

LATVIJAS UNIVERSITĀTE
DATORIKAS FAKULTĀTE

**LoRaWAN datu pārraides tīkla veikspējas
novērtējums Rīgas pilsētā un tās apkaimē**

BAKALaura DARBS

Autors: **Elvijs Ernests Viļķels**

Studenta apliecības nr.: ev14027

Darba vadītājs: Dr.dat. Reinholds Zviedris

RĪGA 2018

ANOTĀCIJA

Zemas enerģijas patēriņa, plaša pārklājuma datu pārraides tehnoloģijas (LPWAN) pēdējo gadu laikā arvien vairāk tiek izmantotas dažādu tautsaimniecības problēmu risināšanai. Paralēli noris aktīvi šo tehnoloģiju pētījumi un attīstība, kā arī meklēti praktiski tehnoloģiju pielietojumi lietu interneta (*Internet of Things* jeb IoT) vidē.

Darba mērķis ir izpētīt zemas enerģijas patēriņa, liela pārklājuma bezvadu datu pārraides tehnoloģijas un to realizāciju ar LoRaWAN tehnoloģijas palīdzību. Papildu teorētiskajiem pētījumiem, darba mērķis ir praktiski pārbaudīt, vai LoRaWAN datu pārraides pārklājums atbilst dokumentācijā aprakstītajam, ka pilsētā tas var sasniegt līdz pat 8 km distanci.

Darba praktiskajā daļā, lai veiktu pārklājuma mērījumus, apgūti iekārtu izstrādes principi un prototipēšanas iemaņas, praktiski izveidojot LoRaWAN raidītāja iekārtu, kas apvienota ar GPS raidītāju un spēj nosūtīt uz bāzes stacijām savu aktuālo atrašanās vietu. Līdztekus raidītāja izstrādei, darbā tika pētīta LoRaWAN bāzes staciju uzstādīšana un to pieslēgšana bāzes tīklam – *The Things Network*, kā arī izstrādāta *Javascript* tīmekļa lietotne, lai varētu vizuāli attēlot veiksmīgi saņemtās raidītāja sūtītās datu paciņas ar atrašanās vietas datiem.

Darba rezultātā autoram izdevās sasniegt izvirzīto darba mērķi, izstrādāt LoRaWAN raidītāja iekārtu un pieslēgt to TTN bāzes servera tīklam. Tika sasniegti veiksmīgas komunikācijas rezultāti, ka raidītāja iekārta varēja nolasītos atrašanās vietas datus pārsūtīt tīklā uz bāzes staciju un tos tālāk apstrādāt autora pielāgotā tīmekļa lietotnē. Autors izpētīja LPWAN tehnoloģijas, konkrētāk analizējot LoRaWAN datu pārraides tehnoloģiju un LoRa standartu. Darba noslēgumā izstrādātā raidītāja iekārta būtu izmantojama, lai papildinātu LoRaWAN TTN tīkla vizualizēto pārklājumu.

Atslēgvārdi: LoRaWAN, lietu internets, bezvadu sensoru tīkli, *The Things Network*, tīkla pārklājuma mērījumi.

ABSTRACT

LORAWAN WIRELESS COMMUNICATION NETWORK PERFORMANCE EVALUATION IN RIGA AND ITS SURROUNDINGS

Low power wide area network technologies (LPWAN) have been widely used in recent years to address different economic challenges. In parallel there is active research and development going of these technologies, as well as practical technology applications implemented in the Internet of Things (IoT) environment.

The work aims to explore low-energy wide area wireless network technologies and more in detail - LoRaWAN technology. In addition to theoretical studies, the purpose of the work is to ensure that the coverage of the data transmitted by LoRaWAN complies with the information described in the documentation that it can reach up to 8 km distance in the urban areas.

As a practical assignment author developed a LoRaWAN transmitter node combined with a GPS transmitter and functionality of sending its current location to the base station for data coverage measurements as well improved his device development principles and prototyping skills. Alongside development of the transmitter node author studied deployment of LoRaWAN base stations and connecting them with The Things Network. Custom web application was developed with multiple *JavaScript* frameworks to visually represent successfully transmitted node location data.

As a result of the work, the author managed to develop a LoRaWAN transmitter node and connect it to the TTN network. Successful communication was achieved between transmitter node and base stations. Node could read the location data and transmit the data to base stations. Author researched LPWAN technologies, more in detail analysing LoRaWAN technology and LoRa standard. Developed transmitter node could be used to further contribute to the visualized coverage of the LoRaWAN TTN network within Riga city and its surroundings.

Keywords: LoRaWAN, IoT, wireless sensor networks, *The Things Network*, network coverage measurements.

SATURA RĀDĪTĀJS

APZĪMĒJUMU UN SAĪSINĀJUMU SARAKSTS	6
IEVADS	7
1. MOTIVĀCIJA	8
1.1. Bezvadu datu pārraides paņēmieni	8
1.2. Vides pētnieku datu ievākšana.....	8
2. ESOŠO RISINĀJUMU APSKATS	10
2.1. Komunikācijas tehnoloģijas.....	10
2.1.1. BLE [3], RFID [4] un NFC [5]	10
2.1.2. Wireless Local Area Network (WLAN) un WiFi.....	10
2.1.3. Mobilo datu pārraides tehnoloģija	11
2.1.4. ZigBee [8].....	11
2.1.5. LPWAN zema patēriņa tīkla protokoli	11
2.2. LoRa un LoRaWAN	13
2.3. Komunikācijas tīkla iekārtas.....	14
2.3.1. LoRaWAN bāzes stacija	15
2.4. Tīkla pārklājuma serveris	15
2.4.1. The Things Network būtība un nozīme	15
2.4.2. TTN arhitektūras darbības princips.....	16
2.4.3. LoRaWAN un TTN komunikācija un drošība.....	17
3. AUTORA EKSPERIMENTA APRAKSTS	19
3.1. LoRaWAN bāzes stacijas iekārta	19
3.2. LoRaWAN bezvadu datu raidītāja iekārta	19
3.2.1. Iekārtas arhitektūras apraksts.....	20
3.2.2. Iekārtas moduļu komunikācija un darbības principi	21
3.2.3. Strāvas sprieguma loģikas konversijas līmeņa modulis.....	22
3.2.4. Iekārtas programmatūras struktūras apraksts.....	23

3.3.	LoRaWAN komunikācijas tīkla struktūra.....	26
3.3.1.	The Things Network tīkla lietotnes.....	26
3.3.2.	Sevis pielāgota datu vizualizācijas lietotne izmantojot TTN API.....	27
3.3.3.	<i>The Things Network</i> tīkla noslogotība un ierobežojumi.....	29
	REZULTĀTI.....	30
	SECINĀJUMI.....	32
	PATEICĪBAS.....	33
	IZMANTOTĀ LITERATŪRA UN AVOTI.....	34
	PIELIKUMI.....	37
	Pielikums 1. Raidītāja iekārtas moduļu izmaksu novērtējums.....	37
	Pielikums 2. Izstrādāta raidītāja iekārta gatava programmas augšupielādei un testēšanai.....	38
	Pielikums 3. Maketēšanas plates moduļu izvietojuma shēma.....	39
	Pielikums 4. TTN datu API raidītāja iekārtas saņemtais ziņojums.....	40
	Pielikums 5. Raidītāja iekārtas programmatūras pirmkods.....	41

APZĪMĒJUMU UN SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

Apzīmējums, saīsinājums	Skaidrojums
API	Lietojumprogrammas saskarne
BLE	Zemāka patēriņa Bluetooth datu raidīšana tehnoloģija
CSS	Čirkstu signāla izplatīšanās spektrs (<i>chirp spread spectrum</i>)
GNSS	Globālā navigācijas satelītu sistēma
GPS	Globālās pozicionēšanas satelīts
LoRaWAN	Plaša pārklājuma platjoslas interneta tehnoloģija
LPWAN	Zemas enerģijas patēriņa platjoslas internets
MAC	Fiziskās piekļuves vadības protokols
MQTT	Mašīnas-mašīnas lietu interneta sakaru protokols
NFC	Tuva darbības lauka sakari
RFID	Radio frekvences identifikācija
SDK	Programmatūras izstrādātāja rīkkopa
SPI	Seriālā perifēriālā saskarne
<i>The Things Network</i>	LoRaWAN tīkla bāzes serveris un kopīga atvērta kopiena.
TTN konsole	<i>The Things Network</i> bāzes servera konsoles rīks

IEVADS

Liela daļa mūsdienu tehnoloģiskā saziņa sastāv no bezvadu datu pārraides tehnoloģijām. Populārākās no tām, kas nodrošina datu pārsūtīšanu uz bāzes stacijām vai torņiem ir Wi-Fi, ir Bluetooth un 3G/4G tehnoloģijas. Mazāk pazīstamas ir LPWAN tehnoloģijas, kas ir plaša pārklājuma, zemas enerģijas platjoslas interneta pārraides tehnoloģijas, kas visbiežāko pielietojumu ir radušas tieši lietu interneta risinājumos, jo atļauj plašāku pārklājumu nekā iepriekš pieminētie tīkla protokoli. Tiesa, modernie M2M (*Machine-to-machine*) saziņas protokoli arī spēj raidīt apjomīgus datu ziņojumus plašā rādiusā, tomēr to darbību ierobežo enerģijas patēriņš, kas atkarīgs no baterijas darbības ilguma. Arī to uzstādīšana ir diezgan dārga – gan komponentu, gan apkalpošanas ziņā.

LPWAN tehnoloģijas labi noder iekārtu uzstādīšanai, kurām jāpārsūta maza apjoma dati plašā pārklājumā, tikmēr saglabājot baterijas enerģijas kapacitāti, lai iekārtu varētu darbināt vairākus mēnešus. Dažādām lietu interneta iekārtām nepieciešams pārsūtīt ļoti mazus datu apjomus retā laika intervālā, piemēram, autostāvvietu novietnes sensors, kas paziņo par autostāvvietas vietu stāvokli tikai tad, kad vieta tiek atbrīvota vai aizņemta.

Darba mērķis ir izstrādāt zemas enerģijas patēriņa, liela pārklājuma bezvadu datu raidītāja iekārtu, izmantojot LoRaWAN tīkla tehnoloģijas raidītāju un GPS signāla uztvērēju iekārtas atrašanās vietas noteikšanai. Iekārtas izstrādāšana nozīmētu LPWAN tehnoloģiju izpēti. No LPWAN protokola steka darbā tiek pētīts LoRaWAN datu pārraides modulis, tā darbības principi un pārraidīto datu struktūra.

LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*) ir plaša pārklājuma datu pārraides protokols. Pie veiksmīga bāzu staciju novietojuma ar datu raidītājiem pilsētvidē iespējams nosūtīt datus līdz pat 8 km attālumā. Darbā veikto mērījumu salīdzināšanai tika izstrādāta *Javascript* ietvaru tīmekļa lietotne, kurā iekļautas TTN datu API funkcijas kopā ar servera datu bāzi, datu glabāšanai. Ar lietotni kartē var vizualizēt raidītāja atrašanās vietu konkrētajā pakešu sūtīšanas brīdī.

1. MOTIVĀCIJA

Pasaulē katru dienu aug savienoto, automatizēto un sensoru iekārtu skaits, kuras mēs vēlamies kontrolēt, vai kādā mērā uzraudzīt ar interneta starpniecību. Tās kļūst aizvien plašāk izmantotas, energoefektīvākas un lētākas, jo ražošanas paņēmieni un iekārtas laiku gaitā ir attīstījušās. Vairums šādu iekārtu tiek izmantotas, lai veidotu lietu interneta lietotnes, kur gala lietotājs var ar bezvadu tīklu palīdzību darbināt kādu attālinātu iekārtu vai sistēmu. Līdz ar lietu interneta iekārtu attīstību aug nepieciešamība un vajadzība pēc efektīvākas datu pārsūtīšanas tīklā. Šāda veida iekārtas potenciāli varētu ievērojami uzlabot iegūtās informācijas nekļūdīgumu un pēcāk iegūtos datus varētu analizēt, lai izdarītu nekļūdīgus secinājumus datu atbilstībai.

1.1. Bezvadu datu pārraides paņēmieni

Godrākie inženieri jau 19. gadsimtā varēja digitāli pārsūtīt datus izmantojot vadu savienojumus, tomēr bezvadu datu pārraide ir tā, kas šo visu revolucionēja. 1971. gadā Havaju salu universitātē tika pārraidīta pirmā komerciālā bezvadu datu pakete, izmantojot ALOHAnet, jeb vienkāršāk, ALOHA [1]. Bezvadu datu pārraidīšana patiesi sāka attīstīties pēc šī sasnieguma un vēlāk, 80. gadu beigās, tika attīstītas mobilo telefonu komunikācijas tehnoloģijas, kā 1G un 2G, ar kuru palīdzību varēja sūtīt SMS ziņas. Pēc radio frekvenču saprātīga sadalījuma komerciāliem nolūkiem varēja plānot dažādus datu pārraides paņēmienu, piemēram, Wi-Fi un 3G, kas zināms arī kā GPRS jeb standartizētais radio servisu pakešu raidītājs.

Kopš datu pārraides paņēmieni attīstības ir veidojušies spēcīgi platjoslas datu pārraides paņēmieni, kas pieļauj uzstādīt radio signālu bāzes stacijas, lai veidotu lielāku pārklājumu. Pēdējo gadu mērķis ir izveidot vienotu zema enerģijas patēriņa, plaša pārklājuma bezvadu platjoslas tīklu (LPWAN), kas attīstīs vienotu standartu dažādu viedo iekārtu komunikācijai. Šāda standarta ieviešana nozīmēs daudz vienkāršāku dažādu iekārtu attālinātu pārvaldību un uzraudzību.

1.2. Vides pētnieku datu ievākšana

Atbildīgie dienesti Latvijā rūpējas par savu dabu un dzīvniekiem. Dabas zinātnes nozarē Latvijā ir daudz kvalificētu pētnieku un studentu, kas ievāc un pēta dažādas dabas biosfēras un analizē to aktivitāti. Kā vieni no aktīvākajiem šajā nozarē uzskatāmi ornitologi. Tie ikgadēji putnu ligzdošanas sezonā uzrauga Latvijā ligzdojošo putnu ligzdas un uzskaita aizsargāto putnu sugas, kas ligzdo Latvijas teritorijā. Papildus ligzdu uzraudzīšanai, ornitologiem jāveic īpaši retu sugu putnu uzskaitē, to apgredzenošana un medicīniskie pārbaudījumi. Zema enerģijas

līmeņa patēriņa komunikācijas iekārtas varētu pētniekiem atvieglot datu ievākšanas procesus tos padarot automatizētus un pieejamus attālināti. Izmantojot bezvadu sensoru tīklu arhitektūru ar vairāku mezglu un pāris bāzes staciju izvietojumu.

Latvijā un citās Eiropas savienības valstīs pēc izdotiem normatīvajiem aktiem tiek ievēroti atmosfēras gaisa un nokrišņu piesārņojuma līmeņi pilsētās, kas tiek apdraudēti lielu ražotņu izplūdes gāzu un automobiļu izmešu dēļ. Lai gaisa monitorēšanas iekārtas, kas ievāc dažādu izplūdes gāzu datus ievāktu un segmentētu, būtu jāveic kopējā tīkla izveide, kur šīs stacijas būtu savienotas un ievāktie dati labi strukturizēti to analizēšanai. Šāda veida risinājums potenciāli būtu izstrādājams ar LoRaWAN raidītāja iekārtas palīdzību.

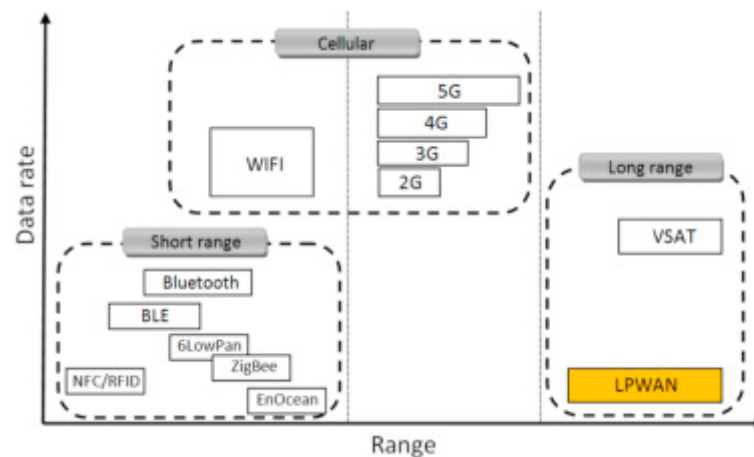
Dabas pētniekiem ir vēl dažādas nozares kā ūdens tīrība, augsnes un zemes virsmas apaugums, stāvkraustu erozija u.c., lai izdomātu konkrētu datu ievākšanas metodes, izmantojot sensoru iekārtas, un datus pārsūtītu uz vienotu vides pētījumu serveri, kur šos datus analizēt un dot dabas pētnieku atzinumus.

2. ESOŠO RISINĀJUMU APSKATS

Šīs nodaļas galvenais mērķis ir apskatīt dažādas komunikāciju tehnoloģijas un raidītāja un bāzes stacijas iekārtu iespējas. Esošo risinājumu pētīšana un tehnoloģiju apzināšana uzlaboja darba autora zināšanas konkrētajā sfērā, lai zināšanas varētu pielietot gan bakalaura darba izstrādē, gan tālākos eksperimentos.

2.1. Komunikācijas tehnoloģijas

Nodaļā ir aprakstītas komunikācijas tehnoloģijas, kuras nodrošina datu pārraidi starp raidītāja iekārtu un bāzes staciju. Tā kā raidītāja iekārta ir mobila un neatradīsies statiskā lokācijā, tad uzsvars tiek likts uz bezvadu datu pārraides tehnoloģijām. Galvenie kritēriji mobilo datu pārraides tehnoloģijām ir pārklājums, enerģijas patēriņš, joslas platums, radio mikroshēmas cena, radio abonementa izmaksas. [2]



2.1. att. LPWAN, mobilo datu pārraides un ZigBee salīdzinājums

2.1.1. BLE [3], RFID [4] un NFC [5]

Šīs tehnoloģijas izmantotas tuvas distances datu pārraidei. Tās ir ļoti efektīvas un labi darbojas, ja iekārtas atrodas netālu viena no otras, nepārsniedzot dažu desmitu metru robežu. Šīs tehnoloģijas vislabāk piemērotas izmantošanai iekštelpās dažādu iekārtu savstarpējai komunikācijai. Tās var izmantot arī iekārtu pozicionēšanai iekštelpās [6]. Datu pārraides distance ir no 10 cm līdz pat 20 m attālumam atkarībā no tehnoloģijas.

2.1.2. Wireless Local Area Network (WLAN) un WiFi

Bezvadu datu pārraides tehnoloģija, kas vairāk tiek izmantota iekštelpu tīkla risinājumiem, piemēram, birojos, māsasaimniecībās vai mācību iestādēs. Tehnoloģija nodrošina

augstu datu pārraides ātrumu un pārklājumu līdz pat 50 m rādiusā, ja raidītāja atrašanās vieta ir bez papildus signāla traucētājiem. [4]

2.1.3. Mobilo datu pārraides tehnoloģija

Visiem mobilo telefonu lietotājiem ir zināma šī datu pārraides tehnoloģija, kas piedāvā gandrīz 100% pārklājumu lielākā daļā attīstītajās valstīs. Plaši pieejamās datu pārraides tehnoloģijas izmantošana, ar *Global System for Mobile Communications* (GSM), ir variants, kas nodrošina plašu tīkla pārklājumu un apjomīgu pārsūtamo datu plūsmas apjomu.

Mūsdienās izmantotās mobilo datu pārraides standarti ir **GPRS, EDGE, 3G, 4G, LTE**. Viens no būtiskākajiem ierobežojumiem šo tehnoloģiju izmantošanā ir neefektīvā enerģijas patēriņš. Tomēr *Long Term Evolution-Machine* (LTE-M) [7] un *NarrowBand IoT* (NB-IoT) [7] ir divi mobilo datu tehnoloģiju risinājumi, kas patērē būtiski mazāk enerģijas, ar mērķi tās ieviest kā lietu interneta standartu, kuru apstiprinātu *Generation Partnership Project* (3GPP).

Šādu tehnoloģiju izmantošana piedāvā lielus datu pārraides apjomus un lielu pārklājumu, tomēr augstais enerģijas patēriņš mobilo datu moduļiem un to izmaksa, gan iekārtām, gan tīklu abonementiem ir acīmredzams trūkums.

2.1.4. ZigBee [8]

ZigBee ir atvērtais datu pārraides standarts, kas speciāli izveidots, lai to pielietotu mašīnas-mašīnas (M2M) tīkliem. ZigBee tehnoloģijas uzstādīšana neizmaksā dārgi, kā arī tās darbināšana nepatērē lielu enerģijas daudzumu. Šo iemeslu dēļ tehnoloģija ir labi piemērota izmantošanai industriālos nolūkos. Komunikācijai ir zems gaidīšanas laiks un mazs darba cikls, atļaujot iekārtām darboties pēc iespējas ilgāku laika periodu. Liels plus tehnoloģijai ir iespēja pieslēgties vairākiem datu kanāliem vienlaicīgi. Uz doto brīdi tehnoloģiju standarts nav pietiekami stabils, lai bez traucējumiem komunicētu visām ZigBee iekārtām. ZigBee kopiena aktīvi strādā pie stabilas datu pārraides izstrādes un protokola standartizēšanas, lai tehnoloģiju piedāvātu patērētājam un to varētu ieviest viedo mājokļu, lietu interneta vai citās tehnoloģijās. Vairums ZigBee standarta lietotāji pāriet uz citu LPWAN tehnoloģiju izmantošanu, jo nepietiekams tīkla pārklājums un iekārtu funkcionālais sniegums tos neapmierina.

2.1.5. LPWAN zema patēriņa tīkla protokoli

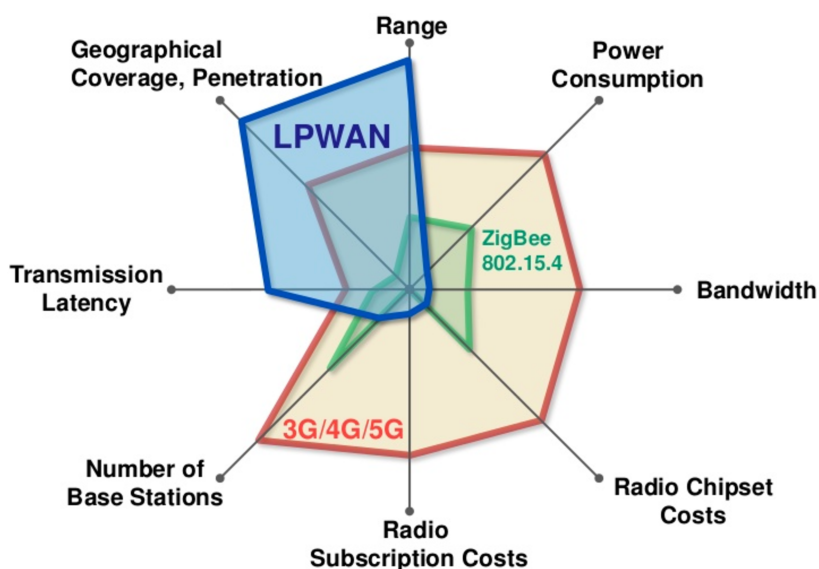
LPWAN datu pārraides tehnoloģijas galvenais mērķis ir apvienot zemo enerģijas patēriņu, ko spēj nodrošināt BLE, RFID un NFC tehnoloģijas, un plašo pārklājumu pieeju, kas

raksturīgs mobilo datu pārraides tehnoloģijām. Lai šo kombināciju izveidotu, jāņem vērā mazie datu pārraides apjomi, kurus iespējams pārraidīt tīklā. Šīs tehnoloģijas galvenās īstenošanas ieviešanas iespējas ir sensoru tīklu mezglu iekārtas, kuru ievāktu un dienā nosūtāmo datu apjoms nav liels, kā piemēram, ar baterijām darbināms sensoru mezgls, viedais ūdens skaitītājs vai laikapstākļu stacija ar temperatūras, mitruma un citiem sensoriem. [9]

Galvenie datu komunikāciju tehnoloģiju salīdzināšanas faktori :

- komunikācijas pārklājums;
- enerģijas patēriņš;
- joslas platums;
- radio moduļu un tīkla abonementu izmaksas;
- bāzu staciju skaits;
- transmisijas tīkla latence;
- ģeogrāfiskais pārklājums.

Šo kritēriju salīdzinājums starp LPWAN, mobilajiem datiem un ZigBee komunikācijas tehnoloģijām ir redzams 2.2. attēlā. LPWAN tehnoloģijām ir labāks ģeogrāfiskais pārklājums un komunikācijas pārklājums, savukārt, radio moduļu un tīkla abonementa izmaksas, salīdzinājumā ar mobilajiem datiem un ZigBee, ir krietni zemākas. Savukārt, mobilo datu un ZigBee tehnoloģijas izrāda redzamu pārākumu joslas platuma mērījumos un tīkla pārraides latences datos.

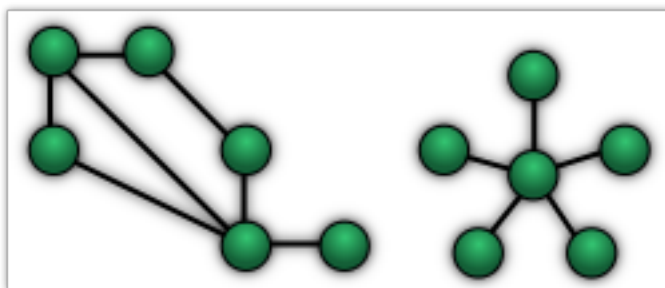


2.2. att. LPWAN, mobilo datu pārraides un ZigBee salīdzinājums

Tipiski raidītāju un bāzes staciju datu pārraides komunikāciju tehnoloģijām tās tiek strukturētas vairāku veidu topoloģijās. Zināmākās tīklu topoloģijas ir režģtīkla un zvaigznes tīkla topoloģijas. Abu topoloģiju veidi vizualizēti attēlā 2.3.

Režģtīklā individuālie raidītāja mezgli pārsūta informāciju, padodot to tālāk pa ķēdīti citiem raidītāja mezgliem. Tas palielina sasniedzamo pārklājumu un iespēju saņemt datus no tālāk atrodošajiem tīkla mezgliem. Lai arī šāda tīkla struktūra palielina sasniedzamo pārklājumu, tā uzbūve un uzstādīšana ir krietni sarežģīta, jo nepieciešams pareizi lokalizēt katru raidītāja mezglu un šis paņēmieni samazina raidītāja mezglu enerģijas kapacitāti, ja mezgliem ir jāsaņem un tālāk jāpadod informācija, kas tiem pa visam nav aktuāla.

Zvaigznes tīkla topoloģijā, līdzīgi kā Wi-Fi komunikācijas tehnoloģijā, iekārtas komunicē ar vienu galveno tīkla devēju vai bāzes staciju. Katrs zvaigznes stars ir kā atsevišķa komunikācija starp raidītāja iekārtu un bāzes staciju. Visbiežāk bāzes stacija tālāk ar serveriem komunicē, izmantojot vada pieslēgumu. Zvaigznes topoloģijas tīkla struktūrai ir savi plusi un mīnusi, kā piemēram, šādā tīkla struktūrā raidītāja iekārta patērē vismazāk enerģijas, jo tai jākomunicē tikai ar vienu iekārtu, savukārt, komunikācijas pārklājums ir mazāks. Ja kādu iemeslu dēļ komunikācija starp iekārtām ir traucēta, tad dati tiks pazaudēti, ja vien tie netiek uzglabāti iekārtas lokālajā atmiņā un atkārtoti nosūtīti pēc laika intervāla.



2.3. att *Režģtīkla un zvaigznes tīkla topoloģijas reprezentācija*

2.2.LoRa un LoRaWAN

LoRa ir patentēts zema enerģijas patēriņa bezvadu tīkla standarts. Tas izpilda fiziskā līmeņa funkcijas atbilstoši atvērto sistēmu sadarbības bāzes etalonmodeļa (OSI modelis) 1. līmenim. Tīkls darbojas ISM frekvenču diapazonā:

- starp 863 un 870MHz, un aptuveni 433MHz Eiropas reģionā;
- starp 902 un 928MHz Apvienotajās Amerikas Valstīs;
- starp 915 un 928MHz Austrālijā;
- starp 779 un 787MHz kā arī 470 un 810MHz Ķīnā [10].

Modulī izmantots Semtech [11] izstrādāta un patentēta integrētā shēma. Tās tehnoloģija darbojas, izmantojot CSS (*chirp spread spectrum*) modulāciju, kas padara raidīšanu papildus noturīgu pret apkārtējiem trokšņiem, palielina tīkla pārklājuma rādiusu uz zemākas datu pārraides ātruma rēķina. Eiropā ir nozīmēti vairāki komunikācijas kanāli. Vairums kanālu ir ar ātrumiem robežās no 250b/s līdz 5,5kb/s. Eksistē arī “ātrais” komunikācijas kanāls ar datu

pārtraides ātrumu līdz 11kb/s un viens GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*) kanāls ar ātrumu līdz 50kb/s. Zemo frekvenču un datu pārtraides plūsmas dēļ Eiropā ir striktāki nosacījumi attiecībā uz ētera pārtraides noslogojumu. 1% darba cikla noslogojums nozīmē, ka iekārtai atļauts izmantot kanālu tikai 1% apmērā no visas pilnas dienas (24h) jeb 14,4 minūtes. Pārtraides laiks tīklā LoRa datu paketei ir proporcionāli atkarīgs no tās izmēra un izplatīšanās faktora. Tai pat laikā izplatīšanās faktors ietekmē attālumu, kuru raidītājs var sasniegt, paketi pārtraidot konkrētā bitu pārtraides ātrumā.

LoRaWAN ir balstīta uz LoRa fiziskā līmeņa un iespējo vides piekļuves vadības (MAC) protokolu zema enerģijas patēriņa iekārtām. LoRaWAN tīkliem tiek izmantota zvaigznes tīkla topoloģija, kur bāzes stacijas izvietotas maksimāli izretināti, lai nodrošinātu maksimāli lielāko pārklājumu.

LoRaWAN protokolu definē un nosaka LoRa alianse [12] savā LoRaWAN specifikācijas dokumentā [13].

Galvenokārt, ir divu veidu nosūtāmo ziņojumu veidi: (1) augšpusaites ziņojums, kas tiek sūtīts no raidītāja iekārtas uz bāzes staciju un (2) lejuplīnijas ziņojums, ar kuru atbild bāzes stacija raidītāja iekārtai. Tīkla struktūra ir paredzēta pielietojumiem dažādām lietu interneta lietotnēm, industriāliem automatizēšanas scenārijiem, viedās pilsētas iekārtošanai un lauksaimniecībai, tāpēc protokols paredzēts vairāk augšpusaites ziņojumu saņemšanai un mazāk lejuplīnijas ziņojumu nosūtīšanai. Augšpusaites ziņojumi paredzēti, lai raidītāja iekārtas varētu savus ievāktos sensoru datus noteiktā laika intervālā pārsūtīt uz bāzes staciju vai servera lietotni. Lejuplīnijas ziņojumi ir paredzēti, lai nosūtītu iekārtām kontroles ziņojumus no servera lietotnes uz raidītāja iekārtu, ka nosūtītie dati ir saņemti, vai kādu citu MAC līmeņa komandu. LoRaWAN tīklā automātiski tiek pārvaldīts izplatīšanās koeficienta faktors, lai optimizētu ātrāku datu pārtraidi, optimālāko diapazonu, maksimālo akumulatora darbības laiku un maksimālo tīkla jaudu, nosūtot lejuplīnijas kontroles ziņojumus raidītāja iekārtai [14].

2.3. Komunikācijas tīkla iekārtas

Iegultās sensorās iekārtas ir mikroshēmas ar procesoriem un dažādiem pieslēgtiem moduļiem, kas var iegūt datus, apstrādāt tos vai pārtraidīt uz bāzes staciju. Sfērā populārākās mikrokontrolieru iekārtas, ar kurām iespējams pētīt dažādu moduļu īpatnības ir Raspberry Pi un Arduino.

2.3.1. LoRaWAN bāzes stacija

Signāla veiksmīgai uztveršanai, tīklā nepieciešams izvietot bāzes staciju ar LoRa tehnoloģijas uztvērēja moduli. Bāzes stacijas specifika ir atkarīga no ražotāja, taču, galvenokārt, tiek izšķirti divi to veidi:

- viena kanāla bāzes stacijas;
- vairāku kanālu bāzes stacijas;

LoRaWAN bāzes stacijas izveido tīkla tiltiņu starp radio viļņu pārraides un vada savienojuma interneta pieslēguma. Tās galvenā funkcija ir saņemt un tālāk pārsūtīt raidītāja augšpusaites ziņojumus, kā arī izveidot lejuplīnijas ziņojumus atpakaļ uz raidītāju. Sīkāk LoRaWAN bāzes stacijas un tīkla servera funkcionālais apraksts ir atrodams 2.4.2. nodaļā. Bāzes stacijas detalizēts apraksts atrodams 3.1. nodaļā.

2.4. Tīkla pārklājuma serveris

Šajā nodaļā tiks aprakstīts LoRaWAN lielākais un plašāk zināmais tīkla nodrošinātājs vai tīkla bāzes serveris - *The Things Network* (TTN) [15].

2.4.1. The Things Network būtība un nozīme

Tīkla serveris ir izveidots, lai atbalstītu vienotu zemas enerģijas un plaša pārklājuma tīkla infrastruktūru, ko var piedāvāt LoRaWAN datu raidītāja iekārtas. Līdzīgi kā mobilo datu pārraides tīkliem arī šeit eksistē raidītāja iekārtas (jeb “mobilie telefoni”) un bāzes stacijas (jeb “mobilo operatoru torņi”), komunikāciju starp kuriem nodrošina vairāki tīkla operatori (jeb “LMT”, “Tele2”, “Bite” u.c.). Vairums operatori nosaka savas abonēšanas maksas par pakalpojumu izmantošanu, bet *The Things Network* ir izveidots kā atvērta kopīgas kopienas tīkla operators jeb bāzes serveris.

TTN darbības princips ir kā tīkla vārtejai starp LoRaWAN tīkla bāzes stacijām un aizmugursistēmas serveriem, kā arī iecerētās sistēmas lietotni vai servisu. TTN tīkla serveris ir atbildīgs par datu integritātes pārbaudīšanu, iekārtu autentificēšanu tīklā, pārsūtīto pakešu skaita noteikšanu, lejuplīnijas šablona veidošanu un citām ne mazāk nozīmīgām funkcijām. Kā rakstīts TTN tīmekļa lapā, tad galvenais TTN bāzes servera izveidošanas iemesls ir padarīt datu komunikāciju cilvēkiem vairāk pieejamu gan fiziski, gan finansiāli. TTN kopienā ir aptuveni 40000 biedru un visā pasaulē uzstādītas aptuveni 3700 bāzes stacijas, kuras ir publiski pieejamas. TTN virza tīkla attīstību un izveidi uz kolektīvo pakalpojumu izmantošanas pieeju, ka kopienas biedri dos ieguldījumu tīkla paplašināšanā un attīstībā.

Arī Latvijas Universitāte, pateicoties SIA “Mikrotīkls” atbalstam [16], plāno izvietot vairākas TTN bāzes stacijas uz saviem nekustamajiem īpašumiem [17], tādējādi, veicinot atvērtās zinātnes pamatprincipus.

2.4.2. TTN arhitektūras darbības princips

Tīkla servera uzdevums nav triviāls. Tas raidītāju mezglu datus maršrutē uz lietotņu serveriem. Lai izpildītu šo uzdevumu tīkla serverim nepieciešamas papildus servisu komponentes:

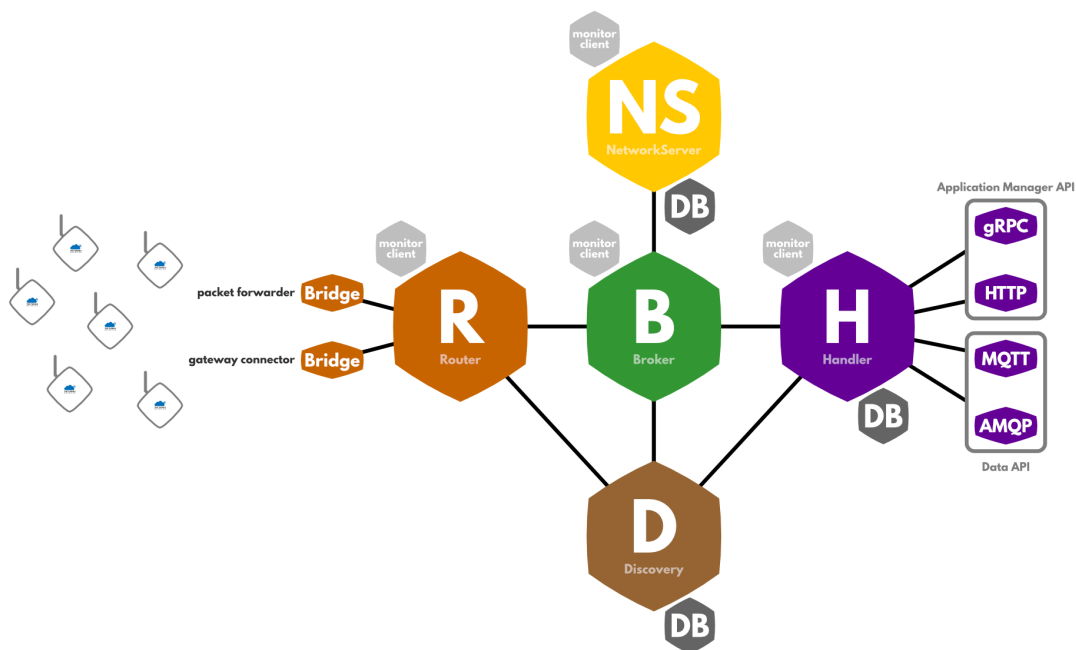
- **tīkla tilts** (*bridge*);
- **maršrutētājs** (*router*);
- **starpnieks** (*broker*);
- **tīkla serveris** (*network server*);
- **manipulators** (*handler*);
- **atrašanas serviss** (*discovery service*).

Bāzes stacijas, kas ir LoRaWAN iekārtas un, izmantojot radio signālus, saņem datus no sensoru iekārtām, ar tīkla tiltu ir pieslēgtas pie maršrutētāja, kuram, savukārt, ir interneta pieslēgums. Maršrutētājs atbild par bāzes staciju statusu, un datu pārraides plānošanu. Maršrutētājs tālāk ir savienots ar vienu vai vairākiem starpniekiem, kuru uzdevums ir kartēt iekārtas to lietotnēm, pārsūtīt augšupsaites ziņojumus pareizām lietotnēm un padot lejuplīnijas ziņojumus uz korekto maršrutētāju, kurš pēc tam tās pārsūta uz bāzes staciju. Manipulators uzrauga datu sūtīšanu uz atsevišķām lietotnēm, tāpēc tam ir savienojums ar starpnieku. Manipulatorā arī tiek veikta datu šifrēšana vai atšifrēšana, kā arī tas ir atbildīgs par datu plūsmu un to, kur nonāk konkrētie dati un kur tie tiek padoti uz ārējiem servisiem vai avotiem. Tāpēc tas ir savienots ar ārējiem starpniekiem, kas nodrošina datu padevi lietotāju izveidotām lietotnēm. Atrašanas serviss ir paredzēts, lai tīklā esošos maršrutētājus, starpniekus un manipulatorus varētu sameklēt un ar tiem komunicēt.

2.4.3. LoRaWAN un TTN komunikācija un drošība

LoRaWAN drošības protokols darbojas pēc IEEE 802.15.4 standarta [18]. Datu šifrēšanai ir izmantots šifrēšanas standarts AES-128. Lai iekārta varētu tīklā komunicēt ar bāzes stacijām, tai ir nepieciešama aktivizācija. Lai iekārtu aktivizētu ir nepieciešami sekojoši parametri:

- iekārtas adrese (*DevAddr*);
- tīkla sesijas atslēga (*NwkSKey*);
- lietotnes sesijas atslēga (*APPSKey*).



2.4. att. TTN arhitektūras diagramma [19]

DevAddr ir tīklā unikāls 32 bitu identifikators. Katrai iekārtai ir 128 bitu garuma NwkSKey, kas ir vajadzīgs, lai pārbaudītu ziņojumu integritāti un to korektumu. Šī atslēga ir svarīga, lai ļaunprātīgs uzbrucējs nevarētu izmainīt ziņojuma datus. Ņemot vērā, ka visi ziņojumi, kas pārraidīti tīklā, ir šifrēti, tad katrai iekārtai ir sava šifrēšanas atslēga AppSKey (128 bitu garumā). Ar atslēgu tiek šifrēti katra ziņojuma dati starp lietotni un tīkla iekārtu (abos virzienos). Papildu drošības atslēgu komplektam, LoRaWAN drošības protokols izmanto pārsūtīto pakešu skaitīšanas metodi, lai netiktu veikti atbildes uzbrukumi tīklam. Šāda veida uzbrukums atkārtoti sūta ziņu bāzes stacijai ar izmainītu ziņojuma saturu, lai tādejādi ietekmētu lietotnes servera darbību. Ziņojumi tiek noraidīti, ja pārsūtīto pakešu skaits ziņojumā ir zemāks vai vienāds ar iepriekšējo pakešu skaitu.

Lai raidītāja iekārtas izveidotu aktīvu savienojuma saiti ar TTN tīkla serveri un tajā atrodošajām bāzes stacijām ir nepieciešama aktivizācijas metode. TTN drošības protokolā ir divas aktivācijas metodes:

- personalizēšanas aktivācija (ABP);
- aktivācija pa gaisu (OTAA).

Personalizēšanas aktivācija (*Activation by Personalization – ABP*) notiek, ja iekārtai ir piešķirtas trīs nepieciešamās atslēgas un tās norādītas iekārtas lietojumprogrammas kodā - DevAddr, NwkSKey un AppSKey. Šāda veida aktivācijas metode nozīmē, ka bāzes stacijai nav vajadzības atbildēt ar apstiprinošu ziņu, ka tā var saņemt ziņojumus no raidītāja. Produkcijas vidē esošām iekārtām šāda aktivācijas metode nav ieteicama, jo iekārtas piederība un aktivācija paliek neapstiprināta.

Aktivācija pa gaisu (*Over-the-air Activation – OTAA*) izmanto citus trīs identifikatorus, lai iegūtu trīs aktivācijas atslēgas. Iekārtas paplašinātais identifikators (DevEUI), lietotnes paplašinātais identifikators (AppEUI) un lietotnes atslēgu (AppKey). Šī aktivācijas metode ir sarežģītāka un sastāv no vairākiem soļiem. Sākotnēji iekārta aizsūta pievienošanās pieprasījumu bāzes stacijai, kura salīdzina ziņojumā šifrētās atslēgas un veiksmīgā salīdzināšanas gadījumā iekārtai atbild ar pievienošanās akceptēšanas atbildi. [20]

3. AUTORA EKSPERIMENTA APRAKSTS

Darba eksperimentālajā daļā tika veikta LPWAN tehnoloģijas LoRaWAN komunikācijas pārklājuma testēšana Rīgā un raidītāja iekārtas izstrādāšana, kā platformas iekārta kādai reāla pielietojuma lietotnei.

Vēlamais eksperimenta rezultāts ir pārraidīt raidītāja nolasīto atrašanās vietu no vairākām vietām pilsētā. Iekārta pārraida datu paketes uz sasniedzamām LoRaWAN bāzes stacijām, kur tās informāciju padod tālāk uz TTN bāzes serveri un izstrādāto lietotni.

3.1. LoRaWAN bāzes stacijas iekārta

Praktiskā darba izstrādē galvenais uzsvars tika likts uz raidītāja iekārtas izstrādi un datu sūtīšanu, tāpēc sadarbībā ar Latvijas Universitātes Datorikas Fakultātes kolēģi Edgaru Pieneni tika apskatīta un uzstādīta vairāku kanālu LoRaWAN bāzes stacija. Bāzes stacijas Latvijas Universitātes projekta [16] ietvaros izveidoja kolēģis un notestēja tās darbību, lai autors varētu veikt bāzes stacijas uzstādīšanu vienā telpā ar raidītāju. Šāda uzstādīšana atvieglotu testēšanas un sūtāmās datu paketes izveidošanu un atklūdošanu.

Bāzes stacija sastāv no trim komponentēm:

- iegultās Linux darbstacijas **Raspberry Pi3** [21];
- IMST **iC880A** [22] LoRaWAN signāla koncentratora moduļa;
- radio signāla antenas.

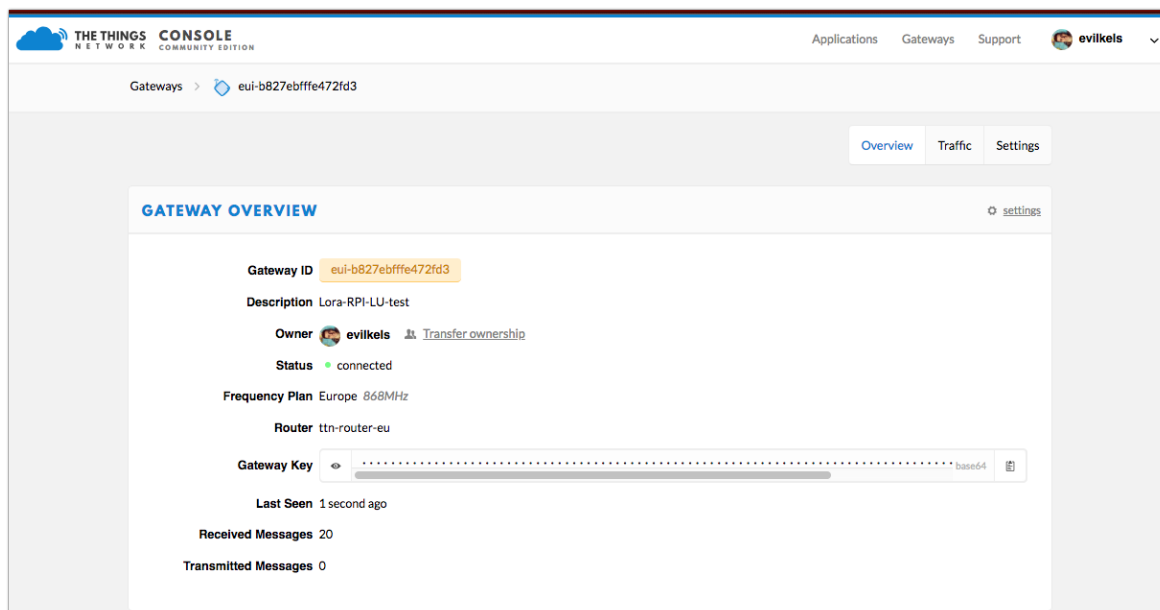
Iegultās Linux darbstacijas **Raspberry Pi3** skaitļošanas jauda ir pietiekama, lai tā darbotos kā tilts starp radio viļņu ziņojumiem un interneta paketēm. Vairāku kanālu funkcionalitāte iespējo bāzes stacijai komunikāciju ar līdz pat 10000 iekārtām vienlaicīgi. Ja vairāki raidītāji sūta ziņojumus uz bāzes staciju, tad tie netiek ignorēti, bet gan saņemti.

Šādu LoRaWAN bāzes staciju uzstādīšana ir ļoti izdevīga, jo atsevišķu komponentu izmaksas nav dārgas un iekārtas izstrāde nav pārlieku sarežģīta. Bāzes stacijas uzstādīšanas instrukcijā ir konkrēti definēti komunikācijas porti un programmatūras palaišanas darbības kā arī TTN bāzes tīkla konsolē pieslēgšanas norādījumi [23]. Pēc uzstādīšanas TTN konsolē (3.1. attēls) var redzēt bāzes stacijas detalizētu informāciju un statusu, kā arī ienākošos ziņojumus no raidītāju iekārtām.

3.2. LoRaWAN bezvadu datu raidītāja iekārta

Šajā nodaļā aprakstīta LoRaWAN bezvadu datu raidītāja iekārtas izveidošana, kurā būtisku atbalstu autoram sniedza bakalaura darba vadītājs. Papildu informācija tika iegūta

dažādos interneta vidē atrodamos pamācību rakstos. Būtiskākais pamācību raksts, kas palīdzēja saprast galvenos moduļu darbības principus un kā tos savienot ar Arduino, lai varētu sākt testēšanu, atradās MobileFish vietnē [24].



3.1. att. *LoRaWAN bāzes stacijas informācija un status TTN konsolē.*

3.2.1. Iekārtas arhitektūras apraksts

Galvenais iekārtas modulis ir LoRaWAN radio integrētā shēma, kas iekārtā nodrošinās datu pārraidi. Autors savā eksperimentālajā iekārtā izmanto **HopeRF RFM95W** [25] moduli, kurā tiek nodrošināts LoRa fiziskais slānis un modulācija, lai veiktu datu pārraidi ar zemu enerģijas patēriņu. Moduļu atsevišķas izmaksas aprakstītas pie kopējās iekārtas izmaksām pielikumā 1. Tehniskais moduļa pieslēgums mikrokontrolierim ir atspoguļots tabulā 3.1.

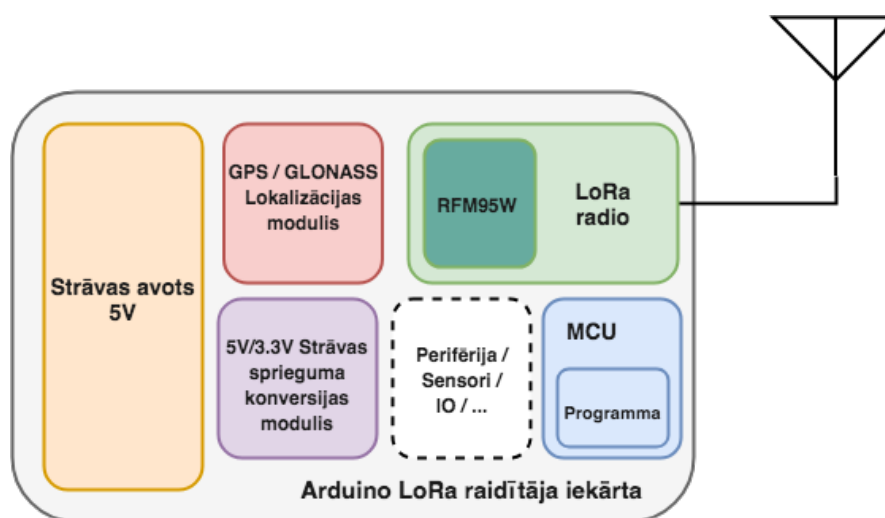
Lai noteiktu iekārtas atrašanās vietu, tika izmantots globālās pozicionēšanas (GNSS) modulis **u-blox CAM-M8Q** [26]. Izvēlētais GNSS modulis ir ar mazu rādījumu neprecizitāti, kā arī iespēju nokonfigurēt dažādus lokalizācijas paņēmienus. Izvēlētais modulis ir daudzfunkcionāls un ļoti praktisks, kā arī energo taupīgāks par paša ražotāju iepriekšējiem šīs sērijas moduļiem.

Lai mikrokontrolierim pieslēgtu izvēlētos moduļus un iekārtu padarītu ērtāk pārvietojamu, izveidoju savu Arduino vairogu (skatīt pielikumā 3), kas veidots no 5cm x 7cm lielas maketēšanas plates, uz kuras var savietot un pielodēt moduļu pieslēgvietas, kā arī ar vadiem savilkt nepieciešamos savienojumus starp moduļu komunikācijas portiem.

Abas izvēlētais iekārtas visām pieslēgvietām ieteicamais strāvas spriegums ir paredzēts 3,3V, savukārt, Arduino mikrokontrolierim uz tā digitālajiem ievades/izvades portiem starp kopējo zemējumu ir 5V strāvas spriegums. Lai arī savienojot moduļus tieši ar mikrokontrolieri,

teorētiski pastāv iespēja, ka moduļi netiks bojāti, tas tomēr ietekmē digitālā signāla pārsūtīšanu starp moduļiem un mikrokontrolieri. Lai šo problēmu atrisinātu, bija nepieciešams izveidot kopīgo loģikas strāvas līmeņa konversijas moduli, kas to veiktu ar **2n7000-d MOSFET** tranzistora [27] un **10 kiloomu rezistoriem** slēgumu.

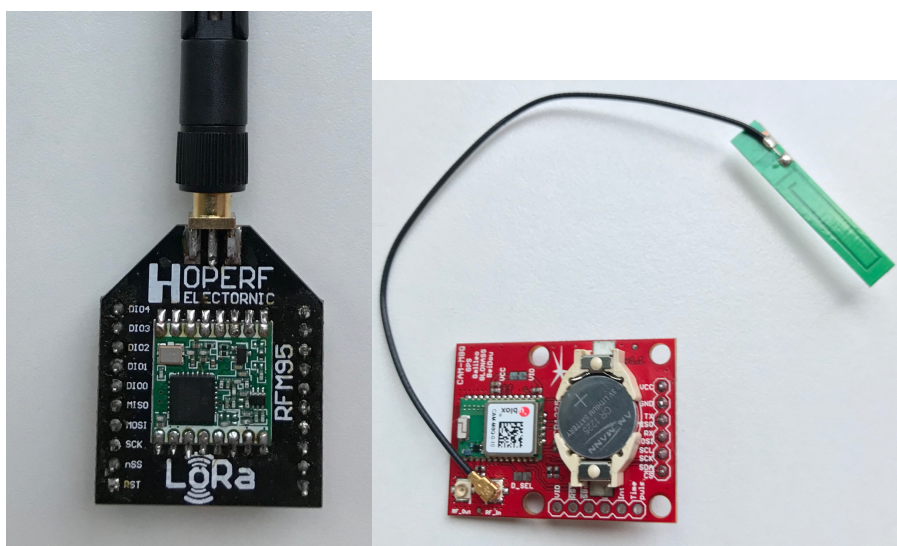
Tas attiecīgi nozīmē to, ka savienojuma vadi no mikrokontroliera uz moduļiem netika savienoti tieši, bet gan caur loģikas strāvas līmeņa konversijas moduli. Autora izveidotā raidītāja iekārtas moduļu struktūra attēlota attēlā 3.2.



3.2. att. *LoRaWAN datu raidītāja iekārtas moduļu diagramma*

3.2.2. Iekārtas moduļu komunikācija un darbības principi

Pēc darba vadītāja ieteikuma tika iegādāts **HopeRF RFM95W** un **ublox CAM-M8Q**. Sākotnējai modeļu testēšanai un apgūšanai tika izmantots prototipēšanas mikrokontrolieris Arduino. Saslēgšanas pamācības un parauga koda fragmenti tika veidoti pēc tīmeklī pieejamām pamācībām. Izstrādātas iekārtas attēls, kā arī prototipēšanas plātes komunikāciju ceļi apskatāmi darba pielikumos 2 un 3.



3.3. att. *HopeRF RFM95W LoRa radio modulis un ublox CAM-M8Q GPS modulis*

Ērtākai moduļu pieslēgšanai mikrokontrolierim, darba autors izveidoja vadu slēguma shēmu uz prototipēšanas plates. Pēc iepriekš uz papīra uzzīmētas komunikācijas shēmas, tika salodēti komunikāciju celiņi ar dažādas krāsas vadiem. Tabulā 3.1. var redzēt komunikācijas portu saistību ar mikrokontrolieri.

Tabula 3.1. Arduino moduļu pieslēgvietu attēlojums un apraksts.

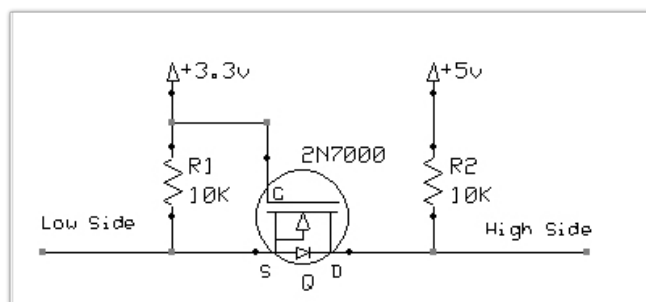
Moduļa nosaukums	Moduļa komunikācijas ports	Arduino komunikācijas ports	Apraksts
RFM95W LoRa	MISO	D12	SPI izvaddati
	MOSI	D11 *LKM	SPI ievaddati
	SCK	D13 *LKM	Seriālā pulksteņa ievade
	nSS	D10 *LKM	SPI mikročipa izvēle
	3.3V	3.3V *LKM	3.3V strāvas avots
	GND	GND *LKM	Zemējums
	DIO 0	D2 *LKM	TxDone un RxDone
	DIO 1	D3 *LKM	RxTimeout
	DIO 2	D1 *LKM	Timeout
ublox CAM-M8Q	TX	D8 *LKM	SPI izvaddati
	RX	D9 *LKM	SPI ievaddati
	VCC	3.3V *LKM	3.3V strāvas avots
	GND	GND *LKM	Zemējums

*LKM – Nepieciešams savienot caur loģiskās konversijas moduli aprakstīts nodaļā 3.2.3.

3.2.3. Strāvas sprieguma loģikas konversijas līmeņa modulis

Eksperimentā izmantotais LoRa raidītāja modulis pēc izstrādātāja norādītās datu specifikācijas, darbojas no 3,3V strāvas sprieguma, kas nozīmē, ka komunikācijas portus nepieciešams pievienot savienojumiem, kuros darba spriegums ir nevis 5V, bet 3,3V. Lai šo realizētu, uz prototipēšanas plates, autors izveidoja divus strāvas sprieguma loģikas konversijas līmeņa pārveidotājus. 3,3V strāvas sprieguma nodrošināšanai, visiem komunikāciju portiem uz plates tika izmantota papildus četru kanālu loģikas konversijas līmeņa modulis.

Tranzistors **2n7000-d MOSFET** un divi **10 kiloomu rezistori** modulī veido elektrisko ķēdi, kā redzams attēlā 3.4. un shēmā ir divas pieslēgvietas, kur viens ir augstais 5V spriegums un otrs - zemais 3,3V spriegums.



3.4. att. *Loģikas konversijas līmeņa strāvas sprieguma pārveidotāja shēma*

3.2.4. Iekārtas programmatūras struktūras apraksts

Šajā darba nodaļā aprakstīta raidītāja iekārtas iegultā programmatūra.

Arduino mikrokontrolierim ar ATmega328 mikroprocesoru zibatmiņas apjoms ir 32 kilobaiti. Šī zibatmiņa paredzēta, lai augšupielādētu uz tās iegulto programmatūru, kuru mikrokontrolieris darbinās katru reizi, kad tam tiks pieslēgta strāvas padeve.

Raidītāja iekārtas LoRaWAN moduļa darbināšanai tika izmantota bibliotēka “*LoraMAC-in-C*” (LMIC), kas tika licencēta kā atvērta pirmkoda programmatūra 2015. gadā ar IBM licenci [28]. Lai kontrolētu un pārveidotu nacionālo jūrniecības elektronikas asociācijas (NMEA) [29] datu plūsmas ietvaros ievāktos datus no GPS moduļa un tos pārveidotu cilvēkam saprotamās vērtības (jeb platuma un garuma vērtībās) tika izmantota NeoGPS [30] un TinyGPS++ [31] bibliotēkas. Sākumā tika pieslēgti un notestēti iekārtas moduļi individuāli, lai autors labāk iepazītos ar katru atsevišķo moduli, tā darbības principiem un saprastu programmatūras funkcijas, ar kurām iespējams kontrolēt moduļu darbības.

GPS datu plūsmas vajadzīgo vērtību iegūšana tika veikta, izsaucot bibliotēkas iebūvētās funkcijas. Pēc platuma, garuma un augstuma virs jūras līmeņa datu iegūšanas, tos nepieciešams šifrēt baitu masīvā. Baitu masīvs ir definēts kā globālais mainīgais, lai no jebkuras programmas vietas tam var piekļūt.

Kad tiek piestartēts mikrokontrolieris, notiek abu moduļu inicializācijas metodes, kas LoRaWAN modulim autorizē iekārtu tīkla lietotnei, savukārt, GPS iekārta uzsāk pieejamo GNSS satelītu meklēšanu. Pēc tam izpildes ciklā tiek izpildītas iepriekš minētās funkcijas. LoRaWAN datu pakotne tiek sūtīta uz bāzes staciju, tikai tad, kad iepriekšējais pārraides cikls ir noslēdzies un nav aktīvu raidīšanas signālu.

Datu pārsūtīšana ir galvenais LoRaWAN raidītāja uzdevums un funkcionalitāte. Datu pārsūtīšana nenotiek cilvēkam nesaprotamā un nestrukturētā formātā. Kā jau visos datu pārraides protokolos dati ir jāšifrē. Pirmkārt, lai tie būtu droši un neviens uzbrucējs pa vidu klausoties, nevarētu tos pārtvert un izlasīt. Otrkārt, lai būtu viena izmēra datu ziņojumu paketes. Datu pārsūtīšanai TTN bāzes tīkla serverim nepieciešama informācijas kodēšana baitu virknes masīvā. Datu šifrēšana notiek pirms datu paciņas nosūtīšanas uz bāzes staciju, kas šo datu ziņojumu padod tālāk uz bāzes tīkla serveri, kurā norādīta atšifrēšanas funkcija. LoRaWAN protokols atļauj tīklā pārsūtīt ne lielākus par 12 baitiem datu ziņojumus.

```
184 void build_packet()  
185 {  
186     // GPS datu iegūšana  
187     LatitudeBinary = ((gps.fix().latitudeL() + 900000000) / 1800000000) * 16777215;  
188     LongitudeBinary = ((gps.fix().longitudeL() + 1800000000) / 3600000000) * 16777215;  
189  
190     // GPS koordinātu šifrēšana baitu masīvā  
191     txBuffer[0] = ( LatitudeBinary >> 16 ) & 0xFF;  
192     txBuffer[1] = ( LatitudeBinary >> 8 ) & 0xFF;  
193     txBuffer[2] = LatitudeBinary & 0xFF;  
194  
195     txBuffer[3] = ( LongitudeBinary >> 16 ) & 0xFF;  
196     txBuffer[4] = ( LongitudeBinary >> 8 ) & 0xFF;  
197     txBuffer[5] = LongitudeBinary & 0xFF;  
198     // GPS augstuma virs jūras līmeņa šifrēšana  
199     altitudeGps = Alt;  
200     txBuffer[6] = ( altitudeGps >> 8 ) & 0xFF;  
201     txBuffer[7] = altitudeGps & 0xFF;  
202     // GPS moduļa precizitātes datu šifrēšana  
203     hdopGps = GPShdop/10;  
204     // beigu simbola šifrēšana  
205     txBuffer[8] = 0xFF;  
206 }  
207
```

3.5. att *Datu paketes šifrēšanas funkcijas koda fragments*

Augšpusaites ziņojums sastāv no šifrētas baitu virknes. Attēlā 3.5. redzama raidītāja iekārtas funkcija, kas programmā šifrē datu objektu atsevišķos baitos, lai baitu masīvu pēc tam nosūtītu bāzes stacijai. Savā eksperimentā autoram bija nepieciešamas bija pārraidīt konkrētas datu vērtības - atrašanās vietas datus (platums un garums), augstums virs jūras līmeņa, GPS moduļa precizitāte HDOP, u.c. vērtības.

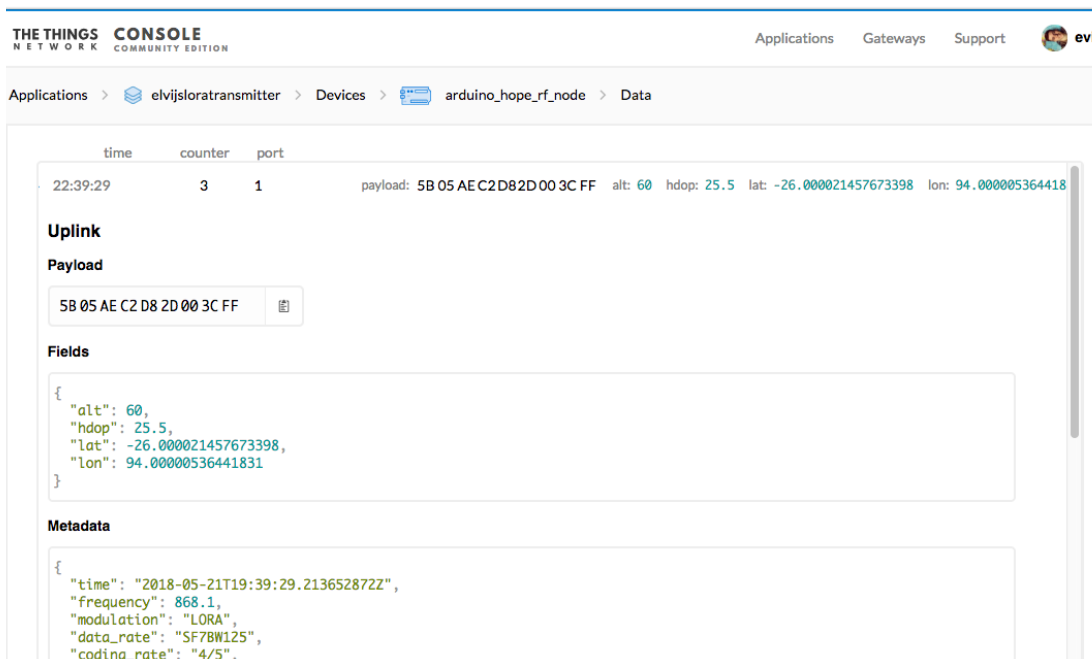
Pēc šifrēto datu pārraidīšanas TTN bāzes serverī iespējams ievietot atšifrēšanas funkciju, lai atsūtīto datu ziņojumu atšifrētu cilvēkiem saprotamā datu formātā (attēls 3.6.).

```
2 function Decoder(bytes, port) {
3     // Augšupsaites ziņojuma atšifrēšana TTN bāzes serverī
4     // baitu masīva pārveidošana cilvēkam salasāmā datu objektā
5     var decoded = {};
6
7     decoded.lat = ((bytes[0] << 16) >>> 0) + ((bytes[1] << 8) >>> 0) + bytes[2];
8     decoded.lat = (decoded.lat / 16777215.0 * 180) - 90;
9
10    decoded.lon = ((bytes[3] << 16) >>> 0) + ((bytes[4] << 8) >>> 0) + bytes[5];
11    decoded.lon = (decoded.lon / 16777215.0 * 360) - 180;
12
13    var altValue = ((bytes[6] << 8) >>> 0) + bytes[7];
14    var sign = bytes[6] & (1 << 7);
15    if (sign) {
16        | decoded.alt = 0xFFFF0000 | altValue;
17    }
18    else {
19        | decoded.alt = altValue;
20    }
21
22    decoded.hdop = bytes[8] / 10.0;
23    return decoded;
24 }
25
```

3.6. att. Augšupsaites ziņojuma atšifrēšanas funkcija

Šīs funkcijas ievietošana TTN konsolē atvieglo pārsūtīto datu pārvaldību, jo iespējams redzēt atsūtīto datu ziņojumu, nevis baitu masīvu, kā datu ziņojumu (attēlā 3.7.). Atšifrēšanas funkcijai jābūt pretējām darbībām kādas tika izmantotas datu šifrēšanas funkcijā.

Kad ziņojuma atšifrēšanas funkcija pievienota TTN bāzes servera konsolē, tad pie datu plūsmas pārvaldības rīka grafiskā lietotāja interfeisā iespējams apskatīt datu ziņojumu informāciju.



time	counter	port
22:39:29	3	1

payload: 5B 05 AE C2 D8 2D 00 3C FF alt: 60 hdop: 25.5 lat: -26.000021457673398 lon: 94.00000536441831

Uplink

Payload

5B 05 AE C2 D8 2D 00 3C FF

Fields

```
{
  "alt": 60,
  "hdop": 25.5,
  "lat": -26.000021457673398,
  "lon": 94.00000536441831
}
```

Metadata

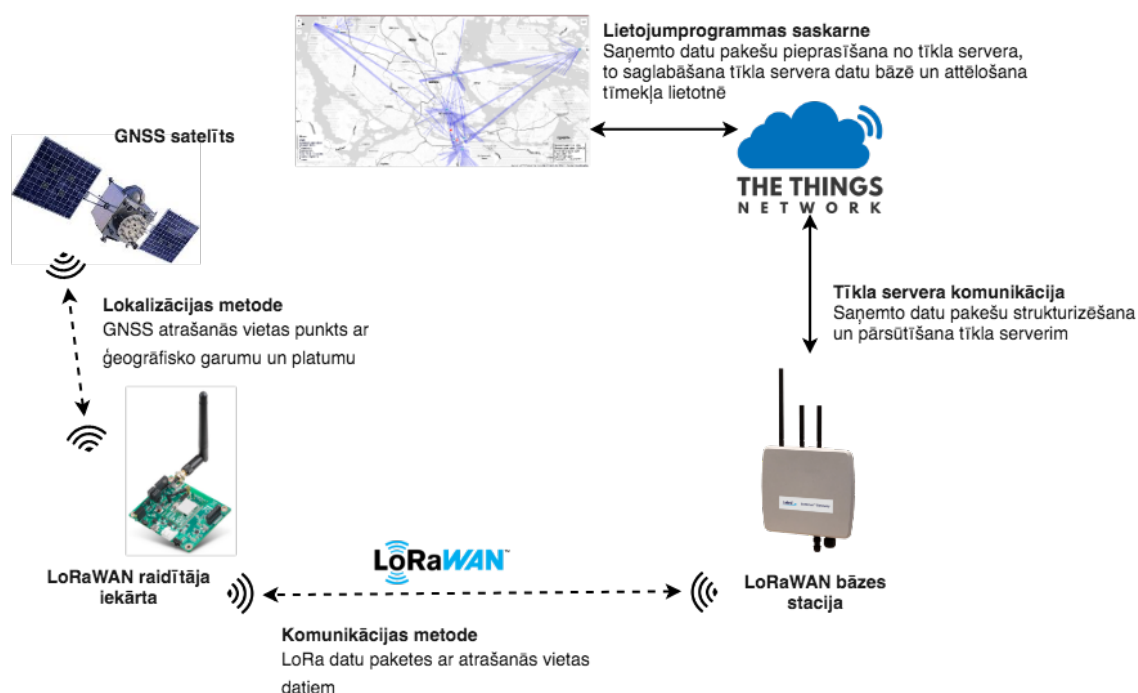
```
{
  "time": "2018-05-21T19:39:29.213652872Z",
  "frequency": 868.1,
  "modulation": "LORA",
  "data_rate": "SF7BW125",
  "coding_rate": "4/5",
}
```

3.7. att. TTN konsolē bāzes stacijai nosūtīta GPS datu pakete.

3.3. LoRaWAN komunikācijas tīkla struktūra

Autors eksperimenta ietvaros izmantoja atvērto bāzes serveri *The Things Network*. Tā specifikācija tika konkrētāk aprakstīta nodaļā 2.4. Pēc veiktās bāzes servera TTN izpētes tika izlemts izmantot to LoRaWAN komunikācijas tīkla un lietotnes izveidei.

Iekārtu komunikācijas modelis attēlā 3.8. izveidots tā, lai no GNSS satelītiem saņemtu iekārtas atrašanās vietu GPS modulī. Raidītāja iekārta datus apstrādā, sapakojot baitu masīvā un nosūtīt tos uz bāzes serveri TTN, izmantojot apkārt pieejamās LoRaWAN bāzes stacijas. TTN bāzes serverī notiek datu atšifrēšana un apstrāde. Pēc datu apstrādes tie ir pieejami jebkurai autentificētai ārējai tīmekļa, mobilai lietotnei vai servisam caur API pieprasījumiem.



3.8. att. *Iekārtu un servisu shematiskais komunikāciju modulis.*

3.3.1. The Things Network tīkla lietotnes

TTN bāzes serveris darbojas ar raidītāja un bāzes stacijas iekārtām tikai tad, ja tās ir piesaistītas TTN bāzes servera lietotnē. TTN ir konsoles rīks, kas nodrošina ērtu iekārtu pārvaldību un monitorēšanas iespējas sistēmu izstrādātājiem. Iekārtas var pierēģistrēt, labot vai dzēst iekš atsevišķām tīkla lietotnēm izmantojot konsoles rīku. Pēc iekārtu pierēģistrēšanas bāzes servera konsolē un piesaistīšanas kādai konkrētai lietotnei, tām tiek uzģenerēts unikāls iekārtas identifikators un nodaļā 2.4.3. pieminētās autentifikācijas atslēgas, lai komunikācija tīklā būtu droša un šifrēta. Tīkla lietotnes paredzētas, lai varētu sadalīt raidītāja iekārtas pēc to lietošanas piemēra kā arī attēlot iekārtu sūtītos datu ziņojumus. Lai šo funkcionalitāti izmantotu pielāgota risinājuma tīmekļa lietotnē, TTN piedāvā lietojumprogrammas saskarni.

The Things Network API - lietojumprogrammas saskarne izstrādātājiem izveidojuši divu veidu komunikāciju ar bāzes servera funkcionalitāti.

Datu API ir izmantojams, lai saņemtu notikumu un datu ziņojumus no raidītāju iekārtām. Lai ieviestu lietotnē šo Datu API var izmantot gan MQTT (mašīnas-mašīnas lietu interneta sakaru protokols), gan SDK (programmatūras izstrādātāja rīkkopu). Autors savas pielāgotās lietotnes izstrādē izmantoja SDK datu pieprasījuma funkcijas.

Lietotnes pārvaldības API funkcijas paredzētas, lai mijiedarbotos ar TTN bāzes sistēmu no trešo pušu lietotnēm. Lai veiktu kādas sistēmas darbības var izmantot HTTP pieprasījumus vai izmantot SDK datu pieprasījuma funkcijas. Eksperimenta izstrādē autoram nebija nepieciešams izmantot šo lietotnes pārvaldības API.

Pārklājuma pētīšanai LoRaWAN pētījumos tiek veikta pārraidīto punktu vizualizēšana kartē. Informācijas vizualizēšanas metodes un atrādāmie signāla informācijas dati ir dažādi. TTN kopienas atbalstītājs izstrādājis speciālu platformu šādu datu ievākšanai, lai labāk attēlotu atvērtā LoRaWAN TTN tīkla pārklājumu visapkārt pasaulē. Pārklājuma informācijas kartētājs TTN Mapper [32] ir pieejams jebkuram LoRaWAN datu pārraides protokola pētniekam. TTN Mapper kartētāja galvenais uzdevums ir parādīt reālo LoRaWAN pārklājuma pieejamību visā pasaulē, kur pieejamas LoRaWAN bāzes stacijas. TTN Mapper ir integrēta mobilā lietotne, kurai var padod testa iekārtas unikālos identifikatorus, un brīdī, kad iekārta varēs sasniegt kādu apkārtnē atrodošo bāzes staciju, tai nosūtot ziņojumu, tad tiks piefiksēts atrašanās punkts kopējā kartē. Atrašanās punktu fiksēšanai paredzētas vairākas metodes. Izmantojot mobilā tālruņa GPS iebūvēto moduli, kas tiek nolasīts brīdī, kad datu ziņojums ir saņemts TTN Mapper aizmugurservera lietotnē, kā arī datu ziņojumā iekļaujot atrašanās vietas informāciju pirms sūtīšanas bāzes stacijām. Vēlamais mērķis ir kopienas biedriem testēt savā apkārtnē atrodošās bāzes stacijas un dot ieguldījumu LoRaWAN pārklājuma fiksēšanā. Lai datus padarītu noderīgus un dotu kādu ieguldījumu kopienā, Rīgas pilsētā būtu nepieciešamas statistiski novietotas bāzes stacijas iekārtas ar labu pārredzamību. Patlaban Rīgā izvietotas tikai testēšanas bāzes stacijas ar ierobežotu redzamību, tāpēc autors neveica raidītāja iekārtas datu integrāciju TTN Mapper sistēmā, bet gan izstrādāja savu pielāgotu tīmekļa lietotni.

3.3.2. Sevis pielāgota datu vizualizācijas lietotne izmantojot TTN API

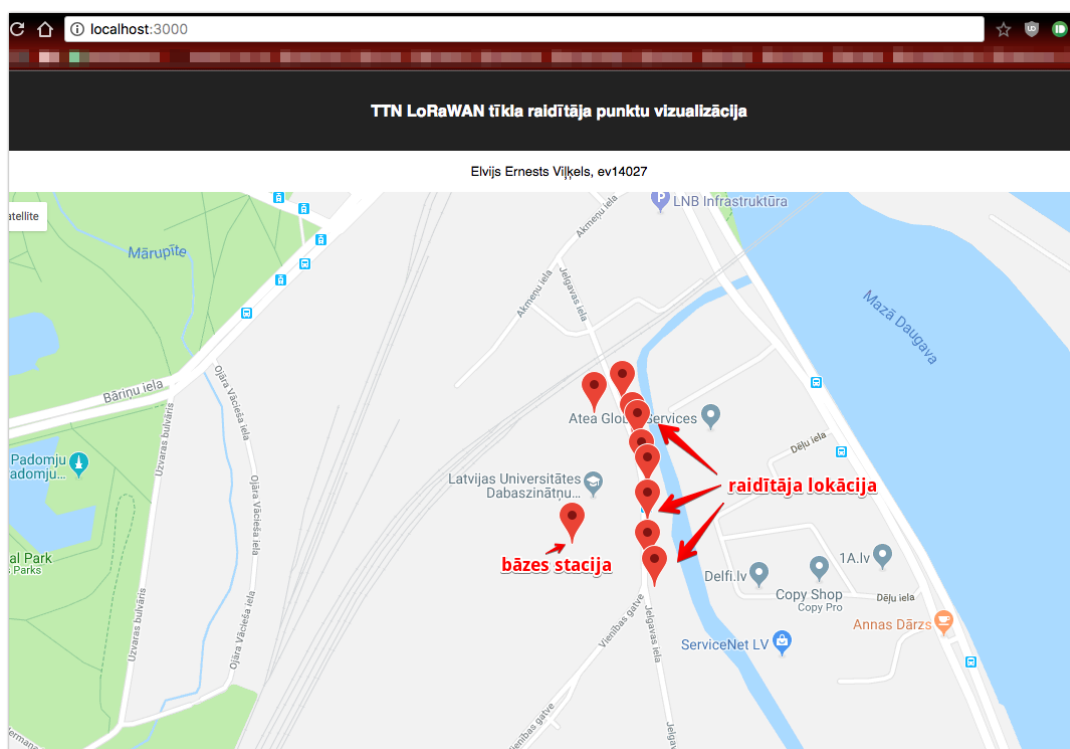
Eksperimenta rezultātu labākai attēlošanai, autors izstrādāja tīmekļa lietotni, izmantojot TTN API lietojumprogrammas saskarni datu iegūšanai. Lietotnē izmantots aizmugurservera ietvars *Node.js* [33], lai saglabātu bāzes staciju un raidītāju informāciju tika piesaistīta

PostgreSQL [34] datu bāze un *Sequelize* [35] objektu pārvaldības rīks. Pagaidu implementācijai tika izmantota *React* [36] priekšgala ietvars, lai lietotnē ievietotu *Google Maps API*. Autora pielāgotās sistēmas datu bāzē ir divas datu tabulas: Bāzes stacijas un raidītāju iekārtu ziņojumi. Izmantojot TTN datu API tiek gaidīts augšpusaites ziņojums no autora izveidotās TTN bāzes servera lietotnes, kad ziņojums atnācis, tad ar *Sequelize* servisa funkcijām tiek pārbaudīts vai datu bāzē ir piefiksēts ziņas saņēmēja bāzes stacija, ja pēc unikālā identifikatora tāda netiek atrasta, tad tā tiek saglabāta. Raidītāja iekārtas ziņojumi tiek saglabāti datu bāzes tabulā katru saņemšanas reizi.

Lai ziņojumu punktus un bāzes stacijas atrašanās atzīmi varētu attēlot kartē, tika izstrādātas aizmugurservera funkcijas, kas no datu bāzes atgriež visas jebkad sasniegtās bāzes stacijas un visus nosūtītos raidītāja ziņojumus.

4. Pielikumā ir datu objekts, kas tiek atsūtīts aizmugurserverim katru reizi, kad iekš TTN bāzes servera lietotnes tiek saņemts datu ziņojums no raidītāja iekārtas.

Nākotnes uzlabojumos varētu labāk strukturēt bāzes staciju informāciju, kā arī no saskarnes puses padarīt to lietotājam mijiedarbīgāku, lai varētu pārraidītos datu ziņojumus filtrēt pēc iekārtas unikālā identifikatora, saņēmēja bāzes stacijas, laika intervāla vai kādu citu parametru datiem.



3.9. att. *Pielāgota datu vizualizācijas lietotne raidītāja datu attēlošanai*

Eksperimenta rezultātā autors veiksmīgi pārraidīja vairākus ziņojumus uz bāzes staciju, kas bija novietota universitātes ēkas 5. stāvā iekštelpās. Pēc raidītāja iekārtas vairāku ziņojumu nosūtīšanas tika pārsniegti atļautie TTN tīkla darba ciklu atļautais tīkla izmantošanas laiks un

vairs nevarēja saņemt datu ziņojumus bāzes stacijā. Attēlā 3.9. ir ekrānšāviņš ar pielāgotās tīmekļa lietotni un tajā atzīmētajiem iekārtas pārsūtītajiem datu ziņojumiem un bāzes staciju.

3.3.3. *The Things Network* tīkla noslogotība un ierobežojumi

Lai arī lietotājam ir neierobežots skaits ar lietotnēm, kuras tas var izveidot TTN bāzes serverī, tām ir ierobežojums uz raidītāja iekārtām, kas ir piesaistītas konkrētai lietotnei. Ir noteikta regula, kas nosaka raidītāju atļauto laiku tīklā. Godīgā tīkla piekļuves politika ir striktāka kā LoRa protokola 1% darba cikla ierobežojums aprakstīts nodaļā 2.2. TTN piekļuves politika atļauj izmantot tikai 30s augšpusaišu tīkla okupēšanai un tikai 10 lejuplīnijas ziņojumus dienā [37]. Nevienam netiek strikti uzspiesta piekļuves politika, toties ir pieņemts džentelmeņa goda prāta princips, ka TTN tīkla lietotāji respektēs datu plūsmas kārtības ievērošanu bāzes serverī.

Lai iekārtu izstrādātāji varētu tīklā nosūtīt vairāk ziņojumus, tiem jāpievērš uzmanība datu ziņojumu izmēram. Laika zīmola neiekļaušana datu ziņojumā var ievērojami samazināt baitu masīva izmēru un tā piefiksēšana aizmugurserverī neizveidos datu neprecizitāti. Ar raidītāja iekārtām jāpārsūta tikai svarīgākie un konkrētākie dati. Papildus datu ziņojuma izmēru samazināšanai GPS lokācijas parametrus nepieciešams šifrēt no binārā formātā, ne decimālā grādu formātā.

Lai aptuveni izrēķinātu vidēji dienā iespējamo datu ziņojumu skaitu, kuru varētu pārsūtīt no raidītāja iekārtas uz bāzes staciju jāveic pārsūtāmo datu sakārtošana un signāla izplešanās faktora izmaiņas. Saņemto GPS atrašanās vietas datu precizitāti varētu reducēt līdz 4 cipariem aiz komata, kas reāli nozīmētu 11,132m precizitāti uz kartes. Ja platuma un garuma mērvienības ir ar četriem cipariem aiz komata, tad šifrējot tās var ievietot 3 baitu lielā masīvā, kopā aizņemtu 6 baitus no kopējā pārraides datu apjoma. Izmantojot vidējo signāla izplatīšanās faktoru šāds datu ziņojums līdz bāzes stacijai tiks pārraidīts aptuveni 186ms, balstoties pēc LoRa dizaina specifikācijas [38]. Ja ievēro TTN bāzes tīkla norādītos ierobežojumus, tad dienā var pārraidīt 161 datu ziņojumu. Tas nozīmē viena ziņojuma nosūtīšana aptuveni 9 minūšu laikā. Ja iecerētā LoRaWAN iekārta paredzēta biežāku atrašanās vietas datu pārsūtīšanai, tad to nevarētu īstenot.

REZULTĀTI

Darba rezultātos aprakstītas veiktās eksperimentālās darbības:

- LPWAN tehnoloģiju izpēte un potenciālas pielietojšanas iespējas;
- padziļināta LoRa protokola un LoRaWAN tehnoloģiju izpēte;
- dažādu moduļu apvienošana vienotā iekārtā un to testēšana;
- tīkla raidītāja iekārtas izstrādāšana un saprogrammēšana;
- LoRaWAN tīkla pieejamība Rīgā un tās apkaimē;
- raidītāja iekārtas datu pārraidīšana uz apkārt esošām bāzes stacijām TTN bāzes servera izmantošana.

Lai varētu veiksmīgi analizēt LoRaWAN tīkla pārklājumu pilsētā, nepieciešams pietiekami labs bāzu staciju izvietojums, kā arī ideālā gadījumā bāzes stacijām būtu jābūt maksimāli labākā tiešā redzamībā.

Darbs ietver sevī vairāku tematu pētīšanu, kā arī praktisko darba daļu, kurā autors izstrādāja iekārtu, balstoties uz iepriekš izpētītām tehnoloģijām. Darba sākumā izpētītas bezvadu komunikācijas tehnoloģijas un to galvenās īpašības. Tā kā darba tēma ietver sevī zema enerģijas patēriņa tehnoloģijas izpēti, tad lielāks uzsvars darbā tika likts uz LPWAN datu pārraides tehnoloģiju izpēti.

Iegulto iekārtu izstrādei vispiemērotākās ir tieši LPWAN datu pārraides tehnoloģijas, jo kaut arī tās nespēj nodrošināt tādu pārraidāmo datu apjomu, kā *Wi-Fi* vai *Bluetooth* tehnoloģijas, tās ir mobilākas un zemā enerģijas patēriņa dēļ nodrošina ilgāku darbības laiku, it sevišķi, ja to strāvas avots ir ierobežotas ietilpības baterijas. Zema enerģijas patēriņa plaša pārklājuma platjoslas interneta tehnoloģiju pielietojums ir aktuāls vairākās nozarēs - gan industriālos pielietojumos, gan zinātnisku pētījumu nolūkos, gan dabas procesu uzraudzīšanai un patērētāju lietotņu savienošanā.

Autors darbā konkrētāk izpētīja LoRa fiziskā līmeņa protokolu un LoRaWAN datu pārraides tehnoloģiju, LoRa integrālās shēmas arhitektūru un tehnisko specifikāciju, kā dažādu signāla izplatīšanās faktoru dēļ tiek ietekmēts pārraidāmais datu apjoms, ko modulis spēj pārsūtīt uz bāzes staciju un attālums līdz bāzes stacijai. Papildus teorētiskai moduļu izpētei, autors veiksmīgi izstrādāja funkcionējošu LoRaWAN raidītāja iekārtu, kas var saņemt iekārtas atrašanās vietas koordinātas no GNSS satelīta, nošifrēt datus baitu masīvā un pārsūtīt uz bāzes staciju. Darba autoram sekmīgi izdevās darbināt iekārtas moduļus atsevišķi, kas prasīja tehniskas zināšanas prototipēšanas plates izveidei. Iekārtas izstrādes procesā autors saskārās ar vairākiem sarežģījumiem, kad iekārtas nedarbojās pēc to aprakstītās funkcionalitātes, taču

izstrādes platformu kopienas forumi un līdzīgi problēmu atrisinājumi citiem izstrādātājiem, palīdzēja radušās problēmas atrisināt.

Kopējo LoRaWAN tīkla pārklājumu Rīgā neizdevās notestēt bāzes staciju sliktā novietojuma dēļ.

Līdz ar veiksmīgu raidītāja iekārtas izveidi, autors izpētīja *The Things Network* bāzes serveri, ar kura palīdzību tiek apstrādāti komunikācijas dati, darbinātas tīkla iekārtas un veidota tīkla kopējā infrastruktūra. TTN kopienā pieejamā informācija veicināja darba izstrādes procesu, jo vietnē pieejamā informācija autoram bija ļoti paskaidrojoša un nozīmīga. Autors pārzin TTN bāzes servera galvenos darbības principus un prot izveidot strādājošu tīkla lietotni. Tīkla pārklājuma izpētes nolūkos autors veica arī tīmekļa lietotnes izstrādi, lai varētu vizualizēt saņemtās datu pakotnes.

SECINĀJUMI

Balstoties uz teorētiskajā un praktiskajā daļā iegūtajiem rezultātiem, bakalaura darba autors var veikt vairākus secinājumus:

- bezvadu datu komunikācijas tehnoloģijas ir pielietojamas dažādos nolūkos un atkarībā no to izmantošanas gadījuma, jāizvēlas nepieciešamā datu pārraides tehnoloģija;
- LoRaWAN datu pārraides tehnoloģija ir praktiska un ideāla izmantošanai iegultās iekārtās, lai iegūtu plašu pārklājumu datu pārraidei;
- raidītāja iekārtas izstrādē bija nozīmīgi saprast visu komunikāciju pieslēgvietu funkcionalitāti, ko izmanto programmatūras bibliotēkas;
- raidītāja programmatūrā bija sarežģīti ieviest pārsūtīto ziņojumu datu šifrēšanas, atšifrēšanas un datu pārbaudes funkcijas;
- radās sarežģījumi no lielāka attāluma aizsūtīt bāzes stacijām jebkādu ziņojumus ar savu raidītāja iekārtu, kas saistīti, iespējams, ar kādu kļūdu raidītāja iekārtas radio izejošajā ķēdē vai arī slikto bāzes staciju novietojumu.

Autoram ne līdz galam izdevās sasniegt izvirzīto darba mērķi, izvērtējot LoRaWAN pārklājuma tīkla pieejamību pilsētā Rīga, objektīvu iemeslu dēļ. Bāzes staciju atrašanās vietas nebija visai praktiskas, jo liela daļa bāzu stacijas atradās iekštelpās vai zemu zemes līmenim.

Sākotnējie darba mērķi tika uzstādīti pārlietu ambiciozi, jo autors līdz galam neapzinājās tēmas sarežģītību un apjomu, lai kvalitatīvi izstrādātu LoRaWAN raidītāja iekārtu. Tomēr sadarbībā ar darba vadītāju, autors plāno darbu pie iekārtas un mērijumiem turpināt, lai to varētu izmantot LU LoRaWAN bāzes staciju projektā [16].

PATEICĪBAS

Sava bakalaura studiju noslēguma darbā vēlos pateikties cilvēkiem, kas mani atbalstīja un palīdzēja darba izveidē. Pateicību izsaku savam bakalaura darba vadītājam, Reinholdam Zviedrim, par šīs interesantās un mūsdienām aktuālās tēmas ieteikšanu, labojumiem darba dokumentā, kā arī raidītāja iekārtas izstrādes asistēšanā. Darba izstrāde bija interesanta un aizraujoša, jo bija arī veiksmīgs pētījuma rezultāts. Pēc darba aizstāvēšanas vēlētos turpināt pētniecību izvēlētajā tēmā, lai sasniegtu izvirzītos mērķus.

Paldies vēlos teikt saviem biedriem, kolēģiem un draugiem, Dāvim Mednim un Austrim Cīrulniekam, par emocionālā un praktiskā atbalsta sniegšanu. Kopā cīnījāties, lai sasniegtu savu noslēguma darbu labākos rezultātus un uzrakstītu labu dokumentu.

Ļoti patīkami ir, ja ir atbilstoša vieta darba izstrādei, tāpēc paldies vēlētos teikt Emil Syundyukov vadītai datorzinātņu laboratorijai "DF LAB", kurā varēju pavadīt laiku izstrādājot sava darba dokumentu, kā arī testējot darbā izstrādāto raidītāja iekārtu.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA UN AVOTI

- [1] “The ALOHA Protocol.” [tiešsaite]. Pieejams:
<http://www.wirelesscommunication.nl/reference/chaptr06/loha/loha.htm>.
- [2] P. R. Egli, “Low Power Wide Area Network,” *Indigoo.Com*, 2015.
- [3] Bluetooth Special interest group, “Bluetooth technology.” [tiešsaite]. Pieejams:
<https://www.bluetooth.com/>. [Skatīts: 13-05-2018].
- [4] J. H. Schiller, “Mobile Communications,” pp. 1–50, 2003.
- [5] NFC forum, “NFC Technology.” [tiešsaite]. Pieejams: <https://nfc-forum.org/>. [Skatīts: 13-05-2018].
- [6] Blatz, “Indoor Positioning Systems based on BLE Beacons.”
- [7] B. Ray, “LTE-M & 2 Other 3GPP IoT Technologies To Get Familiar With,” 2017.
[tiešsaite]. Pieejams: <https://www.link-labs.com/blog/lte-iot-technologies>. [Skatīts: 12-05-2018].
- [8] ZigBee Alliance, “ZigBee Alliance.” [tiešsaite]. Pieejams: <http://www.zigbee.org/>.
[Skatīts: 24-04-2018].
- [9] LinkLabs, “Low Power, Wide Area Networks,” p. 16, 2016.
- [10] TheThingsNetwork Foundation, “LoRa un LoRaWAN.” [tiešsaite]. Pieejams:
<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/>. [Skatīts: 26-04-2018].
- [11] SemtechCorporation, “What is LoRa?” [tiešsaite]. Pieejams:
<https://www.semtech.com/technology/lora>. [Skatīts: 12-04-2018].
- [12] L. Alliance, “LoRa Alliance.” [tiešsaite]. Pieejams: <https://lora-alliance.org/>. [Skatīts: 26-03-2018].
- [13] LoRa Alliance, “LoRaWAN™ 1.1 Regional Parameters,” no. 2010, p. 97331, 2011.
- [14] L. Aliance, “LoRaWAN™ 101, A technical introduction,” p. 39, 2017.
- [15] TheThingsNetwork, “The Things Network Foundation.” [tiešsaite]. Pieejams:
<https://www.thethingsnetwork.org/>. [Skatīts: 10-04-2018].
- [16] L. U. Fonds, “Pirmā bezvadu tīkla izveide Latvijas Universitātē, kas specializēts zema enerģijas patēriņa, plaša pārklājuma sensoriem.” [tiešsaite]. Pieejams:
<https://www.fonds.lv/projekti/2018gads/dabaszinatnu-un-medicinas-projekti/pirma-bezvadu-tikla-izveide-latvijas-universitate-kas-specializets-zema-enerģijas-paterina-plasa-parklajuma-sensoriem/>. [Skatīts: 23-05-2018].
- [17] L. U. Fonds, “LU 76. konferences sekcijas sēde ‘Datorzinātne un informācijas tehnoloģijas.’” [tiešsaite]. Pieejams: <https://www.df.lu.lv/zinas/t/39061/>.
- [18] “IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks: Overview and

- Architecture,” *IEEE Std 802-2014 (Revision to IEEE Std 802-2001)*, pp. 1–74, Jun. 2014.
- [19] TTN, “TTN Network architecture.” [tiešsaite]. Pieejams: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/network/architecture.html>. [Skatīts: 12-05-2018].
- [20] TTN, “TTN Device Registration.” [tiešsaite]. Pieejams: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/devices/registration.html>. [Skatīts: 12-05-2018].
- [21] “raspberry Pi3.” [tiešsaite]. Pieejams: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberrypi-3-model-b/>. [Skatīts: 12-05-2018].
- [22] “IMST iC880A concentrator 868MHz.” [tiešsaite]. Pieejams: <https://wireless-solutions.de/products/long-range-radio/ic880a.html>.
- [23] ttn-zh, “LoRaWAN gateway setup.” [tiešsaite]. Pieejams: <https://github.com/ttn-zh/ic880a-gateway/wiki>. [Skatīts: 18-05-2018].
- [24] Mobilefish, “Build LoRa node using Arduino Uno and HopeRF RFM95 LoRa transceiver module.” [tiešsaite]. Pieejams: https://www.mobilefish.com/developer/lorawan/lorawan_quickguide_build_lora_node_rfm95_arduino_uno.html. [Skatīts: 06-03-2018].
- [25] HopeRF, “RFM95W RF Transceiver.” [tiešsaite]. Pieejams: http://www.hoperf.com/rf_transceiver/lora/RFM95W.html. [Skatīts: 06-03-2018].
- [26] Watterott, “CAM-M8Q-Breakout Multi GNSS Module.” [tiešsaite]. Pieejams: <http://www.watterott.com/en/CAM-M8Q-Breakout>. [Skatīts: 03-03-2018].
- [27] R. W. Ds, “Small Signal MOSFET 200 mAmps , 60 Volts N – Channel TO – 92 N – Channel MARKING DIAGRAM,” pp. 2–5, 2011.
- [28] I. Corp., “Low Power Networking Technology from IBM and Semtech to Help Enable Telcos to Launch New Services for the Internet of Things.” [tiešsaite]. Pieejams: <https://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/46287.wss>. [Skatīts: 06-05-2018].
- [29] NMEA, “NMEA 0183 Standard.” [tiešsaite]. Pieejams: https://www.nmea.org/content/nmea_standards/nmea_0183_v_410.asp. [Skatīts: 10-05-2018].
- [30] SlashDevin, “NeoGPS, NMEA and ublox GPS parser for Arduino.” [tiešsaite]. Pieejams: <https://github.com/SlashDevin/NeoGPS>. [Skatīts: 11-05-2018].
- [31] M. Hart, “TinyGPS++.” [tiešsaite]. Pieejams: <https://github.com/mikalhart/TinyGPSPlus>. [Skatīts: 26-04-2018].
- [32] TTN, “TTN Mapper.” [tiešsaite]. Pieejams:

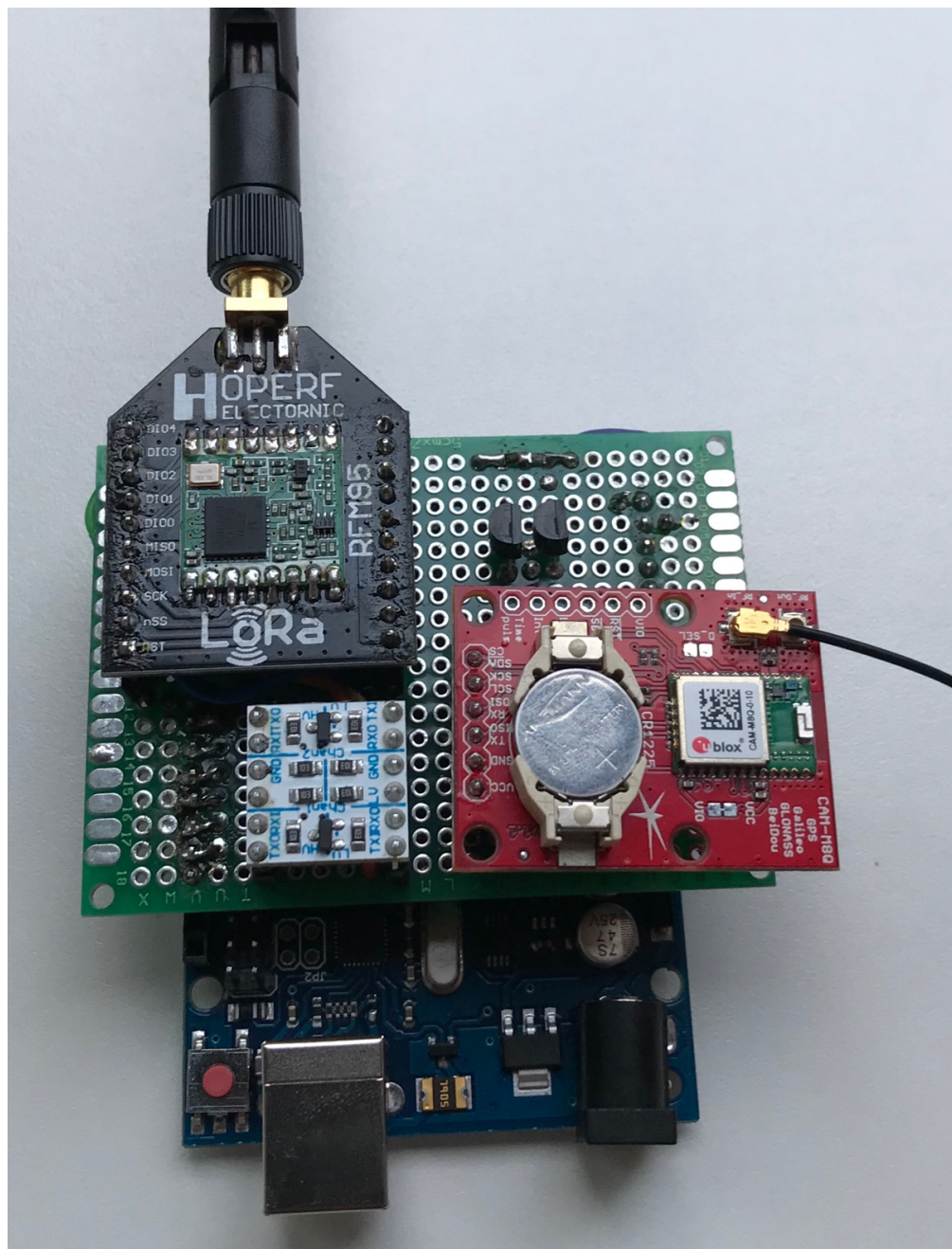
- <https://www.thethingsnetwork.org/docs/applications/ttnmapper/>. [Skatīts: 16-05-2018].
- [33] “Node.js.” [tiešsaite]. Pieejams: <https://nodejs.org/en/about/>. [Skatīts: 10-05-2018].
- [34] “PostgreSQL.” [tiešsaite]. Pieejams: <https://www.postgresql.org/>. [Skatīts: 04-05-2018].
- [35] “Sequelize Docs.” [tiešsaite]. Pieejams: <http://docs.sequelizejs.com/>. [Skatīts: 05-05-2018].
- [36] “React.js.” [tiešsaite]. Pieejams: <https://reactjs.org/>.
- [37] TTN, “Duty Cycle limitations.” [tiešsaite]. Pieejams: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/duty-cycle.html>. [Skatīts: 15-05-2018].
- [38] Semtech-Corporation, “AN1200.13: LoRa Modem Design Guide - SX1272/3/6/7/8,” no. July, pp. 1–9, 2013.

PIELIKUMI

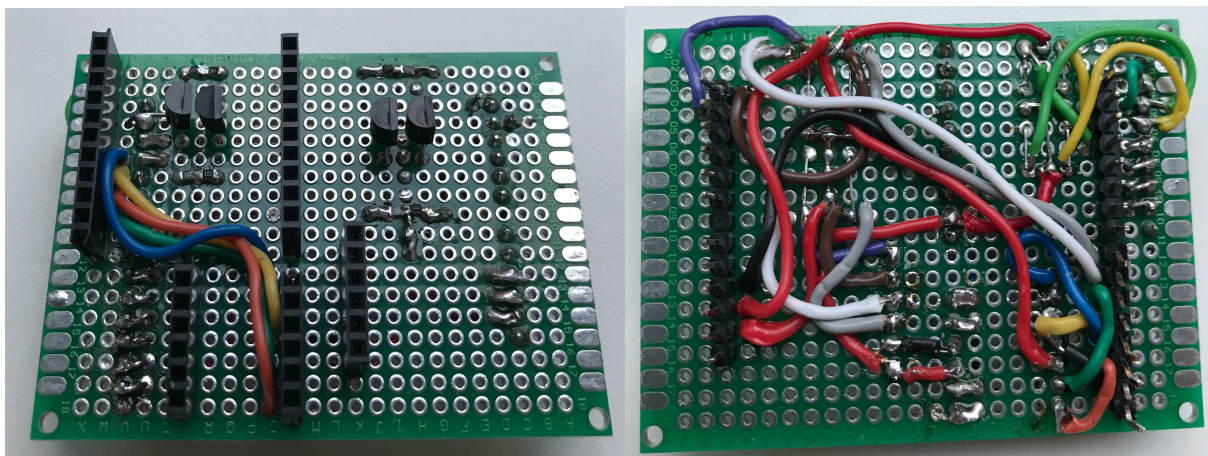
Pielikums 1. Raidītāja iekārtas moduļu izmaksu novērtējums

Moduļa nosaukums	Cena, EUR	Saite
HopeRF RFM95W ar adapteri	16,00 EUR/ vienība	www.rfsolutions.co.uk
U-blox CAM-M8Q	29,00 EUR/ vienība	http://www.watterott.com/en/CAM-M8Q-Breakout
TTL 5V - 3.3V loģikas līmeņa pārveidotājs	5,25 EUR/ vienība	https://www.lemona.lv
2n7000 tranzistori	0,13 EUR/ vienība	http://www.argus.lv
10K omu rezistori	0,30 EUR/ 10 vienības	https://www.lemona.lv
Uno mikrokontrolieris	25,00 EUR/ vienība	https://www.lemona.lv

Pielikums 2. Izstrādāta raidītāja iekārta, gatava programmas augšupielādei un testēšanai



Pielikums 3. Maketēšanas plates moduļu izvietošanas shēma



Pielikums 4. TTN datu API raidītāja iekārtas saņemtais ziņojums

```
DatuZinojums = {  
  app_id: 'elvijsloratransmitter',  
  dev_id: 'arduino_hope_rf_node',  
  hardware_serial: '0029E8BE72F886FD',  
  port: 1,  
  counter: 8,  
  payload_raw: '<Buffer 48 65 6c 6c 6f 2c 20 77 6f 72 6c 64 2c 20 66 72 6f 6d 20 45 6c 76 69 6a 73 21 00>',  
  payload_fields: {  
    alt: 12,  
    hdop: 23.3,  
    lan: 56.956361,  
    lon: 24.155235,  
  },  
  metadata: {  
    {  
      time: '2018-05-20T19:21:45.712561542Z',  
      frequency: 868.5,  
      modulation: 'LORA',  
      data_rate: 'SF7BW125',  
      airtime: 82176000,  
      coding_rate: '4/5',  
      // Informācija par bāzes stacijām, kuras saņēmušas augšpusaites ziņojumu  
      gateways: [  
        {  
          gtw_id: 'eui-b827ebfffe615958',  
          timestamp: 369993867,  
          time: '2018-05-20T09:03:26.851438Z',  
          channel: 2,  
          rssi: -107,  
          snr: 2.5,  
          rf_chain: 1,  
          latitude: 56.951,  
          longitude: 24.035,  
          altitude: 11  
        }  
      ]  
    }  
  }  
};
```

Pielikums 5. Raidītāja iekārtas programmatūras pirmkods

```
#include <NeoGPS_cfg.h>
#include <ublox/ubxGPS.h>
#include <GPSPORT.h>
#include <Streamers.h>

#include <lmic.h>
#include <hal/hal.h>
#include <SPI.h>

// Pārbaudīt konfigurācijas mainīgos
// UBLOX GPS koda fragments
//-----

#if !defined( NMEAGPS_PARSE_GGA ) & !defined( NMEAGPS_PARSE_GLL ) & \
    !defined( NMEAGPS_PARSE_GSA ) & !defined( NMEAGPS_PARSE_GSV ) & \
    !defined( NMEAGPS_PARSE_RMC ) & !defined( NMEAGPS_PARSE_VTG ) & \
    !defined( NMEAGPS_PARSE_ZDA ) & !defined( NMEAGPS_PARSE_GST ) & \
    !defined( NMEAGPS_PARSE_PUBX_00 ) & !defined( NMEAGPS_PARSE_PUBX_04 )

    #error No NMEA sentences enabled: no fix data available for fusing.

#endif

#if !defined( NMEAGPS_PARSE_PUBX_00 ) & !defined( NMEAGPS_PARSE_PUBX_04 )
    #error No PUBX messages enabled! You must enable one or more in ubxNMEA.h!
#endif

#ifndef NMEAGPS_DERIVED_TYPES
    #error You must "#define NMEAGPS_DERIVED_TYPES" in NMEAGPS_cfg.h!
#endif

#ifndef NMEAGPS_EXPLICIT_MERGING
    #error You must define NMEAGPS_EXPLICIT_MERGING in NMEAGPS_cfg.h
#endif

#ifdef NMEAGPS_INTERRUPT_PROCESSING
    #error You must *NOT* define NMEAGPS_INTERRUPT_PROCESSING in NMEAGPS_cfg.h!
#endif

//-----

// LORAWAN mainīgo deklarēšana
// LoRaWAN NwkSKey, tīkla sesijas atslēga

static const PROGMEM u1_t NWKKEY[16] = { 0x6C, 0xCD, 0x0A, 0x31, 0x40, 0xA0, 0x4D, 0x82,
    0x1E, 0xA4, 0x78, 0x90, 0x34, 0xC8, 0xC6, 0xD5 };

// LoRaWAN AppSKey, lietotnes sesijas atslēga
static const PROGMEM u1_t APPSKEY[16] = { 0xFD, 0x67, 0x1D, 0xE5, 0x57, 0x1F, 0x29, 0xC8,
    0xC4, 0xBC, 0xF8, 0x6D, 0x9D, 0x6C, 0x16, 0x16 };
```

```

// LoRaWAN raidītāja iekārtas adrese (DevAddr)
static const u4_t DEVADDR = 0x2601161D ; // <-- Change this address for every node!

// These callbacks are only used in over-the-air activation, so they are
void os_getArtEui (u1_t* buf) { }
void os_getDevEui (u1_t* buf) { }
void os_getDevKey (u1_t* buf) { }

static osjob_t sendjob;
//-----
// Globālo mainīgo deklarēšana
String toLog;
uint8_t txBuffer[9];
uint32_t LatitudeBinary, LongitudeBinary;
uint16_t altitudeGps;
uint8_t hdopGps;

uint32_t Lat;
uint32_t Lng;
uint8_t Alt;
uint8_t timestamp;
uint8_t GPShdop;
uint8_t sendTimestamp = 0 ;

static ubloxNMEA gps; // NMEA datu plūsmas parsētājs
static gps_fix fix;

// Raidītā signāla biežuma intervāls
const unsigned TX_INTERVAL = 60;

// Komunikācijas portu nozīmēšana
const lmic_pinmap lmic_pins = {
    .nss = 10,
    .rxtx = LMIC_UNUSED_PIN,
    .rst = 5,
    .dio = {2, 3, 1},
};

void do_send(osjob_t* j){
    // Pārbaudīt vai nav aktīva datu pārraide
    if (LMIC.opmode & OP_TXRXPEND) {
        DEBUG_PORT.println(F("OP_TXRXPEND, not allowed to transmit"));
    } else {
        // Sagatavot datu paciņu pārraidei
        LMIC_setTxData2(1, txBuffer, sizeof(txBuffer), 0);
        DEBUG_PORT.println(F("Packet queued"));
    }
    // Nākamais datu pārraides cikls notiek pēc TX_COMPLETE izsaukuma.
}

void onEvent (ev_t ev) {
    DEBUG_PORT.print(os_getTime());
}

```

```

DEBUG_PORT.print(": ");
switch(ev) {
  case EV_SCAN_TIMEOUT:
    DEBUG_PORT.println(F("EV_SCAN_TIMEOUT"));
    break;
  case EV_BEACON_FOUND:
    DEBUG_PORT.println(F("EV_BEACON_FOUND"));
    break;
  case EV_BEACON_MISSED:
    DEBUG_PORT.println(F("EV_BEACON_MISSED"));
    break;
  case EV_BEACON_TRACKED:
    DEBUG_PORT.println(F("EV_BEACON_TRACKED"));
    break;
  case EV_JOINING:
    DEBUG_PORT.println(F("EV_JOINING"));
    break;
  case EV_JOINED:
    DEBUG_PORT.println(F("EV_JOINED"));
    break;
  case EV_RFU1:
    DEBUG_PORT.println(F("EV_RFU1"));
    break;
  case EV_JOIN_FAILED:
    DEBUG_PORT.println(F("EV_JOIN_FAILED"));
    break;
  case EV_REJOIN_FAILED:
    DEBUG_PORT.println(F("EV_REJOIN_FAILED"));
    break;
  case EV_TXCOMPLETE:
    DEBUG_PORT.println(F("EV_TXCOMPLETE (wait windows)"));
    if(LMIC.dataLen) {
      // Saņemti dati RX vietā
      DEBUG_PORT.print(F("Data Received: "));
      DEBUG_PORT.write(LMIC.frame+LMIC.dataBeg, LMIC.dataLen);
      DEBUG_PORT.println();
    }
    // Ieplāno nākamo datu pārraides ciklu
    os_setTimedCallback(&sendjob, os_getTime()+sec2osticks(TX_INTERVAL), do_send);
    break;
  case EV_LOST_TSYNC:
    DEBUG_PORT.println(F("EV_LOST_TSYNC"));
    break;
  case EV_RESET:
    DEBUG_PORT.println(F("EV_RESET"));
    break;
  case EV_RXCOMPLETE:
    // data received in ping slot
    DEBUG_PORT.println(F("EV_RXCOMPLETE"));
    break;
  case EV_LINK_DEAD:
    DEBUG_PORT.println(F("EV_LINK_DEAD"));
    break;
}

```

```

    case EV_LINK_ALIVE:
        DEBUG_PORT.println(F("EV_LINK_ALIVE"));
        break;
    default:
        DEBUG_PORT.println(F("Unknown event"));
        break;
}
}
//-----
// Izsaukums, lai saņemtu GPS lokācijas datus
static void poll()
{
    #if defined( NMEAGPS_PARSE_PUBX_00 )
        gps.send_P( &gpsPort, F("PUBX,00") );
    #endif
    #if defined( NMEAGPS_PARSE_PUBX_04 )
        gps.send_P( &gpsPort, F("PUBX,04") );
    #endif
}
//-----
// Datu šifrēšana baitu masīvā

void build_packet()
{
    // GPS datu iegūšana
    LatitudeBinary = ((gps.fix().latitudeL() + 900000000) / 1800000000) * 16777215;
    LongitudeBinary = ((gps.fix().longitudeL() + 18000000000) / 36000000000) * 16777215;

    // GPS koordinātu šifrēšana baitu masīvā
    txBuffer[0] = ( LatitudeBinary >> 16 ) & 0xFF;
    txBuffer[1] = ( LatitudeBinary >> 8 ) & 0xFF;
    txBuffer[2] = LatitudeBinary & 0xFF;

    txBuffer[3] = ( LongitudeBinary >> 16 ) & 0xFF;
    txBuffer[4] = ( LongitudeBinary >> 8 ) & 0xFF;
    txBuffer[5] = LongitudeBinary & 0xFF;
    // GPS augstuma virs jūras līmeņa šifrēšana
    altitudeGps = Alt;
    txBuffer[6] = ( altitudeGps >> 8 ) & 0xFF;
    txBuffer[7] = altitudeGps & 0xFF;
    // GPS moduļa precizitātes datu šifrēšana
    hdopGps = GPShdop/10;
    // beigu simbola šifrēšana
    txBuffer[8] = 0xFF;
}

void setup() {
    // Lora SETUP
    DEBUG_PORT.println(F("Starting"));
    #ifdef VCC_ENABLE
        // For Pinoccio Scout boards
        pinMode(VCC_ENABLE, OUTPUT);
    #endif
}

```

```

    digitalWrite(VCC_ENABLE, HIGH);
    delay(1000);
#endif

    // LMIC inicializācija
    os_init();
    // Reset the MAC state. Session and pending data transfers will be discarded.
    LMIC_reset();
// -----

//GPS Setup
// Atklūdošana Arduino konsolē
DEBUG_PORT.begin(9600);
while (!DEBUG_PORT)
    ;

DEBUG_PORT.println( F("Looking for GPS device on " GPS_PORT_NAME) );

#ifdef NMEAGPS_PARSE_PUBX_00
    if (LAST_SENTENCE_IN_INTERVAL == (NMEAGPS::nmea_msg_t) ubloxNMEA::PUBX_00) {
        DEBUG_PORT.println( F("ERROR! LAST_SENTENCE_IN_INTERVAL PUBX_00 not enabled!\n"
            " change LAST_SENTENCE enable PUBX_00" ) );
        for(;;);
    }
#endif
#ifdef NMEAGPS_PARSE_PUBX_04
    if (LAST_SENTENCE_IN_INTERVAL == (NMEAGPS::nmea_msg_t) ubloxNMEA::PUBX_04) {
        DEBUG_PORT.println( F("ERROR! LAST_SENTENCE_IN_INTERVAL PUBX_04 not enabled!\n"
            " change LAST_SENTENCE enable PUBX_04" ) );
        for(;;);
    }
#endif

    trace_header( DEBUG_PORT );
    DEBUG_PORT.flush();

    gpsPort.begin(9600);

    poll();

// -----
// LoRa moduļa kanālu inicializācijas metodes

    // Set static session parameters. Instead of dynamically establishing a session
    // by joining the network, precomputed session parameters are be provided.
    #ifdef PROGMEM
        uint8_t appskey[sizeof(APPSKEY)];
        uint8_t nwkskey[sizeof(NWKSKEY)];
        memcpy_P(appskey, APPSKEY, sizeof(APPSKEY));
        memcpy_P(nwkskey, NWKSKEY, sizeof(NWKSKEY));
        LMIC_setSession (0x1, DEVADDR, nwkskey, appskey);
    #else
        // If not running an AVR with PROGMEM, just use the arrays directly

```

```

LMIC_setSession (0x1, DEVADDR, NWKKEY, APPKEY);
#endif

#if defined(CFG_eu868)
LMIC_setupChannel(0, 868100000, DR_RANGE_MAP(DR_SF12, DR_SF7), BAND_CENTI); // g-
band
LMIC_setupChannel(1, 868300000, DR_RANGE_MAP(DR_SF12, DR_SF7B), BAND_CENTI); // g-
band
LMIC_setupChannel(2, 868500000, DR_RANGE_MAP(DR_SF12, DR_SF7), BAND_CENTI); // g-
band
LMIC_setupChannel(3, 867100000, DR_RANGE_MAP(DR_SF12, DR_SF7), BAND_CENTI); // g-
band
LMIC_setupChannel(4, 867300000, DR_RANGE_MAP(DR_SF12, DR_SF7), BAND_CENTI); // g-
band
LMIC_setupChannel(5, 867500000, DR_RANGE_MAP(DR_SF12, DR_SF7), BAND_CENTI); // g-
band
LMIC_setupChannel(6, 867700000, DR_RANGE_MAP(DR_SF12, DR_SF7), BAND_CENTI); // g-
band
LMIC_setupChannel(7, 867900000, DR_RANGE_MAP(DR_SF12, DR_SF7), BAND_CENTI); // g-
band
LMIC_setupChannel(8, 868800000, DR_RANGE_MAP(DR_FSK, DR_FSK), BAND_MILLI); // g2-
band

#elif defined(CFG_us915)
LMIC_selectSubBand(1);
#endif

// Disable link check validation
LMIC_setLinkCheckMode(0);

// TTN uses SF9 for its RX2 window.
LMIC.dn2Dr = DR_SF9;

// Norādīt signāla izplatīšanās faktoru un raidīšanas jaudu
LMIC_setDrTxpow(DR_SF7,14);
getGPS_data();
do_send(&sendjob);
}

void getGPS_data() {
while (gps.available( gpsPort )) {
fix = gps.read();

#if defined(GPS_FIX_VELNED) && defined(NMEAGPS_PARSE_PUBX_00)
fix.calculateNorthAndEastVelocityFromSpeedAndHeading();
#endif

Lat = gps.fix().latitudeL();
Lng = gps.fix().longitudeL();
Alt = gps.fix().altitude();
timestamp = gps.fix().dateTime;

poll();
}

```

```
    }  
  }  
  
  void loop() {  
    // Nolasīt GPS datus no ublox moduļa  
    getGPS_data();  
    if (timestamp - sendTimestamp > 5){  
      build_packet();  
      DEBUG_PORT.println(toLog);  
      DEBUG_PORT.println("byte packing done");  
      os_runloop_once();  
      sendTimestamp = timestamp;  
    }  
  }  
}
```

Bakalaura darbs "LoRaWAN datu pārraides tīkla veiktspējas novērtējums Rīgas pilsētā un tās apkaimē" izstrādāts Latvijas Universitātes Datorikas fakultātē.

Ar savu parakstu apliecinu, ka pētījums veikts patstāvīgi, izmantoti tikai tajā norādītie informācijas avoti un iesniegtā darba elektroniskā kopija atbilst izdrukai.

Autors: Elvijs Ernests Viļķels _____ .05.2018.

Rekomendēju darbu aizstāvēšanai

Vadītājs: Dr.dat. Reinholds Zviedris _____ .05.2018.

Recenzents: docents, Dr. dat. Leo Trukšāns _____

Darbs iesniegts ____ .05.2018.

Metodiķe: Ārija Sproģe _____

Darbs aizstāvēts bakalaura gala pārbaudījuma komisijas sēdē

____ .06.2018. prot. nr. _____

Komisijas sekretārs(-e): _____