kusjuures LoRaWANI leviala loodi omal käel ning Sigfoxi puhul katsetati olemasolevat teenusvõrku. Palju mitmekülgsema testimise teevad Sikora jt [56], kelle töö hõlmab nii laboratoorseid kui ka maastikukatsetusi LoRaWANI, Sigfoxi, NB-IoT ja MIOTYga. Kokkuvõtvalt on näidatud iga tehnoloogia paketikadu erinevatelt kaugustelt tugijaamast, kuid katsekeskkond jääb suures osas kirjeldamata.

Laiemalt arutleb valitud tehnoloogiate kasutusmallide sobivuse ja mitesobivuse üle Sjöström [57] oma magistritöös. Diskussioon kaardistab hästi eeliseid ja puuduseid tehnoloogiate vahel ning toob välja kasutused, kus need nüansid kõige olulisemad on, tehes järeldusi vaid kirjanduse analüüsi põhjal. Käesolev töö on uudne, sest viib kokku kaks olulist poolt tehnoloogiate võrdlusel – teenuste katsetamise ja tulemuste põhjal kasutustele sobivuse järeldamise, moodustades terviku aitamaks lugejal luua aimdus konkureerivate tehnoloogiate reaalsest potentsiaalist.

3 Keskkonna ülesseadmine

Käesolevas peatükis tutvustatakse katsete läbi viimise keskkonda. Esimeses alapeatükis keskendutakse kasutatavale arendusplaadile, mis simuleerib lõppseadet IoT kontekstis. Seejärel kirjeldatakse teises peatükis alternatiivset lahendust LPWAN leviala tagamiseks, luues oma LoRaWANi tugijaam. Kolmandas peatükis kirjeldatakse katsete metoodikat – loetletakse üles testitavad teenused ning põhjendatakse mõõdetavaid parameetreid teenuste ja keskkondade lõikes.

3.1 Arendusplaat FiPy

Pycom toodab IoT arenduskomplekte, mis võimaldavad arendajatel hõlpsalt prototüüpida oma IoT lahendusi ning katsetada sealjuures erinevaid sidetehnoloogiaid. FiPy on ESP32 mikrokontrolleri põhine arendusplaat, mis on programmeeritav MicroPythonis ning on integreeritud mitme erineva LPWAN tehnoloogiaga: LoRa, Sigfox, NB-IoT ja LTE-M. Tootja tarnib oma tooted enda MicroPythoni raamistikega, mis sisaldab teeke iga tehnoloogia mugavaks käima saamiseks.

Seadme programmeerimiseks, koodi käitamiseks ja toiteks kasutatakse laiendusplaati Expansion Board v3.1, mis võimaldab REPL keskkonna käitamist üle USB. Lisaks kuuluvad komplekti veel isotroopiline 868 MHz antenn Sigfoxi ja LoRa jaoks ning mobiilsideantenn NB-IoT jaoks. Testimiseks kasutatav seade on kujutatud joonisel 1.

FiPy on katsetes lõppseadme rollis, ehk simuleerib üksikut IoT seadet suhtlemas iga uuritava LPWANi võrgu tugijaamadega. Lõppseadme vaatepunktist loob kirjeldatud kõik-ühes süsteem igati võrdsed tingimused katsete teostamiseks igale tehnoloogiale, arvestades järgmiseid asjaolusid:

- arendusplaat kasutab usaldusväärseid OEM modemeid,
- kõik tehnoloogiad jagavad üht riistvara,
- arendusplaat ei ületa sätestatud signaali võimsusi,

- antennid on seadmele kalibreeritud, kusjuures Sigfox ja LoRa kasutavad sama antenni.

Katsete käigus kasutatakse lõppseadet, et luua side Sigfoxi, NORAneti, Telia NB-IoT ja isikliku LoRaWAN tugijaamaga strateegilistest kohtadest, mis on täpsemini kirjeldatud peatükis 4.3. Kasutatud Micropython kood on välja toodud lisades (Lisa 1).

3.2 LoRaWAN tugijaam

Juhul kui ükski valmisvõrk ei ole rakenduseks sobilik, on võimalik luua isiklik LoRaWANi võrk või leviala. Esimese eelduseks on rakendusserver, milleks võib olla avalik võrk, nagu TTN või isiklikult hostitud LoRaWAN serveri implementatsioon. Oma levialaks on vajalik tugijaam, mis on ühelt poolt LoRaWANi sagedustel pidevalt kuulav LoRa seade ning teiselt poolt paketiedastaja, mis suhtleb rakendusserveriga ning edastab kuulnud pakette. Sellise paketiedastaja lihtsaimal kujul ehitamiseks on vaja LoRa transsiivermoodulit ning Internetivõimekusega mikrokontrollerit või Raspberry Pi-d. Sõltuvalt konfiguratsiooni populaarsusest on võrdlemisi lihtne oma riistvarale leida avalik koodirepositoorium, millega LoRaWAN spetsifikatsioonile vastav tugijaam üles seada.

Töö raames kasutatav seade on WiFi toega ESP32 mikrokontrolleri põhine arendusplaat “TTGO V1”, millel on Semtechi SX1276 LoRa transsiiver. Tugijaam on lisaks varustatud lühikese isotroopilise LoRa antenniga ja displeiga ning on koos akutoitega ilmastikukindlas karbis, et seda oleks lihtne välioludes rakendada (joonis ?). Mikrokontroller on programmeeritud avalikust repositooriumist laenatud koodiga, mis võimaldab tööajal kaudset configureerimist ja monitoorimist üle veebi (joonis ?). Rakendusserverina kasutab seade TTN avalikku võrku.

Katsetugijaam on lihtsasti teisaldatav erinevatesse kohtadesse ning pääseb võrku läbi kaasasoleva WiFi pääsupunkti, mis on omakorda ühendatud LTE modemiga. Oluline on märkida, et tugijaam pole riistvarast tingitud piirangute tõttu täielikult LoRaWAN spetsifikatsioonile vastav ning on seetõttu sobiv vaid prototüüpimiseks. Erinevus täisväärtusliku tugijaamaga tuleneb transsiivermoodulist, mis on töökindel korraga teenindama vaid ühel kanalil ja laotusteguril. Sellise lahenduse mastaapne kasutamine võib liigselt

koormata kitsast vahemikku 868 MHz sagedustel ning tekitada häireid teistele sama piirkonna LoRa rakendustele. Erinevus kajastub ka hinnaklassis — täisvõimekusega LoRa modemi maksumus on 50-300€, käesoleva hind umbes 5€.

3.3 Metoodika

Täpne kirjeldus, mida testitakse, teenuste lõikes

Järgnevalt kirjeldatakse lühidalt, milliseid kasutusmalle erinevate tehnoloogiatega läbi mängitakse ning põhjendatakse katsete meetodeid. Huvi pakkuvaid kriteeriume kontrollitakse kolmes keskkonnas, mis on omakorda käsitletud eraldi alapeatükkides: maapiirkond, linnapiirkond ja liikuv tugijaam.

3.3.1 Maapiirkond

Käesolevas töös mõeldakse maapiirkonna all väiksema hoonestusega alasid, kus puuduvad side häirivate faktoritena kõrghooned jm, kuid leidub maastikku ja metsa. Kesken-
datakse eelkõige keskkonna- ja põllumajandusrakenduste kriteeriumitele: levikaugus ja teenuse kvaliteet nii tugijaama silmsidega kui silmsideta seadmetel.

3.3.2 Linnapiirkond

Linnapiirkonna puhul peetakse silmas tihedat asustust. Kontrollitakse targa linna keskseid rakendusi, kus lõppseadmed asetsevad kohtades nagu korterid, keldrid või on varjatud hoonete ja muude takistustega, mis mõjutavad signaali levi. Olulisemad kriteeriumid, mis annavad tehnoloogiale eelise on läbistavus ja peegeldumine.

Piirkond hõlmab peamiselt Tartu Annelinna ja Jaamamõisa linnaosasid. Side luuakse varieeruvates sügavustest kortermajade varjust, kortermajade sisemustes ja keldrites.

3.3.3 Liikuv tugijaam

Eraldiseisvalt uuritakse veel andmete kogumist transporditavalt tugijaamalt. Kasutatakse loodud tugijaama ning võetakse mõõtmisi maksimaalselt 200 meetrilt maapinnalt.

4 Tulemused

Siia ilmuvad katsete tulemused, kaardid ja tabelid

5 Diskussioon

Siia ilmub arutlus/analüüs, mis tehnoloogia on sobiv erinevatele kasutusjuhtudele, milline ei sobi üldse jne. Ühtlasi ilmutatakse siin vastus uurimisküsimusele

6 Kokkuvõte

Viidatud kirjandus

- [1] Sarath Chandu Gaddam and Mritunjay Kumar Rai. A comparative study on various lpwan and cellular communication technologies for iot based smart applications. In *2018 International Conference on Emerging Trends and Innovations In Engineering And Technological Research (ICETIETR)*, pages 1–8. IEEE, 2018.
- [2] Jayavardhana Gubbi, Rajkumar Buyya, Slaven Marusic, and Marimuthu Palaniswami. Internet of things (iot): A vision, architectural elements, and future directions. *Future generation computer systems*, 29(7):1645–1660, 2013.
- [3] Aloÿs Augustin, Jiazi Yi, Thomas Clausen, and William Mark Townsley. A study of lora: Long range & low power networks for the internet of things. *Sensors*, 16(9):1466, 2016.
- [4] Malo Mabon, Matthieu Gautier, Baptiste Vrigneau, Mickaël Le Gentil, and Olivier Berder. The smaller the better: Designing solar energy harvesting sensor nodes for long-range monitoring. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2019, 2019.
- [5] Chii Chang, Satish Narayana Srirama, and Rajkumar Buyya. Internet of things (iot) and new computing paradigms. *Fog and edge computing: principles and paradigms*, pages 1–23, 2019.
- [6] Emil Nilsson and Christer Svensson. Power consumption of integrated low-power receivers. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 4(3):273–283, 2014.
- [7] Min Chen, Yiming Miao, Xin Jian, Xiaofei Wang, and Iztok Humar. Cognitive-lpwan: Towards intelligent wireless services in hybrid low power wide area networks. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 3(2):409–417, 2018.
- [8] Haider Mahmood Jawad, Rosdiadee Nordin, Sadik Kamel Gharghan, Aqeel Mahmood Jawad, and Mahamod Ismail. Energy-efficient wireless sensor networks for precision agriculture: A review. *Sensors*, 17(8):1781, 2017.

- [9] Sani Abba, Jonah Wadumi Namkusong, Jeong-A Lee, and Maria Liz Crespo. Design and performance evaluation of a low-cost autonomous sensor interface for a smart iot-based irrigation monitoring and control system. *Sensors*, 19(17):3643, 2019.
- [10] Wael Guibene, Johannes Nowack, Nikolaos Chalikias, Kevin Fitzgibbon, Mark Kelly, and David Prendergast. Evaluation of lpwan technologies for smart cities: River monitoring use-case. In *2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, pages 1–5. IEEE, 2017.
- [11] Yan-Ting Liu, Bo-Yi Lin, Xiao-Feng Yue, Zong-Xuan Cai, Zi-Xian Yang, Wei-Hong Liu, Song-Yi Huang, Jun-Lin Lu, Jing-Wen Peng, and Jen-Yeu Chen. A solar powered long range real-time water quality monitoring system by lorawan. In *2018 27th Wireless and Optical Communication Conference (WOCC)*, pages 1–2. IEEE, 2018.
- [12] Carlos Moreno, Raúl Aquino, José Ibarreche, Ismael Pérez, Esli Castellanos, Elisa Álvarez, Raúl Rentería, Luis Anguiano, Arthur Edwards, Paul Lepper, et al. Rivercore: Iot device for river water level monitoring over cellular communications. *Sensors*, 19(1):127, 2019.
- [13] Markus Knoll, Philipp Breitegger, and Alexander Bergmann. Low-power wide-area technologies as building block for smart sensors in air quality measurements. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, 135(6):416–422, 2018.
- [14] James Jin Kang, Iryna Khodasevych, and Sasan Adibi. A disaster recovery system for location identification-based low power wide area networks (lpwan). In *27th International Telecommunication Networks and Applications Conference*, pages 1–6, Melbourne, 2017. VIC.
- [15] Andrea Zanella, Nicola Bui, Angelo Castellani, Lorenzo Vangelista, and Michele Zorzi. Internet of things for smart cities. In *IEEE Internet of Things Journal*, volume 1, pages 22–32. IEEE, 2017.
- [16] Sten Laurit. Eesti madalpingevõrgu analüüs kaugloetavate arvestite baasil, 2017.

- [17] Tulevaks aastaks tuleb gaasiarvestid välja vahetada. <https://www.err.ee/1002491/tulevaks-aastaks-tuleb-gaasiarvestid-valja-vahetada>, 2019. (07.03.2020).
- [18] Lorenzo Germani, Vanni Mecarelli, Giuseppe Baruffa, Luca Rugini, and Fabrizio Frescura. An iot architecture for continuous livestock monitoring using lora lpwan. *Electronics*, 8(12), 2019.
- [19] Q. Li, Z. Liu, and J. Xiao. A data collection collar for vital signs of cows on the grassland based on lora. In *IEEE 15th International Conference on e-Business Engineering*, pages 213–217, Oct 2018.
- [20] Damilola D. Olatinwo, Adnan Abu-Mahfouz, and Gerhard Hancke. A survey on lpwan technologies in wban for remote health-care monitoring. In *Sensors*, volume 19, 2019.
- [21] Juha Petäjäjärvi, Konstantin Mikhaylov, Rumana Yasmin, Matti Hämäläinen, and Jari Iinatti. Evaluation of lora lpwan technology for indoor remote health and wellbeing monitoring. In *10th Int. Symp. Med. Inf. Commun. Technol. (ISMICT)*, pages 1–5, 2017.
- [22] D. H. Kim, J. B. Park, J. H. Shin, and J. D. Kim. Design and implementation of object tracking system based on lora. In *2017 International Conference on Information Networking (ICOIN)*, pages 463–467, Jan 2017.
- [23] T. Hadwen, V. Smallbon, Q. Zhang, and M. D’Souza. Energy efficient lora gps tracker for dementia patients. In *2017 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, pages 771–774, July 2017.
- [24] K. Kusuda and M. Iwata. Application-oriented lpwa network with a moving gateway and stationary end-nodes. In *2019 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, pages 2351–2356, Oct 2019.
- [25] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara. Low power wide area networks: An overview. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 19(2):855–873, Secondquarter 2017.

- [26] J. Bardyn, T. Melly, O. Seller, and N. Sornin. Iot: The era of lpwan is starting now. In *ESSCIRC Conference 2016: 42nd European Solid-State Circuits Conference*, pages 25–30, Sep. 2016.
- [27] B. Reynders, W. Meert, and S. Pollin. Range and coexistence analysis of long range unlicensed communication. In *2016 23rd International Conference on Telecommunications (ICT)*, pages 1–6, May 2016.
- [28] Giuseppe Anastasi, Marco Conti, Mario Di Francesco, and Andrea Passarella. Energy conservation in wireless sensor networks: A survey. *Ad Hoc Networks*, 7(3):537–568, 2009.
- [29] M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella, and M. Zorzi. Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the iot and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications*, 23(5):60–67, October 2016.
- [30] Claire Goursaud and Jean-Marie Gorce. Dedicated networks for iot: Phy / mac state of the art and challenges. *EAI endorsed transactions on Internet of Things, European Alliance for Innovation*, 2015.
- [31] Short Range Devices (SRD) operating in the frequency range 25 MHz to 1 000 MHz; Part 2: Harmonised Standard for access to radio spectrum for non specific radio equipment. https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300200_300299/30022002/03.02.01_30/en_30022002v030201v.pdf. (07.03.2020).
- [32] Sigfox technical overview. <https://www.disk91.com/wp-content/uploads/2017/05/4967675830228422064.pdf>. (10.03.2020).
- [33] Radim Kalfus and Tomáš Hégr. Ultra narrow band radio technology in high-density built-up areas. In *International Conference on Information and Software Technologies*, pages 663–676. Springer, 2016.
- [34] Sigfox. <https://www.sigfox.com/en/coverage>. (07.03.2020).
- [35] What is LoRa. <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>. (07.03.2020).
- [36] What is LoRaWAN. <https://loro-alliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf>. (07.03.2020).

- [37] LoRa Alliance. <https://lora-alliance.org/about-lora-alliance>. (07.03.2020).
- [38] L. Vangelista. Frequency Shift Chirp Modulation: The LoRa Modulation. *IEEE Signal Processing Letters*, 24(12):1818–1821, Dec 2017.
- [39] LoRa modulation basics. <http://wiki.lahoud.fr/lib/exe/fetch.php?media=an1200.22.pdf>. (07.03.2020).
- [40] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui, and T. Watteyne. Understanding the limits of lorawan. *IEEE Communications Magazine*, 55(9):34–40, Sep. 2017.
- [41] LoRaWAN 1.1 Specification. https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm_specification_v1.1.pdf. 07.03.2020.
- [42] Asjade interneti võrk sai uue tehnoloogia. <https://www.logistikauudised.ee/uudised/2019/04/01/asjade-interneti-vork-sai-ue-tehnoloogia>. 07.03.2020.
- [43] 3GPP Standards for the Internet-of-Things. https://www.3gpp.org/images/presentations/3GPP_Standards_for_IoT.pdf. 07.03.2020.
- [44] J. Xu, J. Yao, L. Wang, Z. Ming, K. Wu, and L. Chen. Narrowband internet of things: Evolutions, technologies, and open issues. 5(3):1449–1462, June 2018.
- [45] B. Martinez, F. Adelantado, A. Bartoli, and X. Vilajosana. Exploring the performance boundaries of nb-iot. 6(3):5702–5712, June 2019.
- [46] Y. . E. Wang, X. Lin, A. Adhikary, A. Grovlen, Y. Sui, Y. Blankenship, J. Bergman, and H.Š. Razaghi. A primer on 3gpp narrowband internet of things. 55(3):117–123, March 2017.
- [47] S.Š. Basu, A. K. Sultania, J. Famaey, and J. Hoebeke. Experimental performance evaluation of nb-iot. In *2019 International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, pages 1–6, Oct 2019.

- [48] J. Wirges and U. Dettmar. Performance of tcp and udp over narrowband internet of things (nb-iot). In *2019 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System (IoTaIS)*, pages 5–11, Nov 2019.
- [49] Anna Larmo, Antti Ratilainen, and Juha Saarinen. Impact of coap and mqtt on nb-iot system performance. 19(1):7, March 2019.
- [50] R. Mozny, P. Masek, M. Stusek, K. Zeman, A. Ometov, and J. Hosek. On the performance of narrow-band internet of things (nb-iot) for delay-tolerant services. In *2019 42nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, pages 637–642, July 2019.
- [51] Telia avas eestit katva asjade interneti võrgu. <https://www.telia.ee/uudised/telia-avas-eestit-katva-asjade-interneti-vorgu>. 07.03.2020.
- [52] Badr Eddine Benhiba, Abdessalam Ait Madi, and Adnane Addaim. Comparative study of the various new cellular iot technologies. In *2018 International Conference on Electronics, Control, Optimization and Computer Science (ICECOCS)*, pages 1–4. IEEE, 2018.
- [53] Mads Lauridsen, IstvánŽ Kovács, Preben Mogensen, Mads Sorensen, and Steffen Holst. Coverage and capacity analysis of lte-m and nb-iot in a rural area. In *2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, pages 1–5. IEEE, 2016.
- [54] Juha Petajajarvi, Konstantin Mikhaylov, Antti Roivainen, Tuomo Hanninen, and Marko Pettissalo. On the coverage of lpwans: range evaluation and channel attenuation model for lora technology. In *2015 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, pages 55–59. IEEE, 2015.
- [55] Guillermo del Campo, Igor Gomez, Guillermo Cañada, and Asuncion Santamaria. Hybrid lpwan communication architecture for real-time monitoring in power distribution grids. In *2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, pages 920–924. IEEE, 2019.
- [56] Axel Sikora, Manuel Schappacher, Zubair Amjad, et al. Test and measurement of lpwan and cellular iot networks in a unified testbed. In *2019 IEEE 17th International*

Conference on Industrial Informatics (INDIN), volume 1, pages 1521–1527. IEEE, 2019.

- [57] Daniel Sjöström. Unlicensed and licensed low-power wide area networks: Exploring the candidates for massive iot, 2017.

Viidete formaat. Osad viited veel käsitsi pandud, mistõttu on numbrid valed

Lisad

I. Testskriptid

II. Litsents

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, **Kert Tali**,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose
Tartu LPWAN võrkude võrdlus ja kasutusmallid,
mille juhendaja on Alo Peets,
reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Kert Tali

pp.kk.aaaa