

LATVIJAS UNIVERSITĀTE

Datorikas fakultāte

Reinholds Zviedris

**OBJEKTU MONITORINGS AR ZEMA ENERĢIJAS
PATĒRĪŅA IEGULTĀM IEKĀRTĀM UN
HETEROGĒNIEM BEZVADU SENSORU TĪKLIEM**

Promocijas darbs

datorzinātņu doktora (*Dr.sc.comp.*) zinātniskā grāda iegūšanai

Nozare: datorzinātnes

Apakšnozare: datu apstrādes sistēmas un datortīkli

Zinātniskais vadītājs:

Profesors, *Dr.sc.comp.*

Leo Seļāvo

Rīga – 2015



**LATVIJAS
UNIVERSITĀTE**
ANNO 1919

IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā "Atbalsts doktora studijām Latvijas Universitātē - 2".

Anotācija

Bezvadu sensoru tīkli ir kļuvuši par neatņemamu daļu no visuresošās skaitļošanas (*Ubiquitous Computing*) un lietu interneta (*Internet of Things*). Darba ietvaros izstrādāta un aprakstīta vispārīgā metode iegulto sensoru iekārtu izveidei, kuru pielietojot, iespējams radīt rīkus objektu monitoringam un datu ievākšanai, kas, savukārt, izmanto zema enerģijas patēriņa iegultas sensorās iekārtas un heterogēnus bezvadu sensoru tīklus. Darbā gaitā izstrādātā metode pielietota, lai radītu rīku kopumu, kas piemēroti savvaļas dzīvnieku, piemēram, Eirāzijas lūšu (*Lynx lynx*) vai Eirāzijas pelēko vilku (*Canis lupus lupus*) monitoringam un aktivitāšu noteikšanai. Darbā izvirzītā hipotēze arī aprobēta un iegūtie rezultāti apkopoti, pielietojot radītos rīkus auto orientēšanās pasākumu dalībnieku izsekošanai. Daļa no darba rezultātiem tiek pielietoti datu ieguvei un apmaiņai, veicot apvidus izpēti pirms saules un vēja enerģijas ieguves iekārtu uzstādīšanas. Darbā sasniegtie rezultāti, radot dažāda pielietojuma iegultās sensorās iekārtas, pierāda, ka aprakstītā vispārīgā metode ir pielietojama.

Atslēgas vārdi

Bezvadu sensoru tīkli, objektu monitorings, savvaļas dzīvnieki, komunikācija tīklā, pret aizturēm noturīga datu pārraide.

Abstract

Wireless sensor networks have become an integral part of the ubiquitous computing and the Internet of Things. During research has been developed and described general method for creating embedded sensor equipment. By applying it one can create tools for object monitoring and data collection using low-power embedded sensor equipment and heterogeneous wireless sensor networks. In the course of work the method was applied to create the tool package suitable for monitoring and determination of activities of wild animals, i.e., Eurasian lynxes (*Lynx lynx*) or Eurasian grey wolves (*Canis lupus lupus*). Some of work's hypotheses are evaluated and results are categorized by applying them to track participants of car orienteering events. As well some assumptions of research are evaluated based on data collection and exchange in monitoring of sites of future renewable energy plants. The results achieved by creating various usage embedded sensor devices shows that general method described in thesis is applicable.

Keywords

Wireless Sensor Networks, Object Monitoring, Wild Animals, Network Communication, Delay and Disruption Tolerant Networking.

Pateicības

Pirmkārt, es vēlētos pateikties par palīdzību un atbalstu promocijas darba izstrādē savai sievai Mārai, kura mani uzmundrināja un atbalstīja, kā arī saviem bērniem Otto Mārtiņam un Rūtai Tillai un pārējiem ģimenes locekļiem par to, ka atļāva man to paveikt.

Otrkārt, liela pateicība jāizsaka manam promocijas darba vadītājam Leo Seļāvo par izturību un uzticību, vadot mani.

Treškārt, es izsaku pateicību saviem bijušajiem Elektronikas un datorzinātņu institūta kolēģiem Ģirtam Strazdiņam, Artim Mednim, Atim Elstam, Gatim Šūpolam, Aivaram Ševerdakam, Georgijam Kanoniram, Andrim Gordjušinam, Rinaldam Ruskulam par palīdzību un padomiem šī darba tapšanā. Īpašs paldies Artim un Gatim par viņu palīdzību realizējot manis uzprojektētās iegultās iekārtas dzīvē.

Ceturtkārt, es vēlētos pateikties arī saviem vecākiem Oskaram un Marijai, kā arī saviem brāļiem Edgaram un Mārtiņam par atbalstu, kuru tie sniedza visa darba tapšanas gaitā. Īpašs paldies Mārtiņam arī par vērtīgām idejām darba radīšanai.

Piektkārt, paldies visiem maniem draugiem, kuri atbalstīja mani gan morāli, gan materiāli darba tapšanas gaitā – Ivaram un Natālijai par viņu tulkošanas prasmēm, Gunāram un Ilzei par pieredzi veterinārijā.

Sestkārt, es veltu pateicību Aivaram Ornicānam no LVMI "Silava" par ideju, kas – faktiski – ir promocijas darba stūrakmens jeb par nepieciešamību pēc risinājuma savvaļas lūšu un vilku izsekošanai un to aktivitātes noteikšanai.

Visbeidzot, izsaku pateicību arī SIA "Akeru Systems" un Gatim Mednim personīgi par palīdzību pasākumu vadības sistēmas realizācijā, kā arī biedrībai "Autoliste" un apvienībai "CDT" par iespēju izmantot viņu organizētos pasākumus, lai pārbaudītu darbā izvirzītās hipotēzes un iegūtu pētījumu rezultātus.

Darba gaitā radīto iegulto iekārtu prototipu izstrādi daļēji atbalstījuši:

- Eiropas Sociālā fonda projekts Nr. 2009/0219/1DP/1.1.1.2.0/09/APIA/VIAA/020 "Viedo sensoru un tīklotu iegulto sistēmu pētījumu un attīstības centrs (VieSensTIS)";
- SIA "19 points".

Saturs

Ievads	1
Tēmas aktualitāte	2
Darba mērķis un uzdevumi	4
Sasniegtie rezultāti	5
Publikāciju saraksts	5
Publikācijas, kas indeksētas SCOPUS	6
Citur indeksētas publikācijas	6
Publikācijas konferenču tēzēs	7
Uztāšanās konferencēs	7
Mutiskās prezentācijas	7
Sagatavotie un prezentētie plakāti	8
Darba struktūra	8
 1. Vispārējs objektu monitoringa modelis	 10
1.1. Kas ir bezvadu sensorās iekārtas un to tīkli?	10
1.2. Iespējamie BST pielietojumi, izaicinājumi un prasības	12
1.3. Monitoringa modelis	15
1.4. Vispārīgā metode iegulto BST iekārtu izveidei	17
 2. Izmantotie materiāli un metodes	 19
2.1. Izmantotā datortehnika un programmatūra	19
2.2. Izmantotās iegultās iekārtas	20
2.2.1. Texas Instruments MSP430	20
2.2.2. Arduino	22
2.2.3. Raspberry Pi	23
2.2.4. Speciālās iegultās iekārtas	24
2.3. Hipotēžu pārbaudei pielietotās metodes	25

3. Savvaļas dzīvnieku monitorings, izmantojot bezvadu sensoru tīklus	27
3.1. Ievads	28
3.1.1. Motivācija	29
3.2. Esošo risinājumu apskats	31
3.2.1. VHF sekošana	31
3.2.2. ARGOS satelītsekošana	35
3.2.3. GPS sekošana	38
3.2.4. Citi risinājumi	44
3.3. Risinājums	51
3.3.1. Sistēmas arhitektūra	51
3.3.2. Aparatūra	54
3.3.3. Programmatūra	60
3.4. Eksperimenti	66
3.4.1. Eksperimentu apraksts	66
3.4.2. Rezultāti	68
3.5. Secinājumi	76
4. Heterogēni rīki izglītībai un izklaidei reālā laikā	78
4.1. Ievads	78
4.1.1. Motivācija	79
4.2. Esošo risinājumu apskats	80
4.3. Risinājums	83
4.3.1. Sistēmas arhitektūra	84
4.3.2. Pasākumu vadības sistēma	86
4.3.3. Aparatūra	97
4.4. Eksperimenti un to rezultāti	101
4.5. Secinājumi	103
5. Tīmekļa servisi zema enerģijas patēriņā bezvadu sensoru tīklos	105
5.1. Ievads	105
5.1.1. Motivācija	106
5.2. Esošo risinājumu apskats	107

5.2.1. MAC protokoli	107
5.2.2. Transporta protokoli	109
5.2.3. Tīmekļa servisi bezvadu sensoru tīklos	110
5.2.4. Pret aizturēm un pārtraukumiem noturīgi bezvadu sensoru tīkli . .	111
5.2.5. Mobilu mezglu pielietojums bezvadu sensoru tīklos	112
5.3. Risinājums	113
5.4. Eksperimenti	114
5.4.1. Sistēmas arhitektūra	114
5.4.2. Aparatūra	115
5.4.3. Programmatūra	118
5.4.4. Izaicinājumi	119
5.5. Secinājumi	123
Nobeigums	124
Secinājumi	124
Darba perspektīva	126
A. <i>LynxNet</i> gala iekārtas 2. prototipa principiālās shēmas	127
A.1. Gala iekārtas moduļu shēmas	127
A.2. Monitoringa kaklasiksnas detaļu saraksts	128
B. <i>LynxNet</i> gala iekārtas enerģijas patēriņa aprēķina programmatūra	140
C. Dinamiskā kontrolpunkta konfigurācijas komandu saraksts	156
D. Sensoru mezgla un bāzes stacijas principiālās shēmas	160
D.1. Sensoru mezgla shēmas	160
D.2. Sensoru mezgla detaļu saraksts	162
D.3. Bāzes stacijas shēmas	163
D.4. Bāzes stacijas detaļu saraksts	164
Izmantotā literatūra un avoti	165

Attēlu saraksts

1.	Promocijas darba pētījumu lauks un objekts	4
1.1.	Sensoru mezgla vispārīgā arhitektūra	11
1.2.	BST pētniecības izaicinājumi	14
2.1.	TI MSP-EXP430G2 LaunchPad	21
2.2.	TI MSP-EXP430FR5739 FRAM	21
2.3.	TI MSP-EXP430F5529LP	22
2.4.	Arduino Uno	23
2.5.	Arduino Pro	23
2.6.	Raspberry Pi Model A iekārta	24
2.7.	Raspberry Pi Model B iekārta	24
2.8.	Virknes saskarnes uz USB pārveidotājs	25
2.9.	Tmote Sky sensoru mezgls	25
2.10.	Telonics VHF uztvērējs ar antenu	25
3.1.	Eirāzijas lūsis kokā	29
3.2.	Lūšu ķeršanas ierīce – kaste	29
3.3.	Sistēmas arhitektūra	51
3.4.	<i>LynxNet</i> gala iekārtas 1. prototips	55
3.5.	<i>LynxNet</i> gala iekārtas 2. prototipa funkcionālā shēma	56
3.6.	<i>LynxNet</i> gala iekārtas 2. prototipa spiestās plates shēma	58
3.7.	<i>LynxNet</i> gala iekārtas ārkārtas darbības moduļa prototips	59
3.8.	EdiMote modulis, kas tiek izmantots kā bāzes stacijas komunikāciju modulis	61
3.9.	Raspberry Pi mikrodaturs, kas ir bāzes stacijas pamatkomponente	61
3.10.	<i>LynxNet</i> datu pakotnes fiziskais formāts	64
3.11.	<i>LynxNet</i> MAC protokola sarīkošanās shēma	64
3.12.	Testa ”lūsis” – Spaiks	67
3.13.	Testa uzstādījumi Rumbulas lidostā	67
3.14.	Testa uzstādījumi Šampētera mežā	67

3.15. Radio testi Rumbulas lidlaukā	69
3.16. Radio testi Šampētera mežā	70
3.17. Modelētais 433 MHz pārklājums Ķemeru tīrelī	71
3.18. Modelētais 433 MHz sensoru tīkls Ķemeru tīrelī	71
3.19. 152 MHz raidītāja testu iekārta	72
3.20. Modelētais 152 MHz pārklājums Ķemeru tīrelī	73
3.21. Modelētais 152 MHz sensoru tīkls Ķemeru tīrelī	73
4.1. Pasākumu organizācijas shēma no 2001. līdz 2005. gadam	84
4.2. Pasākumu organizācijas shēma no 2006. līdz 2007. gada pavasarim	85
4.3. Pasākumu organizācijas shēma 2007. gada rudenī	86
4.4. Pasākumu organizācijas shēma no 2008. līdz 2011. gada pavasarim	87
4.5. Spēkā esošā pasākumu organizācijas shēma – sistēmas arhitektūra	88
4.6. Uzdevuma datu struktūra	88
4.7. Uzdevums	90
4.8. Karte	90
4.9. Autoorientēšanās pasākuma atkārtotas atskaņošanas piemērs	94
4.10. Kājnieku orientēšanās pasākuma atkārtotas atskaņošanas piemērs	95
4.11. Pasākumu vadības sistēmas nākotnes arhitektūra	96
4.12. Dinamiskā kontrolpunkta iegultās iekārtas 1. prototips	98
4.13. Dinamiskā kontrolpunkta iegultās iekārtas 2. prototipa shēma	102
5.1. MAC protokolu darbības pamatprincips	108
5.2. Komunikācijas modeļi	109
5.3. IPv6 un 6LoWPAN pakotņu satura salīdzinājums	110
5.4. WSN-SOA transakcija	113
5.5. Eksperimentos realizētā WSN-SOA sistēmas arhitektūra	114
5.6. WSN-SOA sensoru mezgls	116
5.7. Vēja virziena, vēja stipruma un nokrišņu daudzuma sensori	117
5.8. Temperatūras un relatīvā mitruma sensors	117
5.9. WSN-SOA sensoru mezgla barošanas risinājums	118
5.10. WSN-SOA bāzes stacijas augšpuse	119

5.11. WSN-SOA bāzes stacijas apakšpuse	120
A.1. USB-UART moduļa principiālā shēma	133
A.2. Ārkārtas moduļa mikrokontroliera principiālā shēma	134
A.3. Ārkārtas moduļa raidītāja principiālā shēma	135
A.4. Galvenā moduļa mikrokontroliera principiālā shēma	136
A.5. Iekšējo sensoru principiālā shēma	137
A.6. Ārējo sensoru un 7 segmentu displeja principiālā shēma	138
A.7. Litija jonu akumulatoru lādētāju principiālās shēmas	139
D.1. Sensoru mezgla ārējo sensoru principiālā shēma	160
D.2. Sensoru mezgla pastāvīgās atmiņa, reālā laika pulksteņa un raiduztvērēja principiālā shēma	161
D.3. Sensoru mezgla autonomā barošanas avota principiālā shēma	161
D.4. Bāzes stacijas raiduztvērēja principiālā shēma	163
D.5. Bāzes stacijas barošanas avota un enerģijas patēriņa kontroles moduļa prin- cipiālā shēma	163

Tabulu saraksts

1.1.	Vispārīgais monitoringa modelis	15
1.2.	BST izaicinājumu sarežģītības novērtējums	16
3.1.	Tipiskā precizitāte ARGOS sistēmā	36
3.2.	GPS lokācijas datu pakotnes saturs un izmērs	53
3.3.	Aktivitātes datu pakotņu sērijas 1. pakotnes saturs un izmērs	53
3.4.	Aktivitātes datu pakotņu sērijas regulārās pakotnes saturs un izmērs	54
3.5.	TRM-433-LT raiduztvērēja testu rezultāti Rumbula lidlaukā	69
3.6.	TRM-433-LT raiduztvērēja testu rezultāti Šampētera mežā	70
3.7.	Aprēķinātais stundas enerģijas patēriņš <i>LynxNet</i> gala iekārtu prototipiem	75
3.8.	Aprēķinātais sistēmas dzīves ilgums <i>LynxNet</i> gala iekārtu prototipiem	75
3.9.	<i>LynxNet</i> bāzes stacijas enerģijas patēriņš	76
4.1.	Dinamiskā kontrolpunkta iegultās iekārtas enerģijas patēriņš dažādos dar- ba režīmos	99
4.2.	Autonomais kontrolpunkta iekārtas darbības laiks	100

Apzīmējumu saraksts

Šajā disertācijā lietoto terminu un abreviatūru saraksts:

ADC – Analog to Digital Converter jeb analogciparu pārveidotājs ir ierīce, kas pārveido ieejas analogo signālu diskrētajā kodā (ciparu signālā).

BSL – BootStrap Loader jeb sāknēšanas programma ir īsa programma, kas pastāvīgi glabājas datora energoneatkarīgajā atmiņā un kas vajadzības gadījumā no lasāmatmiņas operatīvajā atmiņā izsauc uzdevumu risināšanas vadības sistēmu (piemēram, operētājsistēmu) vai tās ielādes programmu.

BST – Bezvadu sensoru tīkli jeb dažreiz saukti arī par bezvadu sensoru un akuatoru tīkliem (BSAT) ir telpiski izvietotas autonomas sensorās iekārtas, kas veic fizisko vai vides nosacījumu monitoringu, un savstarpēji sazinās, izmantojot bezvadu tīklus.

CPU – Central Processing Unit jeb centrālais procesors ir datora mezgls, kas pēc norādītās programmas, realizē datu matemātisko un loģisko apstrādi un attiecīgajos momentos ierosina pārējo mezglu darbību.

CSMA – Carrier Sense Multiple

Access jeb nesēja jušanas un sadursmju nepieļaušanas daudzpiekļuve ir varbūtiskais mediju piekļuves kontroles (MAC) protokols.

DAC – Digital to Analog Converter jeb ciparanalogu pārveidotājs ir ierīce, kas pārveido ieejas diskrēto kodu jeb ciparu signālu analogajā signālā.

DCO – Digitally Controlled Oscillator jeb digitāli kontrolēts oscilators ir hibrīds digitāli-analogs elektronisks oscilators, ko izmanto signālu sintezatori.

DIP – Dual Inline Package ir elektronisko komponentu korpusa veids.

DMA – Direct Memory Access ir ievadizvades procesa piekļuves metode operatīvajai atmiņai programmas izpildes laikā.

DOF – Degrees of Freedom jeb brīvības pakāpes ir neatkarīgu parametru skaits, kas nosaka mehāniskas sistēmas konfigurāciju.

DTN – Delay or Disruption Tolerant Networking jeb aiztures vai pārrāvumu noturīga tīklošana ir tāda tīkla izveide, kas spētu izturēt aiztures, traucējumus un pārrāvumus.

EDGE – Enhanced Data rates for GSM Evolution jeb tehnoloģija EDGE ir pārejas posmā no otrās uz trešās paaudzes bezvadu sakariem izveidota tehnoloģija, kas izmanto GSM standartu.

EDI – Elektronikas un datorzinātņu institūts.

EEPROM – Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory jeb elektriski pārprogrammējamā lasāmatmiņa ir lasāmatmiņa, ko ar elektrisku signālu palīdzību var programmēt un vairākas reizes pārprogrammēt gan datorā, gan ārpus tā.

FIFO – First In, First Out jeb pirmais iekšā - pirmais ārā ir datu apstrādes procedūra, kas paredz, ka pirmais atmiņā ievietotais elements kā pirmais tiek arī nolasīts.

FM – Frequency Modulation jeb frekvences modulācija ir informācijas kodēšana, mainot nesējfrekvenci.

FRAM – Ferroelectric Random-Access Memory jeb feroelektriskā brīvpiekļuves atmiņa ir brīvas piekļuves atmiņas veids.

GLS – Global Location Service jeb globāls atrašanās vietas pakalpojums ir pakalpojums, kas ir pieejams visā pasaulē.

GPS – Global Positioning System jeb globālā vietnoteices sistēma ir ASV Aiz-

sardzības departamenta izveidota radio-navigācijas satelītsistēma.

GNSS – Global Navigation Satellite System jeb globālā navigācijas satelītu sistēma ir satelītu navigācijas sistēma ar pārklājumu visā pasaulē.

GPIO – General-purpose Input/Output jeb universāla ievade/izvade ir tāda ievade/izvade, kuras uzvedību var noteikt lietotājs.

GPRS – General Packet Radio Service jeb vispārējais pakešu radiopakalpojums ir globālās mobilo sakaru sistēmas paplašinājums, kas nodrošina datu pakešu pārraidi.

GPX – GPS eXchange Format jeb globālās vietnoteices sistēmas apmaiņas formāts ir datu apmaiņas formāts, kas ļauj apmainīties ar globālās vietnoteices sistēmas datiem.

GSM – Global System for Mobile communications jeb globālā mobilo sakaru sistēma ir tehnoloģija, kas nodrošina digitālo mobilo telefonu standartpakalpojumu, kura pamatā ir laikdales multipleksēšana.

HTML – HyperText Markup Language jeb hiperteksta marķēšanas valoda ir valoda, kas, izmantojot speciālus kodus, nosaka hiperteksta dokumenta atveidojumu displeja ekrānā gadījumā, ja tiek lie-

totas interneta globālā tīmekļa lappuses.

HTTP – Hypertext Transfer Protocol jeb hiperteksta transporta protokols ir interneta standartprotokols, kas nodrošina informācijas apmaiņu globālajā tīmeklī.

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers jeb Elektrotehnikas un elektronikas inženieru institūts ir starptautiska profesionāla organizācija, kas apvieno inženierus, zinātniekus un studentus elektronikas un tai radniecīgās nozarēs. Viens no šīs organizācijas galvenajiem darbības virzieniem ir standartizācija, t.sk. standartu izstrādāšana lokālajiem tīkliem un pilsētīkliem.

IoT – Internet of Things jeb lietu internets ir fizisku lietu, kas aprīkotas ar elektroniku, programmatūru, sensoriem un savienojumiem, tīkls, kas padara tās nodrošinātākas ļaujot tām veikt datu apmaiņu ar ražotāju, operatoru un/vai citām pievienotajām ierīcēm.

IPv4 – Internet Protocol version 4 jeb interneta protokols, versija 4

IPv6 – Internet Protocol version 6 jeb interneta protokols, versija 6

I2C – Inter-Integrated Circuit ir virknes piekļuves kopne, kas tiek izmantota zemāka ātruma perifērijas ierīču pievienošanai datoru pamatplatēm vai iegultajām sistēmām.

JTAG – Joint Test Action Group jeb standarta diagnostikas ports, ar kura palīdzību iespējams atklāt iegultās iekārtas.

JSON – JavaScript Object Notation jeb JavaScript objektu notācija ir uz tekstu balstīts datu apmaiņas formāts, kas ļauj pārsūtīt strukturētus datus.

LCD – Liquid Crystal Display jeb šķidro kristālu displejs ir displejs, kas veido rakstzīmes, izmantojot speciālus šķidrumā veidotus šablonus, kuri kļūst necaurspīdīgi, ja tiem pievada spriegumu.

LIFO – Last In, First Out jeb pēdējais iekšā - pirmais ārā ir datu apstrādes procedūra, kas paredz kā pirmo apstrādāt pēdējo rindā ienākušo vai datnē ierakstīto informāciju.

LTE – Long-Term Evolution jeb ilgtermiņa evolūcija ir 4. paaudzes (4G) mobilie sakari, paredzēti liela ātruma (līdz 100Mb/sek.) datu pārraidei.

MAC – Media Access Control jeb fiziskās piekļuves vadība ir paņēmieni, ko izmanto, lai noteiktu datu staciju secību, kas noteiktu laiku pārvalda pārraides vidi.

MEMS – MicroElectroMechanical Systems jeb mikro elektriskās-mehāniskās sistēmas ir īpaši mazu ierīču tehnoloģija ierīcēm, kuru komponentes ir no 1 līdz 100 mikrometri un pašas ierīces ir izmēros no

20 mikrometriem līdz vienam milimetram.

MMS – Multimedia Messaging Service jeb multivides ziņapmaiņas pakalpojums ir ziņapmaiņas pakalpojums, kas ļauj nosūtīt attēlus, skaņu un video.

NTC – Negative Temperature Coefficient jeb negatīvais temperatūras koeficients nosaka to, ka pretestība samazināsies, palielinoties temperatūrai.

PIT – Passive Integrated Transponder jeb pasīvais integrētais retranslators ir signālu uztvērējs, kas automātiski atbild uz saņemto signālu. Daži retranslatori nosūta saņemtos signālus pa norādīto ceļu, izmantojot to pašu vai citu frekvenci.

PTT – Platform Transmitter Terminals jeb platformas pārraides termināli ir speciāls izsekošanas aprīkojums, kas tiek piestiprināts izsekojamajam objektam.

PWM – Pulse-Width Modulation jeb impulsa platuma modulācija ir tehnoloģija, kas tiek izmantota, lai veiktu ziņojuma kodēšanu pulsa signālā.

QR Code jeb **QR kods** – Quick Response Code jeb QR kods ir īpašs divdimensiju svītru kods.

REST – Representational State Transfer jeb attēlojuma stāvokļa pārsūtīšana ir programmatūras arhitektūras stils, kas sastāv no mērogojamu tīmekļa pakalpojumu izveides vadlīnijām.

RF – Radio Frequency jeb radio frekvence.

RFID – Radio Frequency Identification jeb radio frekvences identifikācija ir tehnoloģija, kas izmanto automātiskas identifikācijas nolūkos un kurā datus nosūta un saņem ar radiosignālu palīdzību, izmantojot ierīces, ko sauc par RFID retranslatoriem.

RSSI – Received Signal Strength Indication jeb saņemtā signāla stipruma indikators ir saņemtā radio signāla jaudas mērijums.

RTC – Real Time Clock jeb reāllaika pulkstenis ir pulkstenis datorā, kas vienmēr rāda faktisko laiku. Reāllaika pulkstenis ģenerē ciparsignālu vai periodiskus impulsus, ko dators var izmantot kā laika intervāla starp dažādiem notikumiem, tā arī kāda procesa sākuma momenta noteikšanai.

SD – Secure Digital atmiņas karte jeb drošā digitālā karte ir maza pastmarkas lieluma zibatmiņas karte, kas sver aptuveni 2 g.

SPI – Serial Peripheral Interface jeb virknes perifērā saskarne ir saskarne, kas nodrošina sinhronu virknes komunikāciju.

SMS – Short Message Service jeb īsziņu pakalpojums ir pakalpojums mobilajās sakaru sistēmās, kas ļauj lietotājam vien-

laicīgi un neatkarīgi no balss un datu izsaukumiem sūtīt un saņemt īsus ziņojumus (sistēmā GSM - līdz 160 rakstzīmēm). Šis ir reāllaika pakalpojums, kurā komutācijas vadības funkcijas veic ziņojumu centri.

SOA – Service Oriented Architecture jeb servisorientēta arhitektūra ir programmatūras izstrādes arhitektūra, kas izmanto tīklā pieejamos komponentus.

SOAP – Simple Object Access Protocol jeb vienkāršais objektpieklūves protokols ir protokols, ar kura palīdzību internetā un citās izkliedētās skaitļošanas vidēs var sazināties un kopīgi darboties dažādu platformu un operētājsistēmu programmatūra, sūtot cita citai XML formātā strukturētus datus. Ir specificēts, kā šāda apmaiņa var notikt ar HTTP palīdzību.

SRD – Short Range Device jeb neliela darbības rādiusa ierīce.

SST – Sea Surface Temperature jeb jūras ūdens virsmas temperatūra.

TCP – Transmission Control Protocol jeb pārraides vadības protokols ir protokolu TCP/IP sistēmas sastāvdaļa, kas atbilst Atvērto sistēmu sadarbības bāzes etalonmodeļa transporta slāņa protokolam. Protokols TCP paredz iepriekšēju savienojuma nodibināšanu, un tajā ir tādi drošas datu pārraides un plūsmas vadības

mehānismi kā slidošais logs, noildzes, apstiprinājumi un atkārtotās pārraides.

TDMA – Time Division Multiple Access jeb laikdales daudzpieklūve ir paņēmieni, kas ļauj daudzām galiekārtām iepriekš nosacītā veidā vai saskaņā ar pieprasīto noslodzi kopīgi lietot pārraides trakta resursu, izmantojot laikdales metodi.

UDP – User Datagram Protocol jeb lietotāja datogrammu protokols ir TCP/IP protokolu komplekta protokols, kas ļauj lietojumprogrammai nosūtīt ziņojumu vienam vai vairākiem kāda datora lietojumiem.

URL – Uniform Resource Locator jeb vienotais resursu vietrādis ir adrese, kas norāda, kur var atrast kādu konkrētu interneta resursu.

USART – Universal Synchronous/Asynchronous Receiver-Transmitter jeb universālais sinhronais/asinhronais raiduztvērējs ir datora komponents, kas apstrādā asinhronos sakarus.

USB – Universal Serial Bus jeb universālā seriālā kopne ir ārējās kopnes standarts, kas nodrošina datu pārraides ātrumu līdz 12 megabitiem sekundē. Atsevišķai kopnes USB pieslēgvietai var pievienot līdz 127 ārējām iekārtām, piem., peles, modemus vai tastatūras.

VHF – Very High Frequency jeb ļoti augstas frekvences radio viļņi ir radio viļņi frekvenču reģionā no 30 līdz 300 MHz.

WAP – Wireless Application Protocol jeb bezvadu lietojumu protokols ir protokols bezvadu iekārtu piekļuves nodrošināšanai e-pastam, balss pastam, faksu saņemšanai, bankas transakciju veikšanai un nelielu tīmekļa lappušu aplūkošanai bezvada termināļa displejā.

WiFi – Wireless Fidelity jeb bezvadu tīkls ir bezvadu tīklošanas standarts, kas ļauj nosūtīt informāciju, izmantojot augstas frekvences lokālus bezvadu tīklus.

WSN – Wireless Sensor Network jeb

bezvadu sensoru tīkls. Skatīt BST skaidrojumu.

3D – 3 dimensijas.

3G – 3rd Generation Mobile Network jeb 3. paaudzes mobilo sakaru tīkls ir kopīgs apzīmējums platjoslas mobilo sakaru standartiem.

6LoWPAN – IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks jeb IPv6 pār mazjaudas bezvadu personālajiem tīkliem ir IETF darba grupas nosaukums, kas strādā pie tā, lai interneta protokols varētu tikt pielietots pat vismazākajās ierīcēs.

Ievads

Promocijas darbā ir izvirzīta tēze, ka var aprakstīt metodi kā radīt iegulto sensoro iekārtu konkrētam mērķim, vadoties pēc ārēji dotiem priekšnosacījumiem un ierobežojumiem un izmantojot heuristisku daudzkritēriju optimizāciju, kur optimuma kritērijs par labāko vērtību ir eksperta viedoklis, lai optimizētu enerģijas patēriņu, informācijas apstrādi un pieejamību. Ar to tiek saprasta energoefektīvas bezvadu sensorās iekārtas izveide, kas iegūst, apkopo un nosūta datus, izmantojot heterogēnus bezvadu sensoru tīklus ar pret aizkavēšanām un pārtraukumiem noturīgu datu pārraides protokolu.

Darbā ir izvirzīta apakšhipotēze, ka aprakstīto metodi iespējams pielietot vispārīgajam monitoringa modelim, kas iedalīts četrās realizācijas sarežģītības pakāpēs. Realizācijas sarežģītības pakāpes, veidotas ņemot par pamatu monitorēšanas subjektus, kas monitorē, un objektus, kurus monitorē, un sagrupētas no sarežģītākās uz viēglāko. Ar vissarežģītāko pakāpi tiek saprasts kustīgs monitorējamais subjekts un kustīgs monitorējamais objekts, savukārt, ar visviēglāko – statisks monitorējamais subjekts un statisks monitorējamais objekts.

Autors ir aprakstījis radītās metodes un rīkus objektu monitoringam un datu ievākšanai, lietojot zema enerģijas patēriņa iegultas iekārtas un heterogēnus bezvadu sensoru tīklus.

Darbā aprakstītās idejas ir aprobētas dzīvē:

- izveidots *LynxNet* risinājums savvaļas dzīvnieku monitoringam [1];
- radīta sistēma un rīki dinamisku sacensību ar spēles elementiem [2] vadībai;
- kopā ar EDI kolēģiem radīts eksperimentāls risinājums, lai fiksētu bedres un citus nelīdzenumus uz ceļa [3];
- kopā ar EDI kolēģiem radīts eksperimentāls risinājums autonomai automašīnas vadībai kooperatīvā braukšanas scenārijā [4];
- kopā ar EDI kolēģiem izveidota apkārtējās vides apstākļu monitoringa sistēma augļu dārzam [5];
- izveidota bezvadu sensoru tīkliem piemērota servisorientēta arhitektūra *WSN-SOA*.

Pētījumā apkopoti esošie risinājumi par bezvadu sensoriem kā viediem objektiem, kas var atrasties jebkur un ar kuru palīdzību iespējams ievākt informāciju par apkārt esošo situāciju un nogādāt to gala lietotājam. Apkopotajos risinājumos sekmīgāki rezultāti tika sasniegti tajos gadījumos, kad radītās sistēmas bija vienkāršas gan no lietošanas, gan izveides viedokļa. Arī autors savā darbā uzsvaru liek uz ērtu un lietotājam draudzīgu risinājumu izveidi.

Tēmas aktualitāte

Mūsdienās aizvien plašāk tiek pielietotas nelielas iegultas sensorās iekārtas un bezvadu sensoru tīkli, jo tos ir salīdzinoši viegli un ātri pielāgot dažādiem mērķiem. Zinātnieki un uzņēmējdarbības pārstāvji tos lieto, lai sekotu līdzi daudz un dažādiem apkārtējās vides aspektiem. Bezvadu sensoru tīkli ir kļuvuši par neatņemamu daļu no visuresošās skaitļošanas (*Ubiquitous Computing*) un lietu interneta (*Internet of Things*).

Viena no būtiskām problēmām bezvadu sensoru tīklos, kas tiek lietoti objektu monitoringam, ir enerģija jeb, precīzāk, tās ierobežotais daudzums. Piemēram, sensoru mezgli var tikt uzstādīti vietās, kur nav pieejama stabila enerģijas padeve [6], vai arī ir apgrūtināta enerģijas ieguve no atjaunojamajiem resursiem klimatisko un/vai ģeogrāfisko apstākļu dēļ [1].

Tādā gadījumā atliek vien paļauties uz iegultajās iekārtās iebūvētajiem barošanas avotiem – baterijām vai akumulatoriem. Taču, gadījumos, kad tiem ir nepieciešama nomaiņa, to ne vienmēr ir viegli paveikt [7]. Turklāt bieži sensoru tīkli tiek uzstādīti, lai tie ievāktu datus ilgstoši – dažu mēnešu vai pat gadu garumā [8]. Šo iemeslu dēļ jebkurš veids, kā ietaupīt enerģiju, kļūst par obligātu nosacījumu, izstrādājot sensorās iekārtas un to tīklus.

Ir aktuāla tendence izsekot savaļas dzīvniekus to dabiskajā vidē [9], tāpēc kā reāls pielietojums monitoringa iekārtai ir savaļas dzīvnieku izsekošanai piemērota kaklasiksna, ko izmantotu Latvijas zinātnieki no LVMI "Silava" [10], veicot lielo plēsēju monitoringu. Šādas siksnas izveidi atbalstīja ESF līdzfinansēts projekts Nr. 2009/0219/1DP/1.1.1.2.0/09/APIA/VIAA/020 "Viedo sensoru un tīklotu iegulto sistēmu pētījumu un attīstības centrs (VieSenTIS)".

Pasaulē arvien aktīvāk izklaides un izglītības pasākumos tiek iesaistīti spēļošanas

elementi [11], tāpēc arī dažādu sporta, izklaides un izglītības pasākumu organizatori Latvijā biedrība "Autoliste" meklē iespējas, kā to ieviest arī savos organizētajos pasākumos. Tas ļautu piedāvāt dalībniekiem sacensību reālā laika atspoguļojumu, ko būtu iespējams realizēt ar iegultām iekārtām un efektīvu komunikāciju to starpā. Šādu iegultu iekārtu izstrāde arī tika atbalstīta no ESF līdzfinansētā projekta Nr. 2009/0219/1DP/1.1.1.2.0/09/APIA/VIAA/020 "Viedo sensoru un tīklotu iegulto sistēmu pētījumu un attīstības centrs (VieSenTIS)" puses.

Tā kā bezvadu komunikācija sensoru mezglu starpā ir viena no visvairāk enerģiju tērējošajām operācijām, tiek nepārtraukti pētītas un pilnveidotas iespējas, kā samazināt komunikāciju apjomu, piemēram, apkopojot informāciju sensoru tīkla iekšienē un izsūtīt tikai caur vienu kanālu, kā arī izstrādājot jaunas un uzlabojot esošās radio pārraides tehnoloģijas, lai tās kļūtu vēl energotaupīgākas.

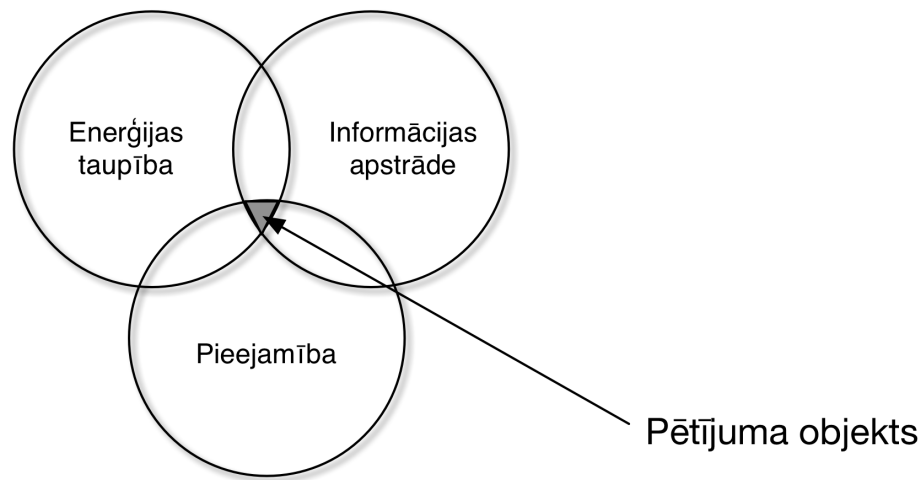
Savukārt, lai veiktu datu apmaiņu, parasti sensoru tīklos tiek lietoti dažādi konkrētiem apstākļiem pielāgoti MAC protokoli un virs tiem lietojumspecifiski datu apmaiņas protokoli, taču tas rada problēmas dažādu tīklu savienošanai, jo saziņa nav vienota. Tāpēc pēdējā laikā kā lietojumiem piemērots tiek virzīts IPv6 transporta protokols ar 6LoWPAN [12] [13] paplašinājumu, kas nodrošinātu to, ka sensoru tīkli un to mezgli ir galējā interneta robeža. Tomēr tas neatrisinātu problēmu, kā šos datus attēlot.

Kopš 2000. gadu sākuma tiek attīstīta ideja par semantisko tīmekli [14] un datu attēlošanu semantiskā veidā, kas nodrošinātu vienkāršāku saziņu starp dažādām sistēmām un iekārtām. Viena no idejām [15] ir veidot semantisko produktu atmiņu, kas nodrošinātu standartizētu pieeju datu apmaiņai un uzkrāšanai.

Promocijas darba pētījumu lauks sastāv no trīs būtiskāko bezvadu sensoru tīklu izaicinājumu – enerģijas taupības, informācijas apstrādes un pieejamības – apvienojuma (skatīt. 1. attēlu). Ar enerģijas taupību tiek saprasts ne tikai zems iekārtu enerģijas patēriņš, bet arī meklēti risinājumi, kā iegūt enerģiju no apkārtējās vides. Arī informācijas apstrādi tiek saprasti vairāki saistīti izaicinājumi – informācijas ievākšana, informācijas uzglabāšana un informācijas pārsūtīšana. Visbeidzot, ar pieejamību jāsaprot iekārtas drošība, kas ir ne tikai tās fiziskā drošība, bet arī monitoringa misijas beigas un iekārtu savākšanas protokols.

Savukārt, promocijas darba pētījumu objekts ir šo trīs būtiskāko bezvadu sensoru tīklu

izaicinājumu apvienojuma krustpunkts.



Att. 1.: Promocijas darba pētījumu lauks un objekts

Darbs var tikt uzskatīts kā starpnozaru pētījums, jo pielieto datorzinātņu bioloģijas un izglītības problēmu risināšanā.

Darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir radīt metodi, kuru pielietojot var izveidot iegulto sensoro iekārtu ar konkrētam mērķim optimizētu enerģijas patēriņu, informācijas apstrādi un pieejamību.

Darbam izvirzīti uzdevumi, lai sasniegtu promocijas darba mērķi:

- apkopot teorētiskās zināšanas par esošajām tehnoloģijām;
- klasificēt vispārīgā monitoringa modeļa realizācijas sarežģītības pakāpes;
- katrai realizācijas sarežģītības pakāpei:
 - uzprojektēt bezvadu sensoru sistēmu;
 - izveidot iegultās sensorās iekārtas;
 - izstrādāt sistēmas programmatūru;
 - veikt praktiskus eksperimentus sistēmas darbības pārbaudei.

Sasniegtie rezultāti

Darba izstrādes rezultātā ir radīta vispārīgā metode iegulto sensoru iekārtu izveidei, veicot vispārīgā monitoringa modeļa realizācijas sarežģītības pakāpju klasifikāciju un novērtējumu. Kopumā ir izdalītas četras sarežģītības pakāpes jeb modeļi ar dažādiem monitorējamiem subjektiem un objektiem – ”kustīgs-kustīgs”, ”kustīgs-statisks”, ”statisks-kustīgs” un ”statisks-statisks”.

Realizācijas sarežģītības pakāpes tika klasificētas, pamatojoties uz vispārīgajiem bezvadu sensoru tīklu izaicinājumiem. Tika izvēlēti 3 visbūtiskākie izaicinājumi, kuri jāņem vērā, viedojot jaunas iegultās sensorās iekārtas, – enerģijas taupība, informācijas apstrāde un pieejamība.

Pētījumu rezultātā hipotēzes pārbaudei praksē tika izveidotas vairākas iegultās iekārtas un sasniegti sekojoši rezultāti:

- izveidoti vairāki savvaļas dzīvniekiem piemēroti monitoringa gala iekārtu prototipi;
- izveidota savvaļas dzīvnieku monitoringam piemērota bāzes stacijas iegultā iekārta;
- izstrādāts heterogēnu rīku kopums izglītībai un izklaidei reālā laikā;
- izveidota dinamiskā kontrolpunkta iegultā iekārta;
- aprobēta dinamisko kontrolpunktu sistēma autoorientēšanās pasākumu organizēšanā;
- izstrādāta bezvadu sensoru tīkliem piemērota servisorientēta arhitektūra;
- izveidotas meteoroloģisko mērījumu sensoru mezgla un bāzes stacijas iegultās iekārtas.

Publikāciju saraksts

Promocijas darba starprezultāti ir publicēti vairākos starptautisko zinātnisko konferenču tēžu izdevumos, kā arī daļa no tiem indeksēti SCOPUS datu bāzē. Visas minētās publikācijas ir uzskaitītas hronoloģiskā secībā.

Publikācijas, kas indeksētas SCOPUS

1. **Zviedris, R.** and Elsts, A. and Strazdins, G. and Mednis, A. and Selavo, L., *"LynxNet: Wild Animal Monitoring Using Sensor Networks"*, Lecture Notes in Computer Science, 2010, Volume 6511, Real-World Wireless Sensor Networks (REALWSN'10), pp. 170–173, 2010, Springer. [1]
2. Mednis, A. and Strazdins, G. and **Zviedris, R.** and Kanonirs, G. and Selavo, L., *"Real time pothole detection using Android smartphones with accelerometers"*, 2011 International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems and Workshops (DCOSS), pp. 1–6, IEEE 2011. [3]
3. Elsts, A. and Balass, R. and Judvaitis, J. and **Zviedris, R.** and Strazdins, G. and Mednis, A. and Selavo, L., *"SADmote: A Robust and Cost-Effective Device for Environmental Monitoring"*, Lecture Notes in Computer Science, 2012, Volume 7179/2012, Architecture of Computing Systems (ARCS 2012), pp. 225–237, 2012, Springer. [5]
4. Mednis, A. and **Zviedris, R.**, *"RFID Communication: How Well Protected Against Reverse Engineering?"*, 2nd International Conference on Digital Information Processing and Communications (ICDIPC 2012), pp. 56–61, 2012, IEEE. [16]

Citur indeksētas publikācijas

5. Strazdins, G. and Gordjusins, A. and Kanonirs, G. and Kurmis, V. and Mednis, A. and **Zviedris, R.** and Selavo, L., *"Team "University of Latvia" GCDC 2011 Technical Paper"*, electronically published by GCDC.net, 2 lappuses, 2010, HTAS & TNO. [4]
6. Strazdins, G. and Mednis, A. and Kanonirs, G. and **Zviedris, R.** and Selavo, L., *"Towards Vehicular Sensor Networks with Android Smartphones for Road Surface Monitoring"*, The 2nd International Workshop on Networks of Cooperating Objects (CONET'11), Electronic Proceedings of CPSWeek'11, 4 lappuses, 2011, CONET. [17]

7. Strazdins, G. and Mednis, A. and **Zviedris, R.** and Kanonirs, G. and Selavo, L., *"Virtual Ground Truth in Vehicular Sensing Experiments: How to Mark it Accurately"*, in Proceedings of the 5th International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM 2011), pp. 295–300, 2011, IARIA. [18]
8. **Zviedris, R.** and Mednis, A. and Mednis, G., *"Heterogeneous Tool Kit for Real-Time Edutainment"*, 5th International Scientific Conference "APPLIED INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES" (AICT 2012), pp. 201–208, 2012, LLU. [2]

Publikācijas konferenču tēzēs

9. **R. Zviedris**, A. Elsts, Ģ. Strazdiņš, L. Selavo un G. Šūpols, *"Savvaļas dzīvnieku monitorings, izmantojot bezvadu sensoru tīklus"*, Apvienotais Pasaules latviešu zinātnieku III kongress, Tehnisko zinātņu sekcijas tēžu krājums, Rīga, 2011.

Uzstāšanās konferencēs

Darba autors ir uzstājies ar referātiem par sasniegtajiem rezultātiem virknē starptautisku zinātnisku konferenču un semināru, kā arī izveidojis un prezentējis plakātus par publikācijās atspoguļotajiem rezultātiem.

Mutiskās prezentācijas

1. *"Arhitektūras viedajām transporta sensoru un datu mūļu sistēmām"*, Latvijas Universitātes 68. konference, Rīga, Latvija, 2010. gada 19. februāris.
2. *"Data Mules and Their Usage"*, Scientific Summer Camp Smithy of Ideas 2010, Trakai, Lietuva, 2010. gada 17. līdz 20. jūnijs.
3. *"Savvaļas dzīvnieku monitorings ar bezvadu sensoru tīkliem"*, ESF finansēto projektu "VieSenTIS" un "Datorzinātnes pielietojumi un tās saiknes ar kvantu fiziku" "Viedo sensoru un kvantu skaitļošanas seminārs", Rīga, Latvija, 2011. gada 27. maijs.

4. *"Wild Animal Monitoring using Sensor Networks"*, CONET Summer School 2011: Networked Embedded Systems: Humans in the Loop, Bertinoro, Itālija, 2011. gada 24. līdz 30. jūlijs.
5. *"Savvaļas dzīvnieku monitorings, izmantojot bezvadu sensoru tīklus"*, Apvienotais Pasaules latviešu zinātnieku III kongresa un Letonikas IV kongresa "Zinātne, sabiedrība un nacionālā identitāte" apakšsekcija "Datorzinātne un informācijas tehnoloģijas", Rīga, Latvija, 2011. gada 24. līdz 27. oktobris.
6. *"Heterogeneous Tool Kit for Real-Time Edutainment"*, 5-th international scientific conference "APPLIED INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES 2012", Jelgava, Latvija, 2012. gada 26. līdz 27. aprīlis.
7. *"Heterogēni rīki izglītībai un izklaidei reālā laikā"*, ESF finansētā projekta "VieSenTIS" "Ceturtais Latvijas Viedo sensoru un tīklotu iegulto sistēmu seminārs", Rīga, Latvija, 2012. gada 21. maijs.

Sagatavotie un prezentētie plakāti

1. *"LynxNet: Wild Animal Monitoring Using Sensor Network"*, 4th Workshop on Real-World Wireless Sensor Networks (REALWSN'10), Colombo, Sri Lanka, 2010. gada 16. līdz 17. decembris.
2. *"SADmote: A Robust and Cost-Effective Device for Environmental Monitoring"*, Architecture of Computing Systems (ARCS 2012), Garching, TU Muenchen, Germany, 2012. gada 28. februāris līdz 2. marts, plakātu prezentēja R. Balašs.

Darba struktūra

Darbs apjoms ir 197 lappuses un tas sastāv no ievada, 5 nodaļām un nobeiguma. Darbā ietilpst 70 attēli, 13 tabulas un 4 pielikumi. Darba izstrāde veikta no 2007. gada oktobra līdz 2015. gada aprīlim Latvijas Universitātes Datorikas fakultātē. Promocijas darba vadītājs ir Latvijas Universitātes profesors Leo Seļāvo.

Darba 1. nodaļā aprakstīts vispārējs objektu monitoringa modelis, paskaidrojot, kas ir bezvadu sensori un to tīkli, kādi ir to iespējamie pielietojumi, izaicinājumi un prasības. Visbeidzot nodaļā aprakstīta metode, kuru pielietot, radot konkrētiem monitoringa mērķiem piemērotas iegultās sensorās iekārtas.

Darba 2. nodaļā aprakstīti darba gaitā izmantotie materiāli un metodes.

Darba 3. nodaļā aprakstītas metodes un rīki savvaļas dzīvnieku monitoringam un aktivitātes noteikšanai, izmantojot iegultas iekārtas, bezvadu sensoru tīklus un pārtraukumu noturīgu komunikāciju.

Darba 4. nodaļā aprakstītas metodes un rīki, kas radīti izglītībai un izklaidei reālā laikā, izmantojot iegultas iekārtas.

Darba 5. nodaļā aprakstītas metodes un risinājumi tīmekļa servisiem, kas piemēroti zema enerģijas patēriņa bezvadu sensoru tīklos ar pret aizturēm vai pārtraukumiem noturīgu komunikāciju.

Vispārējs objektu monitoringa modelis

Šajā promocijas darba nodaļā aprakstīta darbā izvirzītā tēze – vispārīgā metode iegulto BST iekārtu izveidei, kā arī iztirzāts monitoringa modelis, tā realizācijas sarežģītības pakāpes un nodefinēti pakāpju izveides kritēriji. Nodaļā arī sniegts ieskats tajā, kas ir bezvadu sensorās iekārtas, to tīkli, iespējamie pielietojumi, izaicinājumi un prasības realizācijai.

Darba 1.1. apakšnodaļā sniegts ieskats par to, kas ir bezvadu sensorās iekārtas un to tīkli. Nākošajā, 1.2. apakšnodaļā aprakstīti iespējamie bezvadu sensoru tīklu pielietojumi, izaicinājumi un prasības. Sekojošajā, 1.3. apakšnodaļā aprakstīts monitoringa modelis, tā realizācijas sarežģītības pakāpes un pakāpju izveides kritēriji. Visbeidzot, 1.4. apakšnodaļā aprakstīta vispārīgā metode iegulto BST iekārtu izveidei.

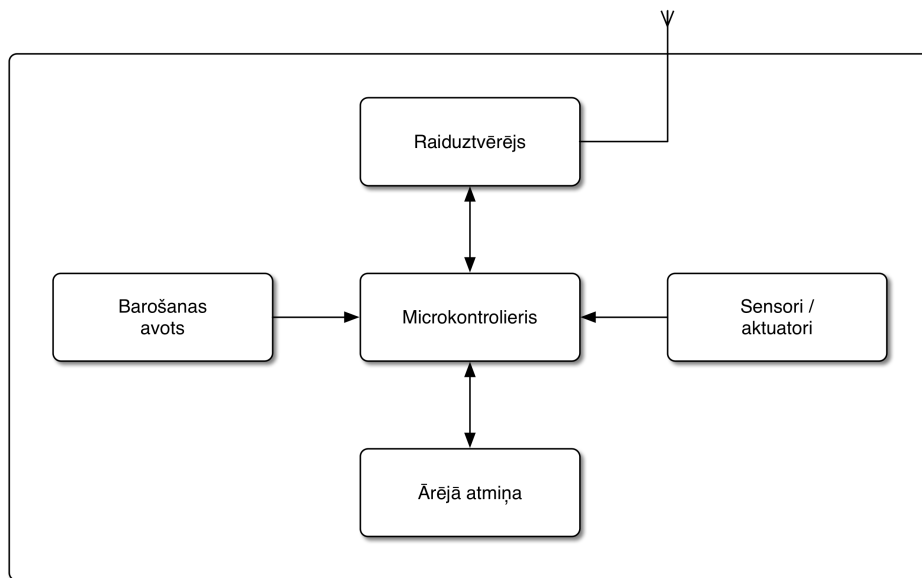
1.1. Kas ir bezvadu sensorās iekārtas un to tīkli?

Iekārtu un bezvadu tīklu tehnoloģiskā attīstība ir radījusi zemu izmaksu, zema enerģijas patēriņa, multifunkcionālas miniatūras datorizētas iegultas iekārtas, kas kalpo kā sensoru mezgli, ar kuriem iespējams "noklāt" kādu noteiktu ģeogrāfisku reģionu, lai veiktu vides vai objektu monitoringu. Tie spēj sazināties savā starpā, izmantojot bezvadu sakarus un šādi veido bezvadu sensoru tīklu. BST, savukārt, nodrošina piekļuvi savāktajai informācijai jebkurā laikā un vietā, ievācot, apstrādājot, analizējot un izplatot datus. Tādejādi, BST faktiski piedalās viedas vides radīšanā [19] [20] [21].

BST ir radikāli pārveidojuši datu ievākšanu daudzās nozarēs. Kā apgalvo BST pētnieki [22] [21] [23], tas ir noticis, pateicoties to uzticamībai, precizitātei, pielāgojamībai, izmaksu efektivitātei un salīdzinoši vienkāršajai uzstādīšanai. Viedie sensori var piedāvāt

nepārtrauktu novērošanu, spēju pašiem noteikt un ievākt datus, piemēram, par būvju strukturālajām izmaiņām [24], vulkāna izvirdumiem [7], klimatu augļu dārzā [5], lūšu [1] vai zeburu [25] [26] uzvedību savvaļā. Iegūtie rezultāti, savukārt, nodrošina pētniekiem uzticamu vides un objektu monitoringu.

Sensoru mezgla arhitektūra ir salīdzinoši vienkārša. Kā redzams 1.1. attēlā vispārīgā gadījumā mezgls sastāv no 5 pamatkomponentēm: mikrokontroliera, sensoriem vai aktuatoriem, ārējās atmiņas, raiduztvērēja un barošanas avota. Atbilstoši sagatavotas iekārtas iespējams uzstādīt bez papildus palīdzības no malas un vairumā gadījumu tām nav nepieciešama specifiska infrastruktūra. Tās spēj sajūst, skaitļot un atbilstoši reaģēt uz fizisko vidi tām apkārt, kā arī tās spēj pašorganizēties un atbilstoši adaptēties, lai atbalstītu vairākus pielietojumus.



Att. 1.1.: Sensoru mezgla vispārīgā arhitektūra

Komunikācija sensoru tīklos tipiski nav nepārtrauktā virknē. Tas saistīts ar to, ka enerģija ir būtiski ierobežota salīdzinot ar citiem bezvadu tīkliem. Enerģijas atjaunošana ne vienmēr ir iespējama ar bateriju vai akumulatoru nomaiņu vai uzlādi. Arī izvēloties piemērotu komunikāciju risinājumu, jāņem vērā tā enerģijas patēriņš, kas atkarīgs no datu pārraides attāluma, ilguma un jaudas.

1.2. Iespējamie BST pielietojumi, izaicinājumi un prasības

BST var sastāvēt no dažādu tipu sensoriem, kas piemēroti seismiskās, magnētiskās, termiskās, vizuālās, infrasarkanās, akustiskās vai citu aktivitāšu noteikšanai un ļauj monitorēt plašu klāstu ar apkārtesošajiem apstākļiem, piemēram:

- temperatūru;
- mitrumu;
- kustību;
- gaismu;
- spiedienu;
- zemes sastāvu;
- trokšņu līmeni;
- noteiktu objektu klātesamību vai trūkumu;
- piestiprināto objektu mehāniskās izmaiņas;
- objekta ātrumu, virzienu vai izmēru u.c.

BST pielietojumu lauks ir ļoti plašs un dažāds, kā arī pētnieki turpina adaptēt sensoru tīklu tehnoloģijas tām problēmām, kuras ir grūti risināt ar tradicionālām bezvadu tīklu metodēm. Daži piemēri vienkāršākiem risinājumiem, kas jau atraduši pielietojumu tautsaimniecībā:

- cilvēku veselības stāvokļa novērošanai piemēroti sensori;
- sensoru tīkli, kas izvietoti attālās vai grūti pieejamās vietās, piemēram, meža ugunsgrēku noteikšanai un trauksmes izziņošanai;
- ar sensoriem aprīkoti lielpilsētu taksometri satiksmes plūsmas analīzei un optimālāko maršrutu noteikšanai;
- bezvadu sensori, kas palīdz autostāvvietās noteikt, kuras vietas ir aizņemtas un kuras brīvas;

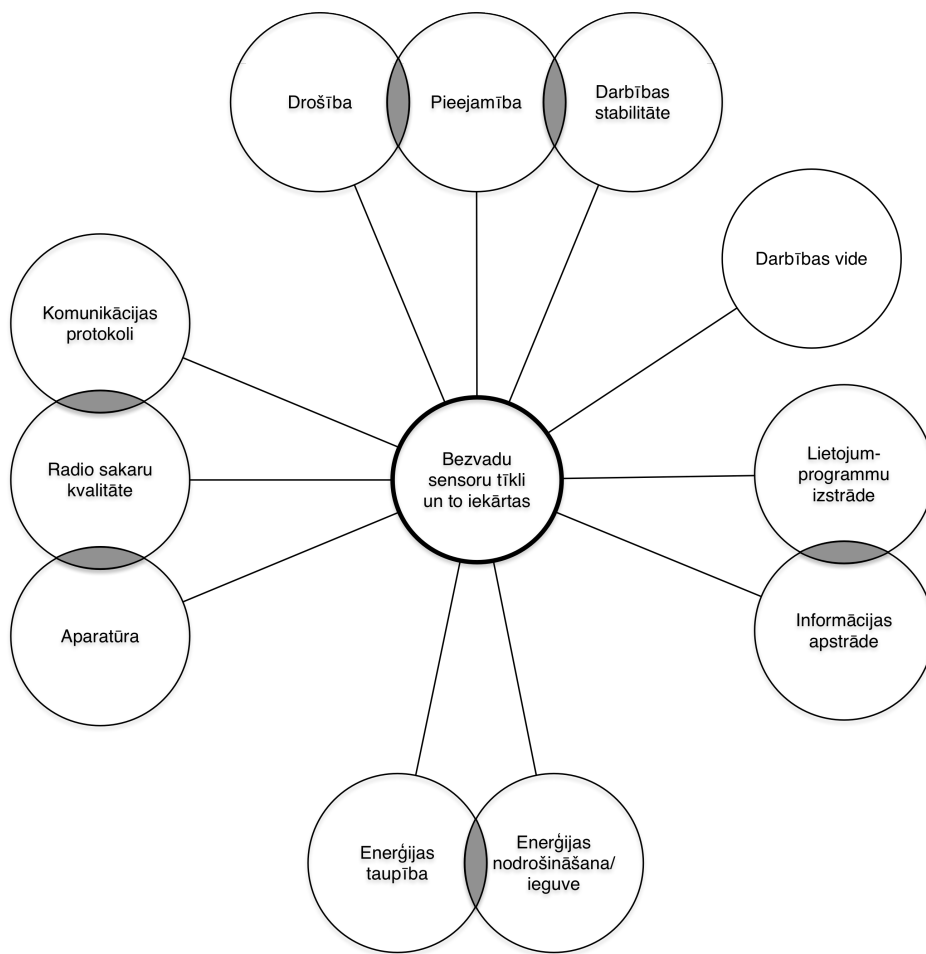
- bezvadu novērošanas sensori drošības nodrošināšanai mājās, birojos vai citās telpās;
- militārie sensoru tīkli pretinieka pārvietošanās noteikšanai un izsekošanai.

Tomēr BST pētniecībā eksistē arī daudzi izaicinājumi (skatīt 1.2. attēlu) – aparatūras uzbūvē, komunikāciju protokolos, drošībā, enerģijas nodrošināšanā un lietojumprogrammu izstrādē – kas kavē pilnvērtīgāku to izmantošanu ikdienā. Divi būtiskākie pētījumu virzieni ir sensoru tīklu dzīves ilguma paildzināšana un saprātīgu datu ievākšanas sistēmu izstrāde. Citi izaicinājumi ietver:

- sensoru tīklu topoloģija var viegli un bieži mainīties;
- sensori bieži izmanto izkaisītas pārraides (*broadcast*) komunikāciju paradigmu, kamēr vairums pierasto datortīklu lieto tiešās pārraides (*point-to-point*) komunikāciju;
- sensoru mezgli ir ierobežoti ar pieejamās enerģijas daudzumu, skaitļošanas jaudu un atmiņas apjomu;
- atsevišķu sensoru mezglu darbība bieži var būt nestabila;
- sensori nav globālas identifikācijas, jo tas ietver būtisku resursu pārtēriņu;
- komunikācijas sastrēgumi vai kolīzijas sensoru tīklos ar lielu mezglu skaitu.

Pamatojoties uz pielietojumiem un izaicinājumiem, ir arī apzinātas vispārējās BST prasības, kuras uzskaitītas zemāk.

- Liels sensoru mezglu skaits – ņemot vērā zemās komponentu izmaksas, sensoru tīkliem būtu jāpastāv no tūkstošiem mezglu. Taču tas rada problēmas ar šāda apjoma tīklu mērogojamību un pārvaldīšanu. Kā risinājums tam ir sensoru grupēšana, kur katrā grupā ir kāds vadošais mezgls, kurš, savukārt, sazinās ar nākošā līmeņa grupas vadošo mezglu.
- Zems enerģijas patēriņš – daudzos pielietojumos var nākties sakarties ar to, ka sensoru mezgli jāizvieto attālos vai grūti pieejamos reģionos, kas apgrūtina vai padara neiespējamu sensoru mezglu apkalpošanu. Tādejādi, sensoru mezgla dzīves ilgumu nosaka tā baterijas dzīves ilgums. Tas, savukārt, izvirza prasību patērēt pēc iespējas mazāk enerģijas.



Att. 1.2.: BST pētniecības izaicinājumi, kur saistītie izaicinājumi pārklājas.

- Efektīva neliela apjoma atmiņas izmantošana – projektējot un būvējot sensoru tīklus bieži nākas saskarties ar tādām problēmām kā maršrutizācijas tabulu izmērs, datu replikācija, drošība un citas, kuras tieši vai netieši ietekmē sensoru mezglu atmiņas izmantošanu un aizpildījumu.
- Datu agregācija – sensoru tīklos ar lielu skaitu mezglu var rasties situācijas, kad tīkls ir pārblīvēts ar informāciju. Lai to risinātu, dažiem mezgliem, piemēram, grupu vadošajiem mezgliem būtu jānodarbojas ar datu agregēšanu, veicot kādas noteiktas skaitļošanas operācijas (piemēram, vidējās vērtības aprēķināšana, summēšana, maksimums, minimums u.c.) un tālāk pārraidot jau apstrādāto informāciju.
- Tīkla pašorganizēšanās – apskatot piemēru par sensoru tīklu ar lielu mezglu skaitu un to potenciālo izvietojumu vietās, kur tie viegli var iziet no ierindas, ir būtiski, ka

tīkls pats spēj pašorganizēties un pārveidoties, ja kāds no mezgliem iziet no ierindas (vai nu tāpēc, ka beidzas baterija vai tas tiek iznīcināts) vai arī tiek pievienots jauns mezgls. Tādejādi, atsevišķu mezglu komunikācijas izmaiņas nedrīkst ietekmēt kopējo tīklu, kuram periodiski vajadzētu pārkonfigurēties, ņemot vērā izmaiņas.

- Kopēja signālu apstrāde – vēl viens no faktoriem, kas atšķir sensoru tīklus no speciāliem mobiliem tīkliem (*Mobile Ad-Hoc Network* vai *MANET*), ir spēja noteikt vai paredzēt kādu iepriekšdefinētu notikumu nevis tikai savstarpēja komunikācija. Lai uzlabotu šādu noteikšanu, ļoti noderīgi ir apvienot datus no vairākiem sensoru mezgliem. Šāda datu apvienošana prasa papildus datu un kontroles ziņojumu pārraidi, kas uzliek zināmus ierobežojumus tīkla arhitektūrai.
- Pieprasījumu veikšana – balstoties uz pētniecības datiem [27] ir divu veidu adresēšana sensoru tīklos: uz datiem centrēta un uz adresēm centrēta. Uz datiem centrētajā adresēšanā pieprasījums tiks nosūtīts noteiktam tīkla reģionam, savukārt, uz adresēm centrētajā adresēšanā pieprasījums tiks nosūtīts individuālam mezglam.

1.3. Monitoringa modelis

Darba ietvaros veiktie pētījumi tiek balstīti uz vispārīgu monitoringa modeli (skatīt 1.1. tabulu), kurš sadalīts četrās realizācijas sarežģītības pakāpēs.

Realizācijas sarežģītības pakāpe	Monitorējamais subjekts (Kas?)	Monitorējamais objekts (Ko?)
1.	Kustīgs	Kustīgs
2.	Kustīgs	Statisks
3.	Statisks	Kustīgs
4.	Statisks	Statisks

Tabula 1.1.: Vispārīgais monitoringa modelis, kas sagrupēts pēc realizācijas sarežģītības pakāpes no sarežģītākās uz vienkāršāko.

Realizācijas sarežģītības pakāpes ir apkopotas (skatīt 1.2. tabulu), pamatojoties uz 1.2. sadaļā aprakstītajiem vispārīgajiem BST pielietojumiem, izaicinājumiem un prasībām. Balstoties uz 3., 4. un 5. nodaļu saistīto darbu izpēti, autors katram no izvēlētajiem

desmit izaicinājumiem (skatīt 1.2. attēlu) ir piešķīris svaru, cik sarežģīti to ir īstenot. Savukārt, katram modelim ir piešķirts koeficients, cik konkrētais izaicinājums ir būtisks tā realizācijā. Svara un koeficienta reizinājums dod konkrētā izaicinājuma novērtējumu konkrētajam modelim. Novērtējuma summa, arī nosaka sarežģītības pakāpi.

Izaicinājums	Svars	Modeļi								Summa
		K-K		K-S		S-K		S-S		
		Koefi- cients	Novēr- tējums	Koefi- cients	Novēr- tējums	Koefi- cients	Novēr- tējums	Koefi- cients	Novēr- tējums	
Aparatūra	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,75	0,75	0,75	0,75	2,5
Radio sakaru kvalitāte	2	1	2	0,75	1,5	0,75	1,5	0,5	1	6
Komunikācijas protokoli	2	1	2	0,75	1,5	0,75	1,5	0,25	0,5	5,5
Drošība	3	0,25	0,75	0,25	0,75	1	3	1	3	7,5
Pieejamība	4	1	4	1	4	0,25	1	0,25	1	10
Darbības stabilitāte	3	1	3	1	3	0,5	1,5	0,5	1,5	9
Darbības vide	2	0,75	1,5	0,5	1	0,25	0,5	0	0	3
Lietojum-programmu izstrāde	1	0,25	0,25	0,25	0,25	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5
Informācijas apstrāde	4	1	4	0,75	3	0,5	2	0,5	2	11
Enerģijas nodrošināšana vai ieguve	3	0,75	2,25	0,75	2,25	0,5	1,5	0,5	1,5	7,5
Enerģijas taupība	5	1	5	1	5	0,75	3,75	0,75	3,75	17,5
Summa	30	25.25		22.75		17.5		15.5		

Tabula 1.2.: BST izaicinājumu sarežģītības novērtējums attiecībā pret realizācijas modeļiem, kur modeļu subjektu-objektu pāri atšifrējas kā K – "Kustīgs" un S – "Statisks".

Sarežģītākajai realizācijas pakāpei izvēlēts modelis, kur kustīgs subjekts veic kustīgu objekta vai objektu monitoringu. Šai pakāpei saskaņā ar 1.2. tabulu ir visaugstākais novērtējums un par sarežģītāko tā tiek uzskatīta, jo tajā dominē visvairāk izaicinājumu – tai ir būtiska radio sakaru kvalitāte, izmantotie komunikācijas protokoli, pieejamība, darbības stabilitāte, informācijas apstrāde un enerģijas taupība. Vēl augsts koeficients ir piemērots darbības videi un enerģijas nodrošinājumam vai ieguvei. Vistuvāk šai realizācijas pakāpei atbilst 3. nodaļā aprakstītais risinājums savvaļas dzīvnieku monitoringam, izmantojot bezvadu sensoru tīklus. Tas saistīts ar to, ka dzīvnieks kā subjekts ir kustīgs un pārsvarā tas ievāc datus par dažādam kustībām – gan sevis, gan apkārtējās vides.

Nākošais pēc sarežģītības ir modelis, kur kustīgs subjekts veic statiska objekta vai objektu monitoringu. Šī pakāpe apvieno sekojošus izaicinājumus – pieejamība, darbības stabilitāte un enerģijas taupīšana. Vēl vairāki izaicinājumi ir ar augstu, bet ne dominējošu

koeficientu – radio sakaru kvalitāte, komunikācijas protokoli, informācijas apstrāde un enerģijas nodrošinājums vai ieguve.

Tālāk seko trešais pēc sarežģītības modelis jeb statisks subjekts veic kustīga objekta vai objektu monitoringu. Šajā pakāpē dominē tikai viens izaicinājums – drošība, taču vairāki ir tuvu maksimumam, kā piemēram, aparatūra, radio sakaru kvalitāte, komunikācijas protokoli un enerģijas taupīšana.

Otrās un trešās pakāpes realizācijas pakāpēm atbilst 4. nodaļā aprakstītie pētījumi par heterogēniem rīkiem izglītībai un izklaidei reālā laikā, jo aprobācijas piemērā ir gan kustīgi subjekti jeb autoorientēšanās pasākumu dalībnieki ar saviem viedtālruniem, kuri monitorē statistiskus objektus jeb kontrolpunktus, kā arī statisks subjekts jeb dinamiskais kontrolpunkts, kurš monitorē kustīgus objektus jeb autoorientēšanās pasākumu dalībniekus. Daļēji šai realizācijas pakāpei atbilst arī 3. nodaļā aprakstītais risinājums savvaļas dzīvnieku monitoringam – bāzes stacijas kā statistiski subjekti veic savvaļas dzīvnieku kā kustīgu objektu monitoringu.

Visbeidzot, visvienkāršākais realizācijas modelis ir statisks subjekts veic statistiska objekta vai objektu monitoringu. Arī šajā pakāpē līdzīgi kā vienu līmeni augstākai pakāpei dominē tikai viens izaicinājums – drošība, taču vēl divi aizaicinājumi ir tuvu maksimumam – aparatūra un enerģijas taupība.

Trešās un ceturtās realizācijas pakāpēm atbilst iegultās iekārtas, kas radītas 5. nodaļā aprakstītajiem pētījumiem par tīmekļa servisu izmantošanu zema enerģijas patēriņa bezvadu sensoru tīklos.

1.4. Vispārīgā metode iegulto BST iekārtu izveidei

Lai izveidotu vispārīgo metodi iegulto sensoru iekārtu izveidei, autors pamatojās uz 1.2. tabulas pēdējā kolonnā summētajiem kopējiem modeļu novērtējumiem. Tādejādi tika iegūts BST izaicinājumu saraksts, kas sakārtots pēc būtiskās ietekmes dažādos vispārīgajos monitoringa modeļos.

Balstoties uz iegūtajiem rezultātiem, tika izvēlēti 3 visbūtiskākie izaicinājumi, kuri jāņem vērā veidojot jaunas iegultās sensorās iekārtas – enerģijas taupība, informācijas apstrāde un pieejamība.

Iekārtu enerģijas taupība ir izvēlēta pamatoti, jo dažāda pielietojuma kustīgiem apstākļiem piemērotas sensorās iekārtas ar lielāku enerģijas patēriņu un esošajiem enerģijas atkalieguves veidiem nespēj nodrošināt ilglaicīgu darbību, kā to pierāda analītiskie aprēķini 3. nodaļā. Tāpēc ir nepieciešams projektēt iekārtas un veidot tām lietojumprogrammas, lai tās maksimāli efektīvi izmantotu tām pieejamo enerģijas apjomu.

Arī informācijas apstrāde ir pamatoti iekļauta būtiskajos izaicinājumos veidojot jaunas iegultās sensorās iekārtas. Monitoringa gadījumā informācijas ievākšana, uzglabāšana un pārsūtīšana ir būtiska pētījumu sastāvdaļa, jo monitoringa rezultātā tiek ievākts daudz "it kā" nebūtisku informācijas vienību no pieejamajiem sensoriem, kuras pirms tālākās pārsūtīšanas nepieciešams apkopot un veikt priekšapstrādi, tādējādi veicinot enerģijas taupību, piemēram, lieki nedarbinot radio raidītāju.

Visbeidzot trešais būtiskākais izaicinājums, kurš jāņem vērā veidojot jaunas iegultās sensorās iekārtas ir pieejamība. Tā kā šīs disertācijas uzsvars likts uz savvaļas dzīvnieku monitoringu, tad ar pieejamību tiek saprasts arī ir misijas beigu un iekārtu savākšanas protokols.

Izmantotie materiāli un metodes

Lai veiktu kvalitatīvus pētījumus, nepieciešams arī atbilstošs tehniskais aprīkojums – gan datu ieguvei, gan datu apstrādei. Šajā nodaļā sniegts pārskats par izmantotajiem materiāliem un metodēm promocijas darba izstrādes laikā veiktajās pētniecības aktivitātēs.

Speciāla pielietojuma iegultu iekārtu izstrāde pirms konceptuālas izvirzītās hipotēzes pārbaudes var novest pie nelietderīgas resursu izmantošanas hipotēzes neapstiprināšanās gadījumā, līdz ar to sākotnējos eksperimentus lietderīgi veikt, izmantojot plaša pielietojuma datortehniku, gatavus sensoru moduļus un nosacīti nelimitētas elektroenerģijas nodrošināšanas risinājumus.

2.1. apakšnodaļā aprakstītas darbā tapšanā izmantotā plaša pielietojuma datortehnika un programmatūra. 2.2. apakšnodaļā tiek īsumā aprakstītas darba laikā izmantotās plaša un speciāla pielietojuma iegultās iekārtas, savukārt, 2.3. apakšnodaļā īsumā apskatītas hipotēžu pārbaudei pielietotās metodes.

2.1. Izmantotā datortehnika un programmatūra

Visi darbā aprakstītie pētījumi un programmēšanas darbi tika izpildīti uz Apple Macbook datora, kurš pamatā darbojas ar Apple MacOS X [28] operētājsistēmu, taču atsevišķu darbu veikšanai ar pieejamo virtualizācijas risinājumu palīdzību tika izmantotas gan Ubuntu Linux [29], gan Microsoft Windows XP [30] operētājsistēmas.

Lai veiktu iegulto iekārtu programmēšanas darbības tika izmantotas sekojošas programmmēšanas vides:

- Atmel ATmega [31] gadījumā – *Arduino IDE* [32] un *Atmel Studio* [33];
- Texas Instruments MSP430 [34] gadījumos – *mspgcc* [35] rīku kopums, *IAR Embedded Workbench for TI MSP430* [36], *Code Composer Studio* [37] un *Energia* [38];

- Raspberry Pi [39] gadījumā - *Phyton* [40] rīku kopums.

Lai veiktu atsevišķus testus un iegulto iekārtu pārbaudes ārpus laboratorijas apstākļos, tika izmantots arī 2 kanālu USB osciloskops Velleman PSCU1000 [41].

2.2. Izmantotās iegultās iekārtas

Strādājot pie darbā aprakstītajām tēmām, lai pārbaudītu sākotnējos pieņēmumus un samazinātu laiku, kas nepieciešams speciālu iegultu iekārtu izstrādē, vispirms izvirzītās hipotēzes tika pārbaudītas uz elektronikas ražotāju piedāvātajiem gatavajiem komplektiem, kā arī gataviem sensoru moduļiem.

2.2.1. Texas Instruments MSP430

MSP430 ir jauktu signālu mikrokontrolieru sērija [34], ko ražo Texas Instruments. Tam pamatā ir 16 bitu centrālais procesors jeb CPU un tas ir piemērots iegultām iekārtām, kam nepieciešamas zemas izmaksas un, galvenais, zems enerģijas patēriņš.

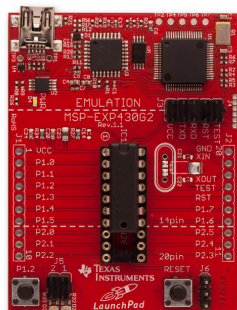
Tā energopatēriņš var miera stāvoklī var būt zem $1\mu\text{A}$, savukārt, takts frekvence – līdz 25 MHz. Samazinot takts frekvenci, tiek samazināts arī energopatēriņš. MSP430 izmanto sešus dažādus zema energopatēriņa režīmus, kuros iespējams apturēt nevajadzīgos pulksteņus un pat pašu CPU. Kā papildus plus jāmin, ka MSP430 var pamosties no miega režīma mazāk kā 1 mikrosekundē, kas ļauj mikrokontrolierim ilgāk palikt miega režīmā, kas, savukārt, noved pie zemāka vidējā energopatēriņa.

Mikrokontrolieri ir dažādi aprīkoti, ietverot gan parasto perifēriju: iekšējo oscilatoru, taimeri ar PWM atbalstu, sargsuni (*watchdog*), USART, SPI un I2C kopnes, 10/12/14/16 bitu ADC, kā arī *brownout* jeb atjaunošanās elektrisko shēmu pēc plānota vai neplānota enerģijas pārtraukuma. Retāk ir sastopami komparatori, kas kopā ar taimeri var izpildīt vienkāršas ADC funkcijas, mikroskārmā iebūvētus operāciju pastiprinātājus, 12 bitu DAC, LCD dzini, aparatūras reizinātāju, USB un DMA priekš ADC rezultātiem.

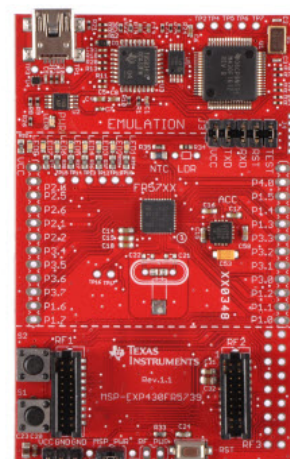
Pārsvarā visi MSP430 modeļi var tikt programmēti izmantojot JTAG saskarni ar visu četru vadu vai *Spy-Bi-Wire* režīmiem vai iebūvēto sāknēšanas ielādētāju jeb BSL caur virknes saskarni.

No Texas Instruments ražotajiem MSP430 16 bitu mikrokontrolieru gatavajiem komplektiem tika izmantoti trīs:

- MSP-EXP430G2 LaunchPad Experimenter Board [42] – iekārta (skatīt 2.1. attēlu) aprīkota DIP 20 kontaktu ligzdu, kurā iespējams ievietot Texas Instruments ražotos *Value Line* un 2. sērijas MSP430 mikrokontrolierus, 2 gaismas diodēm, vienu programmējamu un vienu atiestatīšanas pogu. Komplektā ietilpst MSP430G2553 un MSP430G2452 mikrokontrolieri, taču atsevišķu darbību pārbaudei tika izmantots arī MSP430F2013 mikrokontrolieris;
- MSP-EXP430FR5739 FRAM Experimenter Board [43] – iekārta (skatīt 2.2. attēlu) aprīkota ar MSP430FR5739 mikrokontrolieri, kas ir FRAM bāzēts un tādejādi nodrošina informācijas pastāvību, 3 asu akselerometru, NTC termistoru, 8 gaismas diodēm, 2 programmējamām un vienu attiestatīšanas pogām, kā arī papildus ligzdām, lai pieslēgtu bezvadu sakaru paplašināšanas moduļus;
- MSP-EXP430F5529 USB LaunchPad Evaluation Kit [44] – iekārta (skatīt 2.3. attēlu) aprīkota ar 5. sērijas MSP430 mikrokontrolieri, kurā integrēts USB 2.0 PHY kontrolieris, kas ļauj šo iekārtu izmantot prototipos, kuros nepieciešama USB savienojamība.



Att. 2.1.: TI MSP-EXP430G2 LaunchPad



Att. 2.2.: TI MSP-EXP430FR5739 FRAM



Att. 2.3.: TI MSP-EXP430F5529LP

2.2.2. Arduino

Arduino [32] ir rīks, kas izveidots māksliniekiem, dizaineriem, entuziastiem un tiem, kas ir ieinteresēti izveidot gan vienkāršas, gan pietiekoši sarežģītas iegultās iekārtas. Tā ir atvērtā pirmkoda un iekārtu platforma, kas sastāv no vienkāršām uz Atmel mikrokontrolieriem balstītām platēm un izstrādes vides programmatūras rakstīšanai.

Pati Arduino iekārta satur Atmel 8 bitu AVR mikrokontrolieri un papildus komponentus, kas atvieglo programmēšanu un iekārtas integrāciju citās shēmās. Būtisks Arduino aspekts ir tas, ka visām spiestajām platēm ir standartizēts savienojumu izvietojums, kas ļauj tās savienot ar plašu klāstu papildus moduļu, ko dēvē par vairogiem (*shield*).

Daži no moduļiem komunicē ar Arduino iekārtu tieši, izmantojot pieejamos mikrokontroliera izvadus, savukārt, citi ir individuāli adresējami izmantojot I2C virknes kopni. Tas pieļauj saslēgt kopā vairākus moduļus, tos savienojot vienu virs otra.

Oficiāli Arduino izmanto tikai megaAVR sērijas mikroshēmas jeb precīzāk ATmega8, ATmega168, ATmega328, ATmega1280 un ATmega2560. Taču ir pieejamas arī Arduino versijas, kas izmanto citus mikrokontrolierus. Vairums gatavo iekārtu ietver sevī 5V lineāro sprieguma regulatoru un 16 MHz kristāla oscilatoru, taču ir pieejamas gan 8 MHz versijas, gan tādas, kurām nav iebūvēta sprieguma regulatora.

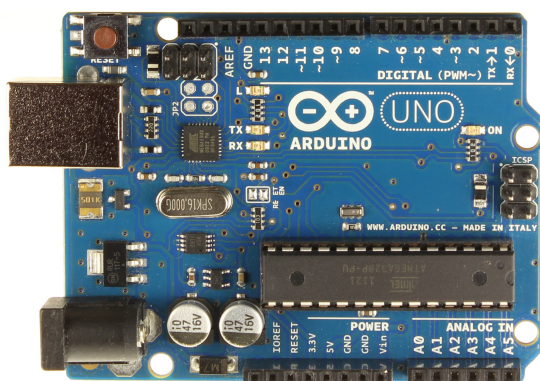
Arduino iekārtas mikrokontrolieris ir iepriekšieprogrammēts ar sāknēšanas ielādētāju (*BSL*), kas atvieglo programmu augšupielādi mikroshēmas zibatmiņā, salīdzinot ar citām ierīcēm, kam parasti ir nepieciešams ārējais programmators. Tas padara Arduino viegli lietojamu, ļaujot izmantot parastu datoru kā programmatoru.

No plašā Arduino iekārtu klāsta darba uzdevumu realizācijai izmantotas divas:

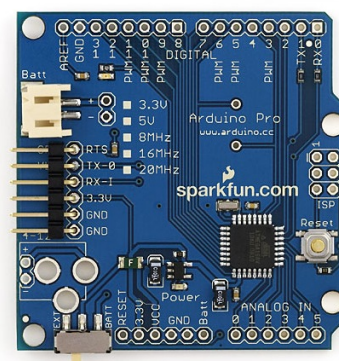
- Arduino Uno – iekārta (skatīt 2.4. attēlu) aprīkota ar DIP 28 kontaktu ligzdu,

16 MHz kristāla oscilatoru, virknes saskarnes uz USB pārveidotāju, ligzdām komponentu pievienošanai, barošanas ligzdu, 1 gaismas diodi, attiestatīšanas pogu un strādā ar 5V spriegumu;

- Arduino Pro – darbā veicamajiem uzdevumiem izvēlēta 3,3V iekārtas (skatīt 2.5. attēlu) versija, kas aprīkota ar 8 MHz kristāla oscilatoru, attiestatīšanas pogu un 1 gaismas diodi. Tai pēc vajadzības var pielodēt ligzdas vai spraudņus. Lai veiktu iekārtas programmēšanu vai datu nolasīšanu, nepieciešams ārējais virknes saskarnes uz USB pārveidotājs – tas ļauj ietaupīt enerģiju, jo nav lieku komponentu, kas to tērētu.



Att. 2.4.: Arduino Uno



Att. 2.5.: Arduino Pro

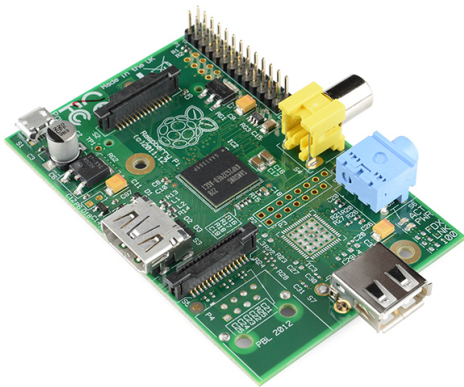
2.2.3. Raspberry Pi

Raspberry Pi [39] ir kredītkartes izmēra, lēts (cena 21–39 EUR) mikrodators ar salīdzinoši zemu enerģijas patēriņu un spējīgs darbināt Linux operētājsistēmu, ko 2009. gadā izstrādāja Lielbritānijā. Tas ir bāzēts uz Broadcom sistēma uz mikroshēmas (*system on a chip*) risinājuma BCM2835, kas ietver sevī 700 MHz ARM procesoru un VideoCore IV video procesoru, kas atbalsta *FullHD* video izvadu.

Uz šīs iekārtas iespējams darbināt pilnvērtīgu Linux operētājsistēmu, kurā, savukārt, var izmantot Python, C, C++ vai citas izstrādes valodas, lai radītu savas programmas. No izstrādes valodām iespējams piekļūt GPIO saskarnei, kas ļauj iekārtai kontrolēt ārējās iekārtas vai nolasīt sensorus. Tomēr, šai iekārtai arī ir trūkumi – tai nav iebūvēta RTC pulksteņa, kas ļautu tai strādāt pēc noteikta saraksta, tiklīdz tiek pazaudēta barošana.

No pieejamajām Raspberry iekārtām, darba uzdevumiem tika izmantotas divas:

- Raspberry Pi Model A - pirmā radītā iekārta, kurai ir tikai 256 MB operatīvās atmiņas un 1 USB ports, kā arī nav Ethernet tīkla saskarnes;
- Raspberry Pi Model B - šai iekārtai ir 512 MB operatīvās atmiņas, 2 USB porti, kā arī iebūvēta 10/100 Mbps Ethernet tīkla saskarne, taču augstāks enerģijas patēriņš.



Att. 2.6.: Raspberry Pi Model A iekārta



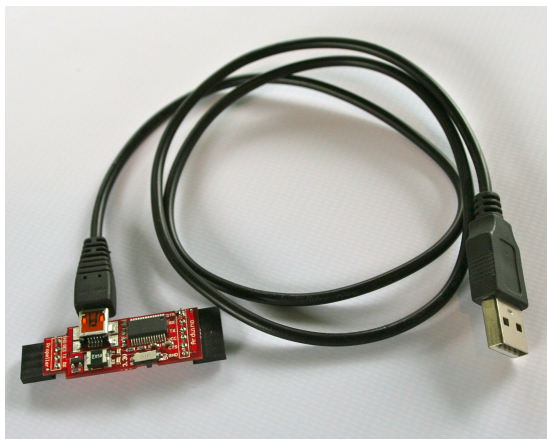
Att. 2.7.: Raspberry Pi Model B iekārta

2.2.4. Speciālās iegultās iekārtas

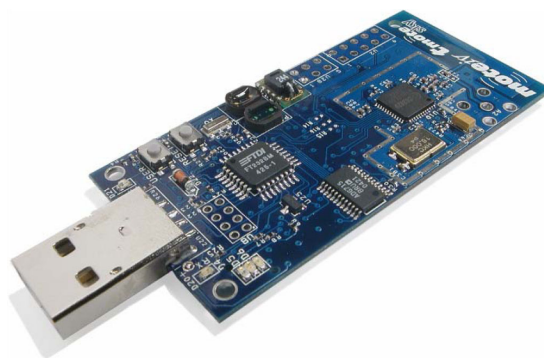
Pie speciālajām iegultajām iekārtām, kuras izmantotas darba izstrādē, jāmin:

- virknes saskarnes uz USB pārveidotājs (skatīt 2.8. attēlu), kas izmantots Arduino Pro iekārtas, kā arī 4. nodaļā aprakstītās iegultās iekārtas programmēšanā un datu nolasīšanā;
- Tmote Sky [45] (skatīt 2.9. attēlu) un Tmote Mini [46] bezvadu sensoru mezgli, kuru pamatā ir zema enerģijas patēriņa 16 bitu Texas Instruments MSP430F1611 [47] mikrokontrolieris un kas tika izmantoti 3. nodaļā aprakstīto sākotnējo hipotēžu pārbaudei un 1. prototipa radīšanai;
- Telonics [48] VHF 152MHz uztvērējs (skatīt 2.10. attēlu) ir daļa no konkrētās kompānijas ražotās telemetrijas sistēmas, kuru lietošanā nodeva LVMI "Silava" [10]

darbinieki, lai veiktu 3. nodaļā aprakstīto 2. prototipa ārkārtas moduļa izstrādi un testēšanu.



Att. 2.8.: Virknes saskarnes uz USB pārveidotājs



Att. 2.9.: Tmote Sky sensoru mezgls



Att. 2.10.: Telonics VHF uztvērējs ar antenu

2.3. Hipotēžu pārbaudei pielietotās metodes

Darba tapšanā tika izmantos sekojošas vispārpieņemtās materiālu izpētes metodes [49] [50]:

- intervijas – lai izprastu 3. un 4. nodaļās aprakstītajos pētījumus iesaistīto pušu vajadzības, prasības un iespaidus, organizētas vairākas intervijas;
- dokumentācijas un publikāciju izpēte – lai izprastu darbā izvirzīto hipotēžu pamatotību, kā arī gūtu pārliecību par izvēlēto komponentu piemērotību, veikts plašs izpētes darbs, studējot pieejamās publikācijas par saistītajiem risinājumiem un komponentu dokumentācijas;
- novērošana – lai saprastu, kā strādā 3. nodaļā minētās esošās iekārtas, veikta to izpēte un novērošana laboratorijas apstākļos;
- gadījumu izpēte – 4. nodaļā aprakstītie pētījumi tikuši vairākas reizes salīdzināti un modelēti ar citu organizāciju veidotiem pasākumiem, kuros tehniskie palīgīdzekļi netika izmantoti vispār vai to izmantojums bija minimāls.

Savvaļas dzīvnieku monitorings, izmantojot bezvadu sensoru tīklus

Šī promocijas darba nodaļa apraksta pētījumus un pieredzi, kas gūti projektējot un realizējot zema enerģijas patēriņa iegulto sensoro iekārtu sistēmu *LynxNet* savvaļas dzīvnieku monitoringam. Sistēma sastāv no vienas vai vairākām gala iekārtām, ar ko aprīko savvaļas dzīvniekus, vienas vai vairākām bāzes stacijām un centrālā servera, kur tiek veikta datu apkopšana. Iekārtu savstarpējā saziņa notiek izmantojot heterogēnus bezvadu sensoru tīklus.

Šīs nodaļas pētījumi atbilst 1.3. apakšnodaļā aprakstītā vispārīgā monitoringa modeļa realizācijas 1. sarežģītības pakāpei, kā arī nedaudz 3. sarežģītības pakāpei. Pētījumu aprobācijas piemērs ar savvaļas dzīvnieku monitoringa sistēmu ietver kustīgus subjektus jeb savvaļas dzīvniekus, kas ievāc datus par dažādiem kustīgiem objektiem – gan sevis, gan apkārtējās vides. Savukārt, sistēmas bāzes stacijas atbilst vispārīgā modeļa realizācijas 3. sarežģītības pakāpei, jo kā statistiski subjekti veic kustību objektu jeb savvaļas dzīvnieku monitoringu.

Darba 3.1. apakšnodaļā tiek aprakstīts pētījumu konteksts un motivācija, savukārt, 3.2. apakšnodaļā apskatīti esošie risinājumi. Nākošajā, 3.3. apakšnodaļā aprakstīta piedāvātā risinājuma sistēmas arhitektūra, radītā aparatūra un programmatūra, kas iekļauj sevī dzīvnieka aktivitātes noteikšanu pamatojoties uz informāciju, kas iegūta no iekārtā iebūvētajiem sensoriem. 3.4. apakšnodaļā apskatīti veiktie eksperimenti un to sasniegtie rezultāti. Nodaļu noslēdz 3.5. apakšnodaļa, kurā aprakstīti secinājumi un nākotnes perspektīvas.

3.1. Ievads

Viens no būtiskiem bezvadu sensoru tīklu pielietojumiem ir objektu monitorings, kas arī kalpo par pamatu šim pētījumam. Savvaļas dzīvnieku, it sevišķi tādu, kas ir apdraudēti kādā konkrētā reģionā vai kuru izpēte ir jāveic padziļināti, ir būtisks pētījumu objekts bioloģiem. Taču ne vienmēr viņiem ir iespēja būt dzīvniekiem līdzās, tāpēc rodas nepieciešamība pēc tehnoloģiskiem palīgīdzekļiem.

Pētījumu laikā, kas ar nelieliem pārtraukumiem ir ilguši pēdējos piecus gadus, ir pakāpeniski veidota iegultā ierīce un metodes, kas sākotnēji piemērotas Eirāzijas lūša (*Lynx lynx*) vai Eirāzijas pelēkā vilka (*Canis lupus lupus*) monitoringam savvaļā, taču vēlāk var tikt adaptēta arī citiem savvaļas dzīvniekiem, jo bioloģiem interesē pētīt dažādu izmirstošu, apdraudētu vai mazizpētītu sugu dzīvnieku uzvedību vai to apdzīvotās teritorijas.

Eirāzijas lūsis jeb vienkārši lūsis ir lielākais kaķu dzimtas (*Felidae*) plēsējs Eiropā un vienīgais savvaļas kaķis Latvijā. Kopumā Latvijas teritorijā uzturas no 700 līdz 1000 lūšiem. Padziļināti sugas pētījumi ir veikti Polijā, Igaunijā un Skandināvijas valstīs, kā arī šobrīd notiek Latvijā.

Lūsis ir krēslas dzīvnieks – vientuļnieks, kurš parasti gul no 12:00 līdz 15:00/16:00 dienā un no 2:00 līdz 3:00/4:00 naktī. Lielāku aktivitāti izrāda pilnmēnesī un pie augstāka atmosfēras spiediena. Pievilināšanai (piemēram, pie bāzes stacijas) var izmantot smakas: cita lūša smaku (piemēram, ņemta no zoodārza un lūša dzimumam nav nozīmes), bebru dziedzeri, kaķumētras. Tiesa, aromātvielas gan būtu vēlams periodiski atjaunot.

Pelēkais vilks jeb vienkārši vilks ir lielākais suņu dzimtas (*Canidae*) plēsējs Eiropā un – iespējams – vienīgais savvaļas suns Latvijā. Kopumā Latvijas teritorijā uzturas no 500 līdz 700 Eirāzijas pelēko vilku. Vilks ir viens no plašāk izpētītajiem un aprakstītajiem savvaļas dzīvniekiem [51], taču tas uzvedība un paradumi ir interesanti tieši Latvijā dzīvojošās pasugas kontekstā.

Vilks ir bara dzīvnieks, kurš pārsvarā medīt dodas diennakts tumšajā laikā. Tā kā bara teritorija Latvijā vidēji ir ap 200 km², bet bara teritorijas "kodols" ir ap 35 km², tad nav nepieciešams izmantot speciālu pievilināšanas taktiku.

Iekārtas izveidē un informācijas par lūšiem un vilkiem sniegšanā būtisku pienesumu devis bioloģijas zinātņu maģistrs, LVMI "Silava" [10] zinātniskais asistents Aivars Orni-

cāns, kurš ikdienā nodarbojas ar Latvijas lielo plēsēju izpēti.

3.1.1. Motivācija

Savvaļas dzīvnieku monitoringam piemērotas iegultas iekārtas izstrādes ideja radās pateicoties konkrētai un skaidri definētai bioloģijas zinātnieku [10] vēlmei pētīt Eirāzijas lūšus (skatīt 3.1. attēlu), bet nākotnē arī citus savvaļas dzīvniekus, kā piemēram, vilkus vai lāčus. Reģions, kurā plānots izmantot darba gaitā radīto iegulto sistēmu, ir Ķemeru nacionālais parks [52], kur regulāri pavasaros lūšu rieta laikā tiek izvietotas lūšu ķeršanas ierīces – kastes (skatīt 3.2. attēlu), taču pagaidām bez rezultātiem.

Dažas no pētāmajām sfērām jau šobrīd ir iespējams apgūt, izmantojot komerciāli pieejamus risinājumus, taču tie ir ierobežoti savā darbībā vai arī neadekvāti dārgi (skatīt 3.2. apakšnodaļu). Tāpēc arī šeit paveras iespēja bezvadu sensoru tīklu pielietojumam ne tikai savvaļas dzīvnieku izpētē, bet arī, piemēram, pētot kazu [53] vai govju [54] uzvedību ganībās.



Att. 3.1.: Eirāzijas lūsis kokā



Att. 3.2.: Lūšu ķeršanas ierīce – kaste

Savvaļas dzīvnieku monitorings iekļauj sevī informācijas iegūšanu par dzīvnieka uzvedību tā dabiskajā vidē. Šī informācija var tikt izmantota kā zinātniskiem mērķiem, tā arī sugas saglabāšanai. Primāri vācamā šāda veida informācija ir par dzīvnieka atrašanās vietu konkrētos punktos konkrētā laikā, ar to parasti tiek saprasta parastā jeb radio sekošana [55].

Eksistē arī cita veida iegūstamā informācija – fizioloģiskie parametri (piemēram, sirdsdarbība [56] [57], ķermeņa temperatūra [58], vaginālā temperatūra [59]) vai aktivitāte (piemēram, galvas pieliekšana [60] vai defekācija [61]), kuri interesē biologus. Visas

minētā iegūstamā informācija tiek saprasta kā telemetrija [55]. Tomēr, neskatoties uz līdzīgo informācijas iegūšanu, termini bieži ir lietoti sajaukti. Būtībā, ar sekošanu ir jāsaprot dzīvnieka atrašanās vietas noteikšanu, savukārt, ar telemetriju – tādas informācijas vākšanu un saglabāšanu, kura vēlāk tiks izmantota dzīvnieka aktivitātes noteikšanai noteiktos laika momentos.

Tā kā visbiežāk, lai dzīvnieku varētu atrast un tam sekot lielā platībā, tiek lietotas sekošanas iekārtas, kas vairumā gadījumu ir elektroniskas. Eksistē arī attālinātas sekošanas metodes, kas izmanto un dzīvniekus identificē vizuāli [62] [63] [64] [65] [66] vai ar akustisko signālu [67] [68] palīdzību. Šādu metožu trūkums ir tas, ka tās ir piemērotas tikai atsevišķām sugām vai arī to darbības rādiuss ir ierobežots. Taču, tā kā tās dzīvniekus netraucē, tad ir pievilcīga izvēle gadījumos, kur tās iespējams izmantot.

Šobrīd jau eksistē daudzas dzīvnieku novērošanas un sekošanas sistēmas, kas izmanto GPS uztvērēju un/vai radio sakarus, lai informāciju nodotu tālāk, bet tās ir vai nu dārgas [69] vai ar ierobežotām funkcijām, kā piemēram, VHF radio kaklasiksnas, vai ar pārāk ierobežotu sistēmas dzīves ilgumu, vai pat visi šie trūkumi kopā. Tas radīja pārliecību, ka jāizveido sistēma, kuras izmaksas būtu nelielas, kura būtu spējīga uz ilglaicīgu (vismaz daži gadi) darbu un piedāvātu plašu iespēju klāstu, tajā skaitā tādas iespējas, kādas līdz šim konkrētā veida dzīvnieku sekošanas sistēmām nav vispār vai ir realizētas zemā līmenī – piemēram, dzīvnieka aktivitātes cikla (ar kustību atpazīšanu) noteikšana.

Saskaņā ar biologu ieteikumiem tika definētas arī minimālās prasības, kas būtu jāizpilda iegultajai iekārtai:

- dzīvnieku izsekošana ar precizitāti $\leq 100\text{m}$;
- datu savākšana analīzei ar relatīvi zemu latenci (nedēļas, nevis gadi);
- dzīvnieka aktivitātes veida noteikšana (medī, gul, pārvietojas utt.);
- sistēmas darbības biežuma un precizitātes pieskaņošana atkarībā no iepriekš definētajiem vai automātiski noteiktajiem parametriem.

3.2. Esošo risinājumu apskats

Darba gaitā tika veikts esošo risinājumu apskats, lai gūtu priekšstatu par pasaules lietotajām metodēm dzīvnieku izsekošanā [70]. Rezultāti ir apkopoti šajā apakšnodaļā.

3.2.1. VHF sekošana

VHF jeb *Very High Frequency*¹ ir agrākā tehnoloģija, kas izmantota, lai sekotu un identificētu individuālus savvaļas dzīvniekus elektroniski. Pirmās veiksmīgi testētās sistēmas tika demonstrētas jau 1963. gadā [71]. Tipiska VHF bāzēta sistēma sastāv no divām komponentēm – raidītāja, kas ir uzstādīts uz dzīvnieka un uztvērēja.

3.2.1.1. VHF raidītāji

Parasti VHF raidītājs sastāv no barošanas bloka, raidošās iekārtas un izstarojošā elementa vai antenas. Iekārta periodiski raida īsu RF signālu virkni (parasti 15 līdz 50 milisekundes, taču atkarīgs no raidītāja frekvenču joslas platuma un izmantotās tehnoloģijas [72] [48] [60]) iepriekšnoteiktā šaurā frekvenču joslā. Pārraidītā signāla pulsācijas temps parasti ir robežās no 30 – 120 pīkstieniem minūtē [72] [48]. Iemesls raidītāja strādāšanai pulsējošā režīmā nevis nepārtraukti ir gaužām vienkāršs – tā tiek taupīta bateriju enerģija, jo zemāks darba cikls dod arī zemāku enerģijas patēriņu un, attiecīgi, ilgāku raidītāja mūžu. Pārsvārā gadījumu, VHF raidītāji, kurus izmanto pētniecībā, ir noskaņoti uz dažādām frekvenču joslām (tipiski ar 5-10 kHz atstatumu [72]), lai būtu iespējams atšķirt un sekot individuāliem dzīvniekiem izmantojot VHF uztvērēju.

Pirmie izmantotie raidītāji bija vienkāršas vienas pakāpes ierīces (pamatā RF oscilatori), kas bija vieglas, bet ar zemu izvades jaudu [73]. Divu pakāpju ierīces sastāv no RF oscilatora un pastiprinātāja, kas pastiprina izvades jaudu uz palielināta enerģijas patēriņa rēķina [72] [73]. Modernajām ierīcēm raidītāja frekvenci precīzi kontrolē kvarca kristāls, kas ļauj samazināt temperatūras variāciju izraisītas nobīdes [72]. Ar mikroprocesoru kontrolētie raidītāji ir būtiski palielinājuši VHF raidītāju izmantošanas elastīgumu [48] [60] [74]. Pateicoties tiem, var tikt pielietota kontrolētā aktivizēšana (piemēram, 8 stundas

¹Vēsturiska aizķeršanās – par VHF signāliem tiek uzskatīti tādi, kas atrodas 30 – 300 MHz frekvenču joslā, taču ņemot vērā mūsdienu tehnoloģiju, šādi signāli patiesībā ir relatīvi zemas frekvences

ieslēgts, 16 stundas izslēgts), kas ļoti būtiski palielina sekošanas ierīces kalpošanas laiku un ļauj tās pielāgot tipiskiem sekošanas laika posmiem. Šos laika posmus, kā arī digitāli kontrolētu raidītāja frekvenci, var ieprogrammēt lietotājs [48] [74] [60] [72].

Atkarībā no valsts, kurā tiek lietotas VHF ierīces, atšķiras arī izmantotie frekvenču diapazoni. Izplatītākās joslas ir 148 – 152 MHz, 163 – 165 MHz un 216 – 220 MHz, kaut arī frekvences var būt diapazonā no 27 MHz līdz 401 MHz [75]. Zemākām frekvencēm ir nepieciešamas garākas antenas (piemēram, ceturtdaļviļņa antenai pie 148 MHz ir jābūt 50 cm garai), kuras bieži nav iespējams izvietot uz mazākiem dzīvniekiem. Augstākās frekvences, kaut arī tām ir nepieciešama īsāka antena, vairāk cieš no "signāla lēkāšanas" dēļ izteiktākiem apkārtējās vides radītiem daudzstaru efektiem, kas ietekmē to izmantojamo noteikšanas attālumu [76]. Raidītāja jauda ir atkarīga no pētījuma prasībām, bet vidēji tā ir starp -10 dBm un +10 dBm [74] [72].

VHF iekārtas izstaroto signālu ir iespējam kodēt, lai tādā veidā pārraidītu vairāk informācijas. To parasti dara, atbilstoši mērāmajam mainīgajam, mainot intervālu starp secīgiem impulsiem. Piemēram, plaši izplatīta sekošanas kaklasiksnu funkcija ir "mirstības indikators", kas maina impulsu intervālu atkarībā no tā vai kaklasiksna ilgstoši ir nekustīga, kas, savukārt, palīdz pētniekam noteikt, ka pētāmais dzīvnieks ir miris [48] [72]. Cits mainīga impulsu intervāla pielietojums ir raidītāja temperatūras pārraide [77], tādējādi no sekošanas iekārtas signāla iegūstot gan lokācijas, gan sensora datus.

3.2.1.2. VHF uztvērēji

Lai attālināti noteiktu dzīvnieka atrašanās vietu, nepieciešams saņemt un noteikt sekošanas signālu. Tipisks uztvērējs sastāv no antenas, pastiprinātāja un detektora. Detektors atšķir RF signāla esamību vai neesamību un atsevišķos gadījumos arī nosaka tā stiprumu. Detektors var būt pētnieks, kas klausās demodulētu radio signālu (tā tiek saukta par manuālu sekošanu) vai datu ierakstīšanas ierīce (tā tiek saukta par automātisku sekošanu).

Sekojošajos apakšpunktos tiek apskatītas dažādas ar dzīvnieka atrašanās vietu saistītas novērtēšanas metodes.

3.2.1.2.1. Tuvuma noteikšana Šī ir vienkāršākā metode rupjas dzīvnieku atrašanās vietas noteikšanai, kuru plaši izmanto arī mūsu biologi [10]. Tā reģistrē sekošanas

ierīču esamību vai neesamību uztvērēja radio uztveršanas attālumā. Tas ļauj novērtēt dzīvnieku attālumu no noteiktas vietas (kas var būt interesējoša vieta, piemēram, ala vai ūdens tilpne). Šī metode ir labi piemērota automātiskai noteikšanai, jo tās vajadzībām ir relatīvi viegli izvietot ilgtermiņa novērošanas staciju. Automātiskas tuvuma noteikšanas uztvērējs sastāv no skenējoša uztvērēja, kas skenē individuālas frekvenču joslas, kas atbilst dzīvniekiem pievienotajām sekošanas iekārtu frekvencēm un datu ierakstīšanas ierīces, kas noteiktā laikā reģistrē signāla esamību vai neesamību [78]. Tuvuma noteikšanā izmantotās antenas parasti ir izkliedētās antenas, kas piemērotas noteikšanai aptuvenā riņķveida laukumā ap detektoru.

3.2.1.2.2. Triangulācija Triangulācija ir metode, kas tiek izmantota, lai noteiktu dzīvnieka atrašanās vietu, novērtējot tā azimutu (ļēnki attiecībā pret fiksētu atskaites punktu, piemēram, ziemeļiem) no divām vai vairāk lokācijām [79]. Dzīvnieka atrašanās vieta tiek noteikta pēc šo azimutu krustošanās punkta [80]. Šī metode nodrošina daudz lielāku precizitāti kā vienkārša tuvuma noteikšana, bet tai ir nepieciešama sarežģītāka uztveršanas aparātūra. Lai aprēķinātu azimutu, uz uztvērēja ir nepieciešams izmantot virziena antenu, piemēram, Adcock (H) tipa vai cilpas antenu [81] [82], bet visbiežāk tiek izmantota Yagi tipa antena [75] [82]. Yagi antenā izmantotie elementi, ļauj kontrolēt tās jutīgumu un virzienu, bet vienlaikus daudzie elementi padara to arī smagu un masīvu, kā rezultātā tā nav īpaši piemērota manuālai triangulācijai pie zemākām frekvencēm [83].

Lai veiktu manuālu triangulāciju, pētnieks, turot vērstu antenu, pagriežās maksimālā dzīvnieka kakla siksas iekārtas raidītā signāla virzienā [81] [75]. Šis azimuts tiek reģistrēts un pētnieks pāriet uz nākošo lokāciju, lai reģistrētu nākamo azimutu [81]. No šo azimutu krustošanās punkta ir iespējams noteikt dzīvnieka atrašanās vietu. Protams, ja dzīvnieks pirms otrā azimuta reģistrēšanas ir pārvietojies, tā atrašanās vieta tiks noteikta neprecīzi [75]. Lai izvairītos no šīs problēmas, azimutus pret konkrēto pētāmo dzīvnieku var vienlaicīgi noteikt divi vai vairāk pētnieki [75]. Manuāla triangulācija var tikt izmantota arī sekošanas pētījumos, kas tiek veikti no gaisa [84].

Automātiskās triangulācijas sistēmas izmanto rotējošas vai nerotējošas antenas. Mehānisku rotējošu sistēmu priekšrocība ir tāda, ka uz vienu uztveršanas torni ir nepieciešams izmantot tikai vienu uztveršanas elementu [79]. Diemžēl, lai nodrošinātu ilgstošu darbī-

bu, mehāniskām, rotējošām antenu sistēmām ir nepieciešama bieža tehniska apkope [85]. Nerotējoša virziena noteikšana ietver vairākas antenas un leņķa noteikšanu, izmantojot fāzes vai signāla spēka balstītus mērījumus [85] [86].

Īpaši veiksmīga automātiskās triangulācijas sistēma ir ARTS jeb *Automated Radio Tracking System*, kas izmanto septiņus 45 metrus augstus torņus, kas katrs aprīkots ar vairākām fiksētām log-periodiskām antenām [82] un kas izvietota Baro Kolorada sala, Panamā [77]. Visi torņi ir savā starpā ir saistīti ar bezvadu tīklu infrastruktūru, kas izmanto centralizētu datubāzi, kurā tiek reģistrēti visu noteikto iekārtu atrašanās vietas [77]. Atrašanās vietu precizitāte ir aptuveni 70 metri, atkarībā no azimutu skaita un signāla spēka [77]. Šī instalācija ļauj reālā laikā novērot vairākus dzīvniekus un to fizioloģiskos parametrus [77]. Īpaši interesanta ir iespēja noteikt medību notikumus, ko iespējam izsecināt pēc plēsoņas un upura pārvietošanās trajektoriju konverģences [87].

3.2.1.2.3. Dzīvnieka lenkšana Dzīvnieka lenkšana ir process, kurā pētnieks pārvietojas signāla virzienā, līdz dzīvnieks ir fiziski redzams vai nosakāms. Dzīvnieka lenkšanas gadījumā pastāv iespēja, ka iegūtajās atrašanās vietās tiks ieviesta statistiska novirze, jo dzīvnieks var tikt iztraucēts, kā rezultātā tā uzvedība var mainīties [88]. Dzīvnieka lenkšana var tikt izmantota arī sekošanai, kas tiek veikta no gaisa – šajā gadījumā katrā lidmašīnas vai helikoptera pusē tiek novietots pa antenai un pilots lido maksimālā signāla spēka virzienā. Parasti tas notiek spirālveida apla kustībā [84].

3.2.1.3. VHF tehnoloģijas plusi un mīnusi

VHF sekošana ir vienkārša un relatīvi lēta dzīvnieku izsekošanas metode. Tipiska raidītāja iekārta (atkarībā no opcijām) izmaksā no U\$100 līdz U\$200 [72] [60] [74] [48]. Manuālo uztvērēju cena atkarībā no to sarežģītības var būt diapazonā no U\$500 līdz U\$2500 [72] [60] [74] [48]. Pateicoties zemajai raidīšanas jaudai un VHF iekārtu kalpošanas ciklam, tām nav nepieciešami lielas ietilpības akumulatori. Mazākie pieejamie VHF raidītāji sver aptuveni 0,2 gramus, taču tiem ir ierobežota raidīšanas jauda un ļoti īss kalpošanas laiks (divas līdz trīs nedēļas) [89]. Ilgākiem pētījumiem paredzētā sekošanas iekārta, kas veidota kaklasikšanas formā, sver aptuveni 500 gramus un var pārraidīt RF signālu ilgāk par 4 gadiem [60]. VHF sekošanu var pielietot plašam dzīvnieku sugu lokam, sākot ar ļoti

maziem dzīvniekiem (un pat kukaiņiem [89]), līdz pat lieliem zīdītājiem [60].

Galvenais VHF sekošanas trūkums ir triangulācijā iesaistītā darba spēka daudzums (un ar šo darbaspēku saistītās izmaksas), kā rezultāta tiek iegūts neliels fiksēto rezultātu daudzums [79]. Kaut arī aparātūras izmaksas šai metodei ir no visām trīs galvenajām metodēm (šeit domātas VHF, satelīta un GPS sekošanas metodes) viszemākās, vienas fiksētā rezultāta izmaksas ir ļoti augstas – vienā no pētījumiem tika noteikts, ka viena fiksētā rezultāta izmaksas VHF gadījumā var sasniegt U\$65, salīdzinot ar U\$8 GPS gadījumā [90]. Pie tam jāņem vērā fakts, ka daudzas saistītās izmaksas (piemēram, degvielas cena, inflācija utt.) kopš pētījuma veikšanas ir tikai pieaugušas, tādejādi sadārdzinot viena VHF fiksētā rezultāta izmaksas. Savukārt, GPS gadījumā izmaksas pat varētu būt samazinājušās jaunāku un efektīvāku tehnoloģiju ieviešanas dēļ.

Dzīvnieku lenkšanā arī pastāv iespēja izkropļot atrašanās vietu lokācijas dēļ iekļaušanās dzīvnieku dabiskajā vidē [88]. Automātiskās sekošanas sistēmas sniedz plašu informācijas klāstu un tām ir nepieciešams ļoti mazs darbaspēks, bet to sākotnējās izvietojšanas izmaksas ir ļoti augstas [77]. Dzīvnieku atrašanās vietu datu interpretāciju sarežģī arī nevienmērīgā kļūdu izplatība – jo dzīvnieks ir tālāk no uztverošās antenas, jo lielāka ir iespējamā kļūda [91].

3.2.2. ARGOS satelītsekošana

ARGOS [69] ir satelītu bāzēts sekošanas risinājums, kas ir dārgs (izmaksā vairākus tūkstošus USD gadā) ikdienas lietošanai un uzturēšanai, tomēr nedod vēlamo rezultātu iegūto koordināšu precizitātē. Izmanto 850 kilometru augstumā riņķojošus satelītus. Tipiskā ARGOS satelītsekošanas precizitāte [69] ir redzama 3.1. tabulā.

Kā vēl būtisks VHF sekošanas trūkums jāmin arī ierobežotais paklājums – pētniekam, lai tas varētu noteikt dzīvnieka atrašanās vietu, ir jābūt tā radio darbības rādiusā. Maksimālais praktiski pielietojamais sekošanas laukums ir starp 50 un 300 km² [73]. Tas nepieļauj parastās VHF sekošanas pielietojanu tādām plašā reģionā izplatītām sugām kā, piemēram, savvaļas suņi [92] vai lūši. Tāpēc ieteicams izmantot satelītu sekošanu, kas nodrošina pilnībā globālu atrašanās vietas noteikšanu, izmantojot kosmosā izvietotus uztvērējus (pretēji GPS izsekošanai (skat. 3.2.3. nodaļu), kas izmanto kosmosā izvietotus

Lokācijas klase	Tips	Aptuvenā precizitāte
G	GPS	< 100m
3	ARGOS	< 250m
2	ARGOS	250m < < 500m
1	ARGOS	500m < < 1500m
0	ARGOS	> 1500m
A	ARGOS	Nav aptuvenās precizitātes, saņemtas tikai 3 ziņas
B	ARGOS	Nav aptuvenās precizitātes, saņemtas tikai 1–2 ziņas
Z	ARGOS	Nav lokācijas informācijas

Tabula 3.1.: Tipiskā precizitāte ARGOS sistēmā

raidītājus).

Sistēma, kas plaši tiek izmantota dzīvās dabas izsekošanai, ir ARGOS – kopīga Francijas Kosmosa aģentūras un ASV Nacionālās okeānu un aeronautikas administrācijas (NOAA) satelītu kopa. Šie satelīti lokalizē un identificē signālus, ko nosūta raidītāji jeb termināli (tie tiek saukti arī par PPT jeb *Platform Transmitter Terminals*) [93].

Šobrīd tiek izmantoti četri NOAA satelīti ARGOS-2 sistēmā un divi NOAA satelīti ARGOS-3 sistēmā un tiek plānots tiem pievienot trešo [69]. To orbīta ir 850km augstumā, ar sauli sinhronās orbītās [69]. Katram no satelītiem ir aptuveni 5000 km diametru liels lejup vērsts skata lauks un to orbitālais periods ir aptuveni 100 minūtes [69]. ARGOS nodrošina globālu pārklājumu, tomēr dēļ savas orbitālās trajektorijas tas nesniedz nepārtrauktu piekļuvi visām lokācijām [69]. Turklāt tā kā satelīti atrodas polārā orbītā, atrašanās vietu novērtējumi un pārklājums ekvatora virzienā ir vājāks, kā polu virzienā [69]. Atkarībā no termināla atrašanās vietas satelīts orbītas laikā virs tā atradīsies no 2 līdz 12 minūtēm, taču vidējais laiks ir ap 10 minūtēm [69]. Tas, cik reizes dienā terminālu var lokalizēt, ir atkarīgs no platuma un var mainīties starp 8 (ekvators) un 28 (poli), taču vidējais rādītājs ir 14 [69] [93].

Visi PTT raidītāji raida vienā frekvencē – 401,650 MHz, un šī iemesla dēļ pastāv pārraides biežuma ierobežojums, kas nosaka cik bieži PTT raidītāji drīkst pārraidīt, lai izvairītos no savstarpēji izraisītiem traucējumiem [69]. Satelīts ieraksta ienākošā signāla Doplera nobīdi, piemēram, ja satelīts atrodas tieši virs raidītāja, tad Doplera nobīde netiks novērota [69]. Taču, ja satelīts virzās PTT raidītāja virzienā vai prom no tā, frekvence attiecīgi nobīdīsies uz augšu vai uz leju [69]. Vislabākais pozīcijas novērtējums tiek

iegūts, ja no viena PTT raidītāja tiek iegūtas četras vai vairāk pārraides [69]. No zināmās satelīta pozīcijas un Doplera nobīdītajiem signāliem ir iespējams noteikt atrašanās vietu [69]. Atkarībā no signāla jaudas un PTT raidītāja un satelīta atrašanās vietas, mainīgā precizitāte ir norādīta 3.1. tabulā. Tomēr praksē pētnieki ir secinājuši (salīdzinot ARGOS fiksācijas ar tām, kas vienlaicīgi iegūtas no GPS uztvērējiem), ka precizitāte ir sliktāka, ar vidējo kļūdu 5,0 km 1. līmeņa fiksācijām, kas ir 5 reizes lielāka, ka tā ko norādījis ARGOS [94]. Ir ticis ierosināts filtrēšanas algoritms, kas ļauj atfiltrēt kļūdainos rezultātus no datu kopas – kā rezultātā tika atfiltrētas aptuveni 30% no iegūtajiem datiem par pelēko roņu atrašanās vietām [95]. Jaunāka pieeja izmanto korelētu nejaušas pārvietošanās mobilitātes modeli, lai filtrētu un noraidītu netipiskos satelītu sekošanas datus bruņurupučiem [96]. Papildus tam autori izpētīja, ka ARGOS precizitāte samazinājās līdz ar izmaiņām jūras virsmas temperatūrā, kas, iespējams, ir saistīts ar termisko ietekmi uz raidītāja nesējfrekvences stabilitāti [96]. No PTT raidītāja uz ARGOS sistēmu var tikt augšupielādēts neliels daudzums (līdz 32 baiti uz pārraidi) telemetrisko datu, tādā veidā ļaujot izmantot reālā laika sensoru datu augšupielādi [69].

PTT sekošanas ierīču pārraides jauda mainās no 0,5 W līdz 2 W, kas ir ievērojami augstāka nekā VHF sekošanas ierīcēm ar tipisku jaudas izvadi 10 mW [69] [93] [74]. Tādējādi PTT raidītāji ir lielāki un smagāki kā VHF sekošanas ierīces, jo tiem ir augstākas prasības pret akumulatoru ietilpību [97]. Kaut arī PTT raidītāji ir izstrādāti, lai tos izsekotu no kosmosa, to atrašanās vietu ir iespējams noteikt arī izmantojot uz zemes bāzētus uztvērējus, kas var tikt izmantoti, lai atrastu dzīvnieku vai lai atgūtu raidītāju ar zemu izvades jaudu [98].

3.2.2.1. ARGOS satelītsekošanas plusi un mīnusi

ARGOS nodrošina pilnībā globālu sekošanas pārklājumu, ar reālam laikam pietuvinātiem pozīcijas atjauninājumiem. Kad PTT iekārtas izvietotas, tad atrašanās vietas no tām tiek nodotas tieši lietotājam, kas nozīmē, ka dzīvnieka izsekošanai nav nepieciešams papildus darbs. No tā iegūtais papildus labums ir tāds, ka nenotiek nekāda dabiskās vides traucēšana. Būtiskākais trūkums, kas padara šo sistēmu nepiemērotu Latvijas zinātniekiem, ir tās izmantošanas izmaksas. Bez tam šī sistēma ir labāk piemērota tādu dzīvnieku izsekošanai, kuru apdzīvotā teritorija ir ļoti liela vai arī tai ir grūti piekļūt, piemēram, okeāna

vai polāro apvidu dzīvnieki un to dabiskā vide.

Ir veikts arī ARGOS un GPS sekošanas salīdzinājums [99], kas pierāda, ka GPS izmantošana ir daudz efektīvāka un precīzāka nekā ARGOS.

Satelītu sekošanas sistēmas būtiskākais trūkums ir datu iegūšanas izmaksas – pašas birkas maksā U\$3000 [60] [74] [97] un tās lietotājam ir jāmaksā pakalpojuma lietošanas maksa datu apstrādes centram, kas gadā sastāda no U\$3000 līdz U\$5000 [69]. Atrāsānās vietas precizitāte ARGOS sekošanas birkām ir zemāka, salīdzinot ar VHF un GPS sekošanu [69]. Papildus tam, veiksmīgu fiksāciju procentuālais daudzums parasti ir zems (vienā no pētījumiem tika noteikts, ka fiksācijas iespējamības procentuālais daudzums svārstījās starp 11% ielejas zemākajā punktā un 56% kalna virsotnē [100]). Bez tam, sakarā ar ierobežoto laika logu, kurā satelīti atrodas virs raidītājiem, vienas dienas laikā iegūstamo fiksāciju daudzums ir neliels, salīdzinot ar citām metodēm, piemēram, GPS sekošanu [69]. Galvenais trūkums satelītu sekošanas ierīcēm ir PTT bloka svars, jo tiem dēļ augstās raidītāja izvades jaudas, lai nodrošinātu ilgstošu kalpošanu, ir nepieciešami lieli akumulatori [60] [74] [97]. PTT birkas parasti sver no 200 līdz 400g, bet ir pieejamas ar saules akumulatoriem aprīkotas ierīces, kas sver tikai 15 g [93] [97].

Mēģinot radīt globālu sekošanas sistēmu, ar kuru varētu novērot mazāku dzīvnieku sugas, Wikelski *et al.* [101] ir izveidojis Icarus iniciatīvu, kuras ietvaros plānots zemā zemes orbītā izvietot modernu tehnoloģiju, kas var noteikt atrašanās vietu birkām, kas vieglākas par gramu. Tomēr īpaša dzīvnieku sekošanas satelīta palaišana vēl nav notikusi.

3.2.3. GPS sekošana

Ar ASV izstrādātās globālās navigācijas kosmosa sistēmas (GNKS) NAVSTAR Globālās Pozicionēšanas Sistēmas jeb GPS nodošanu ekspluatācijā 1993. gadā sākās jauna ēra savvaļas dzīvnieku izsekošanā [102] [103]. Šī tehnoloģija pieļauj ļoti precīzu (līdz 5 metriem) GPS uztvērēja vietas noteikšanu jebkurā vietā pasaulē 24 stundas diennaktī [104]. Paralēli GPS eksistē arī citas līdzvērtīgas sistēmas dažādās izstrādes vai lietošanas stadijās, no kurām tikai Krievijas Federācijas izveidotā GNKS GLONASS [105] ir pilnā darba kārtībā, bet pārējās GNKS – Galileo, Beidou vai COMPASS – vēl nav pabeigtas. Tiesa, GLONASS pagaidām nav pietiekoši izplatīts kā rīks dzīvnieku izsekošanai.

3.2.3.1. GPS pamatprincipi

GPS lieto plejādi no 24 satelītiem, kas riņķo ap zemi precīzās 12 stundu orbītās un pārraida signālus L1 (1575,42 MHz) un L2 (1227,60 MHz) augstfrekvenču joslās, kurus arī pamatā izmanto GPS uztvērēji, lai noteiktu atrašanās vietu. Papildus iepriekšminētajiem tiek pārraidīti vēl trīs signāli – L3 (1381,05 MHz), L4 (1379,913 MHz) un L5 (1176,45 MHz) – kuri tiek lietoti gan militāriem (L3), gan zinātniskiem mērķiem (L4), kā arī ”dzīvības drošības” jeb *safety-of-life* nodrošināšanai (L5) aeronavigācijā [102].

L1 signāls ir CA (*Coarse Acquisition* jeb zemas kvalitātes noteikšanas) kods, kas tiek modulēts, lai nodotu informāciju, kuru GPS uztvērējs izmanto, lai aprēķinātu savu atrašanās vietu, un kas sasatāv no pseidogadījuma koda, efemerīda datiem un almanaha datiem. Pseidogadījuma kods unikāli idenfificē katru satelītu. Efemerīda datus katrs satelīts pārraida, lai precīzi norādītu savu atrašanās vietu, un tie ir derīgi 4-6 stundas. Almanaha dati ir katra kopas satelīta statusa informācija (vesels/nevesels un zemas kvalitātes orbitāla informācija) un pašreizējais datums un laiks.

GPS uztvērējam, lai tas varētu noteikt savu trīsdimensiju atrašanās vietu, ir jāsaņem signāls no vismaz četriem satelītiem. Uztvērējs nosaka katra satelīta lidojuma laiku, veicot krustenisku korelāciju pēc laika domēna. Zinot saņemšanas laiku un satelītu precīzu atrašanās vietu (pēc to efemerīda datiem) uztvērējs var noteikt precīzu savu atrašanās vietu trīs dimensijās. ”Papildu” parametrs, kuru uztvērējs izmanto ir laiks, jo visiem satelītiem ir precīzi saskaņota laika atskaite un, lai uzturētu precizitāti, tie ir aprīkoti ar atompulksteņiem. Tādā veidā uztvērēja atrašanās vietas noteikšanas blakusprodukts ir tā precīza laika sinhronizācija, kas ir noderīga iegūto datu atzīmēšanai ar laika zīmogu.

Tomēr GPS uztvērējam ir nepieciešams laiks, lai tas iegūtu atrašanās vietas fiksāciju, un tas ir atkarīgs, gan no uztvērējā izmantotās tehnoloģijas, gan no tā, kad uztvērējs pēdējo reizi ir ieguvis veiksmīgu fiksāciju. Piemēram, kad u-Blox NEO-4S GPS uztvērējs [106] tiek startēts pirmo reizi, vai arī tas ir zaudējis sinhronizāciju (t.i. tam nav efemerīda datu, laika un almanaha datu), tas tiek saukts par „auksto startu” un tam ir nepieciešamas aptuveni 34s [106]. „Siltais starts” notiek tad, kad uztvērējam ir efemerīda un almanaha dati un iepriekšējās atrašanās vietas novērtējums, bet uztvērējs kādu laiku (līdz pat vairākas stundas) ir bijis izslēgts un līdz ar to ir zaudējis precīzu laika sinhro-

nizāciju un šāds starts parasti aizņem 33 sekundes [106]. „Karstais starts” notiek, kad uztvērējam ir derīgi atrašanās vietas, efemerīda, almanaha un laika dati, un tas ir bijis izslēgts uz īsu laika posmu (dažas minūtes) un tas aizņem 3 sekundes [106]. Šie rādītāji ir no ražotāja specifikācijas un tie ir:

”izmērīti pie labas redzamības un -125dBm signāla stipruma” [106].

Modernākiem uztvērējiem šie rādītāji jau ir daudz zemāki, piemēram, *LynxNet* izmantotajam Fastrax IT530 ”aukstais” un ”siltais” starts aizņem 31 sekundi, savukārt, ”karstais starts” vien tikai 1 sekundi [107].

Realitātē GPS precizitāti un aprēķinu pieejamību nosaka daudzi faktori – koku lapotnes pārsegums, daudzkanālu efekti no spēcīgiem atstarotājiem, jonosfēras aizkaves, redzamo satelītpavadoņu skaits un oscilatora precizitāte uztvērējā. Izsekojot savvaļas vilkus, Coelho *et al.* izpētīja, ka GPS fiksācijas visveiksmīgākās ir naktī, kad vilki medī zem atklātām debesīm un visneveiksmīgākās naktī, kad tie guļ blīvā veģetācijā [108]. Tika arī izpētīts, ka fiksācijas iespējamība ir aptuveni 90% [108]. Agrākā pētījumā veiksmīgas bija tikai 5% no fiksācijām uz GPS birkām, kas piestiprinātas Klusā okeāna valzirgiem [108]. Apkārtējās vides (piemēram, biezas veģetācijas) izraisītās nobīdes, kas traucē iegūt veiksmīgu fiksāciju, var novest pie dabiskās vides izvēles pētījumu datu izkropļojumiem, un tas ir jāņem vērā, lai netiktu izdarīti nepareizi secinājumi [109].

GPS uztvērējiem dēļ lielas atdeves radio uztveršanas daļas (*radio front-end*) un arī vairāku kanālu krusteniskās korelācijas meklēšanas procesa ir relatīvi augsts enerģijas patēriņš (aptuveni 100mW, kad tie ir aktīvi [106]). Papildus tam uztvērējam ir jābūt aktīvam līdz tiek iegūta fiksācija, kas dažos gadījumos var aizņemt vairākas minūtes [110], kā rezultātā tiek iegūtas augstas enerģijas izmaksas uz vienu fiksāciju. Dēļ augstā enerģijas patēriņa GPS uztvērējus nav praktiski izmantot nepārtrauktos ilgtermiņa pētījumos un tāpēc tie tiek izmantoti cikliski, ieslēdzot tos noteiktos laika intervālos (parasti no 5 minūtēm līdz 4 stundām [60] [74] [111]). Tomēr ir veikti īstermiņa (mazāk kā 24 stundas) pētījumi, izmantojot nepārtraukti ieslēgtus GPS uztvērējus, lai iegūtu precīzus Āfrikas pingvīnu barības meklēšanas datus, un tika secināts, ka retākas paraugu iegūšanas (vairāk kā 10 minūtes starp paraugiem) rezultātā tiek ievērojami nenovērtēti patiesie barības meklēšanas attālumi [112]. Papildus tam tika izpētīts, ka ierīču atkārtotas fiksācijas veikt-

spēja ir zema – veicot reģistrāciju ik pēc 10s, aizkave starp rezultātiem bija ar vidējo laiku 44s [112]. Ņemot vērā GPS uztvērēju ilgos noteikšanas laikus, īpaši jūras dzīvniekiem, kas uz sauszemes pavada īsu laika periodu, tika izstrādāta jauna (prototips 2006. gadā) noteikšanas stratēģija (nosaukums tirgū FastLoc) [113]. To izmantojot ir iespējami ievērojami samazināti noteikšanas laiki ($<100\text{ms}$), kas tiek iegūti uz samazinātas precizitātes un palielināta ziņojumu izmēra rēķina [113]. GPS uztvērējs neapreķina uztvērēja atrašanās vietu, bet novērtē redzamo satelītu lidojuma laiku, kas vēlākos aprēķinos ļauj iegūtu atrašanās vietu fiksācijas [113]. Arī precizitāte ir pazemināta un ir atkarīga no redzamo satelītu skaita [113].

Pretēji satelīta sekošanai (skat. 3.2.2. sadaļu), kurā uz zemes izvietotā ierīce ir raidītājs, GPS ierīce ir uztvērējs. Tāpēc uztvērēja aprēķinātās atrašanās vietas ir kaut kādā veidā jānogādā no GPS uztvērēja līdz gala lietotājam. Pastāv vairākas metodes kā to izdarīt, kuras tiks apskatītas nākošajās sadaļās.

3.2.3.1.1. Uzglabāšana iekārtā Šis ir vienkāršākais variants, bet tam ir arī vislielākā pilnīgas datu zaudēšanas iespējamība [60] [74] [111]. Sekošanas kaklasiksnas, kurās dati tiek uzglabāti pašā ierīcē, saglabā iegūtās atrašanās vietas fiksācijas pastāvīgajā atmiņā. Pētījuma beigās kaklasiksna tiek atgūta un atrašanās vietu dati lejupielādēti. Kaut arī šī ir vienkārša stratēģija, tas nozīmē to, ka lai iegūtu datus ir jāatgūst kaklasiksna. Šī iemesla dēļ kaklasiksnas ir aprīkotas ar VHF raidītāju (parasti ar savu, atsevišķu enerģijas avotu), lai būtu iespējams noteikt to atrašanās vietu. Ja kaklasiksna vēl joprojām atrodas uz dzīvnieka, tad dzīvnieks ir atkārtoti jāiemidzina/jānotver, lai reģistratoru varētu no tā noņemt. Atsevišķas kaklasiksnas ir aprīkotas ar "nomešanas" mehānismu, kas fiziski salauž kaklasiksnu vai atbrīvo sprūdu un tā noslīd no dzīvnieka kakla [60] [74] [111].

Galvenais sistēmas trūkums ir datu zuduma iespēja kaklasiksnas bojājuma, pazaudēšanas vai iznīcināšanas gadījumā. Tomēr sava vienkāršuma un energoefektivitātes dēļ tas ir pievilcīgs risinājums noteiktu sugu izsekošanai. Mazāka problēma reģistratora izmantošanas pieejai ir ilga laika posms starp datu reģistrāciju un to iegūšanu no kaklasiksnas. Šo problēmu risināšanai ir pieejamas vairākas bezvadu augšupielādes iespējas.

3.2.3.1.2. Bezvadu augšupielāde Lai atrisinātu dažas no problēmām, kas saistītas ar GPS reģistratoriem, atsevišķas ierīces ir aprīkotas ar radio modemiem, kas ļauj pētniekiem, atrodoties laukā, augšupielādēt datus [25]. Birkas vēljoprojām funkcionē kā reģistratori, bet noteiktos laikos (reālā laika sinhronizācija tiek veikta, izmantojot GPS), birka augšupielādē pēdējo iegūto GPS atrašanās vietu datu apakškopu. Pētnieki var saņemt šos datus un tā iegūt informāciju par dzīvnieku pēdējā laika atrašanās vietām. Šīs birkas ir aprīkotas arī ar VHF vai UHF radiobākām, kas ļauj izsekot un atrast dzīvnieku no liela attāluma, lai lejupielādētu tā datus [110]. Sarežģītākas birkas ir aprīkotas ar divu virzienu modemiem, kas ļauj attālināti piekļūt birkām un tās pārprogrammēt [60]. Pētījuma beigās birka tiek atgūta tāpat kā parastie reģistratori un no tās tiek lejupielādēti visi ievāktie dati. Šādā veidā ar VHF augšupsaiti ir iespējams samazināt laika nobīdi starp datu reģistrāciju un iegūšanu, un tiek samazināta arī iespējamā reģistratora bojājuma vai bojāejas ietekme uz pētījumu. Tomēr šīm ierīcēm ir nepieciešams lielāks enerģijas avots kā parastajiem reģistratoriem, jo tām ir jānodrošina arī radio modema darbība, kā rezultātā kaklasiksnas ir smagākas un apjomīgākas [60].

Birkas ir iespējams aprīkot arī ar GSM moduli, kas ļauj datus augšupielādēt izmantojot mobilo tīklu [114] [60] [110]. Birka iegūst GPS atrašanās vietas un uzkrāj tās buferī, līdz tā nonāk GSM torņa darbības rādiusā, kad tā nosūta datus, izmantojot SMS vai GPRS [114] [60] [110]. GSM modemiem ir augsts enerģijas patēriņš (1W maksimālā pārraides jauda) un tiem ir nepieciešams reģistrēties tīklā, pirms tie var nosūtīt datus, un tas var aizņemt līdz pat 30 sekundēm [115]. Daudzos apvidos, īpaši attālos, kur nepieciešama savvaļas dzīvnieku novērošana, nav mobilā tīkla pārklājuma, kas nepieļauj to izmantošanu. Tā kā GSM saskarne ir divvirzienu, pastāv iespēja pieprasīt datus (piemēram, pašreizējo atrašanās vietu) no kaklasiksnas, kā arī lietotājs automātiski var saņemt dažādus brīdinājumus (piemēram, par dzīvnieka aizklišanu no noteikta apgabala) [110]. GPS-GSM kaklasiksnas ir smagākas kā GPS datu reģistratori, jo tās ir aprīkotas ar GSM modemu un antenu un dēļ palielināta enerģijas patēriņa tām ir nepieciešams lielāks akumulators [110].

Lai nodrošinātu reālā laika piekļuvi datiem un globālu pārklājumu, ir pieejamas GPS birkas, kas var augšupielādēt atrašanās vietu datus tieši uz satelītu. Atkarībā no atrašanās vietas tiek izmantotas tādas satelītu kopas kā Inmarsat [110], bet visbiežāk tiek

izmantota ARGOS sistēma, jo tā nodrošina globālu piekļuvi [60] [93] [69]. Šādā veidā augstas precizitātes atrašanās vietas novērtējumus ir iespējams iegūt faktiski jebkurā pasaules vietā un tos ir iespējams augšupielādēt no faktiski jebkuras pasaules vietas. Viena no GPS ierīces priekšrocībām ir tāda, ka tā nodrošina laika sinhronizāciju, kas ļauj satelīta raidītājam ielēgties tikai tad, kad virs tā atrodas uztverošais satelīts (tā tas ir ARGOS gadījumā, bet Inmarsat ir ģeostacionārs), un šādā veidā tiek samazināts enerģijas patēriņš [93]. Šīs ir visdārgākās (izmaksas sasniedz no U\$3000 līdz U\$5000 [93] [97], neieskaitot datu pārraides izmaksas) un apjomīgākās birkas, bet tās nodrošina lielisku precizitāti un globālu pārklājumu.

3.2.3.2. GPS sekošanas plusi un mīnusi

GPS sekošana ir atstājusi ievērojamu iespaidu uz dzīvās dabas pētījumiem, ļaujot ar lielisku precizitāti iegūt detalizētu atrašanās vietas informāciju jebkurā pasaules vietā. GPS uztvērējs var pēc pieprasījuma iegūt atrašanās vietu datus, kas nav iespējams ar satelītu sekošanu (skat. 3.2.2. sadaļu), dēļ to izretinātā satelītu pārklājuma. Atrašanās vietas, kas iegūtas, izmantojot GPS sekošanu, ir daudz precīzākas, kā satelītu sekošanā iegūtie dati (tipiska GPS precizitāte ir 4m, bet labākie satelītu sekošanas rezultāti ir ar precizitāti līdz 100 m).

Liela GPS sekošanas priekšrocība attiecībā pret VHF sekošanu (skat. 3.2.1. sadaļu) ir minimālais laiks, kas pētniekam ir jāpavada ārpus laboratorijas. Tā kā GPS ierīce pati aprēķina atrašanās vietu, darbaspēka izmaksas, kas saistītas ar GPS sekošanu, ir ievērojami zemākas [90]. Papildus tam tiek ievērojami samazinātas iespējamās pētījumu kļūdas, kas saistītas ar pētāmo dzīvnieku dabīgās vides iztraucēšanu [88]. VHF sekošanai ir ļoti ierobežots pārklājums – tā nav piemērota plašā apvidū klaiņojošiem dzīvniekiem, jo maksimālais rādiuss, kurā ir iespējams noteikt dzīvnieka atrašanās vietu ir 8–10 km [88] (vai 15-30 km no gaisa [84]). Tupretī GPS ir globāla sekošanas sistēma.

Galvenais GPS sekošanas mīnuss, salīdzinot to ar VHF sekošanu, ir GPS uztvērēja enerģijas patēriņš. Šī iemesla dēļ GPS uztvērēja darba cikls ir pakārtots tā, lai lielāko daļu laika tas atrastos zema enerģijas patēriņa miega režīmā [110] [60] [74]. Kā (vienkāršs un optimistisks) piemērs – GPS uztvērējs, kas iegūst atrašanās vietu ik pēc 10 minūtēm un ar vidējo laiku līdz pirmajai fiksācijai (*TTFF*) 20 sekundes, vidēji patērē 3,3mW, bet

tā enerģijas patēriņš brīdī, kad raidītājs ir aktīvs, ir 100mW. Salīdzinājumam VHF radiobāka, kas 30 sekundes ar 40% efektivitāti pārraida ar jaudu 10mW katrā sekundē, patērēs vidēji 0,75mW. Līdz ar to uz vienādu kalpošanas laiku GPS ierīcei ir nepieciešams vairāk kā četras reizes ietilpīgāks akumulators kā VHF ierīcei. Tā kā lielāko daļu ierīces svara sastāda enerģijas avots, tad šī iemesla dēļ GPS ierīces svars ir aptuveni četras reizes lielāks kā VHF ierīcei.

Sarežģītās uzbūves dēļ GPS kaklasiksna ir dārgāka kā VHF radiobākas. Tipisks VHF raidītājs maksā aptuveni U\$100–U\$200 [72], bet GPS kaklasiksna izmaksās no U\$2500–U\$4500, atkarībā no tā kādas opcijas (piemēram, satelīta augšupielāde) tai ir uzstādītas.

3.2.4. Citi risinājumi

Šī apakšnodaļa apskata pārējos risinājumus, kas var tikt izmantoti, lai monitorētu savvaļas dzīvniekus.

Pēdējo gadu laikā ir izstrādātas un ieviestas vairākas uz bezvadu sensoru tīkliem un iegultām iekārtām bāzētas dzīvnieku monitoringa sistēmas [116] [117] [118], no kurām vislīdzīgākā pieeja darbā aprakstītajam ir ZebraNet [119] [26] dzīvnieku izsekošanas kaklasiksnām, ar kuru palīdzību tika sekots zebrām Āfrikas savannā.

Eksistē arī vairāki pētījumi, kuros tiek pētīti un izsekoti tieši lūši, kā piemēram, Vācijā [117] vai Kanādā [120] [121]. Visos gadījumos tiek izmantotas kaklasiksna, kas aprīkotas ar GPS uztvērēju un radio raidītāju.

Atsevišķa uzmanība savvaļas dzīvnieku sekošanas sakarā jāpievērš arī enerģijas ieguvei. Interesantas hipotēzes par enerģijas lietošanu un tās atkal iegūšanu ir aprakstījuši ZebraNet radītāji [25]. Viņu radītās kakla siksnas iegūst enerģiju no saules baterijām. Šāda pieeja, diemžēl, pētot savvaļas dzīvniekus Latvijas apstākļos neder, jo mūsu klimatiskajā joslā saules enerģija nav pietiekoša daudzumā, lai to varētu izmantot kā pastāvīgu avotu enerģijas ieguvei. Bez tam jāņem arī vērā fakts, ka lūsis vai vilks ir mazāks zvērs par zebru, un pieprasa kompaktāku un svarā vieglāku risinājumu. Būtisks aspekts iekārtas ilgstošai darbībai ir enerģijas taupīšana uz lielāko patērētāju – GPS un radio sakaru – rēķina, piemērojot piemērotu patēriņa kombināciju līdzīgi kā tas darīts citos pētījumos [122] [123] [54] [124].

Interesantu pielietojumu bezvadu sensoru tīkliem ir radījuši zinātnieki no Oksfordas un Kembridžas Anglijā – BST tiek izmantoti āpšu monitoringam [125]. Šie paši zinātnieki ir autori publikācijai par āpšu pazemes magneto-induktīvo izsekošanu tajā pašā mežā [126]. Minētais risinājums arī ir ilgstoši izmantojama sistēma, taču jāņem vērā, ka apgabals, kurā tai ir jānodrošina pārklājums, ir mazāks nekā mūsu (lūšu) gadījumā, savukārt, uzturēšanas nosacījumi ir vieglāki (mežam varēja viegli piekļūt, kā arī bija pieejami vairāki cilvēki ar tehniskām un ne tikai zināšanām, kas varēja ar to strādāt vai arī bieži to apmeklēt). Risinājumā tika lietoti slēgti svina skābes akumulatori kā magnētiskā lauka ģenerators enerģijas avoti (magnētiskā lauka ģenerators ir enerģijas ziņā visdārgākais mehānisms minētajā sistēmā) un mainīja šos akumulatorus ik pēc divām nedēļām.

Vēl viena no pieejām, kas izmantota savvaļas dzīvnieku monitoringam ir ātrā prototipēšana [127], izmantojot gatavus un viegli iegādājamus komponentus. Autori izveidoja bezvadu sensoru tīklu EcoNet, lai aprakstītu un monitorētu starpsugu mijiedarbību (konkrēti tika skatīta mijiedarbība starp suņiem un govīm). Rezultātā tika iegūta bagātīga pieredze sakarā ar GPS izmantošanu, taču tā nedeļa vēlamos rezultātus. Šāda pieeja bezvadu sensoru tīklu uzbūvē der īslaicīgiem risinājumiem.

Kā vēl vienu piemēru bezvadu tīklu pielietojumam var minēt sistēmu, kuru autori ir paredzējuši izmantot leopardu monitorēšanai kalnainā un mežainā apvidū [128]. Viņi ir plānojuši aptvert 2400 km² lielu teritoriju, sākumā lietojot 13 sensoru mezglus un vēlāk paplašinoties.

Atsevišķi no citiem bezvadu sensoru pielietojumiem būtu jāizdala tādi risinājumi kā ganāmpulku virtuālās sētas [124] [129] [118], kas izmanto GPS, lai monitorētu dzīvnieku atrašanās vietu un gadījumos, kad tie šķērso nosacīto robežlīniju, raida vājstrāvas triecienu dzīvniekam, tādējādi stimulējot tā atgriešanos virtuālā aploka iekšienē. Dažos gadījumos veicot dzīvnieku novērošanu tiek izmantoti lokāli radio sakari – piemēram, lai neļautu diviem bulliem savstarpēji tuvoties un veidot konfliktsituācijas [116].

Vēl viena no šādām tehnoloģijām ir kursu reģistrējošu sensoru izmantošana, lai varētu divās vai trīs dimensijās rekonstruēt dzīvnieka pārvietošanās trajektoriju [130] [131] [132]. Sensors nosaka dzīvniekam piestiprinātās birkas kursu (azimuta leņķi attiecībā pret ziemeļiem) un cits sensors nosaka attālumu, kuru birka ir veikusi [133] [130]. Šī pieeja tiek saukta par kursa nospraušanu (*dead-reconing*) vai ceļa aprēķināšanu [130]. Kursu

nospraušanas sistēmas nodrošina nesalīdzināmi augstāku īstermiņa atrašanās vietu precizitāti (laika posmā no sekundēm līdz stundām atkarībā no sensoriem, kļūdām un dzīvnieku pārvietošanās [134]), bet cieš no nobīdēm (piemēram, jūras straumju izraisītiesm dreifiem jūras radijumu pētījumos), kuru rezultātā to ilgtermiņa izmantošana ir kļūdaina. Tā kā paātrinājuma signāls, lai noteiktu pārvietošanos, tiek aprēķinots iekļauts divas reizes, jebkura kļūda vai troksnis izplatās ļoti ātri. Kursa nospraušana ir relatīva atrašanās vietas noteikšanas sistēma, jo objekta atrašanās vieta tiek aprēķināta attiecībā pret tā sākuma pozīciju [132]. Lai izvairītos no dažām kļūdām, kas saistītas ar strauju kļūdu akumulāciju, kursa nospraušanu ir iespējams kombinēt ar absolūtām atrašanās vietas noteikšanas tehnikām, piemēram, GPS [135]. Šādā gadījumā periodiski tiek ieslēgts GPS uztvērējs, un iegūtās atrašanās vietas tiek izmantotas kursa nospraušanas moduļa „kalibrēšanai” [135]. Lai uzlabotu atrašanās vietas noteikšanas precizitāti programmatoriski, vēlams izmantot Kalmana filtrus [136], tos integrējot risinājumā kopā ar GPS [137]. Papildus iespējams iegūtos GPS datus kompresēt, lai tos vieglāk varētu gan uzkrāt, gan pārraidīt, tādējādi nodrošinot noturību pret traucējumiem [138].

Pasīvās radio frekvences identifikācijas RFID birkas, sauktas arī par PIT ierīcēm jeb pasīvajiem integrētajiem transponderiem, satur unikālu identifikatora kodu, kuru tās izsūta atbildot uz pieprasījuma signālu [139]. PIT ir ļoti vieglas (sākot no 0,6g) un mazas ierīces, jo tām nav nepieciešams savs enerģijas avots — tās enerģiju iegūst no lasītāja [139]. Salīdzinot ar citām sekošanas tehnoloģijām, to darbības rādiuss ir ļoti neliels (no 20 cm līdz 2 m atkarībā no birkas izmēra un lasītāja tehnoloģijas) un vairāk piemērots klātbūtnes reģistrācijai noteiktā apgabalā nevis precīzai atrašanās vietas noteikšanai [139]. PIT ir lēta (US\$2,20 par birku, iegādājoties tās vairumā) tehnoloģija un tā nodrošina vienu no izmaksu ziņā efektīvākajiem veidiem, ka atzīmēt ar birkām lielu dzīvnieku skaitu [140] [139]. Lasītāji ir relatīvi dārgi (US\$200 – US\$1000 katrs) un to darbināšanai ir nepieciešams daudz enerģijas (starp 10-20W nodrošinot nepārtrauktu nolasīšanu) un tas ierobežo to izvietojuma iespējas [140]. PIT ir standartizētas ar starptautiskajiem ISO standartiem ISO11784/11785, kas nosaka to numurēšanas veidu un darbību, kas ļauj iegūt sadarbības iespējas starp dažādu ražotāju ierīcēm [140] [141]. Tā kā PIT ierīcei nav enerģijas avota, kas var tikt iztukšots, var pieņemt, ka PIT ir ”bezgalīgs” kalpošanas laiks. Papildus tam dzīvnieku atzīmēšanai izmantotās frekvences (134 kHz) neietekmē ūdens un vai dzīvnieka

ķermenis, padarot iespējamu to izmantošanu zem ūdens [140]. Aktīvās RFID birkas satur enerģijas avotu un tām ir lielāks nolasīšanas attālums un tās var noteikt un nodot apkārtējās vides rādītājus, piemēram, temperatūru un spiedienu [142]. Enerģijas avota dēļ tās ir ar ierobežotu kalpošanas laiku, un tās ir apjomīgākas salīdzinot ar pasīvajām ierīcēm, kā arī pastāv drošības risks, ka tās iespējams "uzlaust" vai kā citā viltot to izsūtīto signālu [16]. Aktīvās RFID birkas var dēvēt arī par viedajām VHF/UHF birkām.

Dzīvnieku atrašanās vietu noteikšanai var izmantot arī harmoniku radaru [143]. Jaudīgs radars izgaismo birku, kas atpakaļizkļiedē starojumu ar augstāku harmoniku [143]. Detektors reģistrē atpakaļizkļiedētā starojuma klātbūtni, ko var izmantot, lai noteiktu ierīces atrašanās vietu, un radara šķīvi ir iespējams rotēt, lai skenētu apkārtējo rādīsim un iegūtu birkas atrašanās vietu trīs dimensijās [144]. Uz dzīvniekiem izvietotās ierīces ir iespējams padarīt ļoti vieglas, jo tās sastāv no diodes, kas nelineāras ieslēgšanās veidā ģenerē augstas frekvences nesēja harmonikas, un antenas, kas uztver radio signālu [143]. Harmoniku radars ir ticis izmantots, lai izsekot kukaiņu lidojumu trajektorijām, jo birkas ir pietiekoši mazas, lai tās varētu piestiprināt lielākiem kukaiņiem, piemēram, zemes vabolēm [143], medus bitēm [144], tauriņiem [145] vai citiem kukaiņiem [146]. Tomēr birka ir aprīkota ar antenu, kuras dēļ tiek ietekmēta aerodinamiskā kustība, kas ietekmē šīs pieejas piemērojamību [147]. Lai noteiktu insektu grupas nevis atsevišķus insektus, var tikt izmantotas tradicionālās radaru tehnoloģijas, bez nepieciešamības piestiprināt jebkādas ierīces [148]. Balstoties uz atsevišķiem parametriem, harmoniku radaru un PIT var uzskatīt par līdzīgām tehnoloģijām, jo tās abas darbina notikuma starojums. Tomēr PIT ir aprīkotas ar unikālu kodu un atbild tajā pašā frekvenču joslā.

Kā vēl viena metode, lai noteiktu aptuveno atrašanās vietu, jāmin globālās atrašanās vietas noteikšana jeb GLS [149] [150]. Ierīce, kas izmanto šo sistēmu, nosaka un ieraksta dienasgaismas apjomu gaismas sensorā un satur precīzu reālā laika pulksteni [149]. Lai noteiktu ģeogrāfisko platumu tiek izmantots dienas ilgums (no krēslas līdz rītausmai) un ģeogrāfiskais garums tiek aprēķināts pēc vietējā laika dienas vidus vai pusnakts [151]. Šīm ierīcēm ir iespējams virs gaismas sensora izvietot filtru, kas ierobežo gaismas viļņu garumus tā, lai tiktu izmantots tikai dziļi zilais spektrs, kuru tik daudz neietekmē mākoņu pārklājums. Kaut arī sistēmas precizitāte ir zema (vienā no pētījumiem tika noteikts, ka patiesā atrašanās vieta var atrasties 31 km rādiusā no noteiktās) un dienā iespējamo

atrašanās vietu fiksāciju skaits ir tikai divas, GLS ierīces ir lēts un viegls veids kā noteikt globālu atrašanās vietu dzīvniekiem, kas pārvietojās plašā apvidū [151]. Veicot albatrosu pētījumu, GLS precizitāte tika noteikta 180 km rādiusā [152]. Tā kā GLS ierīce ir datu reģistrators, to ir nepieciešams atgūt pēc pētījuma beigām, lai iegūtu pētāmā objekta atrašanās vietas. Kritisks parametrs ir arī gaismas sensora orientācija, bet to var kompensēt izmantojot slīpus sensorus [151]. Cita metode, kā uzlabot GLS precizitāti ir kompensēt atrašanās vietu, izmantojot jūras virsmas temperatūras jeb SST mērījumus, kurus vienlaicīgi iegūst satelīts [153]. Izmēru ziņā GLS sensori ir nelieli - tie var darboties divus gadus un svert tikai 20 gramus [151].

Daudzām dzīvnieku sugām ir atšķirīgs kažoka raksts un to var izmantot, lai identificētu individuālus dzīvniekus. Automātiska vizuālā atpazīšana ir tikusi veiksmīgi izmantota, lai identificētu Āfrikas pingvīnus pēc to krūškurvju punktu rakstiem [63] [65]. Vizuālās atpazīšanas problēma ir tās ierobežotais atpazīšanas attālums un uzņēmība pret tādiem faktoriem kā netīrs dzīvnieka kažoks, tā orientācija attiecībā pret kameru un apkārtējās vides apgaismojums [65]. Tomēr tā ir neinvazīva metode, kas ļauj novērot lielas dzīvnieku populācijas, jo izsekošanas ierīces nav jāpiestiprina vai jāinplantē dzīvniekiem. Attālinātie fotokameru slazdi var tikt izmantoti dažādās vietās, noteiktu dzīvnieku klātbūtnē – tie tiek iedarbināti un uzņem fotoattēlus, reaģējot uz skaņu vai kustību to apkārtnē (plašāku apskatu skat. [154]). Kautgan attālinātie fotokameru slazdi ir vienkārši un relatīvi lēti, pateicoties zemu izmaksu digitālo fotokameru izplatībai, tiem ir nepieciešams daudz manuāla interpretācijas darba, lai klasificētu uzņemtos fotoattēlus [155], kā arī ar to palīdzību ir ierobežotas iespējas noteikt dzīvnieka aktivitāti un/vai dzīves paradumus [156]. Jāpiebilst gan, ka, lai klasificētu uzņemtos fototattēlus, ir iespējams izmantot arī datorizētas klasifikācijas tehnikas. Tāpat kā pasīvās RFID birkas, vizuālās atpazīšanas sistēmas nevar tikt uzskatītas par patiesām atrašanās vietas noteikšanas sistēmām, bet gan tikai par sistēmām, kas ir izmantojamas noteikšanai tiešā tuvumā, jo tām ir ierobežots darbības rādiuss.

Atsevišķi dzīvnieki (īpaši putni [157], vārdes/krupji [68] un vaļveidīgie [158]) izdod skaļus saucienus, lai sazinātos ar saviem sugas brāļiem. Lai triangulētu šo dzīvnieku atrašanās vietu un atpazītu to sugas ir iespējams izmantot mikrofonu kompleksu [159]. Pietiekami daudz atsevišķu saucienu gadījumā ir iespējams arī identificētu individuālus

dzīvniekus [158]. Šīs pieejas mīnuss ir tas, ka dzīvniekus ir iespējams noteikt tikai, ja tie ir dzirdami, taču atšķirībā no vizuālās atpazīšanas, tiem nav jābūt atklātās vietās un redzamiem.

Eksistē arī citas metodes, kas var tikt izmantotas, lai identificētu indivīdus, piemēram, gredzenošana [160] un ķīmiskā luminiscence [161], bet tās var uzskatīt par palīgmetodēm manuālai identifikācijai, nevis par automātiskas sekošanas tehnoloģijām.

Atsevišķi tiek izdalīti iegulto iekārtu un programmatūras pētījumi un risinājumi, kuri devuši būtisku ieguldījumu vai iedvesmu vai kas izmanto kādu no izvēlētajiem komponentiem idejiski līdzīgos pielietojumos.

3.2.4.1. Iegultās iekārtas

Veicot saistīto darbu izpēti, tika konstatēts, ka ir arī citi projekti, kas lieto TRM-433-LT raiduztvērēju. Piemēram, diezgan interesantu pielietojumu ir atradis kāds students, kas izmanto šo raiduztvērēju savā sistēmā, lai sazinātos starp tās mezgliem, kamēr pati sistēma ir domāta, lai stieptu cilvēka ķermeņa daļas garākas [162].

Vēl viens no studentu projektiem tendēts uz cilvēkiem gados vai ar ierobežotām ķermeņa motorikas kustībām, veidojot viņiem speciālu iekārtu, ar kuru tie var ieslēgt vai izslēgt citas iekārtas [163]. Šajā sistēmā TRM-433-LT tiek izmantots, lai centrālais mezgls jeb *Easy-Access Power Dome* sazinātos ar citām iekārtām, kuras tam ir jāvada.

Pirms izvēlēties TRM-433-LT raiduztvērēju, tika apsvērta iespēja lietot arī Analog Devices ražoto ADF7021 [164] raiduztvērēju, kas pielāgota 433 MHz frekvencei, taču nepietiekamās dokumentācijas dēļ, kā arī sarežģītākās signāla izvades ķēdes dēļ, šī ideja tika noraidīta.

Izstrādājot iekārtas 2. prototipu un precīzāk tā VHF raidītāja daļu, tika pētīta citu pieredze lietojot Analog Devices ADF7012 [165] raiduztvērēju, jo arī šai mikroshēmai dokumentācijā nebija atspoguļoti visas konfigurēšanas iespējas un nianšes. Pēc ilgstošas meklēšanas tika atrasti 2 projekti, kuros bija izdevies veiksmīgi iedarbināt un izmantot konkrēto raiduztvērēju. Pirmais projekts ir Džastina Kenija (*Justin Kenny*) bakalaura darbs [166], kurā viņš izstrādāja viss-vienā automātisko pakotņu apziņošanas sistēmu (*Automatic Packet Reporting System* jeb APRS), kurā par pamatu tika lietots ADF7012 raiduztvērējs, kas pielāgots 146 MHz frekvencei.

Otrs atrastais projekts bija Ādama Greiga (*Adam Greig*) izstrādātais *Wombat* kosmosa gaisa balonu vadības dators [167], kurš arī veiksmīgi lieto ADF7012 raidzvērtvērēju.

Tika izskatīti arī citi VHF radio pārraides varianti, kas ietvēra sevī Radiometrix [168] tālas darbības zema ātruma VHF komunikāciju. Piemēram, izmantojot Radiometrix BiM1H mikroshēmu ir radīts ledus monitoringa projekts [169], kā arī, izmantojot to pašu mikroshēmu, ir arī leopardu izsekošanas projekts [128].

Telemetrijas iekārtas [170] var būt gan lielas savos izmēros, gan ļoti dārgas, kā arī ierobežotas savā funkcionalitātē.

3.2.4.2. Programmatūra

Tā kā būtisku daļu no *LynxNet* programmatūras, kas atbildīga par saziņu ar bāzes staciju, ir paredzēts būvēt kā pret aizturēm un pārtrauktumiem noturīgu komunikāciju, tad tika veikts būtisks izpētes darbs, galvenokārt, fokusējoties uz DTN jēdziena aizsācējiem [171] [172]. *LynxNet* gadījumā pirmais līmenis, kur sastopamas aiztures un neprognozējamība komunikācijās, ir starp dzīvnieku un bāzes stacijas tīklu. Tālāk jau aiztures ir prognozējamākas, jo laicīgi var paredzēt, kad datu mūlis [173] dosies ievākt datus no bāzes stacijām.

Dažas noderīgas idejas sakarā ar tiešo sakaru tīkliem saistībā ar pielietojumu bioloģijas aplikācijās ir aprakstījuši savā darbā *Haas* un *Small* [174]. Proti, tiek aprakstīti informācijas replikācijas, uzkrāšanas un izplatības modeļi tiešo sakaru tīklos, kuros savstarpējā komunikācija ir reta, panākot, ka pakotņu piegāde gala adresātam tomēr ir ar zemu aizturi, paļaujoties uz to, ka BST mezglos ir palielinātas ietilpības atmiņa, kurā šos pārsūtāmos datus uzkrāt.

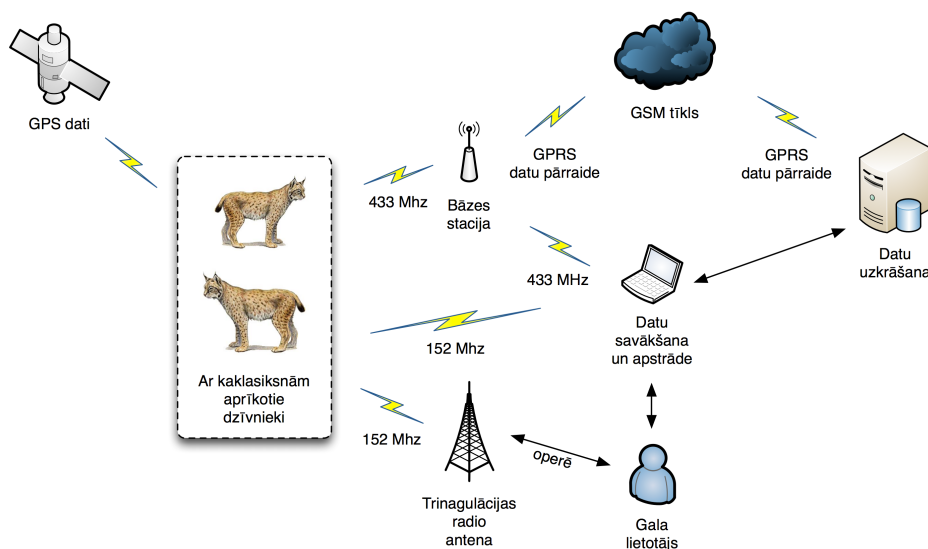
Vēl viens no veidiem kā nogādāt datus tīklos bez pastāvīgas komunikācijas kanāla ir lietot paziņojumu "nosūtīšanu ar prāmi" (*message ferrying*) [175]. Šī ideja ir nedaudz līdzīga mobilo sensoru tīkla mezglu izmantošanai jeb "datu mūļiem" [176], taču atšķirīga ar to, ka "datu prāmji" var ierasties retāk un neprognozējamāk salīdzinot ar "datu mūļiem".

3.3. Risinājums

Šajā nodaļā apskatīts piedāvātais risinājums, ieskaitot sistēmas arhitektūru, izveidotās iegultās iekārtas un programmatūru, savvaļas dzīvnieku monitoringam izmantojot bezvadu sensoru tīklus.

3.3.1. Sistēmas arhitektūra

Piedāvātā sistēmas arhitektūra (skatīt 3.3. attēlu) ir bāzēta uz bezvadu sensoru tīkla un tā mezgliem, ko raksturo mobila datu ievākšana un reta piekļuve tīklam. Arhitektūra piedāvā uz dzīvnieku orientētu paradigmu, kurā datu ievākšana notiek tīmekļa malā [23].



Att. 3.3.: Sistēmas arhitektūra

3.3.1.1. Darbības princips

Sistēmas darbības pamatprincips ir datu ievākšana par dzīvnieka paradumiem tā dabiskajā vidē, izmantojot dzīvnieka kaklasiksniņā iebūvētos sensorus, dati no kuriem tiek ievākti iepriekš noteiktos intervālos. Tā kā biologus interesē ne tikai dzīvnieka atrašanās vieta, kam pietiktu ar GPS sekošanas risinājumu, bet arī tas, kā tas pavada dienu, ir paredzēts, ka iepriekš noteiktos laikos iekārta veiks datu ievākšanu par dzīvnieka aktivitāti ilgākā laika periodā (piemēram, 24 stundas) ar kaklasiksniņā iebūvētā 3D akseleromentra, 3D

žiroskopa un 3D magnetometra palīdzību, par pamatu izmantojot akselerometru un tā iespēju nosūtīt pārtraukumu mikrokontrolierim pie noteikta paātrinājuma jebkurā no trīs asīm, tādējādi ļaujot mikrokontrolierim gulēt un taupīt enerģiju, kamēr dzīvnieks atrodas miera stāvoklī, un pamodinot mikrokontrolieri un veicot datu ierakstīšanu, gadījumos, kad dzīvnieks pārvietojas.

Pamata uzstādījumi datu ievākšanai ir sekojoši:

- 1 reizi stundā tiek ievākti dati no GPS, āra temperatūras, relatīvā mitruma un apkārtesošās gaismas sensoriem;
- reizi 5 minūtēs 5 sekundes tiek vākti dati ar 10Hz frekvenci no 3D akselerometra, 3D žiroskopa un 3D magnetometra.

Gadījumos, kad iekārta veiks datu ievākšanu ilgākā laika periodā, papildus pamata uzstādījumiem, mikrokontrolieris klausās akselerometra radīto pārtraukumu, pēc kā tiek 30 sekundes vākti dati ar 20Hz frekvenci no 3D žiroskopa un 3D akselerometra un tad 30 sekundes ieturēta pauze.

Visi iepriekšminētie datu apjomi un to ievākšanas ilgumi ir paredzēti kā mainīgie, kurus iespējams konfigurēt. Samazinot tos, iespējams ietaupīt enerģiju uz datu apjoma rēķina, jo tiek mazāk darbināti sensori datu ievākšanai..

3.3.1.2. Datu apmaiņas pakotnes

Dzīvniekam uzstādītās kaklasiksnas galvenais mikrokontrolieris no iegūtajiem datiem veido un saglabā SD kartē gatavas datu apmaiņas pakotnes, kuras pie pirmās izdevības pēc LIFO principa nosūta uz bāzes staciju vai gadījumā, ja sistēmā piedalās vairāki dzīvnieki, kas aprīkoti ar kaklasiksnām, nodot datus satiktajam dzīvniekam.

Ņemot vērā, ka tieša rakstīšana SD kartē ir ar ierobežojumiem – vienas ierakstāmās šūnas izmērs [177] (atkarībā no izvēlēta lieluma SD kartes), kā arī tas prasa salīdzinoši lielu enerģiju, lai veiktu ierakstu kartē. Tāpēc enerģijas taupības nolūkos tika nolemts papildināt iekārtu ar EEPROM patstāvīgās atmiņas mikroshēmu, kurā kā buferī iespējams uzkrāt savāktās datu pakotnes, lai sasniedzot noteiktu līmeni, ierakstītu tās SD kartē.

Katra sensora rādījums ir noteikta lieluma, atkarībā no kā izveidojas katras konkrētas datu pakotnes izmērs. Tā kā aktivitātes dati tiek ielasītas sērijās, tad to datu apmaiņas

pakotnes tiek veidotas tā, lai pirmā pakotne aprakstītu sēriju, savukārt, katra regulārā pakotne varētu tikt sasaistīta ar konkrēto sēriju un saturētu viena mērījumu parauga datus.

Tiek izšķirtas divu veidu datu apmaiņas pakotnes:

- GPS lokācijas un apkārtējās vides datu pakotne (struktūru skatīt 3.2. tabulā), kas satur informāciju par ģeogrāfisko platumu un garumu, GPS sakaru kvalitātes informāciju, apkārtējo temperatūru, relatīvo mitrumu un apkārtesošās gaismas daudzumu;
- aktivitātes datu pakotņu sērija (1. pakotnes struktūru skatīt 3.3. tabulā, savukārt, regulārās pakotnes struktūru skatīt 3.4. tabulā), kas satur datus no 3D akcelerometra, 3D žiroskopa un 3D magnetometra, kas var tikt izmantoti, lai aprēķinātu dzīvnieka kustības vektoru.

Lauks	Izmērs
Laika zīmogs	4 baiti
Iekārtas ID	1 baits
Ģeogrāfiskais platums	4 baiti
Ģeogrāfiskais garums	4 baiti
GPS informācija	1 baits
Temperatūra	2 baiti
Relatīvais mitrums	2 baiti
Gaisma	2 baiti
Kopējais izmērs:	20 baiti

Tabula 3.2.: GPS lokācijas datu pakotnes saturs un izmērs

Lauks	Izmērs
Laika zīmogs	4 baiti
Iekārtas ID	1 baits
Sērijas ID	3 baiti
Sērijas izmērs	2 baiti
Kopējais izmērs:	10 baiti

Tabula 3.3.: Aktivitātes datu pakotņu sērijas 1. pakotnes saturs un izmērs

Lauks	Izmērs
Sērijas ID	3 baiti
Iekārtas ID	1 baits
Pakotnes ID	2 baiti
Akselerometra X ass	2 baiti
Akselerometra Y ass	2 baiti
Akselerometra Z ass	2 baiti
Žiroskopa X ass	2 baiti
Žiroskopa Y ass	2 baiti
Žiroskopa Z ass	2 baiti
Magnetometra X ass	2 baiti
Magnetometra Y ass	2 baiti
Magnetometra Z ass	2 baiti
Kopējais izmērs:	24 baiti

Tabula 3.4.: Aktivitātes datu pakotņu sērijas regulārās pakotnes saturs un izmērs

3.3.2. Aparatūra

Šajā sadaļā apkopota informācija par to, kādas iekārtas ir tikušas izstrādātas, lai nodrošinātu *LynxNet* sistēmas darbību. Sadaļa satur arī informāciju par iekārtu tehniskajiem parametriem.

3.3.2.1. Gala iekārtas 1. prototips

Sākotnējā iegultā gala iekārta (skatīt 3.4. attēlu) tika radīta, izmantojot Moteiv Tmote Mini [46] bezvadu sensoru mezglu ar Texas Instruments MSP430F1611 [47] mikrokontrolieri un iebūvētu Texas Instruments CC2420 [178] 2,4 GHz raiduztvērēju kā pamatu. Papildus mezglam tika pievienots LINX TRM-433-LT [179] 433 MHz raiduztvērējs un antena ar gredzenveida virziendarbības diagrammu. Kā GPS uztvērējs tika lietota modificēta Qstarz BT-Q1000 [180] GPS iekārta, kas balstīta uz MTK mikroshēmu kopuma. Savukārt, temperatūras un relatīvā mitruma mērīšanai tika lietots Sensiron SHT15 sensors [181], bet apkāresošās gaismas mērīšanai tika lietots Vishay TEMT6000 [182] sensors. Dzīvnieka aktivitāte tika mērīta izmantojot Sparkfun 5 Degrees of Freedom IDG500/ADXL335 [183] inerciālās kustības iekārtu, kas sastāv no InvenSense IDG-500 [184] 2 asu žiroskopa un Analog Devices ADXL335 [185] 3 asu akselerometra. Kā barošanas avots tiek izmantots Qstarz GPS uztvērējā iebūvētais 1300 mAh 3.7V uzlādējamais

litija-polimēru akumulators. Sākotnējiem testiem ar šādu akumulatora ietilpību bija pietiekoši, taču veicot enerģijas patēriņa aprēķinus, tika ieplānots to nomainīt ar ietilpīgāku, lai paildzinātu iekārtas darbības laiku.



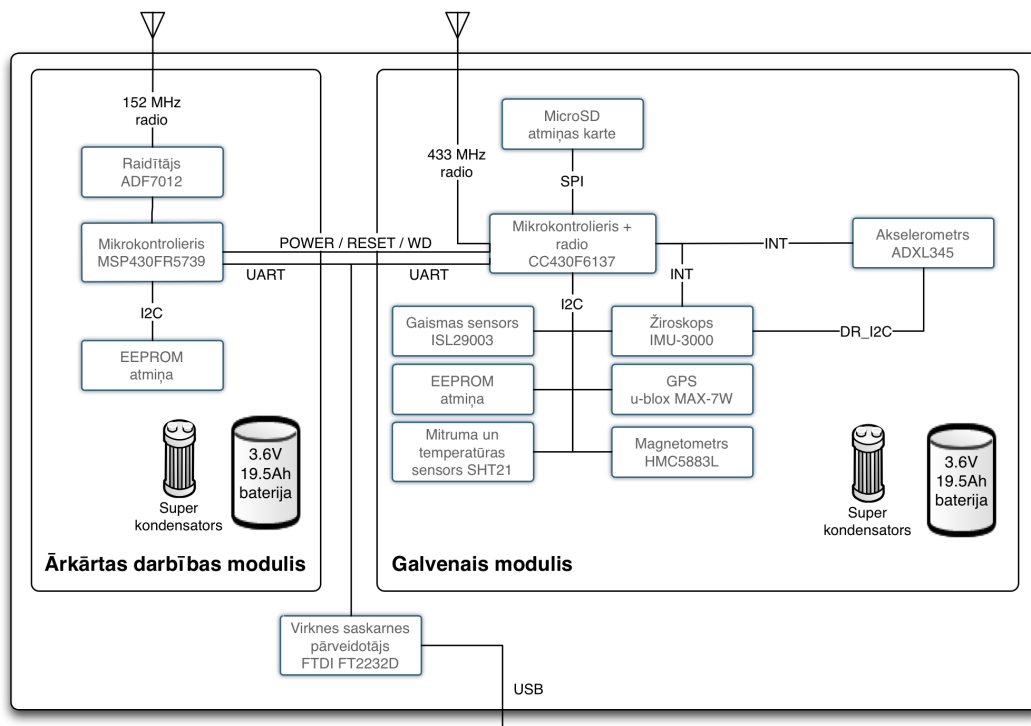
Att. 3.4.: *LynxNet* gala iekārtas 1. prototips

3.3.2.2. Gala iekārtas 2. prototips

Dzīvniekam uzstādāmās iekārtas 2. prototips funkcionāli parādīts 3.5. attēlā, savukārt, 2. prototipa spiestā plate redzama 3.6. attēlā. Atsevišķi ir izstrādāts ārkārtas darbības moduļa prototips, kurš redzams 3.7. attēlā. Iekārtas 2. prototipa spiestās plates attēlā tā parādīta pilnībā ar visiem papildus moduļiem:

- abām galvenajām platēm, uz kurām tiek montētas galvenā moduļa un ārkārtas moduļa mikroshēmas un mezglis;
- atsevišķo plati gaismas sensoram;
- atsevišķo plati mitruma un temperatūras sensoram;
- 8 segmentu LCD displeju iekārtas darbības informācijas vizuālai izvadei;

- diviem uzlādes moduļiem, kurus lieto komplektā ar litija jonu akumulatoriem laboratorijas apstākļos.



Att. 3.5.: *LynxNet* gala iekārtas 2. prototipa funkcionālā shēma

Kā redzams 3.5. attēlā, tas sastāv no diviem moduļiem - galvenā un ārkārtas darbības. Galvenais modulis ir balstīts uz Texas Instruments CC430F6137 mikrokontroliera ar iebūvētu 433 MHz raiduztvērēju [186]. Savukārt, ārkārtas darbības modulis ir balstīts uz Texas Instruments MSP430FR5737 mikrokontroliera [187] un Analog Devices ADF7012 raidītāja [165], kurš pielāgots darbam 152 MHz frekvencē.

Kā starpposms pirms gala iekārtas 2. prototipa izveides tika uzprojektēts pārejas jeb 1.5. prototipa variants. Turpinot pieejamo un iekārtai piemēroto elektronikas komponentu izpēti, tika secināts, ka iespējams izveidot pilnībā digitālu iekārtu, tāpēc pārejas prototips netika realizēts dzīvē. Pamatkomponentes no tā tika izmantotas projektējot gala iekārtas 2. prototipu. Pārejas prototipa iegultā iekārta sastāvēja no sekojošiem elementiem:

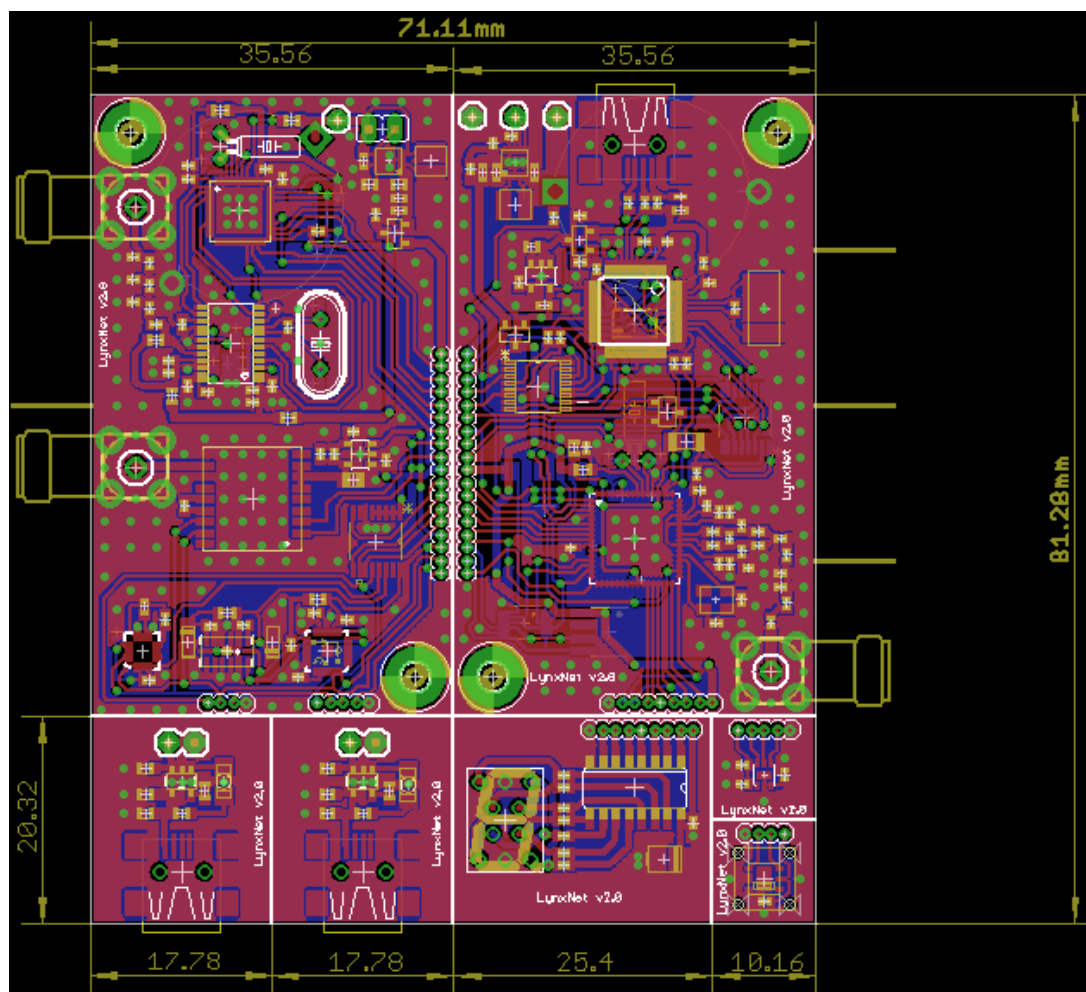
- Texas Instruments CC430F6137 [186] mikrokontrolieris ar iebūvētu RTC pulksteni;

- Fastrax IT300 [188] GPS uztvērējs (šobrīd vairs netiek ražots);
- Analog Devices ADXL335 [185] 3 asu akselerometrs;
- InvenSense IDG-500 [184] 2 asu žiroskops (šobrīd vairs netiek ražots);
- Vishay Semiconductors TEMA6000 [182] gaismas sensors;
- Sensirion SHT21 [189] relatīvā mitruma un temperatūras sensors;
- μ SD karte datu uzkrāšanai;
- FTDI Chip FT232RL [190] divu kanālu virnes saskarnes pārveidotājs uz USB;
- μ USB kā USB pieslēgvietā;
- Enix Energies [191] litija jonu akumulators ar 3,75 V spriegumu un 6.8 Ah ietilpību kā enerģijas avots.

Projektēšanas darba rezultātā tika radīts 2. prototipa galvenais modulis, kas ir pilnībā digitāla iekārta. Tika izvirzīta hipotēze, ka tas ļaus samazināt enerģijas patēriņu, jo pilnībā digitālās komponentes ir gan iespējams ātrāk ieslēgt un izslēgt, gan tās patērē mazāk enerģijas. Rezultātā 2. prototipa galvenais modulis sastāv no sekojošām komponentēm:

- Texas Instruments CC430F6137 [186] mikrokontrolieris ar iebūvētu RTC pulksteni;
- u-blox MAX-7W [192] GPS/GNSS uztvērējs;
- Analog Devices ADXL345 [193] 3 asu akselerometrs;
- InvenSense IMU-3000 [194] 3 asu žiroskops;
- Honeywell HMC5883L [195] 3 asu magnetometrs;
- Sensirion SHT21 [189] relatīvā mitruma un temperatūras sensors;
- Intersil ISL29003 [196] gaismas sensors;
- EEPROM patstāvīgā atmiņa;
- 7 segmentu displejs diagnostikas informācijas izvadei;
- iebūvēta μ SD karte datu uzkrāšanai;
- FTDI Chip FT232RL [190] divu kanālu virnes saskarnes pārveidotājs uz USB;
- μ USB kā USB pieslēgvietā;

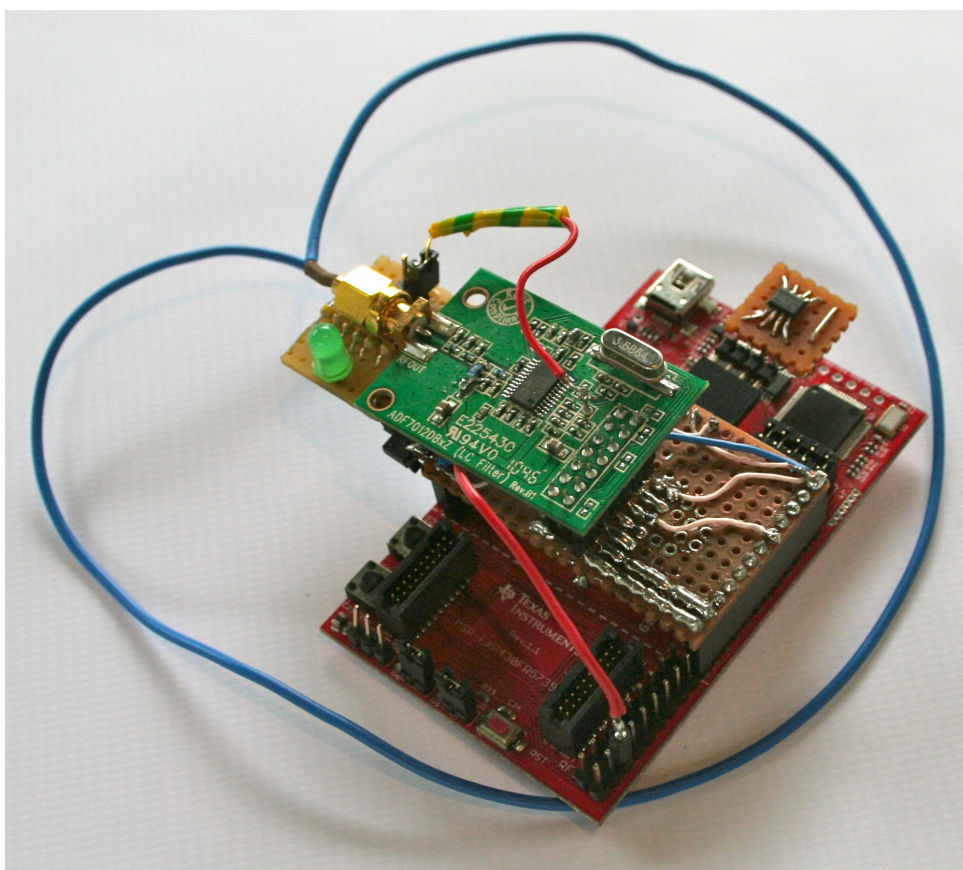
- izstrādes un testa iekārtai kā enerģijas avots tiek lietots Enix Energies [191] litija jonu akumulators ar 3,75 V spriegumu un 6.8 Ah ietilpību, savukārt, reālajai iekārtai tiek lietota XENO XL-205F [197] D izmēra litija jonu baterija ar 3,6 V spriegumu un 19,0 Ah ietilpību un papildus baterijas ražības paaugstināšanai, tiek lietots Panasonic EEC-RG0V105H [198] 1 F 3,6 V superkondensators.



Att. 3.6.: *LynxNet* gala iekārtas 2. prototipa spiestās plates shēma

Papildus galvenajam moduļim iekārtā realizēts arī ārkārtas modulis, kas galvenokārt darbojas kā VHF raidītājs 152 MHz frekvencē. Tā kā starp moduļiem ir realizēta datu apmaiņas saskarne, tad ārkārtas modulis kalpo arī kā galvenā moduļa sargsuns (*watchdog*). Sargsuna funkcijās ietilpst veikt galvenā moduļa ieslēgšanu un izslēgšanu, gan atiestatīt to problēmu gadījumā. Ārkārtas modulis sastāv no sekojošām komponentēm:

- Texas Instruments MSP430FR5737 [187] mikrokontrolieris ar iebūvētu RTC pulksteni;
- Analog Devices ADF7012 [165] raidītājs, kas pielāgots 152 MHz frekvencei;
- EEPROM patstāvīgā atmiņa;
- μ USB kā USB pieslēgvietā;
- izstrādes un testa iekārtai kā enerģijas avots tiek lietots Enix Energies [191] litija jonu akumulators ar 3,75 V spriegumu un 6.8 Ah ietilpību, savukārt, reālajai iekārtai tiek lietota XENO XL-205F [197] D izmēra litija jonu baterija ar 3,6 V spriegumu un 19,0 Ah ietilpību un papildus baterijas ražības paaugstināšanai, tiek lietots Panasonic EEC-RG0V105H [198] 1 F 3,6 V superkondensators.



Att. 3.7.: *LynxNet* gala iekārtas ārkārtas darbības moduļa prototips

3.3.2.3. Bāzes stacija

Bāzes stacija sastāv no 4 galvenajām daļām – mikrodatora, komunikāciju moduļa, mobilā platjoslas modema un mikrodatora enerģijas patēriņa kontroliera.

Bāzes stacijas pamatkomponente ir datus apkopojošais Raspberry Pi [39] mikrodators (skatīt 3.9. attēlu), kas darbojas ar tam piemērotu Debian Linux distributīvu Raspbian [199] kā operētājsistēmu. Mikrodatoram, izmantojot tā GPIO ligzdā esošo virknes portu, pieslēgts komunikācijas modulis, savukārt, USB portam – 3G/LTE mobilais platjoslas modems datu pārraidei ar ārpusauli.

Ar komunikāciju moduļa palīdzību tiek ievākti dati no dzīvnieka kaklasiksnu iekārtām. Tas ir veidots bāzējoties uz EdiMote [200] iekārtai projektētu moduli (skatīt 3.8. attēlu). Tāpat kā kaklasiksnu galvenais modulis, arī šis modulis satur Texas Instruments CC430F6137 [186] mikrokontrolieri ar tajā jau iebūvētu radio raidītāju, kas nokonfigurēts un pielāgots darbam 433 MHz joslā.

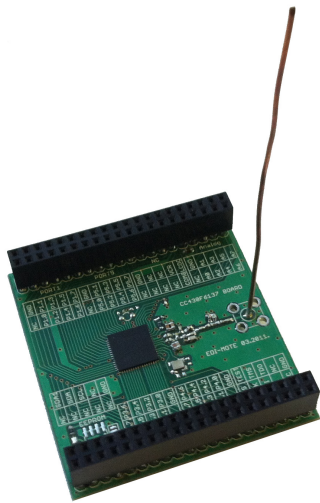
Tā kā Raspberry Pi mikrodators nav tik energotaupīgs kā mikrokontrolieri un tam nav vienkārši pieejams un pielāgojams zemas enerģijas patēriņa režīms, pēc kura iekārtu var viegli atiestatīt normālā režīmā, tiek lietots mikrodatora enerģijas patēriņa kontrolieris. Tas ir balstīts uz Arduino Pro, kas apvienots ar RTC pulksteni, un ir līdzīgs savā uzbūvē iekārtai, kas aprakstīta 5.4.2.2. nodaļā. Arī šajā gadījumā mikrodators un tā enerģijas patēriņa kontrolieris savstarpēji ir savienoti ar vienkāršotu, uz GPIO bāzētu, saskarni.

Kā enerģijas avotu bāzes stacija izmanto hermētisku svina-skābes 12 V akumulatoru ar 17 Ah ietilpību, kuru iespējams aizvietot ar lielākas ietilpības auto akumulatoru.

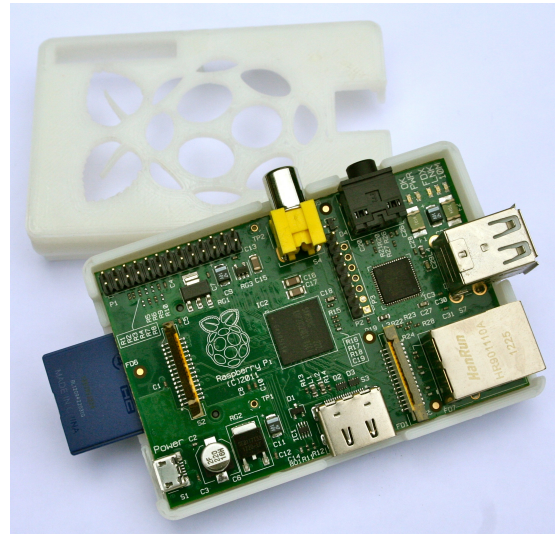
3.3.3. Programmatūra

Iekārtu programmatūra ir veidota, izmantojot MansOS [201]. Lai pierādītu, ka SEAL [202] ir piemērots arī izmantošanai sarežģītās (*mission critical*) situācijās, testa nolūkos ārkārtas darbības moduļa programmatūra tika izveidota tikai SEAL vidē un veiksmīgi strādāja.

Veidojot *LynxNet* iekārtām paredzēto programmatūru, tika ieviesti sekojoši uzlabojumi MansOS operētājsistēmā – nodrošināta piekļuve zibatmiņai, uzprogrammēti dziņi relatīvā mitruma, temperatūras un gaismas sensoriem, izveidots GPS lasījumu analiza-



Att. 3.8.: EdiMote modulis, kas tiek izmantots kā bāzes stacijas komunikāciju modulis



Att. 3.9.: Raspberry Pi mikrodators, kas ir bāzes stacijas pamatkomponente

tors, nodrošināts DCO recalibrācijas atbalsts, uzprogrammēts TRM-433-LT raiduztvērēja dzinis, ieviests CC430F613x un MSP430FR57xx mikrokontrolieru atbalsts, kā arī izstrādāta jauna MAC līmeņa komunikācijas protokola arhitektūra.

3.3.3.1. Radio fiziskā līmeņa datu pārraide

Viens no vislaikietilpīgākajiem darbiem projektā bija TRM-433-LT raiduztvērēja mikroshēmas dziņa un fiziskā līmeņa komunikācijas protokola izstrāde. Konkrētais raiduztvērējs ir ar augstu saņemšanas jutību un atbalsta pārraides ātrumus līdz pat 10000 bitiēm, taču piedāvā tikai pašu vienkāršāko programmēšanas saskarni – bitu līmeņa datu pārraidi, kā arī tam nav pieejamas nekādas programmatūras bibliotēkas vai parauga kodu. Mikroshēma izmanto OOK modulāciju, kas ir pilnīgi pietiekoša *LynxNet* projektam, jo tiek pieņemts, ka attālās vietās, piemēram, Ķemeru tīrelis, kur *LynxNet* sistēma tiks uzstādīta, traucējumi un augsti fona trokšņu līmeņi ir ļoti maziespējami.

Arī 2. prototipa iekārtā izmantotais raiduztvērējs atbalsta OOK modulāciju, tikai nodrošina augstāku datu pārraides ātrumu, kas kopumā atviegloja sistēmas izstrādi. Visi dati, ko paredzēts pārraidīt, ir sadalīti bitos un katrs bits tiek pārraidīts pa radio fiksētā, iepriekš noteiktā laika vienībā.

Jebkura informācijas bitu pārraide (skatīt 3.10. attēlu) *LynxNet* par radio sākas ar

prologu un beidzas ar epilogu. Prologs sastāv no preambulas – vairākiem 1 bitiem – un kadra (*frame*) atdalīšanas sekvenci – speciāli predefinētu bitu sekvenci 010101. Epilogs sastāv no diviem 1 bitiem. Tika ieviests datu pakotņu kodēšanas un atkodēšanas algoritms, kas balstīts uz Mančestras kodējumu [203], kurš gan samazina maksimālo datu pārraides ātrumu uz pusi, taču pieļauj atkodēt pakotnes ar mazāku kļūdu skaitu.

Mančestras kodējums tiek pielietots nosūtāmajai informācijai; 0 bits tiek kodēts ar šablonu (*sample*) sekvenci, kas ir divreiz garāka nekā šablonu sekvence katram bitam kadru atdalītājā un satur noteiktu 0 šablonu skaitu, kam seko tāds pats skaits 1 šablonu. Savukārt, 1 bits tiek kodēts līdzīgi, tikai šajā gadījumā vispirms seko noteikts skaits 1 šablonu un tad tāds pats skaits 0 šablonu. Papildus pārraidāmajiem datiem var tikt izmantots Hamminga kodējums [204], kas nodrošina vēl augstāku pārraides drošību pret kļūdām, taču padara nosūtāmo datu apjomu divreiz lielāku. Gadījumā, ja tiek pielietots Hamminga kodējums, tad tiek izmantots (7,4) kods ar paritātes bitu.

3.3.3.2. Radio fiziskā līmeņa pārraides laiks

Maksimālais datu pārraides ātrums, ko piedāvā TRM-433-LT raiduztvērējs ir 10000 biti sekundē, savukārt, CC430F6137 iebūvētais raiduztvērējs var nodrošināt līdz 256000 (*250kbaud*) bitiem sekundē ātrumu. Projekta ietvaros tika nolemts neizmantojot ātrumu lielāku par 39321 bitiem sekundē (*38.4kbaud*).

Katrā datu pārraidē papildus nosūtāmie biti ir redzams (3.1.), kur 10 bitu garš ir prologs, 6 bitu garš ir kadru atdalītājs, savukārt, 2 bitu garš ir epilogs, kas kopā dod 18 bitus.

$$Prologue + FrameDelimiter + Epilogue = OverheadBits \quad (3.1.)$$

Izmantojot tikai Mančestras kodējumu, pārraidāmo N bitu pakotnes lielums ir aprakstīts (3.2.).

$$N * 2 + OverheadBits = PacketSize \quad (3.2.)$$

Laiks milisekundēs, kas nepieciešams lai pārraidītu N bitu pakotni, ir aprakstīts (3.3.).

$$(N * 2 + OverheadBits) * (1000 / RadioSpeed) = TransmitTime \quad (3.3.)$$

Piemēram, lai pārraidītu 160 bitu jeb 20 baitus lielu datu pakotni, TRM-433-LT raidzuvēreja gadījumā vajadzēs kā minimums 33,8 milisekundes, savukārt, CC430F6137 gadījumā pietiku kā minimums ar 8,59 milisekundēm. Ja tiek izmantoti Hamminga kodi, tad patērējamais laiks dubultojas. Jāņem vērā arī laiks, kas nepieciešams saņemto datu apstrādei. Tiek pieņemts, ka TRM-433-LT uztvērēja gadījumā kopējais laiks, kas nepieciešams vienas pakotnes nosūtīšanai un apstrādei, būtu ap 50 milisekundēm. Savukārt, CC430F6137 gadījumā šis laiks būtu ap 25 milisekundēm. Pie šādiem pieņēmumiem, 1. prototipa datu pārraides ātrums ir ap 400 baitiem sekundē, savukārt, 2. prototipa datu pārraides ātrums ir ap 800 baitiem sekundē.

3.3.3.3. Datu pārraides MAC protokols

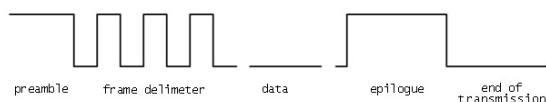
Pa virsu fiziskā līmeņa komunikācijām tika izstrādāts MAC protokols. Tas balstīts uz CSMA ar statusa pārbaudēm un opcionali ieslēdzamiem apstiprinājumiem. Šī metode ir pierādījusi sevi kā dzīvotspējīgu reti apdzīvotos BST, kur kolīziju iespējamība ir zema. MAC protokola izpratnē ir divu tipu lomas – dzīvnieka iekārtas ("lūši") un stacionārās bāzes stacijas.

Protokols uz dzīvnieka gala iekārtām strādā sekojoši:

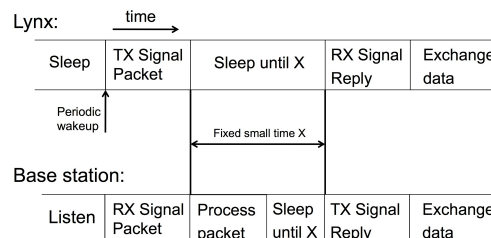
- periodiski tiek ieslēgts raidzuvērejs (sākotnēji reizi 5 minūtēs, taču šo uzstādījumu iespējams konfigurēt);
- ja kanāls ir tīrs, gala iekārta uzsāk sarokšanās protokolu (skatīt 3.11. attēlu), nosūtot signāla datu pakotni, kas satur lokālo identifikatoru (unikāls sistēmas ietvaros);
- ja bāzes stacija ir uztveršanas zonā un saņem datu pakotni, tā atbild ar atbildes signāla datu pakotni, kas satur konkrētā gala iekārtas identifikatoru.

Atbildes signāla datu pakotne netiek pieņemta nekavējoties pēc signāla datu pakotnes nosūtīšanas, lai bāzes stacijai būtu laiks apstrādāt pakotni un sagatavot atbildes signāla datu pakotni. Tas ļauj uz brīdi "aizmidzināt" dzīvnieka iekārtu, tādējādi ļaujot ietaupīt

enerģiju. Ja atbildes signāla pakotne ir veiksmīgi saņemta, sarokošanās stadija tiek uzskatīta par veiktu un var tikt uzsākta datu apmaiņa. Pretējā gadījumā dzīvnieka iekārta pārtrauc pārraidi līdz nākošajam ciklam.



Att. 3.10.: *LynxNet* datu pakotnes fiziskais formāts



Att. 3.11.: *LynxNet* MAC protokola sarokošanās shēma

Tā kā bāzes stacijas ir mazāk energoresursu ierobežotas, tad MAC protokols uz tām strādā savādāk, t.i., nepārtraukti klausās. Atbilde uz sarokošanās protokola paziņojumiem ir aprakstīta iepriekš.

Datu apmaiņa sākas pēc sarokošanās etapa. Klasiksnas iekārta pārraida līdz 10 datu pakotnēm. Pirmās pakotnes pārraide sākas nekavējoties pēc sarokošanās protokola pabeigšanas. Katra nākošā pakotne tiek pārraidīta pēc noteikta laika daudzuma. Pēdējās pakotne satur speciālu atzīmi, lai signalizētu sesijas beigas. Vienas sesijas ietvaros pārraidāmo pakotņu skaitu iespējams konfigurēt.

3.3.3.4. Datu uzglabāšana

Visi mobilo iekārtu savāktie dati tiek saglabāti lokāli uz iekārtām. Sākotnējam prototipam tika izmantots virknes režīma TS M25P80 [205] zibamīna ar kopējo ietilpību 1024 kilobaiti. Galējam prototipam tiek lietota kombinēta datu uzglabāšanas metode – EEPROM patstāvīgā atmiņa un iebūvēta μ SD atmiņas karte.

Datu uzglabāšana ir organizēta sekojoši – visa zibatmiņas piekļuves funkcionalitāte ir abstrahēta no MansOS piedāvātās zibatmiņas plūsmas saskarnes. Izveidotā saskarne atļauj datu lasīšanu no jebkuras vietas un ierakstu plūsmas beigās. TS M25P80 gadījumā plūsma ir organizēta kā noteikta skaita 256 baitu lieli bloki, kur 254 baiti ir atvēlēti datiem, savukārt, 2 baiti – kontrolsummai.

Zibatmiņas plūsmas metadati, piemēram, pēdējā bloka pozīcija, tiek ierakstīti superblokā. Superbloka saturam vienmēr tiek veidota rezerves kopija un tas glabājas 2 kopijās. Sakarā ar to, ka superblokam ir augstāks pārrakstīšanas biežums, tam ir lielāks risks nolietoties. Nolietošanās risks ir saistīts ar to, ka superbloks ir jāpārraksta katru reizi, kad zibatmiņas plūsma tiek atjaunota. Tā kā tiek lietoti divi superbloki, tad tiem tiek rezervēti 2 zibatmiņas sektori. Tā kā TS M25P80 sektora izmērs ir 64 kilobaiti, tad jārezervē minimums 128 kilobaiti superbloku vajadzībām. SD kartes gadījumā, standarts nosaka, ka bloka izmērs ir 512 kilobaiti, taču katram ražotājam tas var atšķirties. Bieži ir sastopamas kartes ar 128 kilobaitu lieliem blokiem.

3.3.3.5. DCO pārkalibrēšana

Piedāvātajā sistēmas arhitektūrā tiek izmantots komunikāciju protokols, kam nepieciešami precīzi laika mērījumi. Diemžēl MSP430 mikrokontrolieru augstās frekvences pulkstenis nav pietiekoši drošs izmantošanai ilglaicīgi, jo kā pulksteņa avots tiek lietots DCO jeb digitāli kalibrējama oscilators, kurš ļoti atkarīgs no temperatūras un var nozīmīgi mainīties atkarībā no vides apstākļiem. Lai izvairītos no kļūdām un uzturētu akurātus laika mērījumus periodiski tiek veikta DCO pārkalibrēšana, izmantojot zemās frekvences pulksteņa kristālu kā pulksteņa references avotu.

Nākotnē tiek domāts kaklasiksnas iekārtas uzlabošanu, pievienojot tam temperatūras kompensētu kristālisko oscilatoru.

3.3.3.6. Dzīvnieka aktivitātes noteikšana

Dzīvniekiem piestiprinātas datu ievākšanas iekārtas jau ir tikušas lietotas kādu laiku paralēli citām telemetrijas metodēm, lai monitorētu savvaļas dzīvniekus to dabiskajā vidē. Visbiežāk literatūrā ir minēti 2 un 3 asu akselerometru pielietojumi [206] [207] [208] [209], kas dod tikai daļēju ieskatu dzīvnieka uzvedībā. Atsevišķos gadījumos ir apskatīti 3 asu akselerometra un 3 asu magnetometra pielietojumi [210], kas dod plašāku ieskatu dzīvnieka uzvedībā, jo attēlo jau 6 pakāpju brīvības atainojumu jeb 6-DOF, kā arī palīdz noteikt aptuvenas dzīvnieka 3 dimensiju trajektorijas.

Kā vēl viens no iespējamajiem variantiem ir jāmin 3 asu akselerometra un 3 asu žiros-

kopa pielietojums [211], kas, lai arī attēlo tikai 6-DOF, taču ļauj daudz precīzāk noteikt dzīvnieka kustības vektoru.

Strādājot pie *LynxNet* projekta un ņemot vērā prasības par aktivitātes noteikšanu, kā arī to, ka tehnoloģiski gan mikrokontrolieri, gan sensori ir attīstījušies tik tālu, lai spētu apstrādāt 9 brīvības pakāpju attainojumu jeb 9-DOF, tika nolemts ievākt un apstrādāt gan 3 asu akselerometra, gan 3 asu žiroskopa, gan arī 3 asu magnetometra datus.

Par labu šādai pieejai var minēt to, ka līdz promocijas darba izstrādes beigām tā autors nav atradis nevienu ar dzīvnieku aktivitātes monitoringu saistītu pētījumu, kas izmantotu 9-DOF. Bez tam pēcāk, saliekot šos ievāktos datus kopā ar Kalmana algoritmu [137] palīdzību (sākotnēji uz datora, bet vēlāk jau uz pašas iekārtas), tas ļautu noteikt maksimāli precīzu dzīvnieka kustības vektoru. Tāpat ievāktos datus var izmantot, lai vēlāk šo kustības vektoru varētu modelēt ar datora palīdzību.

Papildus datu ievākšanai ar sensoru palīdzību, notiek darbs pie algoritma izstrādes, kuru varētu darbināt uz Texas Instruments mikrokontroliera, lai datu apstrādi veiktu jau kaklasiksnas iekārtā. Daļēji uzdevumu var atvieglot, izmantojot jau aparatūrā – žiroskopā InvenSense IMU-3000 [194] un akselerometrā Analog Devices ADXL345 [193] – iebūvētās funkcijas.

3.4. Eksperimenti

Daļa no promocijas darba nodaļā realizētajām iekārtām tika eksperimentāli pārbaudītas dabā, taču diemžēl ne uz īsta savvaļas dzīvnieka, bet gan suņa. Vairāki hipotēzes tika pārbaudītas ar analītisko mērījumu palīdzību.

3.4.1. Eksperimentu apraksts

Eksperimenti ar 1. prototipa iekārtu tika veikti 2010. gada jūlijā un lūša vietā tika izmantots suns (skatīt 3.12. attēlu), kas bija apmēram divas reizes lielāks un smagāks nekā Eirāzijas lūsis. Tika veikti 433MHz LINX TRM-433-LT raiduztvērēja [179] un salīdzinošie 2,4GHz Texas Instruments CC2420 raiduztvērēja [178] testi Rīgā, Rumbulas lidlaukā (skatīt 3.13. attēlu) un Šampētera mežā (skatīt 3.14. attēlu), lai noskaidrotu gan to

spējas klajā laukā, gan vidē, kas pietuvināta reālajai – jauktā lapu koku mežā.



Att. 3.12.: Testa "lūsis" – Spaiks



Att. 3.13.: Testa uzstādījumi Rumbulas lidostā (attēlā R. Zviedris)



Att. 3.14.: Testa uzstādījumi Šampētera mežā (attēlā Ģ. Strazdiņš un R. Zviedris)

Eksperimenti ar gala iekārtas 2. prototipu ir veikti tikai daļēji – atsevišķi pa moduļiem – ārkārtas darbības un galveno – un tikai laboratorijas apstākļos. Arī gala iekārtas 2. prototipā izmantojamie raiduztvērēji ir testēti tikai laboratorijas apstākļos, bet reālajai videi ir veikta situācijas modelēšana un analītiskie mērījumi.

3.4.2. Rezultāti

Šajā apakšnodaļā aprakstīti 2,4 GHz un 433 MHz raiduztvērēju un 152 MHz raidītāja testu rezultāti, kā arī aktivitātes noteikšanas testi, izmantojot suni kā "viltotu" lūsi. Tālāk aprakstīti arī *LynxNet* gala iekārtas un bāzes staciju iekārtu enerģijas patēriņa testi.

3.4.2.1. 433 MHz TRM-433-LT un 2,4 GHz CC2420 raiduztvērēju testi

Abu raiduztvērēju testi notika līdzīgā veidā – bāzes stacija atradās fiksētā vietā:

- Rumbulas lidlauka gadījumā – piestiprināta pie automašīnas (skatīt 3.13. attēlu);
- Šampētera meža gadījumā – piestiprināta pie koka stumbra (skatīt 3.14. attēlu).

Savukārt, dzīvnieks ar gala iekārtu attālinājās no bāzes stacijas un pēc katriem 50 metriem tika veikti datu pakotņu saņemšanas testi. Bāzes stacijas un mērījumu punktu koordinātes tika atliktas izmantojot Garmin GPS iekārtu. To, cik veiksmīgi izdevās veikt raiduztvērēju testus, iespējams redzēt pievienotajos attēlos. Vispirms tika veikti klaja lauka testi Rumbulas lidlaukā (skatīt 3.15. attēlu), pēc tam – testi Šampētera mežā (skatīt 3.16. attēlu). Testu rezultāti apkopoti 3.5. un 3.6. tabulās.

Dzīvnieka iekārta izsūtīja 22 baitu datu pakotnes līdzīgi, kā tas notiktu reālajā situācijā, izmantojot 3.3.3.1. apakšnodaļā aprakstīto enkapsulāciju.

Pirms testu uzsākšanas laboratorijas apstākļos tika veikti mērījumi, lai noteiktu to RSSI robežvērtību, pie kuras būtu vislabākie rezultāti datu pakotņu saņemšanā. Balstoties uz šiem mērījumiem, tika atrasts, ka vislabākā RSSI robežvērtība ir 1600 (maksimālā ir 4095). Ja šī vērtība tika uzstādīta par augstu, tika saņemts mazāk datu pakotņu dēļ signāla pavājināšanās. Savukārt, ja vērtība bija pārāk zema, datu pakotnes netika saņemtas vispār – pieļaujams, ka klusums vai arī troksnis tika interpretēts kā 1 bits un tādejādi nebija iespējas noteikt datu pakotnes sākumu (skatīt 3.3.3.1. apakšnodaļu).

Vispirms tika testēts TRM-433-LT raiduztvērējs un tad tas tika salīdzināts ar CC2420 [178] raiduztvērēju. Tiklīdz parādījās būtiski traucējumi TRM-433-LT raiduztvērēja datu pakotņu piegādē vai tās vairs netika piegādātas, bāzes stacijas iekārtai tika pievienotas

audio austiņas un tika veikta signāla audio atpazīšana. CC2420 raiduztvērēja testi izmantoja Tmote Mini un Tmote Sky iebūvēto antenu, jo tai nebija izgatavota speciāla kaklasiksnā iestrādātā antena, kas būtu pielāgota 2,4 GHz darbības frekvencei. Testos ar maksimālo pārraides jaudu tika izmantota *RadioCountToLeds* lietotne, kas atrodama MansOS demo lietotnēs.

Veicot testus ar dzīvnieku, vislabākā signāla uztveršana TRM-433-LT gadījumā bija, ja dzīvnieks stāvēja ar vienu vai otru sānu attiecībā pret bāzes stacijas antenu. Tas var tikt izskaidrots ar kaklasiksnas antenas uzbūvi.



Att. 3.15.: Radio testi Rumbulas lidlaukā

Distance, metri	Saņemtās pakotnes, procenti	RSSI līmenis (max = 4095)
50	80-100%	2700
100	80%	2200
150	80%	1900-2000
200	40-80%	1600-1800
250	10-80%	1600-1800

Tabula 3.5.: TRM-433-LT raiduztvērēja testu rezultāti Rumbula lidlaukā



Att. 3.16.: Radio testi Šampētera mežā

Distance, metri	Saņemtās pakotnes, procenti	RSSI līmenis (max = 4095)
50	80-100%	2800-3000
100	80-100%	2200-2500
150	70-90%	2300
200	10-50%	1600-1800
250	20-50%	1600-1800

Tabula 3.6.: TRM-433-LT raiduztvērēja testu rezultāti Šampētera mežā

3.4.2.2. 433 MHz un 868 MHz CC430 raiduztvērēja testi

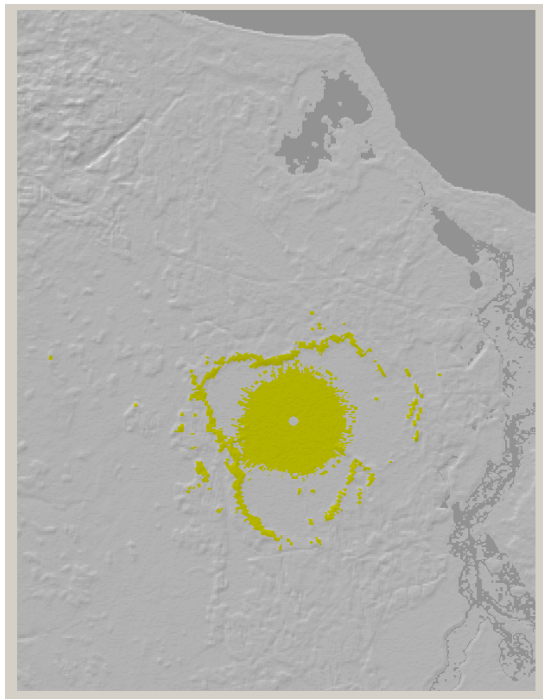
Laboratorijas apstākļos ir veikti testi ar TI CC430F6137 mikrokontrolierī iebūvēto raiduztvērēju divos veidos – vispirms 868 MHz frekvencē, izmantojot Texas Instruments EZ430-Chronos [212] izstrādes rīku, pēc tam izveidojot un izmantojot EdiMote [200] iekārtai projektētu moduli (skatīt 3.8. attēlu), kas sākotnēji darbojās 868 MHz frekvencē, bet vēlāk tika pārveidots, lai darbotos 433 MHz frekvencē.

EZ430-Chronos izstrādes rīka gadījumā tika izmantotas Texas Instruments un OpenChronos [213] piedāvātās lietotnes datu apmaiņas pārbaudei.

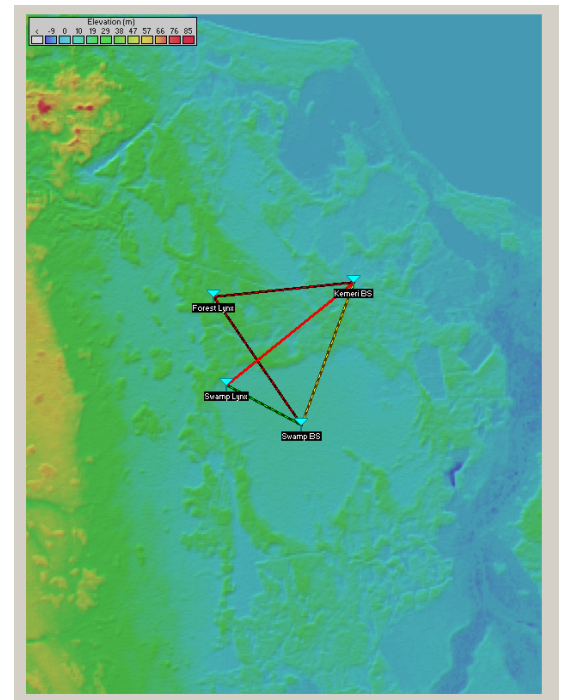
Sākotnēji 868 MHz EdiMote modulis tika testēts ar EZ430-Chronos rīkiem, taču tad TI CC430F6137 mikrokontroliera atbalsts tika iestrādāts MansOS. Pēc MansOS uzlabo-

šanas datu pārraide pārbaudīta, izmantojot MansOS iekļautās komunikācijas iespēju demonstrācijas lietotnes. Pēc 433 MHz EdiMote moduļa izstrādes, iekārtu iespējams testēt laboratorijas apstākļos, izmantojot tikai divus EdiMote moduļus, lai pārbaudītu savstarpējo komunikāciju vai arī vienu EdiMote moduli un *LynxNet* gala iekārtas 2. prototipa galvenā moduļa daļu, lai pārbaudītu komunikāciju starp bāzes staciju un kaklasiksnu.

Izmantojot *LynxNet* gala iekārtas 2. prototipu un bāzes staciju plānots veikt eksperimentus reālajā vidē – Ķemeru tīrelī [52]. Līdz tam, ņemot vērā iekārtu parametrus un pieņēmumus par lūšu pārvietošanos, tika veikta radio sakaru modeļošana programmā Radio Mobile [214] (skatīt 3.17. attēlu), ja bāzes stacija atrastos Ķemeru tīreļa skatu tornī, kā arī iespējamā bezvadu sensoru tīkla sakaru kvalitātes modeļošana (skatīt 3.18. attēlu), ja būtu divas bāzes stacijas – viena Ķemeru tīreļa skatu tornī, otra – tuvāk Ķemeriem – ugunsdzēsēju novērošanas tornī.



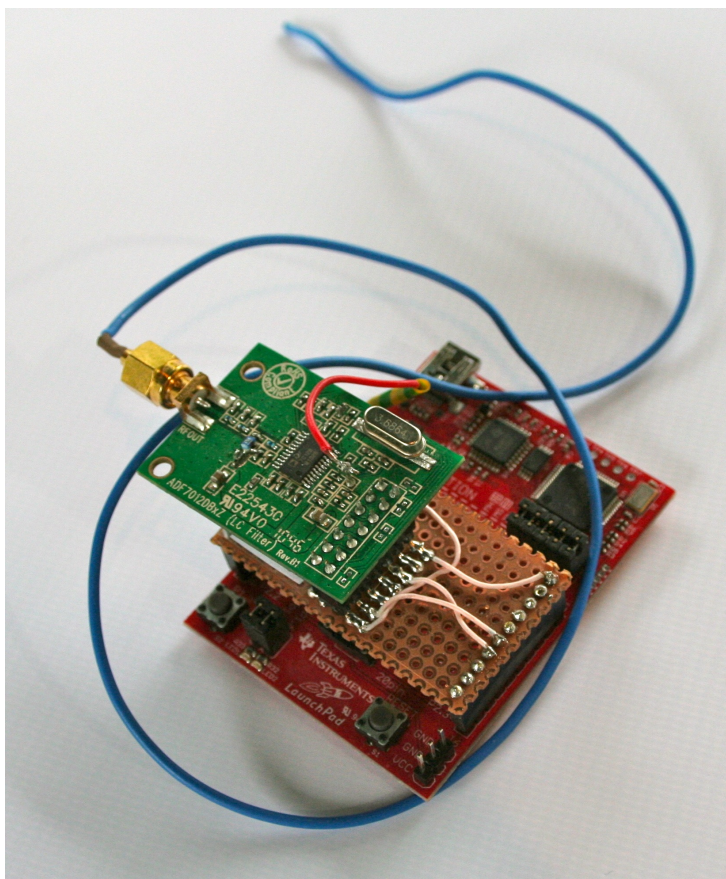
Att. 3.17.: Modelētais 433 MHz pārklājums Ķemeru tīrelī



Att. 3.18.: Modelētais 433 MHz sensoru tīkls Ķemeru tīrelī

3.4.2.3. 152 MHz VHF raidītāja testi

Pirms atbilstošas iekārtas izveides tika veikti testi laboratorijā, izmantojot Telonics VHF kaklasiksnu, kas bija savu laiku nokalpojusi, t.i., tā bija jau noņemta no dzīvnieka, jo



Att. 3.19.: 152 MHz raidītāja testu iekārta

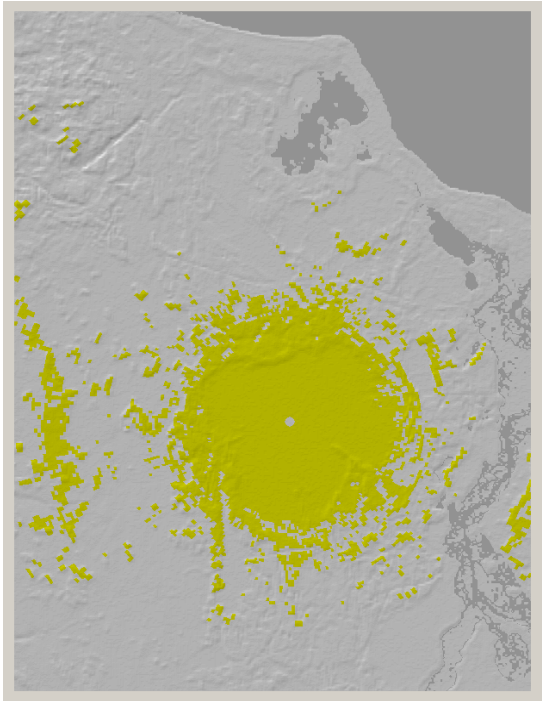
siksnai bija izsīkušas iebūvētās baterijas. Veicot reverso inženieriju, esošā iekārta tika atvērta, tai tika pievienotas testa baterijas un to varēja pārbaudīt laboratorijas apstākļos.

Tāpat tika noskaidrota komerciālās iekārtas uzbūve – tā izmantoja PIC mikrokontrolieri, ar kura palīdzību tika sintezēts 152 MHz signāls, kuru noteiktā laikā pārraidīja, izmantojot vienkāršu raidītāju. Tā kā signālam ir tikai audiāla nozīme, tad tika piefiksēti tā frekvence, garums un citi fakti, kas palīdzēja 2. prototipa ārkārtas moduļa izstrādē.

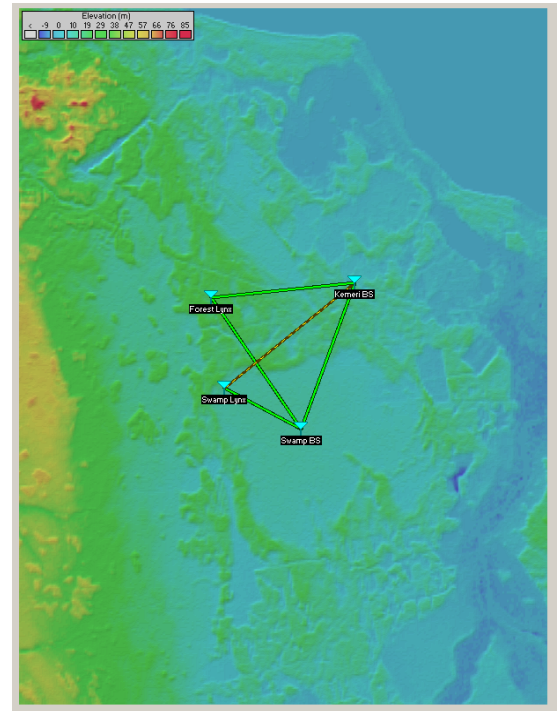
Tika sagatavota arī atbilstoša ārkārtas moduļa iekārta (skatīt 3.19. attēlu) 152 MHz raidītāja testus veikšanai reālajā vidē. Līdz šim ir veikti laboratoriskie testi, lai panāktu, ka iekārta stabili darbojas tai atvēlētajā 152MHz frekvenču diapazonā. Testu veikšanai un iekārtas pārbaudei reālajā izmantošanas vietā jāveic saskaņošana ar Latvijas Republikas Elektronisko sakaru direkciju.

Ņemot vērā iepriekšminētos faktus, 152 MHz raidītājam tika veikta radio sakaru modeļošana ar programmas Radio Mobile [214] palīdzību (skatīt 3.20. attēlu), ja bāzes stacija atrastos Ķemeru tīrēja [52] skatu tornī, kā arī iespējamā bezvadu sensoru tīkla sakaru kvalitātes modeļošana (skatīt 3.21. attēlu), ja būtu 2 bāzes stacijas – viena Ķemeru tīrēja

skatu tornī, otra – tuvāk Ķemeriem – ugunsdzēsēju novērošanas tornī.



Att. 3.20.: Modelētais 152 MHz pārklājums Ķemeru tīrēlī



Att. 3.21.: Modelētais 152 MHz sensoru tīkls Ķemeru tīrēlī

3.4.2.4. Aktivitātes noteikšanas testi

Izmantojot gala iekārtas 1. prototipu tika veikta datu apkopošana 5-DOF līmenī jeb ievākti dati no 2 asu akselerometra un 3 asu žiroskopa. Rezultātā savāktie dati ļāva noteikt dzīvnieka kustības vektoru ilglaicīgi, ja dzīvnieks pārvietojās lēnām un strauji nemainīja savu virzienu, vai īslaicīgi, ja kustības bija straujas un saraustītas.

Tā kā gala iekārtas 1. prototips ir ierobežots gan sensoru izšķirspējā, gan ar apstrādes jaudu, tad datu apstrāde tika veikta uz datora.

Ar gala iekārtas 2. prototipu veikti daļēji 9-DOF līmeņa aktivitātes noteikšanas analītiskie mērījumi laboratorijā. Veikti testi ar atsevišķiem mezgliem tika izmantoti, lai pielāgotu mezglus darbam ar *LynxNet* programmatūru. Pilnvērtīgi 9-DOF līmeņa aktivitātes noteikšanas testi reālajā vidē vēl nav veikti.

Izstrādes un pārbaudes procesā vēl tiek pārbaudīts, cik efektīvi iekārta spēj pamosties no miega režīma, ja tai jāklausa pārtraukums, ko nosūta 3D akselerometrs. Pēc veiktajām pārbaudēm attiecīgi tiek koriģēta *LynxNet* programmatūra. Izstrādes un testēšanas

procesā vēl atrodas iekārtas spēja maksimāli efektīvi ievākt, saglabāt un apstrādāt datus ar izvēlēto mikrokontrolieri un 9-DOF iekārtām.

Balstoties uz līdz šim savāktajiem datiem, ir mēģināts uz datora modelēt dzīvnieka kustības vektoru, taču pagaidām to nav iespējams izdarīt ilglaicīgi. Periodiski ir nepieciešami dati no GPS iekārtas, pretējā gadījumā dzīvnieka reālais kustības vektors neskan ar uzmodelēto un ir jāveic būtiskas korekcijas.

3.4.2.5. Gala iekārtas dzīves ilguma analītiskie aprēķini

Reālie enerģijas patēriņa dati nav pieejami, jo neviena no līdz šim izstrādātajām iekārtām nav bijusi uzstādīta uz reāla lūša. T.i., nav bijis iespējams konstatēt faktu, ka prognozētais darbības ilgums saskanēs ar reālo.

Līdz šim visi enerģijas patēriņa aprēķini un pieņēmumi par iekārtas darbības ilgumu ir balstīti uz teorētiskiem aprēķiniem un analītiskiem mērījumiem, kas veikti izmantojot B. pielikumā attēloto *Python* programmatūru un atsevišķu moduļu laboratorisku mērījumus. Radītā enerģijas patēriņa aprēķinu programma satur visu trīs līdz šim izstrādāto iekārtu un to komponentu datus par enerģijas patēriņu. Dati iegūti no izvēlēto komponentu ražotāju piedāvātajām datu lapām. Programma pieļauj dažādas iespējas rezultātu modelēšanai atkarībā no plānotās iekārtas slodzes. Visu komponentu patērējamā enerģija ir balstīta uz to datu lapās norādīto maksimālo vērtību. Realitātē enerģijas patēriņš var būt zemāks.

Visi aprēķini ir balstīti uz plānoto iekārtu dzīves ciklu, kā arī ņemot vērā to, ka izmantotās baterijas pašizlādējas. Teorētiskie aprēķini par iekārtu enerģijas patēriņu apkopoti un atspoguļoti 3.7. tabulā. Savukārt, plānotie iekārtu dzīves ilgumi un ievāktās informācijas apjomi atspoguļoti 3.8. tabulā.

Reālie enerģijas mērījumi ir veikti atsevišķiem komponentiem vai atsevišķām darbībām, taču tas nav veikts sistemātiski un nevar tikt publicēts.

Skatoties uz analītiski aprēķinātajiem stundas enerģijas patēriņiem, skaidri redzams, ka visefektīvāk ir strādājis gala iekārtas 1.5. versijas prototips. Tas ir saistīts ar to, ka tā darbības princips bija plānots kā 1. prototipam, t.i. tas ievāktu mazāk aktivitātes datus un tam nav 3 asu magnetometra. Savukārt, gala iekārtas 2. prototipam būtu iespējams samazināt enerģijas patēriņu, ja radio pārraide tiktu kontrolēta un netiktu lieki darbināta,

Operācija	1. prototips mA	1.5. prototips mA	2. prototips mA
MCU gul	0,058	0,116	0,113
MCU strādā	0,069	0,072	0,145
GPS	1,050	0,485	0,375
Aktivitātes sensori	0,026	0,026	0,220
Vides sensori	0,380	0,222	0,375
Radio RX	0,010	0,007	0,007
Radio TX @ 433MHz	0,497 @ 9,77kbaud	0,188 @ 38,4kbaud	1,873 @ 38,4kbaud
SD karte	0,058	0,057	0,067
Kopā:	2,175 mA	1,183 mA	3,201 mA

Tabula 3.7.: Aprēķinātais stundas enerģijas patēriņš *LynxNet* gala iekārtu prototipiem, kur 1. prototipam lietots 1300 mAh 3,6 V litija polimēru akumulators, kas darbojas ar 3,3 V spriegumu, savukārt, 1.5. un 2. prototipiem lietots Enix Energies 6800 mAh 3,75 V litija jonu akumulators, kas darbojas ar 3 V spriegumu.

kas aprēķinos tiek lietota standarta režīmā - reizi 5 minūtēs. Ar izslēgtu radio pārraidi, 2. prototips stundā tērētu tikai 1,325 mA, tajā pat laikā nodrošinot desmitkārt vairāk ievākto aktivitātes datu.

Parametrs	1. prototips	1.5. prototips	2. prototips
Baterija	1300 mAh @ 3,6 V	6800 mAh @ 3,75 V	19000 mAh @ 3,6 V
Sistēmas spriegums	3,3 V	3,0 V	3,0 V
GPS mērījumu skaits h	1	1	1
Aktivitātes sensori h	60	60	612
Vides sensori h	1	1	1
Ievāktie dati	605 KB	7,9 MB	83,7 MB
Darbības stundas	594	5443	5611
Darbības dienas	24,75	226,79	233,80

Tabula 3.8.: Aprēķinātais sistēmas dzīves ilgums *LynxNet* gala iekārtu prototipiem, kur: 1. prototipam lietots litija polimēru akumulators; 1.5. prototipam lietots Enix Energies litija jonu akumulators; 2. prototipam lietota XENO XL-205F litija jonu baterija.

Kā redzams no gala iekārtu analītiski aprēķinātā sistēmas dzīves ilguma 3.8. tabulā, tad 1.5. versijas prototips ar tam sākotnēji paredzēto 6800 mAh akumulatoru strādātu nedaudz īsāku laiku nekā 2. prototips ar gandrīz 3 reizes ietilpīgāko akumulatoru. Tomēr šim aspektam jāpievērš uzmanība arī no ievākto datu apjoma, kas 2. prototipa gadījumā ir gandrīz 10 reižu vairāk.

3.4.2.6. Bāzes stacijas dzīves ilguma analītiskie aprēķini

Līdzīgi kā ar *LynxNet* gala iekārtām, bāzes stacijas enerģijas patēriņš ir rēķināts analītiski, balstoties uz tehniskajā dokumentācijā pieejamo informāciju. Realitātē ir veikti tikai īslaicīgi laboratoriskie mērījumi, kas nedod pietiekošu pārskatu par iekārtas ilglaicīgu darbību. Plānotais enerģijas patēriņš ir līdzvērtīgs kā 5.4.2.2. apakšnodaļā aprakstītajai iekārtai, jo arī šai pamatā ir Raspberry Pi [39] mikrodators, kurš izmanto 3G/LTE platjoslas modemu datu apmaiņai un uz Arduino Pro [32] bāzētu enerģijas patēriņa kontrolieri. Vienīgā atšķirība – šim mikrodatoram raiduztvērēja vietā ir pieslēgts *LynxNet* sistēmā izmantotais mikrokontrolieris ar integrētu raiduztvērēju.

Bāzes stacija sastāv no 4 dažādiem komponentiem, kuriem katram ir savs dzīves cikls. Katram komponentam 3.9. tabulā ir rādīta informācija par tā standarta patēriņu, kā arī dzīves ciklu un izrēķināts teorētiskais patēriņš.

Komponente	Max. patēriņš mA	Dzīves cikls min.	Patēriņš mA
Mikrodators	20	20	6,67
3G modems	200	5	16,67
Komunikāciju modulis	20	12	4
Enerģijas kontrolieris	4	15	1

Tabula 3.9.: *LynxNet* bāzes stacijas enerģijas patēriņš

Kā redzams no 3.9. tabulas, tad kopējais enerģijas patēriņš stundā pirmajām 3 komponentēm, kas tiek barotas no viena barošanas avota – svina-skābes akumulatora, ir ap 27,34 mA. Savukārt, enerģijas patēriņa kontrolierim ir savs atsevišķs barošanas avots – 2600 mAh ietilpīgs akumulators. Abām iekārtu grupām ar tiem paredzētajiem barošanas avotiem ir nodrošināts darbības termiņš ilgāks par gadu, kas faktiski nozīmē, ka bāzes stacija teorētiski var darboties ilgāk nekā dzīvnieka kaklasiksna.

3.5. Secinājumi

Šajā nodaļā autors ir aprakstījis savu pieredzi, izstrādājot *LynxNet* – savvaļas dzīvnieku monitoringa sistēmu, kā arī atbilstošo iekārtu prototipus. Iekārtu un sistēmas izstrāde apstiprina darbā izvirzīto hipotēzi, ka ir iespējams izstrādāt iegultās sensorās iekārtas,

par pamatu ņemot 1.3. nodaļā aprakstīto modeli un 1.4. nodaļā aprakstīto vispārīgo iegulto sensoru iekārtu izstrādes metodi.

Kopā izstrādāti trīs *LynxNet* gala iekārtas prototipi, kur katrs nākošais ir energoefektīvāks un ar lielāku datu ieguves izšķirtspēju. Pēdējais izstrādātais prototips izceļas gan ar efektīvu un ātru dzīvnieka atrašanās vietas noteikšanu, izmantojot vienu no jaunākajiem, mazākajiem un energotaupīgākajiem GPS/GNSS moduļiem, gan arī ar to, ka iekārta ir pilnībā digitāla. Tas saistīts ar to, ka visi tās izmantotie sensori ir ar digitālu saskarni, kas ļauj tos visus izvietot vienā kopnē un lasīt pēc vajadzības, kā arī nodrošina mazāku enerģijas patēriņu. Tiesa, pieaudzējot prasības par datu ieguvi, kopējais aprēķinātais enerģijas patēriņš gala iekārtas 2. prototipam ir lielāks nekā iepriekšējiem.

Būtiski jāatzīmē fakts, ka līdz šim gala iekārtas 2. prototipa iekārta uz pārējo fona izceļas ar to, ka atbalsta aktivitātes datu ieguvi 9-DOF līmenī, kamēr citi autoram zināmie risinājumi, ko biologi pielieto savvaļas dzīvnieku monitoringam, nenodrošina vairāk par 6-DOF līmeni.

Dzīvnieka uzstādāmās gala iekārtas 2. prototips ir aprīkots arī ar VHF raidītāju, kas ļauj tam sekot tradicionālā veidā – veicot triangulāciju. Tā kā VHF raidītāju darbina atsevišķs ārkārtas modulis, tad gadījumā, ja iekārtas galvenais modulis vairs nav darboties spējīgs, tad izmantojot tikai VHF raidītāju iespējams iekārtu atgūt.

Izstrādāts arī *LynxNet* bāzes stacijas modulis, kurš nodrošina datu apmaiņu ar gala iekārtu, kā arī veic datu uzkrāšanu un nosūtīšanu tālāk biologiem, kuri var veikt to apstrādi daudz īsākā laika periodā nekā līdz šim izmantotie risinājumi.

Līdzšinējie eksperimentu rezultāti pierāda, ka sistēma ir dzīvotspējīga un var tikt izmantota vidēji lielu savvaļas dzīvnieku monitoringam.

Heterogēni rīki izglītībai un izklaidei reālā laikā

Šajā disertācijas nodaļā apkopota pieredze izveidojot un ieviešot pasākumu vadības sistēmu, kas šobrīd sastāv no tīmekļa bāzētas programmatūras pasākumu vadībai un zema enerģijas patēriņa iegultām iekārtām, kas kontrolē mazas darbības rādiusa (SRD) FM frekvenču raidītāju un pilda dinamisku kontrolpunktu funkcijas.

Nodaļā aprakstītie pētījumi atbilst 1.3. apakšnodaļā aprakstītā vispārīgā monitorinģa modeļa realizācijas 2. un 3. sarežģītības pakāpei. Pētījumu aprobācijas piemērs ar "Autoliste" [215] pasākumu vadības sistēmu ietver gan kustīgus subjektus jeb autoorientēšanās pasākumu dalībniekus, kas izmanto viedtālrunus, kuri monitorē statiskus objektus jeb kontrolpunktus, kā arī statisku subjektu jeb dinamisko kontrolpunktu, kurš monitorē kustīgus objektus jeb autoorientēšanās pasākumu dalībniekus.

Šī nodaļa piedāvā ieskatu heterogēnos rīkos izglītībai un izklaidei reālā laikā. 4.1. apakšnodaļā tiek aprakstīts pētījumu konteksts un motivācija, savukārt, 4.2. apakšnodaļā tiek apskatīti esošie risinājumi. Nākošajā, 4.3. apakšnodaļā aprakstīts piedāvātais risinājums – tā sistēmas arhitektūra, radītā programmatūra un iekārtas. Savukārt, 4.4. apakšnodaļā aprakstīti pētījuma eksperimenti un to sasniegtie rezultāti, bet 4.5. apakšnodaļā – secinājumi un nākotnes plāni.

4.1. Ievads

Mūsdienās digitālās tehnoloģijas aizvien biežāk ieņem stabilu vietu mūsu dzīvē, t.sk., arī izglītības un izklaides jomās, kur regulāri rodas situācijas, kad kādam nepieciešams koordinēt vairākus uzdevumus dažādās vietās vienlaicīgi, pie tam dažreiz ar ļoti ierobežotiem

resursiem. Eksistē vairāki veidi ar dažādu sarežģītības pakāpi kā šādas problēmsituācijas iespējams risināt.

Pētījumu laikā, kas ilguši pēdējos piecus gadus, ir pakāpeniski veidots un attīstīts rīku kopums, kas piemērots gan izglītībai, gan izklaidei. Šajā laika periodā paralēli attīstībai reālos apstākļos tika pārbaudītas pieņemtās hipotēzes un radītie risinājumi. Šīs darbības veiktas, ņemot talkā dažādu ar auto orientēšanos saistītu pasākuma organizatoru [215] [216] pieredzi.

4.1.1. Motivācija

Izglītības, izklaides un sporta pasākumu vēsture, kas saistīta ar orientēšanos, ir datējama jau ar 19. gadsimta beigām, kad orientēšanās bija daļa no militārajām apmācībām un tikai vēlāk pārtapa par civilajiem pieejamu sporta veidu. Sākotnēji šīm nodarbēm bija nepieciešami vien karte un kompass, ar kuru palīdzību spēt orientēties un pārvietoties kājām pa nepazīstamu apvidu. Savukārt, auto orientēšanās ir līdzīga klasiskajam orientēšanās sportam un sākotnēji ir radusies no rallija, kur tika izmantotas kartes, lai atrastu ceļu svešā apvidū. Viens no auto orientēšanās pionieriem Latvijā ir biedrība "Autoliste", kas sāka organizēt šāda tipa pasākumus jau 2001. gadā. Laikam ritot, pasākumu dalībnieki vēlējās baudīt tehnoloģiski sarežģītākus un attīstītākus pasākumus, kas mudināja organizatorus tos būtiski uzlabot, iekļaujot tajos komplicētus uzdevumus, kas, savukārt, prasīja arvien vairāk resursu to kontrolei un ātrai gala rezultātu apkopšanai. Tāpēc tika pieņemts lēmums radīt robustu risinājumu, lai izvairītos no izplatītām kļūmēm, kas piemēklē izklaides un sporta pasākumus, kuros ir rezultāti, kas jāspēj vērtēt, kā piemēram:

- orientēšanās kontrolpunktu prizmu materiālu drukāšana, pašu prizmu sagatavošana un izvietošana dabā precīzās koordinātēs salīdzinoši īsu laiku pirms pasākuma, lai izvairītos no nevēlamas informācijas noplūdes, ir diezgan resursietilpīgs darbs. Tas pats attiecas uz dažādu pasākumam nepieciešamu materiālu drukāšanu, piemēram, kontrolkartes, papīra kartes, leģendas utt.;
- izmantot fotogrāfijas kā kontrolpunktu autorizācijas metodi, kas noved pie liela apjoma nestrukturēta vizuālā materiāla apstrādes, kas jāpaveic cilvēkam, kas neglābjami noved pie kļūdām, kas, savukārt, var ietekmēt pasākuma gala rezultātus

gan neprecīzuma, gan aizkavēšanās dēļ;

- tradicionālā orientēšanās aprīkojuma izmantošana kontrolpunktos savu ierobežoto iespēju dēļ der vienīgi kontrolpunkta apmeklējuma autorizācijai, bet ne uzdevumu piegādei dalībniekiem, kā rezultātā ir nepieciešama alternatīvs informācijas piegādes kanāls.

Visi iepriekšminētie apstākļi noveda pie pieprasījuma pēc sava risinājuma izveides, kas būtu gan vienkārša, bet tajā pašā laikā robusta tīmekļa bāzēta lietojumprogramma, kas kalpotu kā lietotāja saskarne un dinamiskais kontrolpunkts kā iegulta iekārta, ko darbina mikrokontrolieris.

4.2. Esošo risinājumu apskats

Veicot rīku kopuma izglītībai un izklaidei izpēti un izstrādes darbu tika izskatīti arī jau esošie pētījumi un risinājumi gan brīvdabas, gan iekštelpu uz spēlēm balstītās apmācības jomā. Vairums no esošajiem pētījumiem izskatīja līdzīgas idejas kā aprakstītas šajā darbā, taču pārsvarā tās bija orientētas uz bērnu izglītības pieredzi, nevis pieaugušajiem. Vienojošais pavediens, kas ir kopīgs "Autoliste" un "CDT" organizētajiem pasākumiem (pat pirms tie sāka izmantot pasākumu vadības sistēmu, kas aprakstīta 4.3.2. apakšnodaļā), ir balstīts uz stāstu, kas sasaista kopā dažādus apakšuzdevumus vienā lielā kopīgā uzdevumā, līdzīgi, kā tas notiek *Camelot* brīvdabas spēlē [217], tikai mūsu gadījumā – pieaugušo vidē un lielākās grupās.

Citur [218] ir aprakstīti pētījumi, kas pēta mobilo tehnoloģiju pielietojumu tiešā saskarē ar apkārtējo vidi un citiem dalībniekiem, kombinējot tās ar iesaistīšanu un pašmotivāciju 11 un 12 gadu vecu bērnu vidū. Idejas, kas apskatītas šajā darbā ir līdzīgas koncepcijai, ko lieto "Autoliste" un "CDT" savos pasākumos – savstarpējā sacensība palielina iesaistīšanos un iegūtie rezultāti, apmācību un spēles pieredze ir intensīvāki un sniedz vairāk prieka. Līdzīgas idejas par to, ka spēles pieredze ir svarīga, savos darbos pauž arī Džeina Makgonigala (*Jane McGonigal*) [219] [220] [221] [222].

Dažos darbos [223] [224] bija aprakstītas speciāli spēles pieredzes gūšanai veidotas iekārtas – tā kā tās bija domātas bērnu auditorijai, tad uzsvars tajās bija likts uz audio-

vizuālo pieredzi. Tas velk paralēles ar 4.3.3.1. apakšnodaļā aprakstīto dinamisko kontrolpunktu, kas izmantoto Morzes kodu saziņai ar spēlētājiem.

Vel pie eksistējošiem risinājumiem, kuri izmanto iekārtas, ir jāmin *Human Pacman* [225], kas ir interaktīva izklaides sistēma, kas mēģina apvienot fizisko pasauli ar virtuālu spēļlaukumu, galveno uzsvaru liekot uz mobilo skaitļošanu, bezvadu datortīkliem, visuresošo skaitļošanu un kustību izsekošanas tehnoloģijām, to visu ievietojot iekārtu kopumā, kam pamatā ir dators. Tā ir fiziska lomu spēle, kas izmanto papildinātās realitātes (*augmented reality*) datorfantāziju kopā ar sociālo un mobilo spēlēšanos, kas sasaucas ar dažu no "Autoliste" un "CDT" organizēto pasākumu tēmām. Arī šajos pasākumos dalībniekiem ir jāiejūtas kādā lomā. *Human Pacman* risinājums kopumā ir jau morāli novecojis, jo 2000. gadu pirmās desmitgades laikā radītās mobilas ierīces, kā piemēram *iPhone*, ar savām funkcijām un iespējām daļēji vai pilnībā aizvieto pētījumā aprakstīto tehnoloģisko kopumu.

Viens no jaunākajiem apskatītajiem pētījumiem [226] joprojām piedāvā aprīkot dalībniekus ar pilnu datorsistēmu, lai varētu tiem pilnībā sekot, dot rīkojumus un kontrolēt tos. Šāds risinājums pasākumu organizatoriem dod plašas iespējas sekošanai dalībniekam reālā laikā un vieglai uzdevumu maiņai atkarībā no situācijas, taču apgrūtina pašus dalībniekus, kam papildus ir jāpārvieta noteikts tehnikas vienību skaits, kā arī palielina risku kādai no tehnikas vienībām pārtraukt strādāt.

Kā atsevišķs novirziens pie eksistējošiem risinājumiem jāmin uz mobilajiem tālruniem balstītu sistēmu kopums, kas ietver arī atrašanās vietas bāzētu spēlēšanos (*location based gaming*), jo tas daļēji – vismaz mobilo tālrunu izmantošanā, piekļuvi pasākumu vadības sistēmai vai tās lietošanā, kā arī iebūvēto GPS uztvērēju izmantošanā orientēšanās posmos – saistās ar šajā darbā aprakstīto. Šādu mobilo un uz atrašanās vietas bāzētu spēlēšanās koncepciju izpēti jau ir veicis somu zinātnieks Olli Sotamā (*Olli Sotamaa*) savā darbā [227] izvirzot sākotnējo hipotēzi, ka šāda spēlēšanās, kas izmanto pilsētvidi kā spēles laukumu, ir pretrunā ar klasiskajām "spēlēties" un "spēle" definīcijām. Taču darba gaitā viņš ir pierādījis, ka mobilais tālrunis, neatkarīgi no tā saskarnes limitiem, ir ļoti labi piemērots uz atrašanās vietu bāzētai daudzspēlētāju pieejai, pieminot arī to, ka šāda pieeja palīdz formēt gūto spēles pieredzi, kas, savukārt, sasaucas ar šajā darbā pausto.

Kā cits piemērs mobilo tālrunu pielietojumam mobilajās spēlēs minams *Capture The*

Flag [228] spēle, kur spēlētāji, lietojot viedtālrunus un fiziski iejūtoties virtuālos tēlos, mēģina iegūt pretinieku karogus, pārvarot dažādus vides šķēršļus un, tādējādi, panākot saikni starp virtuālo un reālo pasauli. Otrkārt, spēlētāji var pārvietoties reālajā pasaulē plašā teritorijā, taču joprojām uzturēt reāla laika kontaktus ar citiem spēlētājiem gan reālajā, gan virtuālajā vidē. Visa spēles realizācija ir fokusēta uz patiesu mobilitāti ar minimālu aparatūras izmantojumu, kas sasaucas ar šī darba tēmu. Taču pētījumu atšķirība ir tajā, ka šīs disertācijas ietvaros radot pasākumu vadības sistēmu, būtisks uzsvars ir likts arī uz pasākumu organizatoru atslogošanu, kā arī iespēju sistēmu izmantot arī komerciālā vidē.

Vēl viens piemērs mobilo tālrunu pielietojumam ir sociālā spēle *Gophers* [229], kur līdzīgi kā darbā aprakstītajai pasākumu vadības sistēmai, tiek izmantots uzdevumu balstīts spēles scenārijs, taču tā ir radīta tikai viena tipa ierīcēm – Nokia Series 60 tālruniem, kā arī savstarpējā komunikācijā balstās uz SMS/MMS ziņu sūtīšanu, kas mūsdienās nav pats efektīvākais informācijas apmaiņas kanāls.

Turpinot par uz atrašanās vietas bāzētām spēlēm, obligāti jāpiemin *Geocaching* [230] jeb ģeoslēpņošana. Tā ir uz atrašanās vietu bāzēta aktivitāte un ir populāra visā pasaulē jau vairākus gadus. Ģeoslēpņošana ir globāla spēle, kurā jāmeklē "dārgumi", kas noslēpti noteiktās GPS koordinātēs visā pasaulē. Vairāki autori [231] [232] savos pētījumos ir apskatījuši dalībnieku iesaistīšanos un to uzvedību ģeoslēpņošanas aktivitātēs, kā arī datortehnoloģiju un GPS pielietojumu tajās, kas atsevišķos aspektos ir pielīdzināmi šim darbam. Atsevišķi no kopējās ģeoslēpņošanas prakses ir jāizceļ specifisks slēpņu tips – *Wherigo* [233], kas pēc savas būtības ir tuvāks orientēšanās pasākumiem, jo šāda tipa slēpņu atrašanai ir jāveic virkne atrašanās vietai piesaistītu darbību, ko ir uzdevis slēpņa autors, kas, savukārt, līdzinās kontrolpunktu meklēšanai. Ģeoslēpņošana un tās izmantotās sistēmas un rīki pēc savas būtības ir tikai viens no komponentiem kopējā sistēmā, kāda tā ir aprakstīta šajā darbā.

Balstoties uz ģeoslēpņošanu un rīkiem, kas piemēroti izglītībai, grupa skolotāju ir radījusi uz atrašanās vietas bāzētu mobilo spēli, kas iesaista skolēnus dabaszinātņu, konkrēti pazemes ūdeņu, izpētē Guamā. Rezultāti ir aprakstīti pētījumā [234], no kura var secināt, ka daļēji radītā sistēma ir līdzīga darbā aprakstītajai, taču nav īsti piemērojama izklaides pasākumu organizācijai.

Viena no jaunākajām *Niantic Labs* piedāvātajām uz paplašināto realitāti balstītajām daudzspēlētāju tiešsaistes spēlēm ir *Ingress* [235], kura, kā atzinis Hals Hodsons *Hal Hodson* [236], "ir īsta papildinātās realitātes zelta bedre". Spēlētāji šajā spēlē iedalās divās frakcijās un spēles gaitā tiem ir iespējams norobežot Zemes virsmas reģionus ar virtuālām saitēm starp virtuāliem portāliem, kuri ir redzami spēles programmatūrā. Galējais spēles mērķis ir kādai no frakcijām kontrolēt lielu skaitu ar "saprāta vienībām" *Mind Units* jeb aptuveno skaitu ar cilvēkiem frakcijas kontrolētajās teritorijās. Līdzīga ideja ir tikusi realizēta arī dažos "Autoliste" organizētajos pasākumos, piemēram "Uguns un nakts", kur visi spēlētāji bija sadalīti divās frakcijās, kuras cīnās savā starpā.

No pētījumu viedokļa interesanta šķiet iespēja analizēt dalībnieku savstarpējos sociālos modeļus un sadarbību, kā arī to, kur tie ir bijuši. Kā pierādījuši citi pētnieki [237], tad veicot savākto datu analīzi, iespējams gan atpazīt zināmus uzvedības modeļus, gan modelēt [238] vēlāk grupu savstarpējo mijiedarbību.

Eksistē arī daži komerciāli, taču funkcionāli ierobežoti analogi darbā aprakstītajai iegultajai iekārtai – piemēram, Garmin Chirp [239], taču tā strādā tikai kopā ar Garmin ražotajiem GPS uztvērējiem un var tikt lietota tikai, lai norādītu lietotājam uz precīzu vietu un īsu papildus informāciju, tādējādi prasot organizatoriem nodrošināt papildus informācijas nodošanas dalībniekiem kanālu.

Sakarā ar biedrības "Autoliste" organizēto pasākumu popularitāti, eksistē arī pasākumu vadības sistēmas atvasinājumi – *Xelluc SVS* [240], kas gan šobrīd ir izmantota tikai trīs "Makatana" organizētajos pasākumos, taču organizatori ir ieplānojuši to izmantot atkārtoti. Galvenā atšķirība starp sistēmām ir tā, ka *Xelluc SVS* sistēmā kā vienīgie ir ieviesti spēļu "Katanas ieceļotāji" [241] un "Ticket to Ride" [242] noteikumi, toties nav iekļautas daudzas funkcijas no oriģinālās pasākumu vadības sistēmas, izņemot izskatu.

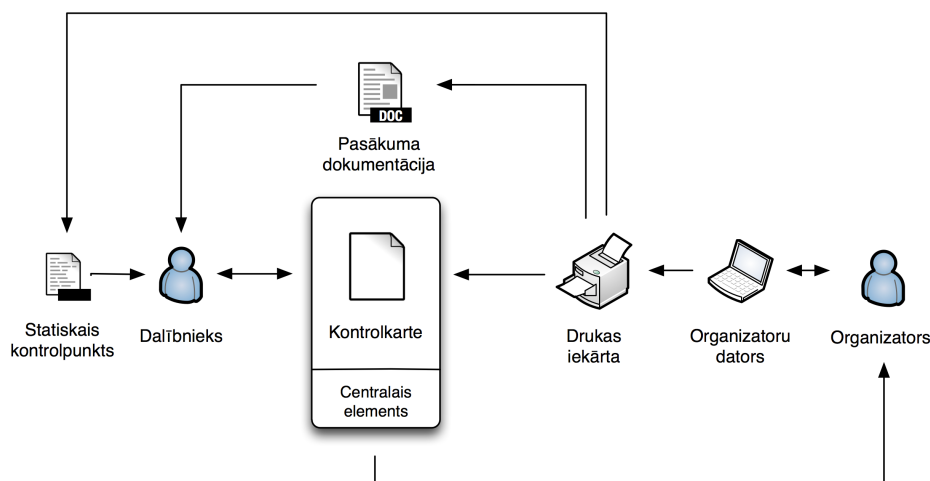
4.3. Risinājums

Šīs nodaļas apakšnodaļās ir apkopoti darba gaitā radītie rezultāti, kas sastāv no sistēmas arhitektūras, tīmekļa bāzētas lietojumprogrammas un dinamiskā kontrolpunkta iegultās iekārtas aprakstiem.

4.3.1. Sistēmas arhitektūra

Šajā apakšnodaļā tiks apskatīta vispārējā sistēmas arhitektūra un tās vēsturiskā evolūcija biedrībā "Autoliste" [215] līdz esošajam stāvoklim. Kā jau iepriekš minēts, "Autoliste" nodarbojas ar pasākumu organizāciju, kuru pamatā ir orientēšanās ar dažādu papildus uzdevumu izpildi.

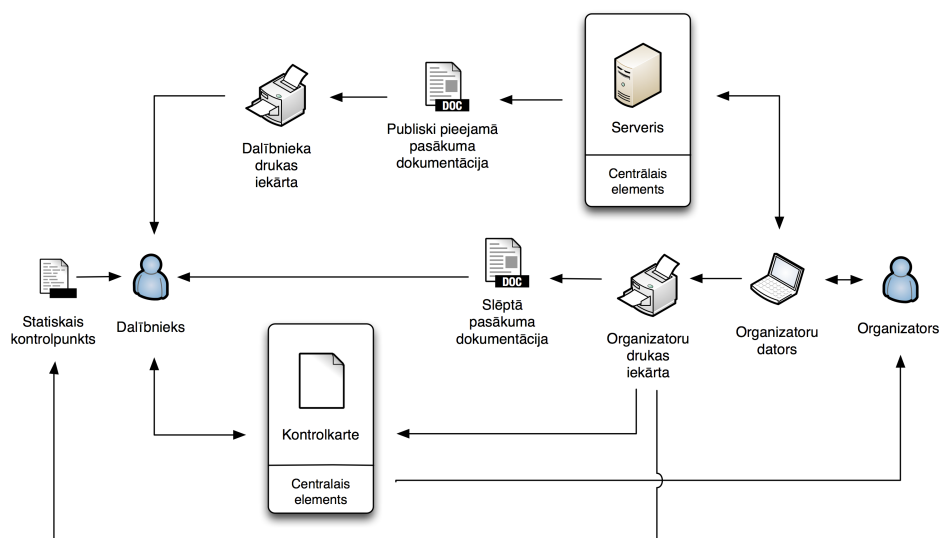
Sākot ar 2001. un līdz 2005. gadam (skatīt 4.1. attēlu) šie uzdevumi bija vienkārši un pilnīgi pietika ar kartona prizmu un orientēšanās sporta kompostieru lietošanu kontrolpunktos un parastu papīra kontrolkaršu lietošanu dalībniekiem šo punktu autorizācijai – kas arī bija šīs primitīvās sistēmas centrālais elements. Visus materiālus sagatavoja organizatori un paši tos arī izdrukāja.



Att. 4.1.: Pasākumu organizācijas shēma no 2001. līdz 2005. gadam

Vēlāk, no 2006. gada līdz 2007. gada pavasarim (skatīt 4.2. attēlu), uzdevumu palika vairāk un tie bija sarežģītāki, prasot būtiski lielāku dokumentācijas apjomu. Resursu taupības nolūkā tika ieviesta prakse, ka visi materiāli, kuru atklātība pirms pasākuma nekādi nevarēja ietekmēt pasākuma rezultātu, tika izvietoti biedrības tīmekļa vietnē, lai dalībnieki paši tos lejupielādētu un izdrukātu, tādējādi ietaupot organizatoru līdzekļus un laiku. Tādējādi, sistēmas centrālajam elementam – kontrolkartei – pievienojās arī tīmekļa serveris kā vienvirziena informācijas nodošanas kanāls.

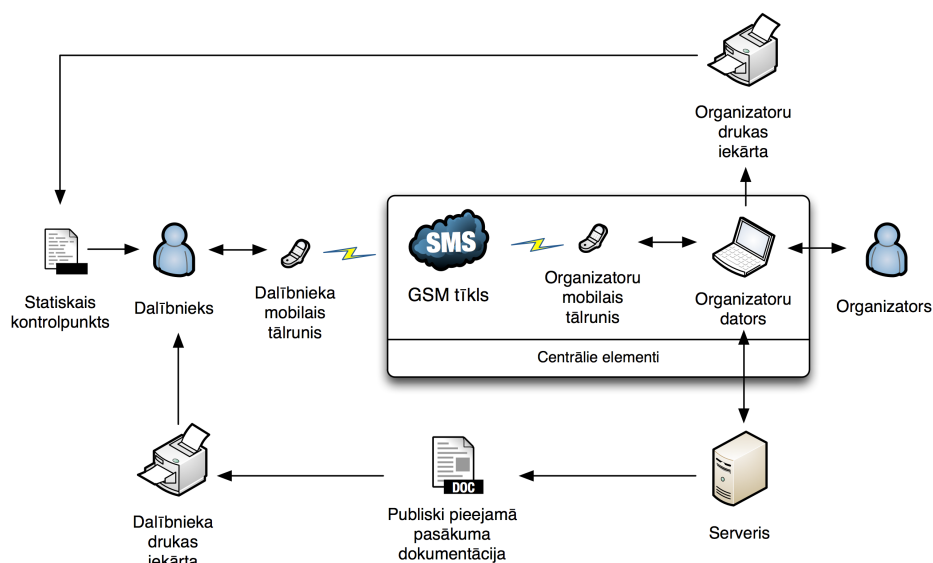
Pēc 2007. gada pavasara pasākuma tika nolemts, ka jāpāriet uz gandrīz pilnībā elektronisku pasākumu vadību, ieviešot uz SMS ziņapmaiņu balstītu sistēmu (skatīt 4.3. attēlu),



Att. 4.2.: Pasākumu organizācijas shēma no 2006. līdz 2007. gada pavasarim

kas faktiski ir uzskatāma par šī pētījuma pamatakmeni. Šo pasākuma vadības shēmu pirmo un vienīgo reizi izmēģināja 2007. gada rudens pasākumā, pēc kā tika secināts, ka izmantot SMS kā pamata informācijas apmaiņas kanālu visa pasākuma vadībai ir ne tikai ļoti apgrūtināši organizatoriem, bet arī dalībnieki apjomīgā SMS ziņojumu skaita dēļ nav spējīgi izsekot pasākuma gaitai. Lielas dalībnieku aktivitātes dēļ ļoti strauji pieauga nosūtīto un saņemto SMS ziņojumu skaits. Uz šo vienīgo reizi par sistēmas centrālajiem elementiem kļuva organizatoru dators un mobilaais tālrunis, kā arī GSM tīkls, caur kuru tika veikta SMS ziņojumu apmaiņa.

Laika posmā no 2007. gada rudens pasākuma līdz 2008. gada pavasarī organizētajam pasākumam tika pilnīgi izstrādāta jauna, tīmekļa – sākotnēji WAP 2.0, bet vēlāk arī pilnībā HTML savietojama – pasākumu vadības sistēma, kas kļuva par centrālo elementu. Tā ieviesa arī jaunu pasākuma organizācijas shēmu, kura ir spēkā no 2008. gada (skatīt 4.4. attēlu). 2009. gada vasarā pasākumu vadības sistēma tika papildināta ar iespēju autorizēt kontrolpunktus izmantojot QR kodus. Tomēr 2011. gada pavasara pasākumā negodīgi dalībnieki izmantojot to, ka kontrolpunkti dabā tiek izvietoti iepriekšējā dienā pirms pasākuma, ieguva dažu statisko kontrolpunktu informāciju. Organizatori šo informācijas noplūdi paspēja laicīgi noteikt un veica attiecīgo kontrolpunktu nomaiņu, kā rezultātā pasākuma dienā bija iespējams izskaitļot negodīgos dalībniekus un piemērot viņiem soda sankcijas par negodīgu rīcību.



Att. 4.3.: Pasākumu organizācijas shēma 2007. gada rudenī

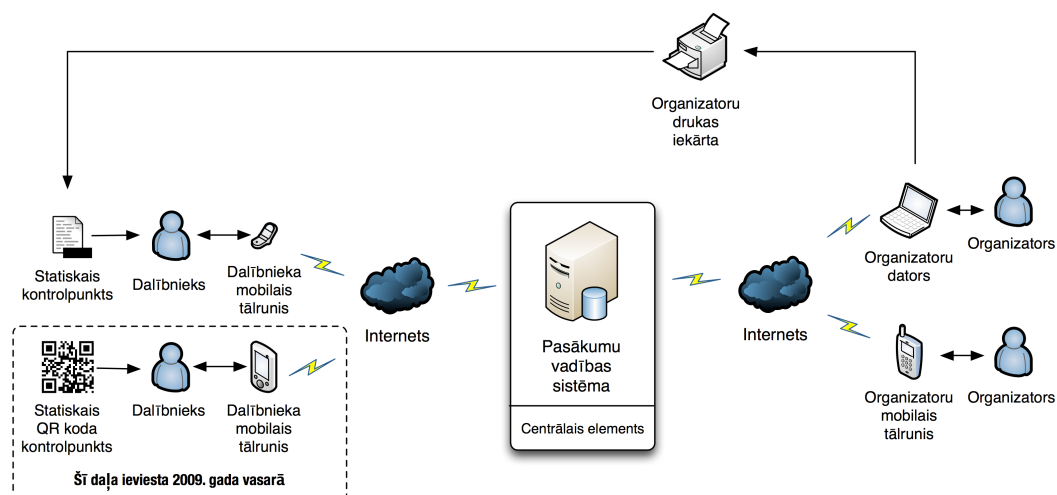
Dalībnieku nesportiskā rīcība radīja vajadzību pēc tāda kontrolpunkta izstrādes, ko būtu iespējams izvietot pasākuma vietā pietiekoši laicīgi, taču tas nesniegtu nekādu informāciju līdz brīdim, kad sākas pasākums, kā arī dotu iespēju uzdevumus mainīt vai padarīt īslaicīgi neaktīvus un visbeidzot automātiski tiktu deaktivizēts, tiklīdz pasākums ir beidzies. Šī brīža pasākumu organizācijas shēma aplūkojama 4.5. attēlā.

4.3.2. Pasākumu vadības sistēma

Projektējot un izstrādājot pasākumu vadības sistēmu, tika izvirzīti galvenie mērķi – samazināt organizatoru administratīvos uzdevumus un piedāvāt pasākumu dalībniekiem vēl dinamiskāku vidi. Papildus eksistēja vēl sekojošas nefunkcionālas prasības, kas arī bija jāņem vērā:

- sistēmas lietotāji izmantos mobilas ierīces;
- sistēmai jābūt pieejamai pēc pieprasījuma;
- sistēmai jābūt pieejamai bez speciālas aparatūras.

Lai izpildītu šīs prasības, tika izlemts veidot pasākumu vadības sistēmu kā vieglu (*lightweight*) tīmekļa tiešsaistes lietojumprogrammu ar WAP 2.0 [243] un pilnu HTML atbalstu. Šāds risinājums nosedz lielāko daļu šobrīd lietošanā pieejamos mobilos un viedos

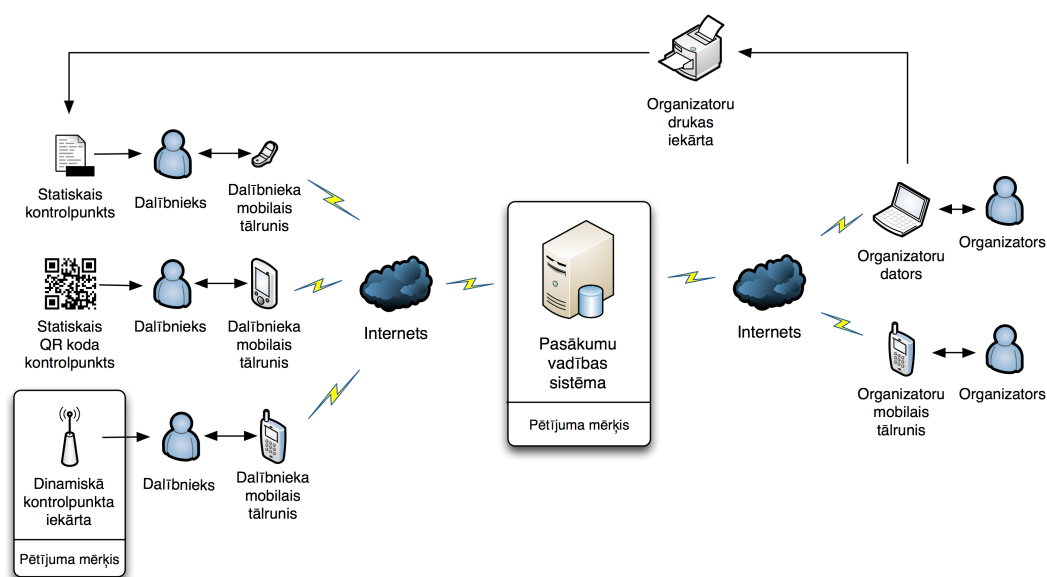


Att. 4.4.: Pasākumu organizācijas shēma no 2008. līdz 2011. gada pavasarim

tālrunus un mobilās ierīces, kā arī nodrošina to, ka sistēma, izmantojot tos, būs pieejama attālos lauku reģionos, kur tiek organizēti ārpustelpu pasākumi, savukārt, citas datorizētas vai komunikāciju iekārtas var nebūt viegli pieejamas. Pateicoties iepriekšminētajam, tiek izpildītas lielākā daļa no nefunkcionālajām prasībām, izņemot pilnībā nodrošinātu sistēmas pieejamību pēc pieprasījuma. Konkrētā prasība neizpildīsies gadījumos, ja konkrētajā vietā nebūs pieejams GSM tīkls vai tas nenodrošinās GPRS vai vismaz EDGE datu pārraidi.

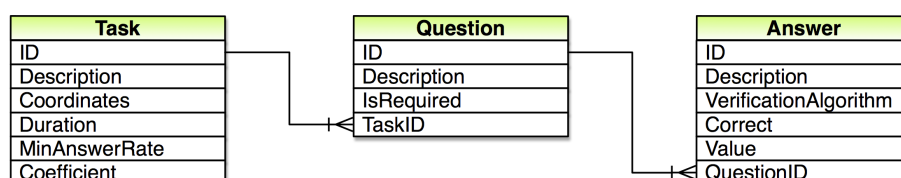
Izstrādājot pasākumu vadības sistēmu, tajā tika iekļauti sekojoši pasākumu organizācijas aspekti:

- dalībnieku reģistrācija un aktivizācija dalībai pasākumā;
- uzdevumu definēšana;
- kontrolpunktu izvietojšanas un aktivizācija pārvaldība;
- uzdevumu piešķiršana dalībniekiem;
- sekošana uzdevumu izpildes gaitai;
- uzdevumu rezultātu novērtēšana;
- GPS pēdu (*track*) analīze;
- izsekojama saziņa starp pasākuma organizatoriem un dalībniekiem.



Att. 4.5.: Spēkā esošā pasākumu organizācijas shēma – sistēmas arhitektūra

Uzdevumu definēšana pasākumu vadības sistēmā tiek veikta strukturētā formātā (skatīt 4.6. attēlu), kas sastāv no trīs daļām, kur pirmā ir unikāli identificējams uzdevums un tā apraksts. Tas var būt piesaistīts konkrētām GPS koordinātēm, kā arī var būt pieejams tikai noteiktā laika posmā vai posmos. Uzdevumam ir jābūt piesaistītam vismaz vienam jautājumam, kas arī ir unikāli identificējams un var saturēt aprakstu. Un visbeidzot katram jautājumam ir piesaistīta vismaz viena unikāli identificējama atbilde, kas arī var saturēt aprakstu. Katram atbildes variantam var tikt piešķirta vērtība punktos, kas var tikt pieskaitīta dalībnieka rezultātam atkarībā no izvēlēta atbildes pārbaudes algoritma. Savukārt, lai uzdevums tiktu uzskatīts par izpildītu, ir jābūt atbildētiem vismaz visiem tā jautājumiem, kas marķēti kā obligāti. Kopējā uzdevuma vērtība viena pasākuma ietvaros var tikt balansēta definējot tā koeficientu.



Att. 4.6.: Uzdevuma datu struktūra

Izvēlētā uzdevumu datu struktūra kopā ar atbilžu pārbaudes algoritmiem teksta virkņu un ciparu atšķirību noteikšanai ir pietiekoša, lai varētu definēt dažāda tipa uzdevumu veidus, kā piemēram:

- orientēšanās kontrolpunkta autorizācija, izmantojot koda ievadi – uzdevums ar GPS koordinātām, kuram 1 obligātais jautājums ar 1 obligātu atbildi, kas tiek pārbaudīta, salīdzinot ievadīto teksta virkni ar saglabāto;
- tests uz laiku – uzdevums ar laika ierobežojumu un minimālo skaitu atbildētajiem jautājumiem, piemēram 30 jautājumi 30 minūtēs, katrs ar 4 atbilžu variantiem, kas tiek pārbaudīti salīdzinot teksta virknes;
- distances noteikšana starp diviem objektiem – uzdevuma rezultātā tiek aprēķināta cipariska atšķirība starp dalībnieka uzrādīto un pareizo atbildēm.

Gan datu struktūra, gan pieejamie pārbaudes algoritmi var tikt paplašināti ar jauniem, ja tāda vajadzība radīsies.

Uzdevumu piešķiršana dalībniekiem ar pasākumu vadības sistēmas palīdzību pieļauj ļoti smalku kontroli pār to, kuri uzdevumi kādā laika momentā ir tiem pieejami, neatkarīgi no organizatoru atrašanās vietas, kas citos gadījumos varētu radīt spriedzi ar resursu sadalījumu. Tas ir būtiski tieši tādos pasākumos, kas aptver plašas teritorijas un kur piedalās daudzi dalībnieki, kā tas ir ar auto orientēšanos. Veidojot dinamiskus pasākumus no šādas pieejas var gūt labumu, piemēram:

- padarot uzdevumu pieejamu dalībniekam kādā konkrētā laika momentā neatkarīgi no atrašanās vietas, piemēram, kontrolēts masu starts no vairākām vietām vienlaicīgi;
- padarot uzdevumu pieejamu atkarībā no dalībnieka rezultātiem līdz šim, piemēram, vairāku līmeņu pasākumā, kur nākošais līmenis kļūst pieejams tikai, kad ir izpildīts iepriekš definēts minimālais apjoms iepriekšējā līmenī;
- piešķirot uzdevumu dalībniekam, balstoties uz kopējo pasākuma stāvokli, piemēram, lai veicinot vienmērīgu dalībnieku izkliedi pasākuma teritorijā.

Kā uzdevuma apraksts var būt jebkāds saturs, ko iespējams nogādāt lietotājam ar tīmekļa pārlūkprogrammas palīdzību – tekstuāla informācija, attēli, multimēdiu datnes,

piemēram, kā parādīts 4.7. un 4.8. attēlos. Gadījumā, ja sistēmas lietotājs izmanto mobilo iekārtu, lai piekļūtu tai, ir jāņem vērā gan tās ekrāna izmērs, gan pārsūtāmais datu apjoms. Lietotājs var saskarties ar potenciāli vāju GSM tīkla signālu, piemēram, biezā mežā vai ielejā, un, attiecīgi, arī lēnu datu pārraidi, tāpēc tipiskais datu apjoms, kas tiek pārsūtīts vienā pieprasījuma/atbildes reizē, tika samazināts zem 10 kilobaitiem.

[+] checkpoint42 (100 points
/ 1 visitor)

[Map](#)

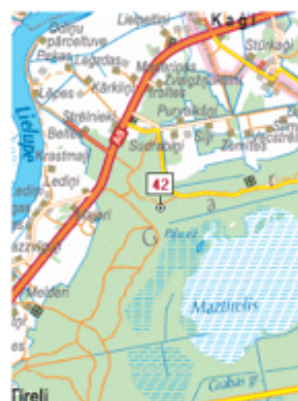
One, two, three,
Until the soul leaves free...

42-1 [S??? S??? T??? Z??]

[sarga savu tēvu zemi]

[Menu](#)

Att. 4.7.: Uzdevums



Att. 4.8.: Karte

Sekošana uzdevumu izpildes gaitai un rezultātu novērtēšana pasākumu vadības sistēmā notiek reālā laikā – tiklīdz dalībnieks reģistrē sistēmā savu atbildi uz jautājumu, tā nekavējoties tiek salīdzināta ar sistēmā definēto pareizo atbildi un, balstoties uz rezultātu, tiek noteikts konkrētā uzdevuma izpildes statuss. Šie dati nekavējoties ir pieejami pasākuma organizatoriem, kas pieļauj uzdevumu izpildes gaitas un dalībnieku sniegumu monitorēšanu, nepieciešamības gadījumā veicot korektīvas darbības, piemēram, labojot kļūdainu uzdevumu aprakstu vai novēršot krāpšanu. Atkarībā no pasākuma noteikumiem un uzdevumu tipa, šie dati var būt pieejami arī pašiem dalībniekiem.

Lai optimizētu atbilžu ievadi sistēmā no mobila ierīcēm, tika novērtētas vairākas ievades metodes:

- izvēle no iepriekšdefinētiem atbilžu variantiem – tas samazina iespēju kļūdīties ievadot atbildi; tehniski limitējošais faktors ir ekrāna izšķirtspēja; uzdevuma definēšanas limitējošais faktors ir jautājuma formāts;
- tekstuālā ievade – bieži sastopamas kļūdas, kuras iespējams risināt ar:
 - predefinētu ievades formātu;

- limitētu ievades garumu;
- normalizējot saņemtos datus – ignorējot lielos/mazos burtus, diakritiskās zīmes, speciālos simbolus;
- atgriežot ierobežotu daudzumu ar mājieniem nepareizas ievades gadījumā;
- QR kods – lielākā daļa šobrīd lietošanā esošo mobilo ierīču satur iebūvētu fotokameru, kuru, kombinācijā ar atbilstošu programmatūru, var izmantot, lai ar viena klikšķa palīdzību atvērtu tīmekļa pārlūkprogrammā URL saiti, kas nolasīta no QR koda, un šādā veidā reģistrētu atbildi. Tomēr arī šajā gadījumā eksistē tehniski limitējošie faktori – ir pieejams neskaitāms skaits QR kodu atpazīstošu programmu, tīmekļa pārlūkprogrammu un mobilo ierīču kombinācijas, kuras visas organizatoriem nav iespējams pārbaudīt un, integrācijas problēmu gadījumā, sniegt dalībniekiem konsultācijas par to novēršanu. Papildus ir jāņem vērā fakts, ka QR koda nolasīšana ir atkarīga no ārējā apgaismojuma daudzumu, fona krāsas, uz kura attēlots QR kods, izmēra utt., kā rezultātā šī ievades metode nav piemērota, lai to izmantotu pasākumos, kas notiek diennakts tumšajā laikā.

Ieviešot pasākumu vadības sistēmā dinamiskā kontrolpunkta iegulto iekārtu, tika veikti sistēmas uzlabojumi, kas nodrošina mainīgo koda pieņemšanu, pamatprincipos līdzīgi kā tas notiek internetbankās [244]. Dinamiskais kontrolpunkts pārraida iepriekšdefinētu laiku kodu, kas ir vienāds visām komandām, piemēram, 15 minūtes tiek raidīts kods 4321. Tā kā tiek pieņemts, ka gan dinamiskajam kontrolpunktam, gan pasākumu vadības sistēmai ir sinhronizēts reālais laiks, tad pasākumu vadības sistēma, tiklīdz tiek uzsākts raidīt jaunu kodu, to pieņems kontrolpunktā definētajā periodā, t.i. 15 minūtes, kā arī tieši tikpat ilgu laiku pēc tam, t.i. otras 15 minūtes. Tas tiek darīts, lai nodrošinātos pret risku, ka viens dalībnieks var saņemt kodu nodot citam dalībniekam, kurš neapmeklējot konkrēto punktu, veiktu tā autorizāciju. Taču šādi, pateicoties koda "sapūšanai", būs iespējams noteikt laika logu, kad konkrētais dalībnieks ir apmeklējis konkrēto kontrolpunktu. Tas ne tikai palīdzētu identificēt negodīgos dalībniekus, jo tad šī konkrētā punkta autorizācija izceltos uz pārējo fona, bet arī, iespējams, izskaustu dalībnieku paradumu savākt vairāku kontrolpunktu informāciju, taču autorizēt tos tikai pēc kāda laika vienlaicīgi.

Automātiska rezultātu novērtēšana reālā laikā pieļauj sarežģītāku algoritmu izmantošanu, piemēram, dinamiski piešķirams koeficients uzdevumam konkrētā pasākuma laikā, kas balstīts uz dalībnieku skaitu, kas to ir izpildījuši, kā arī nekavējoša rezultātu publicēšana neatkarīgi no dalībnieku skaita.

Rezultātu novērtēšana var iekļaut arī GPS pēdu analīzi, kas izpaužas tā, ka nekavējoties pēc pasākuma finiša paši dalībnieki vai organizatori var augšupielādēt pasākumu vadības sistēmā GPS pēdu datni GPX formātā un tur tiks veikta iesūtīto datņu analīze, ņemot vērā šādus aspektus:

- maksimālais ātrums – uz ceļiem eksistē ātruma ierobežojumi, kas jāievēro. Ja uz laika zīmoga un koordinātēm, kas saņemtas no GPS pēdām, balstīto aprēķinu rezultātā iegūtais ātrums pārsniedz konkrētajā periodā definēto maksimālo ātrumu, sistēmā tiek reģistrēts atbilstošs incidents katram šādam gadījumam un nepieciešamības gadījumā tiek piemērots disciplinārsods attiecīgajam dalībniekam. GPS pēdas, kas ierakstītas uz tipiskām GPS iekārtām, ir aptuvenas – tajās ir mazāk atlikto punktu taisnos ceļa posmos un vairāk pagriezienos un/vai likumos. Parasti viens punkts tiek atlikts reizi sekundē, kas arī ir kalpo par laika zīmogu. Tas var novest pie vairākām problēmām, kā piemēram, taisnos ceļa posmos var netikt piefiksētas viegli liektas līnijas, kas, savukārt, samazina paveikto distanci un nedaudz palielina aprēķināto ātrumu. Pagriezienos punkti var būt reģistrēti katru sekundi, kas noved pie nedefinētas atstarpes laikā (apmēram 1 līdz 2 sekundēm) un tam ir nozīmīgs iespaids uz aprēķināto ātrumu. Lai pielāgotos šādām aprēķinu kļūdām un samazinātu viltus pozitīvos incidentus, pasākumu vadības sistēmā ir definēts minimālais laika sprādis, kas tiek pakļauts analīzei, kā arī ātruma un perioda, kurā tas tiek skatīts, parametri, piemēram:

- laika sprādis vismaz 10 sekunžu garumā, kam būtu jāsamazina laika zīmoga kļūdu skaits zem 10
- definēts ātrums vismaz 100 km/h gadījumos, kur ātruma ierobežojums ir 90 km/h;
- definēts periods, piemēram, 60 sekunžu garumā, kurā tiek skatīts braukšanas ātrums un, deviāciju gadījumā, rezultāts norādīs uz tā pārkāpšanu, izslēdzot

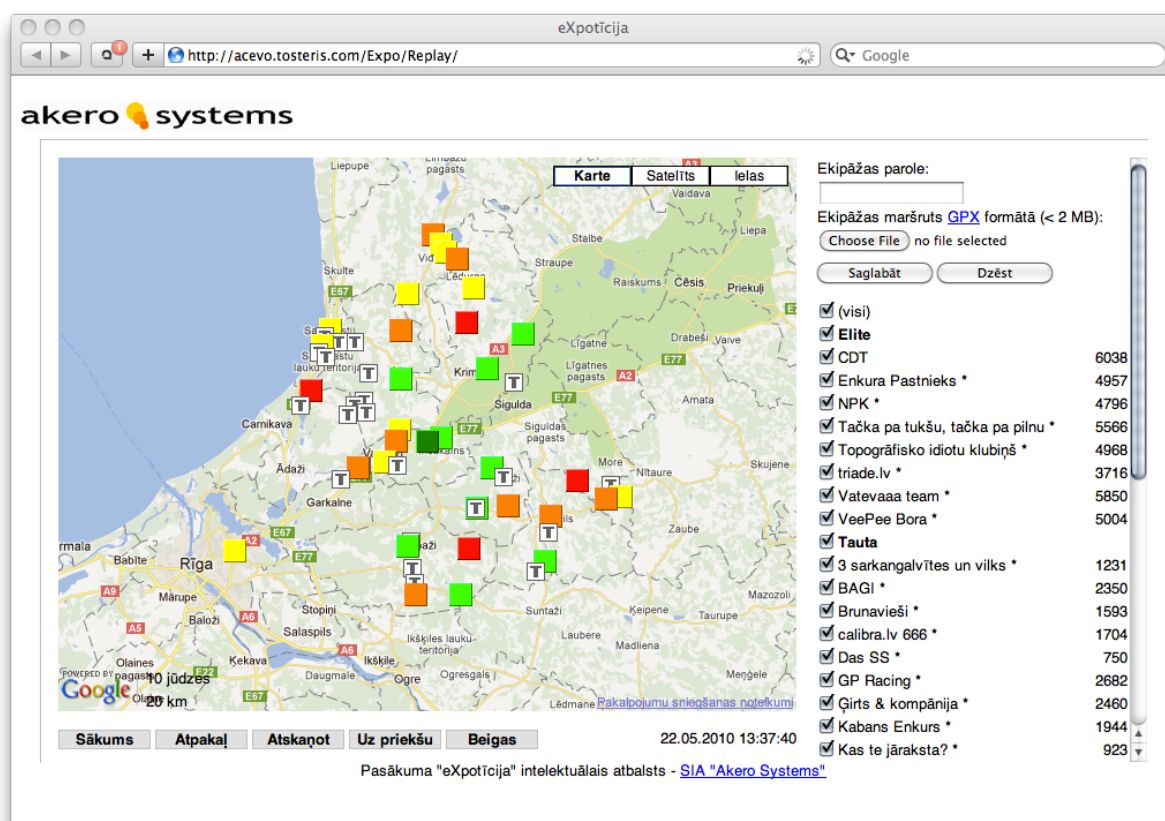
iespēju īslaicīgu pāatrināšanos, piemēram, lai veiktu apdzišanas manervu, uzskatīt par pārkāpumu. Tiek ņemts vērā arī ļoti augsts ātrums, kas var rasties datu integritātes problēmu dēļ – divu viens otram sekojošu GPS pēdu punkti atrodas pārāk tālu viens no otra, kas – iespējams – var norādīt uz GPS uztvērēja kļūdu vai arī datu pielabošanu;

- kontrolpunktu autorizācija – uzdevums var tikt uzskatīts par izpildītu, ja pasākuma dalībnieks ar savu GPS uztvērēju ir apmeklējis noteiktu zonu iepriekšdefinētā attālumā no kontrolpunkta. Šāda iespēja pieļauj viedot pasākumus, kur reālo kontrolpunktu vietā ir virtuālie, kas definēti kā GPS koordinātes un pasākuma dalībniekiem, apbruņotiem ar GPS uztvērēju, kas ieraksta datus par GPS pēdēm, šīs koordinātes ir jācenšas maksimāli tuvu apmeklēt. Šādā pasākuma gadījumā ātrums spēlē ļoti nozīmīgu lomu kontrolpunktu autorizācijas novērtēšanā un tajā, vai dati nav pielaboti, jo, ja kontrolpunkts ir sasniegts ar kājām, ir pilnīgi pieļaujams, ka dalībnieka ātrums kontrolpunkta teritorijā nepārsniegs, piemēram 15 km/h.

Papildus iegūtie GPS dati var tikt izmantoti, lai pēc pasākuma piedāvātu vizuālu tā reprezentāciju. Pasākumu vadības sistēmas gadījumā tas nozīmē dalībnieku pozīcijas attēlojumu uz Google piedāvātajām kartēm kopā ar viņu rezultātiem katrā konkrētā laika posmā, kā tas parādīts 4.9. attēlā. Šāda vizualizācija var būt noderīga organizatoriem, lai novērtētu pasākuma realizāciju, kā arī dalībniekiem būtu interesanti salīdzināt savu sniegumu ar konkurentiem.

Otra iespēja rezultātu atainošanai kājnieku orientēšanās gadījumā ir uz kāda konkrēta objekta kartes, piemēram, Brīvdabas etnogrāfiskā muzeja (skatīt 4.10. attēlu). Tiesa, konkrētā pasākuma realizācija ļāva sekot līdz pasākuma progresam jau spēles gaitā.

Pasākumu vadības sistēmā savstarpējās komunikācijas atbalsts ir izpildīts ziņu formā, kas var tikt nosūtītas individuāli vai grupai, tiek reģistrētas sistēmā un piegādātas adresātam, izmantojot elektroniskā pasta uz SMS teksta ziņām vārteju. Šī pieeja efektīvi atrisina organizatoru problēmu ātri informēt dalībniekus par radušajām izmaiņām pasākuma gaitā gan laika, gan izmaksu ziņā. Savukārt, dalībniekiem šādi komunicējot ar organizatoriem, tiek risināta problēma par nepieciešamā organizatoriskā resursa izdalīšanu konkrētā incidenta risināšanai, izvairoties no gadījumiem, kad tie tiek izdalīti par maz



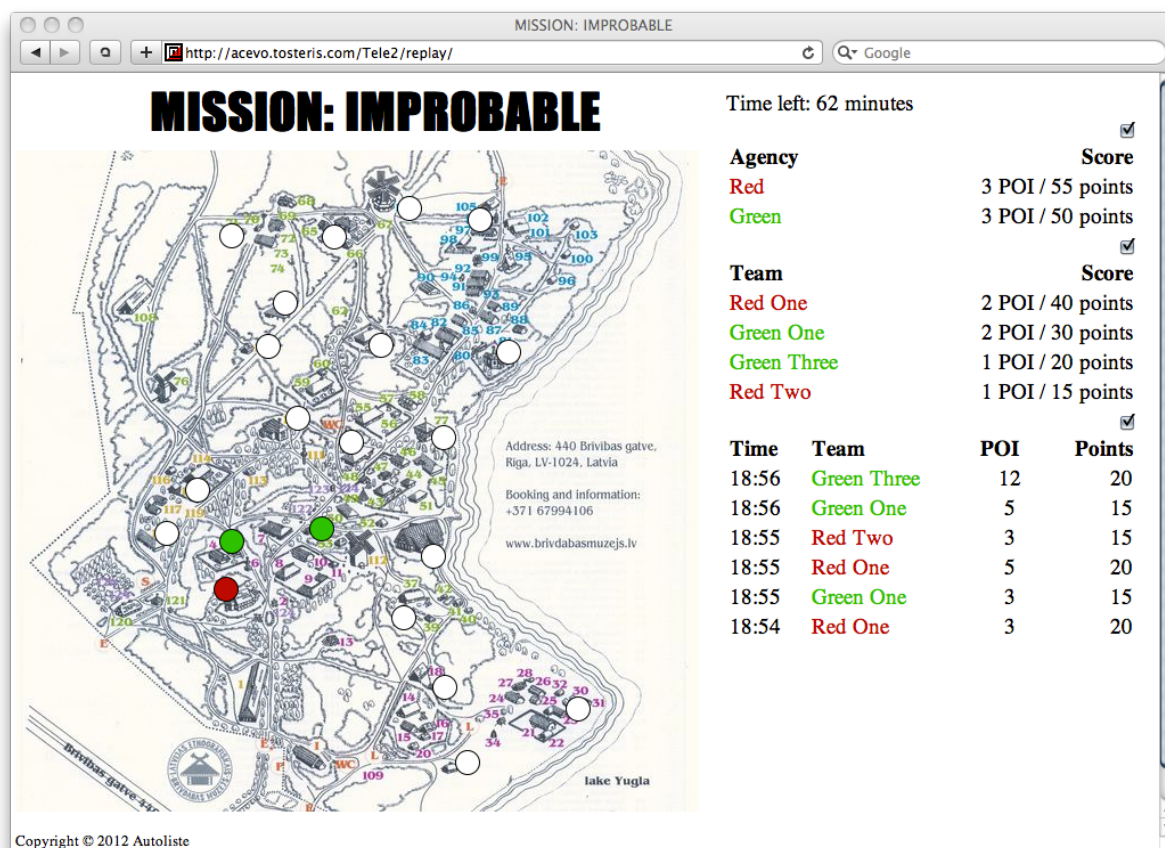
Att. 4.9.: Autoorientēšanās pasākuma atkārtotas atskaņošanas piemērs

vai par daudz.

4.3.2.1. Programmatūras nākotnes perspektīvas

Ņemot vērā mobilo iekārtu un lietotņu iespēju attīstības tendences, ir izstrādāta jauna pasākumu vadības sistēmas arhitektūra (skatīt 4.11. attēlu), kur galvenais uzsvars likts uz mobilam lietotnēm kā sistēmas saskarni pasākumu dalībniekiem vai organizatoriem. Savukārt, pati pasākumu vadības sistēma nodrošina savstarpējo datu apmaiņu starp visiem pasākumā iesaistītajiem un to izmantotajām lietotnēm, kā arī saglabā iespēju organizatoriem caur to veidot pasākumu, nodrošināt dalībnieku reģistrāciju u.c. organizatoriskos darbus.

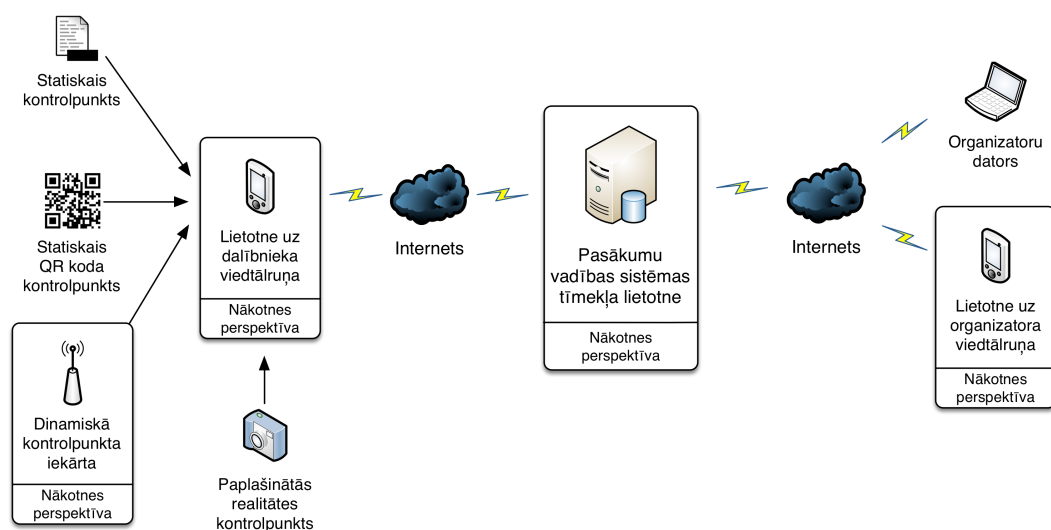
Jaunā pasākumu vadības sistēmas tīmekļa lietotne ir veidota izmantojot HTML 5. versijas marķēšanas valodu un JavaScript, kas pieļauj informācijas apmaiņu ar lietotāju bez lapas pārlādes, kā tas bija iepriekšējā pasākumu vadības sistēmas versijā. Tīmekļa lietotne saturēs sekojošus moduļus:



Att. 4.10.: Kājnieku orientēšanās pasākuma atkārtotas atskaņošanas piemērs

- dalībnieku registrāciju;
- dalībnieku komandu izveidi un pārvaldību;
- komandu pieteikšanos dalībai pasākumā;
- ziņapmaiņas sistēmu;
- organizatorisko daļu pasākuma izveidei;
- pasākuma kontrolpunktu pārvaldību;
- komandu apstiprināšanu dalībai pasākumā;
- komandu pārvaldību;
- pasākuma pārvaldību;
- rezultātu apkopošanu un pasākuma statusa atainošanu.

Savukārt, lietotāja viedtālrunu lietotnes ir uzprojektētas, bet vēl nav sāktas to izstrāde.



Att. 4.11.: Pasākumu vadības sistēmas nākotnes arhitektūra

Tiks izstrādātas Apple iOS un Google Android platformām piemērotas lietotnes, pamatojoties uz to, ka šīs platformas sastāda 88 procentus no izmantojamajiem viedtālruņiem, kur ar 72 procentiem dominē Android iekārtas un tām ar 16 procentiem seko iOS iekārtas [245].

Viedtālruņu lietotnes nodrošinās sekojošas funkcijas:

- ģeolokācija – gan nosūtīt dalībnieka atrašanās vietas koordinātes uz pasākumu vadības sistēmu (gan GPS pēdu analīzei, gan lai novērstu krāpšanos), gan saņemot un attēlojot dalībniekam kontrolpunkta atrašanās vietas koordinātes uz kartes;
- kontrolpunktu vadība – līdzšinējā uz dalībniekiem un organizatoriem attiecināmo kontrolpunktu vadība (gan kontrolpunktu autorizācija, gan uzstādīšana/noņemšana) no tīmekļa lietotnes tiek pārcelta uz viedtālruņa lietotni;
- paplašinātā realitāte – jauns kontrolpunktu autorizācijas veids, kurš nodrošinātu to, ka dabā nebūtu jāizvieto stacionāri kontrolpunkti, bet dalībnieks atrodoties konkrētajās koordinātēs un izmantojot paplašināto realitāti varētu iegūt nepieciešamo informāciju;
- ziņapmaiņas sistēma – dalībniekam/komandai ar organizatoriem, tādējādi atsakoties no līdz šim izmantotās SMS vai e-pastu izmantošanas;
- citas funkcijas, kuras nākotnē var būt nepieciešamas pasākumu organizēšanā.

4.3.3. Aparatūra

Projektējot un izstrādājot aparātūras daļu, kā mērķis tika uzstādīts izveidot risinājumu, kas būtu nedārgs gan ražošanā, gan uzturēšanā, ar vienkāršu gala lietotāja saskarni, kā arī ar zemu enerģijas patēriņu. Ņemot vērā iepriekšminēto par pamatu dinamiskā kontrolpunkta iegultas iekārtas izstrādei tika sastādīts sekojošu tehnisko prasību saraksts:

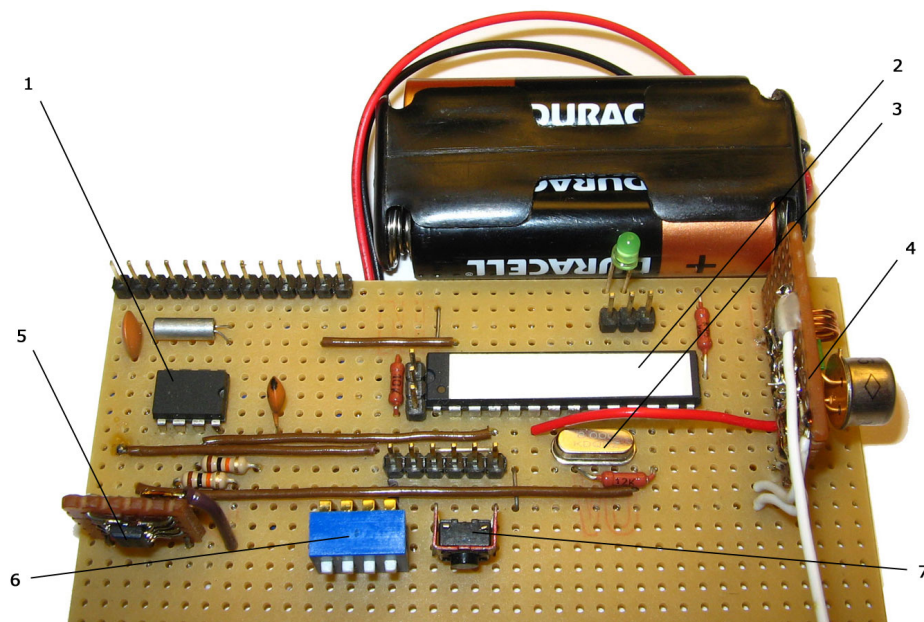
- nepieciešams izmanto mazas darbības rādiusa (SRD) iekārtas [246] radio raidītāju, kas izmanto FM viļņus kā gala lietotāja saskarni;
- iekārtai jāstrādā pēc iepriekš ieprogrammēta saraksta, izmantojot RTC jeb reāllaika pulksteni;
- iekārtai jāvar saglabāt zināms daudzums datu, kas tiek izmantoti datu pārraidē gala lietotājiem;
- iekārtai ir jāstrādā autonomi bez barošanas elementu maiņas vismaz 350 stundas jeb apmēram divas nedēļas.

4.3.3.1. Dinamiskā kontrolpunkta iegultās iekārtas 1. prototips

Viens no veidiem kā panākt nedārgas iegultās elektroniskās iekārtas izstrādi ir izmantot par pamatu kādu no atvērtā pirmkoda elektronikas prototipēšanas platformām. Šī darba ietvaros par šādu pamatu tika izvēlēta Arduino [32] platforma, kas izceļas ar savu popularitāti un relatīvi zemaļām iekārtas komponentu cenām. Konkrēti tika izvēlēts Arduino Pro modelis, kas tiek atbalstīts iegulto iekārtu operētājsistēmā MansOS [247], [201].

Kontrolpunkta iekārtas prototips (skatīt 4.12. attēlu) ir balstīts uz Atmel ATmega328P [31] 8 bitu mikrokontroliera ar ārējo 8 MHz kristāla oscilatoru. Lai nodrošinātu iekārtas komunikāciju ar datoru programmatūras augšupielādei un konfigurācijai, pēc vajadzības tai var pieslēgt uz FTDI Chip [248] mikroshēmas balstītu USB kabeli, kas nodrošina virknes komunikāciju. Tas palīdz samazināt iekārtai nepieciešamo komponentu daudzumu, kā arī samazina patērējamo enerģiju. Lai nodrošinātu programmatūras augšupielādi, mikrokontrolieris ir ieprogrammēts ar atbilstošu ielādes kodu (*bootloader*).

Lietotāja saskarnei tika izvēlēts SRD radio raidītājs ar iespēju raidīt FM viļņos tālrunim, ka ir plaši pieejamas atbilstošas uztveršanas iekārtas. Šāda tipa uztvērēji ir



Att. 4.12.: Dinamiskā kontrolpunkta iegultās iekārtas 1. prototips, kur: 1 – RTC mikroshēma, 2 – Atmel mikrokontrolieris, 3 – 8 MHz kristāla oscilators, 4 – SRD radio raidītājs, 5 – EEPROM atmiņas mikroshēma, 6 – konfigurācijas slēdzis, 7 – atiestatīšanas poga

uzstādīti gandrīz katrā automašīnā, kā arī ir iespējams iegādāties nedārgu (līdz 5 EUR) portatīvo FM uztvērēju, bez tam mūsdienās vairākums mobilie telefoni kā vienu no iekļautajām funkcijām satur arī FM uztvērēju. Šai lietotāja saskarnei kā atbilstošākais datu pārraides veids tika izvēlēts Morzes kods. Šādu izvēli vēl vairāk motivēja salīdzinoši vieglā programmatūras izstrāde, kā arī iespēja radīt papildus uzdevumu pasākumu dalībniekiem.

SRD radio raidītājs tika izstrādāts par pamatu ņemot Buraka Incepināra (*Burak Incepinar*) izstrādāto iekārtu [249]. Kā sākotnējā dizaina modifikācijas var minēt barošanas avota komutāciju caur mikrokontrolieri, kā arī Morzes koda pārraidi ar PWM modulācijas palīdzību no mikrokontroliera parasta audio ievada vietā. Tika izskatīta arī iespēja lietot jau gatavu Niigata Seimitsu ražotu programmējamu FM raidītāja moduli NS73M [250], taču tā tika atmesta relatīvi augstāku izmaksu, salīdzinoši sarežģītākas savstarpējās saskarnes ar mikrokontrolieri dēļ, kā arī iegultajai iekārtai nebija tik augstu prasību pret frekvences precizitāti un raidīšanas jaudu kā piedāvāja gatavais modulis. Turpinot izpēti, vēlāk tika atklāts vēl viens risinājums [251], kam nepieciešams vēl mazāk komponentu nekā izvēlētajam risinājumam un kas ir pilnībā mikrokontroliera bāzēts, taču nav pilnīgi

stabils un pietiekoši jaudīgs, kā arī tam ir ļoti ierobežots darbības laiks, jo veicot raidīšanu tiek modificēti mikrokontroliera iekšējā RC oscilatora kalibrācijas reģistri un tie ar laiku sabojājas. Tika izskatīta arī iespēja izmantot AM viļņu raidītāju [252], taču šī ideja tika atmesta, jo AM viļņi mūsdienās vairs nav tik populāra frekvenču josla un modulācijas tips, kā rezultātā arī derīgie uztvērēji vairs nav tik triviāli pieejami.

Lai nodrošinātu korektu un precīzu iegultās iekārtas darbību atbilstoši ieprogrammētajam darbību sarakstam, tajā iebūvēta arī reāllaika pulksteņa jeb RTC mikroshēma NXP PCF8593 [253]. Komunikācija ar šo mikroshēmu, notiek izmantojot I2C kopni. Savukārt, lai iegultajai iekārtai nodrošinātu pietiekošu apjomu ar pastāvīgo atmiņu pasākuma dalībniekiem pārraidāmā satura saglabāšanai, tā ir aprīkota ar uz I2C kopnes bāzētu EEPROM atmiņas mikroshēmu Atmel AT24C64C [254]. Konkrētajā prototipā lietotās EEPROM atmiņas izmērs ir 64 kilobaiti un pieļauj 2048 4 līdz 8 ciparu garu kontrolpunkta kodu saglabāšanu, kas var tikt mainīti no 1 līdz 30 reizēm stundas laikā, nodrošinot no 68 līdz pat 2048 stundām nepārtrauktas darbības ar nosacījumu, ka iekārta ir aprīkota ar pietiekošas ietilpības baterijām.

Enerģijas patēriņu izstrādātajā dinamiskā kontrolpunkta iegultajā iekārtā nosaka atsevišķu komponentu patēriņš, kā arī to noslodzes cikli (*duty cycles*). Enerģijas mērījumi ir apkopoti un redzami 4.1. tabulā. Šo datu analīze atklāja, ka dinamiskā kontrolpunkta iegultā iekārta, standarta gadījumā izmantojot 2 AA tipa *Alkaline* baterijas ar tipisko ietilpību 2000 mAh, var autonomi darboties līdz pat 536 stundām jeb vairāk kā trīs nedēļas (skatīt 4.2. tabulu).

Režims	Patēriņš, mW
Iekārta gulī	0,89
Konfigurācijas režīms (FM raidītājs izslēgts)	11,23
Iekārta aktīva (FM raidītājs ieslēgts)	15,12

Tabula 4.1.: Dinamiskā kontrolpunkta iegultās iekārtas enerģijas patēriņš dažādos darba režīmos

Iegultās iekārtas programmatūra tika projektēta robusta, tā, lai vēlāk to darbinot, nevajadzētu neko vairāk par datoru ar USB portu un virknes termināla emulācijas programmu, piemēram, Minicom [255]. Lai iekārtu varētu konfigurēt, vispirms uz tās konfigurācijas slēdzis ir jāpārslēdz ieslēgtā pozīcijā un jāveic tās atiestatīšana, pēc kā termināla

Kontrollpunkta koda garums, skaitļi	Koda pārraides ilgums, sekundes	Enerģijas patēriņš stundā, mWh	Autonomās darbības ilgums, h (dienas)
4	18	10,74	536 (22)
6	27	11,87	485 (20)
8	36	12,53	460 (19)

Tabula 4.2.: Autonomais kontrolpunkta iekārtas darbības laiks, lietojot dažādus pārraidāma koda garumus un guļot 8 sekundes starp divām secīgām pārraidēm

emulācijas programmā var veikt iekārtas konfigurāciju, izmantojot C. pielikumā minētās komandas un konkrētā pasākuma specifiku. Visas konfigurācijas komandas un to parametri ir cipariski un tām visām ir vienots formāts (4.1.), kur A apzīmē komandu, B – komandas pirmo parametru, C – neobligātu komandas otro parametru (atkarīgs no komandas, skatīt C. pielikumu), $*$ – argumentu atdalītāju, bet $\#$ – komandas noslēgumu.

$$A * B [* C] \# \quad (4.1.)$$

Komandas un parametru garumu ierobežo tikai mikrokontroliera ATmega328P virknes bufera izmērs, kas ir 128 baiti. Kad komanda uz iegultās iekārtas ir apstrādāta, vairumā komandu gadījumu tiek atgriezti paziņojumi, kuri sākas ar nosūtītās komandas numuru un tālāk seko OK vai NOK (*Not OK*), kas savstarpēji ir atdalīti ar $*$ un virkni noslēdz $\#$. NOK paziņojums parasti nozīmē, ka vai komandai ir bijis nekorekts formāts vai arī mikrokontrolieris nav varējis pilnībā nolasīt virknes buferi. Tāpat konfigurācijas režīms var tikt izmantots, lai nolasītu atmiņas reģistros saglabātās parametru vērtības, kuras glabājas mikrokontroliera iekšējā 1 kilobaitu lielajā EEPROM atmiņā, kā arī pārraidāmos kodus, kas glabājas ārējā EEPROM mikroshēmā. Datu nolasīšana notiek, izmantojot to pašu komandu formātu (4.1.).

4.3.3.2. Dinamiskā kontrolpunkta iegultās iekārtas 2. prototips

Ir uzsākts darbs pie dinamiskā kontrolpunkta iegultās iekārtas 2. prototipa radīšanas, kurai FM frekvenču raidītāja vietā būtu iebūvēts Bluetooth 4.0 versijas zemas enerģijas patēriņa raidzuvēvējs. Ar šādu iekārtu būtu iespējams sazināties, atrodoties līdz 10 metru attālumā no tās. Saziņa tiktu nodrošināta ar 4.3.2.1. apakšsadaļā aprakstītās lietotnes

un viedtālrunā, kurā arī iebūvēts Bluetooth 4.0 raiduztvērējs, palīdzību.

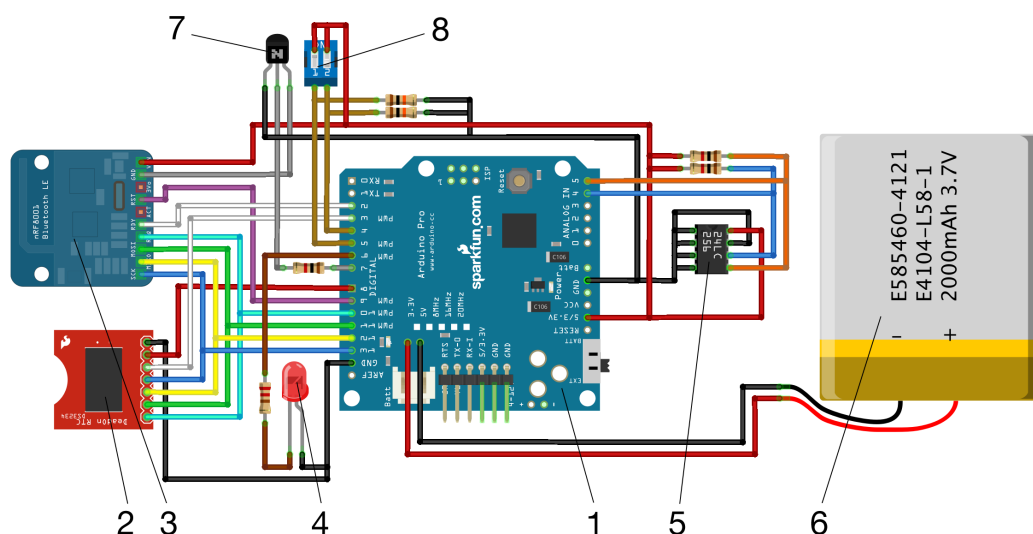
Iegultās iekārtas 2. prototips ir izveidots (skatīt 4.13. attēlu), izmantojot gatavus, rūpnieciski ražotus moduļus. Kā vadības modulis tiek izmantota Arduino Pro [32] iekārta. Tā aprīkota ar Atmel ATmega328 mikrokontrolieri un 8 MHz kristāla oscilatoru. Saziņai ar Bluetooth 4.0 iekārtām tiek lietots Bluefruit LE [256] modulis, kurš ar Arduino Pro savienots izmantojot SPI saskarni. Savukārt, lai kontrolētu laiku, tiek lietots DeadOn [257] RTC reāllaika pulksteņa modulis, kurš pievienots tai pašai SPI saskarnei. Šis reāllaika pulksteņa modulis tika izvēlēts tāpēc, ka tam ir termoregulēts kristāla oscilators, kā arī papildus rezerves 3V baterija informācijas saglabāšanas nodrošināšanai. Papildus datu un konfigurācijas uzglabāšanai, tāpat kā 1. prototipā, tiek lietota EEPROM atmiņas mikroshēma. Atklūdošanai tiek lietota 1 gaismas diode, savukārt, lai iekārtu konfigurētu, pievienoti slēdži. Kā barošanas avots tiek lietots 3.7 V 2000 mAh litija jonu akumulators.

Enerģijas taupības nolūkā, kad tiek aizmidzināts Atmel mikrokontrolieris, tiek atslēgta arī strāvas padeve Bluetooth 4.0 un RTC moduļiem. Par pirmo ir skaidrs, ka to nevajadzēs izmantot, kamēr iekārta guļ, tādejādi tiek ietaupīta enerģija. Savukārt, RTC moduļa barošanu nodrošina pati Arduino Pro iekārta un nevajadzīgos brīžos to atslēdzot, RTC moduļa barošana pāriet taupīgā režīmā uz rezerves bateriju.

Kā variants tiek izskatīta iespēja paplašināt dinamiskā kontrolpunkta iekārtu ar 3G modēmu, lai nodrošinātu vienkāršu datu pārraidi un apmaiņu pa tiešo ar pasākumu vadības sistēmu. Šāds risinājums pieļautu organizatoriem iespēju vēl dinamiskāk mainīt dalībniekiem veicamos uzdevumus.

4.4. Eksperimenti un to rezultāti

Vairākas heterogēno rīku kopuma versijas tika izmēģinātas dažādos izpētes un izstrādes stāvokļos vairākos biedrības "Autoliste", apvienības "CDT", kā arī biedrības "4x4 klubs" organizētajos pasākumos pēdējo piecu gadu laikā. Lielāka daļa šo pasākumu bija veidotas balstoties uz algoritmu īsākā ceļa meklēšanai predefinētā grafā. Dažas daļas no pasākumiem 2010. un 2011. gados balstītas uz idejām, kas aprakstītas pētījumā [224] par iesaistošu spēles elementu izstrādi, balstoties uz sociālo saskarsmi un reālām lietām un vidi.



Att. 4.13.: Dinamiskā kontrolpunkta iegultās iekārtas 2. prototipa shēma, kur: 1 – Arduino Pro iekārta, 2 – DeadOn RTC reāllaika pulksteņa modulis, 3 – Bluefruit LE Bluetooth 4.0 modulis, 4 – gaismas diode indikācijai, 5 – EEPROM atmiņas mikroshēma, 6 – litija jonu akumulators, 7 – NPN tranzistors Bluetooth 4.0 moduļa ieslēgšanai/izslēgšanai, 8 – konfigurācijas slēdži

Pirmais pasākumu vadības sistēmas izmēģinājums notika 2007. gada septembrī "Autoliste" organizētajā pasākumā "AutoChase: Descent" un bija balstīts uz SMS tekstuālo ziņu apmaiņu starp dalībniekiem un organizatoriem (skatīt 4.3. attēlu) par atrastajiem kontrolpunktiem un nākošajiem veicamajiem uzdevumiem. Taču no šī izmēģinājuma tikai gūta vērtīga mācība – nedrīkst paļauties uz mobilā operatora SMS piegādes sistēmu, izmantojot paša operatora piedāvātu publisku SMS sūtīšanas funkcionalitāti, kas ir interneta vārteja uz GSM tīklu, jo tai nav nekādas korelācijas ar ziņu nosūtīšanas prioritizācijas algoritmiem, kas nozīmē, ka, piemēram Paziņojums 2 var tikt saņemts pirms Paziņojuma 1, kas viennozīmīgi noved pie nesekvenciālas un haotiskas spēles.

Balstoties uz gūto pieredzi, tika nolemts attīstīt pasākumu vadības sistēmu citā virzienā, kas aprakstīts 4.3.2. apakšnodaļā un rezultējies ar vairākiem veiksmīgiem izmēģinājumiem no 2008. gada maija līdz 2014. gada jūnijam.

2011. gada maijā biedrība "Autoliste" organizēja savu 10 gadu jubilejas pasākumu, kurā daži no dalībniekiem nespēja godīgi – pirms starta apmeklējot iepriekš izliktos statistiskos kontrolpunktus, ieguva uz tiem publicētos kontrolpunktu autorizācijas kodus, šādi gūstot pārsvaru pār pārējiem dalībniekiem. Tas noveda pie konkrēto komandu diskvalifi-

kācijas un tika nolemts, ka sistēmai ir nepieciešams uzlabojums dinamiskā kontrolpunkta iegultas iekārtas formā, kam ir jābūt pietiekoši mazai un, tādejādi, viegli paslēpjamai, kā arī jādarbojas automātiski un tikai no pasākuma starta līdz finišam.

Pēc trīs mēnešu ilgas izstrādes 4.3.3.1. apakšnodaļā aprakstītās iegultās iekārtas prototips bija gatavs un tika notestēts biedrības "Autoliste" 2011. gada septembrī organizētajā nakts auto orientēšanās pasākumā Tīreļpurvā. Testus veica kopā 20 dalībnieku komandas, kur katrā bija 2 līdz 6 dalībnieki.

Līdz 2014. gada jūnijam heterogēno rīku kopums izglītībai un izklaidei reālā laikā ir pārbaudīts darbībā kopā 23 dažādos pasākumos, kur piedalījušās no 5 līdz 30 komandām katrā no 2 līdz 8 dalībniekiem, un tie ir iekļāvuši sekojošas variācijas:

- vienu pasākumu ar dinamiskā kontrolpunkta iegulto iekārtu, kā arī statistiskajiem kontrolpunktiem;
- trīs pasākumus, kur izmantoti tikai QR kodi kā statistiskie kontrolpunkti;
- 5 pasākumi, kur tika vērtētas dalībnieku nodotās GPS pēdas;
- divi pasākumi, kur dalībniekiem bija jāatrod organizatoru automašīna pasākuma reģionā, sekojot viņu tiešsaistē pārraidītajām GPS koordinātēm, lai saņemtu uzdevumu, pēc kā bija jāatrod viens vai vairāki statistiskie kontrolpunkti un atkal jāatkārto organizatoru atrašana un "noķeršana";
- 12 pasākumi tikai ar statistiskajiem kontrolpunktiem un citiem uzdevumiem, piemēram, testu uz laiku vai tiesnešu tiesātu uzdevumu, kur rezultātu ievada paši tiesneši.

Kā arī ir sagatavots, bet vēl nepublicēts plašākai publikai statistisks biedrības "Autoliste" agrāk organizēta pasākuma variants nedaudz samazinātā formā. Tiek plānots, ka šajā statistiskajā pasākumā finiša autorizācijai tiks izmantota arī dinamiskā kontrolpunkta iegultā iekārta.

4.5. Secinājumi

Šajā nodaļā aprakstīts heterogēnu rīku kopums izglītībai un izklaidei, kas sastāv no programmatūras pasākumu vadībai un dinamiska kontrolpunkta aparatūras. Radītie rīki apstiprina darbā izvirzīto hipotēzi, ka ir iespējams izstrādāt iegultās sensorās iekārtas un

risinājumus, par pamatu ņemot 1.3. nodaļā aprakstīto modeli un 1.4. nodaļā aprakstīto vispārīgo iegulto sensoro iekārtu izstrādes metodi.

Pētniecības un izstrādes gaitā iegūta pieredze, izstrādājot un pārbaudot reālā darbībā uz tīmekļa tehnoloģijām balstītu lietojumprogrammu, kā arī dinamiskā kontrolpunkta iegulto iekārtu ar reāllaika pulksteni precīzai darbībai, paplašinātu atmiņu pārraidāmās informācijas saglabāšanai un SRD FM frekvences raidītāju informācijas pārraidei.

Vēl autors secina, ka bez regulāras iespējas izmēģināt darbībā gan pasākumu vadības sistēmu, gan iekārtas nebūtu iespējama to attīstība līdzšinējā līmenī, kad liela daļa radušos gan tehnisko, gan organizatorisko problēmu ir veiksmīgi pārvarētas.

Iezīmējot nākotnes perspektīvu, tiek turpināts darbs pie pasākumu vadības sistēmas attīstības (skatīt 4.3.2.1. apakšsadaļu), kā arī tiek izstrādāta dinamiskā kontrolpunkta iegultās iekārtas 2. versija (skatīt 4.3.3.2. apakšsadaļu). Tas ļautu neatpalikt attīstībā un nodrošināt pēc iespējas dažādāku veidu pasākumu organizāciju.

Galvenais gūtais secinājums, izstrādājot šo rīku kopumu, ir pareizi pieņemtais lēmums jau pašā izstrādes sākumā orientēties uz mobiliem risinājumiem. Līdzšinējās iekārtu miniaturizācijas un jaudas pieauguma, kā arī lietošanas izplatības tendences tikai pierāda šī lēmuma pareizību.

Tīmekļa servisi zema enerģijas patēriņa bezvadu sensoru tīklos

Šajā darba nodaļā aprakstīti rezultāti, ko autors sasniedza radot bezvadu sensoru tīkliem piemērotu servisorientētu arhitektūru jeb *WSN-SOA*.

Tālāk aprakstītie pētījumi atbilst 1.3. apakšnodaļā aprakstītā vispārīgā monitoringa modeļa abām vienkāršākajām realizācijas sarežģītības pakāpēm. Pētījumu par tīmekļa servisu izmantošanu zema enerģijas patēriņa bezvadu sensoru tīklos aprobācijai tika izstrādātas piemērotas iegultās iekārtas – sensoru mezgls un bāzes stacija. Ar to palīdzību iespējams veikt atjaunojamo energo resursu – saules un vēja – monitoringu ilgstošā laika periodā, paralēli vācot arī informāciju par laika apstākļiem kopumā.

5.1. apakšnodaļā tiek aprakstīts pētījumu konteksts un motivācija, savukārt, 5.2. apakšnodaļā apskatīti esošie risinājumi. Nākošajā, 5.3. apakšnodaļā aprakstīts radītais risinājums un izaicinājumi, ar kuriem autors saskāries. 3.4. apakšnodaļā aprakstīti veiktie eksperimenti un izveidotās iegultās iekārtas. Nodaļu noslēdz 5.5. apakšnodaļa, kurā aprakstīti secinājumi un nākotnes plāni.

5.1. Ievads

Bezvadu sensoru tīkli sastāv no dažiem līdz pat vairākiem simtiem vai tūkstošiem sensoru mezglu, kas var būt izvietoti kā pagadās un veic fizisko vai apkārtnes monitoringu, piemēram, temperatūru, mitrumu, spiedienu utt. Dati, ko tie ievāc, parasti tiek noraidīti uz kādu centrālo punktu, kurš veic to apkopošanu, uzkrāšanu un/vai nosūtīšanu tālāk. Tieši datu pārsūtīšana parasti arī sagādā vislielākās rūpes – gan no enerģijas patēriņa viedokļa (raidītāja darbināšana ir viens no energopatērējošākām darbībām), gan no datu apmaiņas

viedokļa starp diviem nesaistītiem sensoru tīkliem. Pēdējais aspekts ir saistīts ar to, ka joprojām nav vienota *de facto* standarta datu apmaiņai bezvadu sensoru tīklos [258].

Parasti komunikācija bezvadu sensoru tīklos tiek organizēta *Multi-hop* jeb vairāku lēcienu formā ierobežotās raidīšanas jaudas un attāluma dēļ, tā panākot, ka attālāki sensoru tīkla mezgli sūta datus mezgliem, kas atrodas tuvāk bāzes stacijai utt. līdz tā sasniegta.

Taču šāda pieeja var izrādīties neefektīva gadījumos, kad sensoru mezgli nav blīvi izvietoti un attālums starp tiem ir pārāk liels, kā rezultātā liels apjoms enerģijas tiek patērēts tieši datu pārraidei šajā distancē. Tiesa, var gadīties, ka ļoti blīvā sensoru tīklā mezgli, kas atrodas tuvu bāzes stacijai, ir spiesti visu laiku pārsūtīt datus no attālākiem mezgliem, un tādejādi ātrāk iztērē savas enerģijas rezerves varbūt nemaz nepaveicot to, kas tiem jādara.

Tas radīja autora interesi izpētīt šo problēmu padziļināti un rast iespēju decentralizēt komunikāciju sensoru tīklā. To iespējams darīt pielāgojot sensoru tīkliem servisa-orientēto arhitektūru [259], kuras daļa ir tīmekļa servisi, savukārt, semantiskie tīmekļa servisi ir daļa no semantiskā tīmekļa [14].

5.1.1. Motivācija

Kā alternatīva esošajai tiešajai komunikācijai eksistē relatīvi jauna pieeja efektīvai datu savākšanai un pārsūtīšanai, kas balstīta uz mobiliem sensoru tīkla mezgliem jeb "datu mūļiem", kas apveltīti ar bezvadu saziņas iespēju, kā arī pietiekošu atmiņas apjomu, kurā saglabāt datus, kas iegūti no lauka sensoriem. Datu mūlis pārvietojas pa sensoru lauku, savācot datus no katra sastaptā sensoru tīkla mezgla tajā brīdī, kad komunikācijas distancē ir visoptimālākā. Savukārt, vēlāk visi savāktie dati tiek nodoti tālāk bāzes stacijai. Šādi katrs atsevišķs sensoru mezgls var ietaupīt būtisku enerģijas apjomu, netērējot to datu sūtīšanai lielā distancē vai arī pārsūtot citu sensoru datus. Parasti tiek pieņemts, ka "datu mūļiem" nepastāv kristiski enerģijas patēriņa ierobežojumi.

Kā pamatmotivācija pētot šo jomu tika izvirzīts mērķis atrast komunikācijas risinājumu, kurš būtu maksimāli robusts no lietošanas viedokļa, kā arī neradītu papildus slogu izstrādājot BST risinājumus. Vēlāk tam pievienojās papildus motivācija par to, ka ri-

sinājumam ir jābūt vienkāršam, ko sekmēja *Motorola Mobility* galvenā menedžera Bila Brauna (*Bill Brown*) teiktais "Mobilize 2012" konferencē, proti:

"lielākā daļa patērētāju ļoti, ļoti, ļoti negrib būt integratori" [260].

Visbeidzot, projektējot risinājumus jāpatur prātā, ka BST un iegulto ierīču viena no paradigmām ir ierobežoti resursi pret funkcionalitāti. Taču, saskaņā ar 1.3. apakšnodaļā aprakstītajiem sarežģītības izaicinājumiem, nedrīkst aizmirst arī par iekārtu drošību.

Apkopojot visu iepriekš minēto, autors izvirzīja sekojošas prasības tīmekļa servisiem zema enerģijas patēriņa bezvadu sensoru tīklos:

- tiem jāizmanto 6LoWPAN [12] [13] un pret aizturēm un/vai aizkavēšanām noturīga komunikācija;
- datu apmaiņa jābāzē uz *RESTful* [261] arhitektūras paradigmas;
- tam jābūt sesiju bāzētam, "saglabāt un pārsūtīt" (*store-and-forward*) tipa lietotāja protokolam;
- datu pārsūtīšana jāveic saturu grupējot pakotnēs;
- pakotnes jāvar prioretizēt.

5.2. Esošo risinājumu apskats

Servisa-orientētās arhitektūras ideja nav jauna [262], tā ir veiksmīgi tikusi pielietota tradicionālajā datorzinātnē jau vairākus gadus, taču pagaidām vēl nav pilnvērtīgi ieviesusies lietu interneta (*Internet of Things* jeb IoT) vidē.

Bezvadu sensoru tīklos datu apmaiņa nav iedomājama bez dažādiem konkrētajiem apstākļiem pielāgotiem MAC, transporta un virs tiem lietojumspecifiskiem datu apmaiņas protokoliem. Tas ir būtisks ierobežojums dažādu tīklu savienošanai, jo saziņa nav vienota.

5.2.1. MAC protokoli

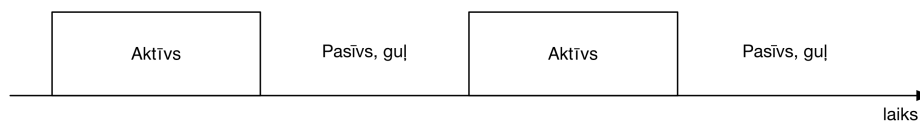
Apskatot esošos komunikācijas risinājumus BST, jāsāk ar atvērto sistēmu sadarbības bāzes etalonmodeļa jeb ISO/OSI modeļa apskati (skatīt 5.2.a attēlu) un tā attiecību pret BST izmantojamajiem risinājumiem.

Tīkla protokolu apskats jāsāk datu kanāla līmenim atbilstošiem MAC protokoliem. BST ideālais MAC protokols būtu ar zemu enerģijas patēriņu; brīvs no kolīzijām; ar vienkāršu un efektīvu realizāciju; pieļautu maksimālu kanāla izmantojumu gan pie mazas, gan pie lielas datu plūsmas; to būtu iespējams konfigurēt; tas būtu mērogojams; tam būtu noturīgs pret mainīgiem radio pārraides apstākļiem.

Vairāki pētījumi ir veltīti daudzo un dažādo MAC protokolu salīdzinājumam, novērtējumam un analīzei. Balstoties uz dažos no darbiem [263] [264] pieejamās informācijas, kā arī veicot papildus pētījumus, autors secina, ka daudzos BST izmantotie MAC protokoli, kas balstīti uz CSMA, nav pietiekoši efektīvi, lai tos pielietotu zema enerģijas patēriņa bezvadu sensoru tīklos, jo pieaugot distancei starp mezgliem, pieaug arī zaudēto datu pakotņu skaits, kā arī tie nav pietiekoši energo efektīvi.

Turpinot MAC protokolu izpēti, autors secina, ka visperspektīvākais no risinājumiem, kas piemērots zēmam enerģijas patēriņam ir *X-MAC* [265] protokols. Tālāk seko TDMA [169] [6], *Z-MAC* [266] un *S-MAC* [267] protokoli, kuri arī nodrošina pietiekošu energo efektivitāti, taču katrs no tiem ir ar savām sīkām nepilnībām, kuras, autoraprāt, nav piemērojamas konkrētajā aprobācijas piemērā.

Visi minētie zēmam enerģijas patēriņam piemērotie MAC protokoli vadās pēc vienkārša pamatprincipa (skatīt 5.1. attēlu). Panākumi slēpjas tur, ka katrs no mezgliem kādu laiku ir pasīvs vai guļ, savukārt, pēc pamošanās kļūst aktīvs un klausās vai kāds cits no mezgliem nemēģina ar to sazināties. Gulēšanas laikā pārsvarā mezgla raiduztvērējs ir izslēgts, savukārt, pats mezgls vadās pēc taimera, kas nodrošina pamošanos pēc noteikta laika. Laika intervāli, kurus mezgls velta aktīvajiem un pasīvajiem periodiem var tikt pielāgoti, nosacījumus tam ieplānojot jau izstrādājot risinājumu.



Att. 5.1.: MAC protokolu darbības pamatprincips

5.2.2. Transporta protokoli

Kā redzams pēc ISO/OSI modeļa attiecības pret BST lietojumiem, tad tas faktiski sadalās trīs līmeņos, kur zemākais ir piederīgs aparatūras līmenim, savukārt, nākošie divi ir saistīti ar izvēlēto operētājsistēmu un specifisko lietotni.

Lai veicinātu BST starpsavienojumu izveidi kā lietojumiem piemērots tiek virzīts IPv6 interneta protokols 6LoWPAN [12] [13] izpildījumā. 6LoWPAN (skatīt 5.2.c attēlu) ir labi attiecināms gan pret vispārīgo TCP/IP protokola modeli (skatīt 5.2.b attēlu), gan jau minēto ISO/OSI modeli (skatīt 5.2.a attēlu).

6LoWPAN standarts paver lietotājiem un izstrādātājiem iespēju efektīvai IPv6 lietošanai zema ātruma un zema enerģijas patēriņa bezvadu sensoru tīklos, kur pārsvarā tiek lietotas vienkāršotas iegultas iekārtas. Tas pieļauj arī optimizēt saistītos protokolus un adaptācijas ISO/OSI modeļa tīkla līmenī. Visbeidzot, plaša 6LoWPAN izmantošana nodrošinātu to, ka sensoru tīkli un to mezgli ir galējā interneta robeža, taču neatrisinātu problēmu kā šos datus attēlot.

Lietotne / Application	Lietotājs
Prezentācija / Presentation	
Sesija / Session	
Transports / Transport	Operētājsistēma
Tīkls / Network	
Datu kanāls / Data link	
Fiziskais līmenis / Physical	Raid-uztvērējs

(a) ISO/OSI modelis attiecībā pret BST

HTTP		RTP	
Netiek specifiski lietots			
Netiek specifiski lietots			
TCP	UDP		ICMP
IP			
Ethernet MAC			
Ethernet PHY			

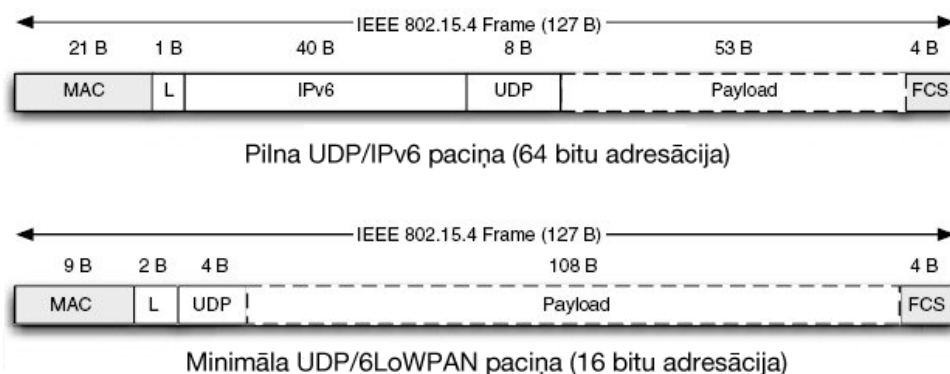
(b) TCP/IP protokola modelis

Lietotnes protokoli	
Netiek specifiski lietots	
Netiek specifiski lietots	
UDP	ICMP
IPv6	
Adaptācijas līmenis 6LoWPAN	
IEEE 802.15.4 MAC	
IEEE 802.15.4 PHY	

(c) 6LoWPAN protokola modelis

Att. 5.2.: Komunikācijas modeļi

Par labu 6LoWPAN pielietojumam BST kalpo tas, ka katras pārsūtītās UDP pakotnes derīgo satura izmērs (skatīt 5.3. attēlu) katrā atsevišķi ņemtā IEEE 802.15.4 standarta kadrā (*frame*) ir gandrīz divreiz lielāks nekā standarta IPv6 pakotnē. Galvenā atšķirība ir tajā, ka 6LoWPAN gadījumā tiek lietota vienkāršota adresācija.



Att. 5.3.: IPv6 un 6LoWPAN pakotņu satura salīdzinājums

5.2.3. Tīmekļa servisi bezvadu sensoru tīklos

Uzsākot izvēlētas tēmas izpēti, pirmie tika pārbaudīti jau eksistējošie risinājumi servisorientētai arhitektūrai bezvadu sensoru tīklos. Tādu izrādījās pietiekoši daudz, taču, papētot sīkāk, atklājās ka katram no tiem ir savi defekti. No visa klāsta tika izvēlēti tie risinājumi, kuri kaut daļēji atbilst uzstādītajām prasībām.

No tādiem var minēt *TinySOA* [268], kas ir speciāli izstrādāta sistēma, kas atbilst SOA uzstādījumiem, taču nevar strādāt bez vārtejas uz interneta tīklu, jo tā faktiski ir iekārta, kas atbild uz SOA pieprasījumiem.

TinyREST [269] ir *RESTful* bāzēts risinājums, taču arī šim risinājumam ir nepieciešama vārteja uz internetu, kas arī atbild uz pieprasījumiem no ārpuses. Bez tam sensoru tīkla iekšienē vairs netiek izmantots *RESTful* risinājums tīrā tā veidā.

Tika apskatīti arī divi uz SOAP bāzēti risinājumi – *WS4D* [270] un *Tiny Web Services* [271] – abiem par nožēlu jāsaaka, ka to lielākais mīnuss ir SOAP lietošana, kas neskatoties uz savu it kā vienkāršo nosaukumu, tomēr ir diezgan smags protokols, jo datu pārraidei lieto XML datu struktūras. Tas rada papildus ierobežojumus iegulto sensoru iekārtu izmantošanā, jo jau laicīgi jāņem vērā nepieciešamība pēc papildus resursiem.

Nedaudz citu paradigmu pielieto *SODA* [272] izstrādātāji – viņu risinājumā iekārtas ir servisi nevis programmatūra uz tām. Pieeja ir interesanta, taču ieviešot šādu risinājumu jau laicīgi jāņem vērā, ka katra sensorā iekārta veiks tikai vienu konkrētu tai uzdotu uzdevumu. Attiecīgi – tīkla izmaiņu gadījumā būs jāveic fiziska iekārtu nomaiņa.

Vēl viens autoru kolektīvs ir nosaucis savu risinājumu tāpat kā šis risinājums – par *WSN-SOA* [273] [274], tiesa gan viņu risinājums ir līdzīgs tikai ar nosaukumu. Arī šim

BST ir nepieciešama specializēta vārteja, caur kuru notiek datu translācija. Autori apraksta arī vārtejas risinājumu, kas ir iegults dators un tam ir dots nosaukums *DPWS*.

Visbeidzot jāpiemin Zviedrijas datorzinātņu institūta zinātnieku aprakstītā BST lietošanu integrācijā IP bāzētos sensoru tīklos [275]. Viņu sistēma lieto divus mehānismus, lai sasniegtu gan labus veiktspējas rādītājus, gan zemu enerģijas patēriņu – uz sesijām balstītu enerģiju taupošu radio protokolu, kas apvienots ar HTTP nosacījuma GET (*Conditional GET*) mehānismu. Viņu pētījums pierāda, ka tīmekļa servisi ir dzīvotspējīgs risinājums zema enerģijas patēriņa bezvadu sensoru tīklos.

5.2.4. Pret aizturēm un pārtraukumiem noturīgi bezvadu sensoru tīkli

Kā galveno atspēriena punktu, izskatot šīs sadaļas saistītos darbus, autors izmantoja pret aizturēm noturīgās tīklošanās (DTN) [172] definīciju, kas, autoraprāt, ir viena no pamata tēzēm informācijas apmaiņā BST vidē. Divi galvenie pētījumu autori, kuru darbs ir pamatā gandrīz lielākajai daļai ar DTN saistīto publikāciju ir Kevins Fols (*Kevin Fall*) un Loids Vuds (*Lloyd Wood*).

Veicot pētījumu, tika izskatītas vairākas ar DTN tēmu saistītas publikācijas. Kā viens no interesantākajiem DTN pielietojumiem ir *Bundle* [276] [277] protokols, kas paredzēts datu pārraidei kosmosā, taču attiecīgi pielāgojot to iespējams lietot arī komunikācijai bezvadu sensoru tīklos. Daži no atbilstošiem DTN pētījumiem apraksta pieredzi saistīta ar saziņas problēmām interneta lietošanai kosmosā izmantojot *Bundle* protokolu [278]. No šī pētījuma iespējams gūt atziņas, ar ko saskārušies *Bundle* protokola ieviesēji, kuras iespējams izmantot, ieviešot DTN bezvadu sensoru tīklos.

Tika izpētītas vairākas publikācijas, kas aprakstīja tieši DTN pielietojumu bezvadu sensoru tīklos [279] [280]. Gandrīz visos pētījumos tiek uzsvērts, ka DTN nodrošina uzticamu datu komunikāciju heterogēnos, pret neveiksmēm nodrošinātos bezvadu sensoru tīklos. Zviedrijas datorzinātņu institūta pētnieki bija veikuši *Bundle* protokola ieviešanu *Contiki* operētājsistēmā [281] un pētījumā dalījušies ar savu pieredzi [282]. Vēl citi zinātnieki apskatīja DTN un TCP protokolu savietojamību [283] [284], savos pētījumos pierādot, ka šīs abas tēmas ir iespējams apvienot. Visbeidzot, plašāks pētījums apskatīja

DTN nākotnes perspektīvas [285].

Visbeidzot pie DTN risinājumiem, kas apskata "panest un pārsūtīt" (*carry-and-forward*) principus, jāmin *CafNet* [286]. Šajā pētījumā ir radīts tīkla protokolu kopums, kas apvieno transporta un tīkla slāņus no ISO/OSI modeļa, kā arī ievieš mobilo sensoru tīkla mezglu jeb "datu mūļu" (sīkāk par tiem aprakstīts 5.2.5. sadaļā) slāni, kas atbilst transporta, tīkla un datu kanāla slāņiem. Vēl šajā pētījumā tiek apskatīta datu pakotņu prioritēzēta nosūtīšana. Tiesa - viss pētījums balstīts uz specifiski izstrādātiem komunikāciju protokoliem nevis, piemēram, 6LoWPAN.

5.2.5. Mobilo mezglu pielietojums bezvadu sensoru tīklos

Loģisks turpinājums DTN arhitektūrai ir uz mobiliem bezvadu sensoru tīkla mezgliem jeb "datu mūļiem" bāzēta arhitektūra, kura pirmo reizi sīkāk apskatīta šajā publikācijā [176]. Faktiski ar "datu mūļiem" tiek saprasta trīs līmeņu arhitektūra, kas sastāv no:

- statistiskiem sensoru mezgliem, kas ievāc datus;
- bāzes stacijas, kas neatrodas tiešā radio sakaru attālumā no sensoru mezgliem;
- kustīga sensoru mezgla jeb "datu mūļa", kurš veic datu savākšanu no statistiskajiem sensoru mezgliem un piegādi uz bāzes staciju.

Vairāki apskatīto publikāciju autori pievēršas datu pārraides problēmu risināšanai tīklos, kuros tiek pielietoti mobili sensoru tīkla mezgli jeb "datu mūļi". Piemēram, *Jain, S. et. al.* savā publikācijā apraksta ideju par mobiliem aģentiem, kas veic datu pārsūtīšanu (*data forwarding*) [287]. Savukārt, *ZebraNet* pētnieki savā darbā aprakstīta datu pārraides mehānismu, kas nosacīti balstās uz "datu mūļu" datu pārraides principu [26]. Citā publikācijā tiek apskatīts datu pārraides protokols, kas piemērots "gudro putekļi" (*smart dust*) tīkliem [288], un ietver daļēji sevī ideju par "datu mūļu" izmantošanu datu apmaiņā.

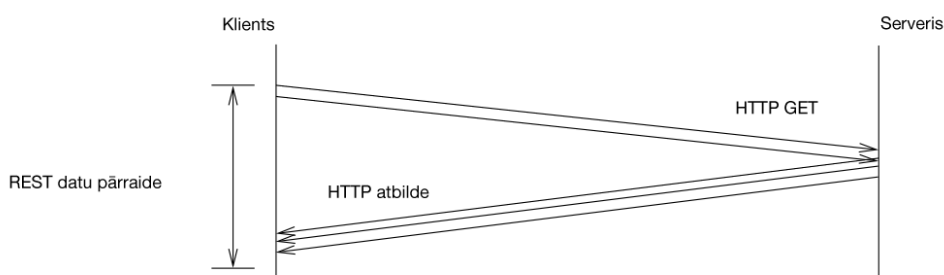
Kā vēl viens no risinājumiem, kuros tiek izmantots mobilo sensoru tīklu mezglu princips, jāpiemin *BikeNet* [289], kas apraksta pilsētā izveidotu bezvadu sensoru tīklu, kur "datu mūļu" loma ir uzticēta velosipēdiem, kuri pārvietojoties gar statistiskiem mezgliem, ievāc datus no tiem un nogādā uz centrālo punktu.

”Datu mūļu” pamatprincipi tiek lietoti arī protokolos un to izmantošanā, piemēram, LTP-T [290] un bezvadu sensoru un TCP/IP savstarpējā savienošanā [291].

5.3. Risinājums

Radītais risinājums ir balstīts uz tīmekļa servisiem, kas ir daļa no servisorientētās arhitektūras. Tas ir reprezentācijas statusa nodošana, izmantojot HTTP protokolu un DTN tīklu (*RESTful architecture over HTTP protocol and DTN*), ko īsumā autors ir nodēvējis par *WSN-SOA*.

Autors paredz, ka uz iegultās sensorās iekārtas operētājsistēmas līmenī darbojas *WSN-SOA* modulis, kas faktiski ir miniatūrs HTTP serveris, kurš saņem REST pieprasījumus un nosūta pretī informāciju (skatīt 5.4. attēlu). Kā transporta protokols tiek lietots 6LoWPAN, kura izmantošana faktiski nosaka, ka sensorā iegultā iekārta ir interneta mala (*edge of the Internet*). Ņemot vērā 6LoWPAN specifikāciju, bezvadu sensoru tīklā tomēr jāparedz maršrutizators, kurš nodrošinātu savienojumu ar standarta IPv6 vai IPv4 tīkliem un veiktu pakotņu translēšanu no un uz 6LoWPAN. Būtiski atzīmēt, ka HTTP lietojumu protokols vismaz sensoru tīkla iekšienē darbojas uz UDP nevis TCP protokola, ņemot vērā 6LoWPAN specifiku. Eksistē pētījumi un gatavi risinājumi, kas pierāda, ka HTTP ir realizējams pieejai caur UDP [292].



Att. 5.4.: *WSN-SOA* transakcija

Kā datu apmaiņas formāts *WSN-SOA* tiek lietots JSON [293], kas ir atvērta standarta formāts. Tas izmanto cilvēkiem izlasāmu tekstu, lai pārraidītu datu objektus, kas sastāv no atribūts-vērtība pāriem. Pie tam JSON ir pietiekoši ”viegls”, lai to varētu ieviest un izmantot BST un iegultajās iekārtās. Tas ir arī populārs, kas ļautu datus, kas iegūti

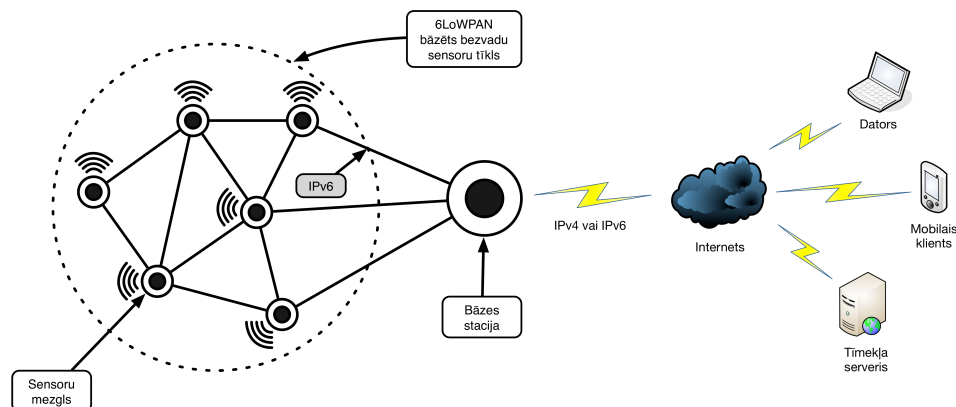
no sensorajām iekārtām viegli izmantot jau esošajos datu apstrādes risinājumos, kā arī veicinātu jaunu risinājumu radīšanu.

5.4. Eksperimenti

Lai pārliecinātos praksē vai teorētiski izstrādātais risinājums – reprezentācijas statusa nodošana, izmantojot HTTP protokolu un DTN tīklu – spēj funkcionēt, tas tika aprobežs dzīvē ilgtermiņā (vismaz 1 gads), radot aparāturu un risinājumu un ar to ievācot datus par saules un vēja daudzumu, kā arī meteoroloģiskajiem datiem. Ievāktos datus paredzēts izmantot, lai novērtētu atjaunojamās enerģijas ieguves avotu – vēja ģeneratoru vai saules bateriju – uzstādīšanas lietderīgumu.

5.4.1. Sistēmas arhitektūra

Izvēloties piemērotu arhitektūru, lai novērtētu *WSN-SOA* priekšrocības, autors nolēma palikt pie BST salīdzinoši bieži sastopamās (skatīt 5.5. attēlu), kas sastāv no diviem galvenajiem elementiem – sensoru mezgliem, kas apvienoti bezvadu sensoru tīklā un robežmaršrutizatora jeb bāzes stacijas.



Att. 5.5.: Eksperimentos realizētā *WSN-SOA* sistēmas arhitektūra

Sensoru tīkla iekšienē kā transporta protokols tiek izmantots IPv6 ar 6LoWPAN atbalstu. Savukārt, saziņu ar ārpusi koordinē un datu translāciju starp 6LoWPAN un IPv4 vai IPv6 veic bāzes stacija, kas ar pasauli sazinās, izmantojot pieslēgumu internetam, piemēram, caur 3G/LTE mobilo sakaru tīklu.

5.4.2. Aparatūra

Lai pārbaudītu nodaļā izvirzītās hipotēzes praksē un atbilstoši 5.4.1. apakšsadaļā aprakstītajai arhitektūrai, tika izveidots aparātūras risinājums, kas sastāv no sensoru mezglā un bāzes stacijas (principiālās shēmas skatīt D. pielikumā). Gan vienam, gan otram pamatā ir gatavi moduļi, kas apvienoti noteiktā kārtībā. Strādājot pie iekārtu izveides, tikapaturēts prātā, ka izveidotajām iekārtām ir jābūt vienkāršām un energotaupīgām.

5.4.2.1. Sensoru mezgls

Sensoru mezgls (skatīt 5.9. attēlu) ir paredzēts, lai veiktu sekojošu meteoroloģisko datu ievākšanu monitorēšanas vajadzībām:

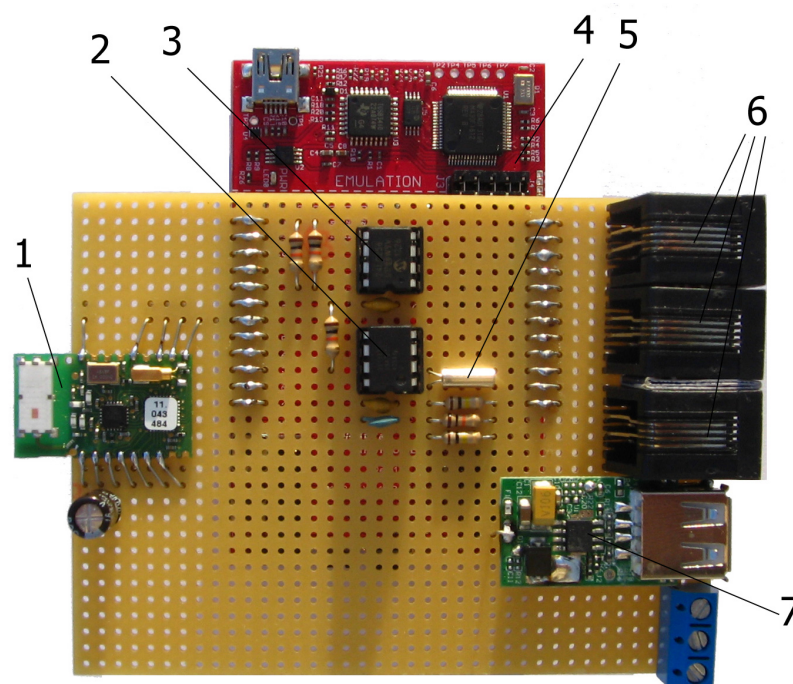
- vēja virziens;
- vēja stiprums;
- saules enerģijas daudzums;
- nokrišņu daudzums;
- gaisa temperatūra;
- gaisa mitrums.

Lai veiktu datu ievākšanu, iekārtai ir pieslēgti ārējie sensoru moduļi:

- vēja virziena un stipruma sensors SEN-09842 (skatīt 5.7. attēlu);
- nokrišņu daudzuma sensors SEN-09842 (skatīt 5.7. attēlu);
- gaisa temperatūras un mitruma sensors SHT15 (skatīt 5.8. attēlu).

Iekārta darbojas saskaņā ar programmatūru, kas uzstādīta uz tās mikrokontroliera MSP430FR5379 un kura izmanto sekojošus aparātūras resursus:

- reālā laika pulksteni NXP PCF8593 [253], lai varētu sinhronizēt datu pārraidi uz bāzes staciju;
- pastāvīgo atmiņu 24LC256 konfigurācijas saglabāšanai un datu uzkrāšanai;



Att. 5.6.: WSN-SOA sensoru mezgls, kur: 1 – 868 MHz raiduztvērēja modulis, 2 – RTC mikroshēma, 3 – EEPROM atmiņas mikroshēma, 4 – MSP-EXP430FR5379 iekārta, 5 – 32768 kHz kristāla oscilators, 6 – vēja ātruma, vēja virziena un nokrišņu daudzuma sensoru pieslēgvietas, 7 – barošanas modulis

- 868 MHz raiduztvērēju Amber Wireless AMB8420 [294] radio sakaru nodrošināšanai ar bāzes staciju.

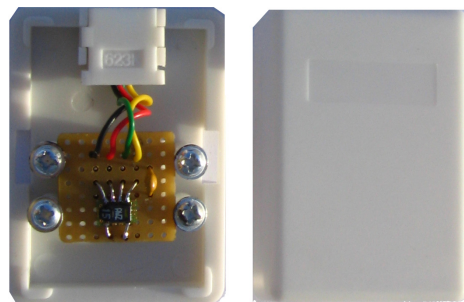
Iekārta tiek barota no autonoma barošanas avota (skatīt 5.9. attēlu), kas sastāv no saules paneļiem, akumulatora uzlādes regulatora TW-910 un hermētiska svina-skābes 12 V akumulatora ar 7,2 Ah ietilpību.

5.4.2.2. Bāzes stacija

Līdzīgi kā 3.3.2.3. nodaļā aprakstīts arī šajā risinājumā par bāzes stacijas (skatīt 5.10. un 5.11. attēlus) pamatu tika izmantots Raspberry Pi mikrodators [39], kurš nodrošina gan plašas iespējas datu apkopošanā, saglabāšanā un apstrādē, gan ir arī neliels izmēros un pietiekoši energo taupīgs. Pievienojot bāzes stacijai GPRS vai 3G/LTE modēmu, tā spēj gan datus nosūtīt, gan atbildēt uz pieprasījumiem, attiecīgi vai nu izpildot tos pati vai nododot tālāk sensoru mezglam.



Att. 5.7.: Vēja virziena, vēja stipruma un nokrišņu daudzuma sensori

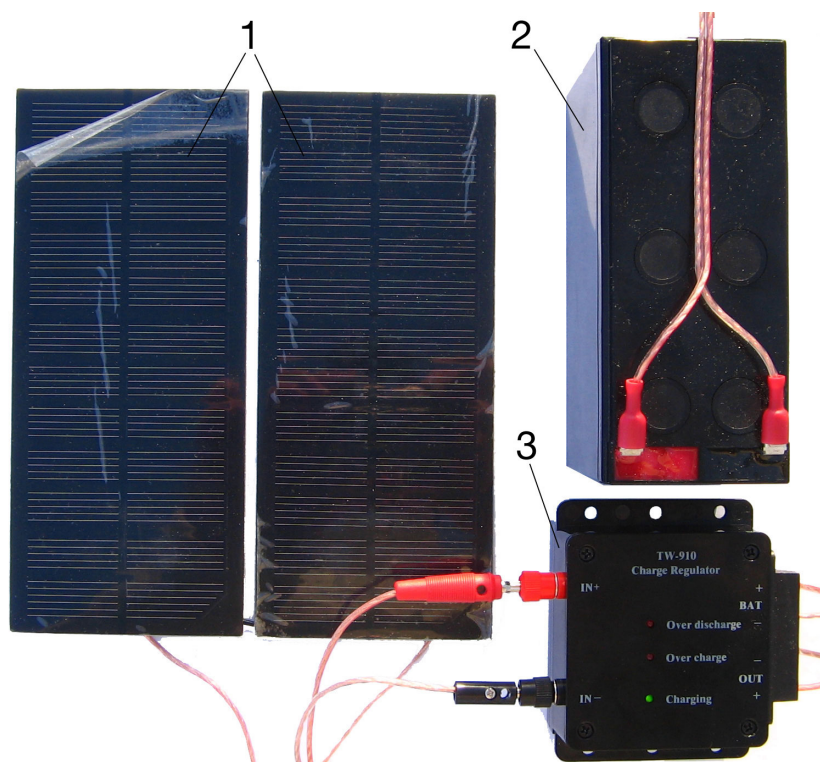


Att. 5.8.: Temperatūras un relatīvā mitruma sensors

Lai nodrošinātu vēl lielāku energo taupību, balstoties uz pasaules pieredzi [295], tika radīts mikroatora enerģijas patēriņa kontrolieris. Tajā tiek lietota Arduino Pro [32] iekārta, kura kontrolē enerģijas patēriņu un brīžos, kad nav nepieciešams bāzes staciju darbināt, izslēdz to ārā ar shēmā iebūvēto releju. Arduino Pro un Raspberry Pi iekārtas savstarpēji ir savienotas ar vienkāršotu saskarni, kas bāzēta uz abu iekārtu GPIO saskarnēm. Tādējādi, Raspberry Pi var signalizēt Arduino Pro, kad darbs ir pabeigts un to var droši slēgt ārā.

Arduino Pro iekārta darbojas no sava, neatkarīga sprieguma, ko dod 5 V 2600 mAh ietilpības akumulatori. Pati bāzes stacija tiek darbināta no hermētiska svina-skābes 12V akumulatora ar 7,2 Ah ietilpību, kuru iespējams aizvietot ar lielākas ietilpības auto akumulatoru. Gadījumos, ja ir pieejams stabils 220 V elektroenerģijas avots, tad akumulatorus iespējams aizvietot ar datora barošanas bloku, kurš izvada 5 un 12 voltus.

Bāzes stacija tāpat kā sensoru mezgls, sazināi ar sensoru tīklu izmanto 868 MHz raidzuvēvērēju Amber Wireless AMB8420 [294], savukārt, enerģijas patēriņa kontroles modulis Arduino Pro lieto reālā laika pulksteni NXP PCF8593 [253], lai zinātu, kad ieslēgt un kad izslēgt bāzes staciju.



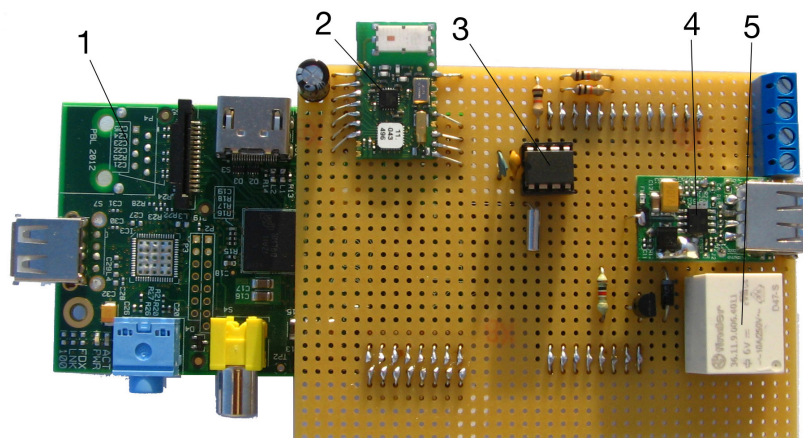
Att. 5.9.: WSN-SOA sensoru mezgla barošanas risinājums, kur: 1 – 2 x 2 W 6 V saules paneļi, 2 – 12 V 7,2 Ah svina skābes hermētiskais akumulators, 3 – uzlādes kontrolieris

5.4.3. Programmatūra

Sensoru mezglam paredzētā programmatūra pirmajā iterācijā tika izveidota izmantojot Energia [38] izstrādes rīku, kas ļāva noprast koda apjomu, lai pēc tam ko līdzīgu radītu ar MansOS [201] vai SEAL [202] palīdzību.

Bāzes stacija darbojas ar Raspberry Pi [39] piemērotu Debian Linux distributīvu Raspbian [199] kā operētājsistēmu. Sensoru tīkla vadības programmatūra ir rakstīta Python un tā arī veic komunikāciju ar sensoru mezgliem caur pieslēgto Amber Wireless raidzuvvērēju, kā arī apkopo informāciju, nosūta to uz ārpusi, izmantojot pieslēgto GPRS modēmu.

Ņemot vērā, ka Raspberry Pi nevar viegli aizmidzināt un pamodināt, tā aizmidzināšanu un pamodināšanu veic uz Arduino Pro [32] bāzēts enerģijas patēriņa kontrolieris, kura programmatūra, savukārt, ir izveidota ar Arduino IDE izstrādes rīku. Tiesa, arī Arduino paredzēto programmatūru iespējams izstrādāt MansOS [201].



Att. 5.10.: *WSN-SOA* bāzes stacijas augšpuse, kur: 1 – Raspberry Pi mikrodators, 2 – 868 MHz raiduztvērēja modulis, 3 – RTC mikroshēma, 4 – barošanas modulis, 5 – relejs

5.4.4. Izaicinājumi

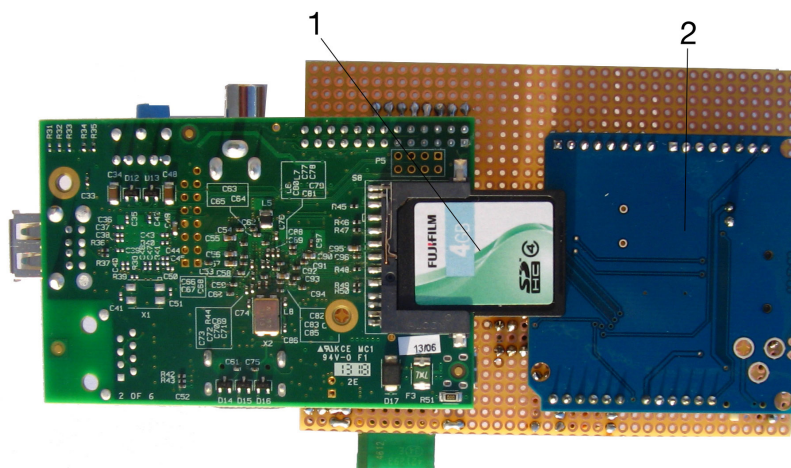
Datu ieguve no sensoru mezgliem nevienmēr ir viegls uzdevums. Tie var atrasties viegli nepieejamās vietās [6], tāpēc tas rada vairākus risinājumam specifiskus izaicinājumus. Arī realizējot *WSN-SOA* eksperimentus, ar tādiem nākas saskarties. Tas ļāvis autoram iegūt labāku izpratni par iespējamajiem risinājumiem.

5.4.4.1. Miniaturizācija

Iekārtu miniaturizācija ir būtiska, jo daudzas sistēmas tiek izvietotas ierobežotās vietās un tām ir jābūt netraucējošām. Savukārt, zemfrekvenču radio gadījumā ierobežojošs faktors var būt antenas izmērs. Tā iemesla dēļ un kā arī savu rādītāju dēļ, kuri jau iepriekš ir tikuši pārbaudīti praksē [5], aparātūras risinājumos tika izvēlēti Amber Wireless moduļi ar dielektrisko rezonatora antenu. Taču tā kā izveidotais sensoru mezgls un bāzes stacija ir pirmie prototipi, sīkāka miniaturizācija netika veikta. Arī apakšsistēmu miniaturizācijai ir jābūt sabalansētai: ierobežojošie faktori vēl joprojām ir akumulatora izmērs un radio jaudas prasības.

5.4.4.2. Enerģijas pārvaldība

Enerģijas pārvaldība ir būtiska ilgtermiņa darbībai. Līdzīgi kā citos projektos, arī šeit tika izmantots laika plānu, lai veiktu enerģijas pārvaldību. Šobrīd tika izmantoti vienkārši 12V



Att. 5.11.: WSN-SOA bāzes stacijas apakšpuse, kur: 1 – SD atmiņas karte ar Linux operētājsistēmu Raspberry Pi mikrodatoram, 2 – Arduino Pro iekārta

impulsa barošanas bloki, kas pārveido spriegumu uz 5V, taču veidojot nākošos prototipus būtu vēlams izmantot augstas efektivitātes regulētus impulsa barošanas blokus.

Izstrādājot BST sistēmas, tiek pieņemts, ka ļoti adaptīvas sistēmas izmantošana varbūt riskanta, dēļ problēmām, kas rodas nezināmu sakaru zudumu un uzticamības dēļ, tomēr autors riskēja veidot šādu sistēmu. Tomēr uz izmaiņu biežumu orientētu datu ievākšanas sistēmu un starp sensoru tiešo sakaru izmantošana teorētiski ļautu vēl vairāk samazināt enerģijas patēriņu. Tāpat jāizvairās no sistēmām, kurām nepieciešams ilgs sāknēšanas vai darbības atsākšanas laiks, jo tas var kļūt par dominējošu faktoru.

5.4.4.3. Radio sakari

Tas vai radio sakari būs veiksmīgi nav paredzams mitrās un vējainās lokācijās, kas ļoti ietekmē radio viļņu izplatību. Jāņem vērā, ka bieži teorētiskie radio zudumu aprēķini, piemēram, ledāju ledum, varbūt neprecīzi un vāji attiecināmi uz reālo situāciju un tas tā bieži būs arī citās vidēs, piemēram, vietās, kur mainās lapu segums mežu biotopos. Nākotnē bieži tiks izmantotas sistēmas, kas ļaus mainīt raiduztvērēja jaudu un ietvers zemāku frekvenču vai akustiskās rezerves izmantošanas iespējas. Sakari starp sensoru mezgliem ir noderīgi gadījumos, kad daži no mezgliem var atrasties ārpus bāzes stacijas darbības rādiusa. Tomēr jāņem vērā, ka nepieciešams samazināt enerģijas patēriņu, kas nepieciešams, lai izveidotu tiešās saites tīklus un pudurus.

5.4.4.4. Mērogojamība

Vides sistēmām regulāri ir jāpievieno sensoru grupas un jāveic potenciāli liela sensoru skaita pārvalde. Sākotnējā tīkla topoloģija ļauj vienai bāzes stacijai pievienot līdz 256 unikālām ierīcēm, taču tā var darboties arī 256 unikālos tīklos, kur katrā var būt 256 iekārtas. Sakaru loga izmantošana var samazināt mērogojamību, jo, ja vairākiem sensoru mezgliem ir jāveic iepriekš iegūtu datu nosūtīšana, tad tam var nepietikt laiks. Tomēr tas ir risināms tā, ka konkrētie mezgli vienkārši nosūtītu vairāk datu nākamajā pārraides logā. Pastāv arī iespēja sensoru mezgliem nosūtīt komandu, kas liktu tiem turpināt darbu ilgāk. Lai palielinātu mērogojamību tipiskā situācijā būtu nepieciešamas vairākas bāzes stacijas vai vārtejas (bāzes staciju masīvi).

5.4.4.5. Attālinātā pārvaldība

Sistēmas, kuras atrodas izolētās lokācijās, nav iespējams apmeklēt regulāri, tāpēc tām ir būtiska attālinātā piekļuve. Darbības laikā var rasties nepieciešamība labot kļūdas, izslēgt apakšsistēmas vai mainīt darbības plānus. Darbā aprakstītajā gadījumā tika noskaidrots, ka, lai novērotu vietas un sistēmu fizisko statusu, bāzes stacijai ir jābūt aprīkotai ar kameru, kas ir iespējams, pievienojot to Raspberry Pi mikrodatoram paredzētajā vietā. Tika noskaidrots tas, ka pilnībā izolētām apakšsistēmām barošanas kontrole ir svarīga ne tikai, lai veiktu enerģijas pārvaldību, bet arī, kā risinājums noteiktām problēmām Lielo pīļu salas (*The Great Duck Island*) projektā [296] tika atklāts, ka izmantotie sensori samirkstot var radīt īssavienojumus). Pielāgoti sakaru risinājumi padara attālināto piekļuvi daudz sarežģītāku, jo parastā piekļuve un maršrutēšana nav iespējama. Lai izveidotu labu attālinātās pārvaldības risinājumu ir nepieciešama tālāka programmatūras attīstīšana un atteicu scenāriju testēšana.

5.4.4.6. Lietojamība

Ja sensoru tīklus paredzēts izvietot komandām, kas tos iegādājās kā gatavus risinājumus, tiem ir jākļūst vieglāk uzstādāmiem, uzturamiem un saprotamiem. Tas ir būtisks aspekts gan WSN-SOA gadījumā, gan arī LynxNet gadījumā, lai sistēma būtu tik vienkārša, ka dabas zinātnieks bez speciālām priekšzināšanām spētu uzstādīt sistēmu pats.

Šādām sistēmām būtu jā sastāv no iespējami maz komponentēm, kurām, savukārt, būtu jābūt pietiekoši intuitīvām, lai nezinātājs spētu ar tām apieties. To var salīdzināt ar skenera, printera vai tīkla uzstādīšanu mājās. Šajā jomā palīdzēs *Plug-and-play* tipa iekārtu attīstība [297].

Līdz ar to, ka kļūst pieejams arvien vairāk datu, galvenais jautājums ir kā pētniekiem nodrošināt efektīvu piekļuvi šiem datiem. Viens no risinājumiem ir BeanWatcher [298], kas ļauj veikt pusautomātisku novērošanu un pārvaldību.

5.4.4.7. Standartizācija

Savietojamība starp tādiem nopērkamiem moduļiem kā, piemēram, GPS vai laika apstākļu stacijas, ir ļoti zema un praksē katram integrētajam modulim ir jāveic atsevišķa koda izstrāde. Atsevišķos gadījumos, piemēram tīmekļa kamerai, ir pieejami dziņi, bet, ja netiek izmantota pareizā operētājsistēma, tie nav pielietojami. Nākotnes izaicinājums būs saskarņu un pat noteiktas radio tīklošanas standartizācija, lai nodrošinātu sadarbības iespējas starp dažādu BST piegādātājiem [299] [300].

Būtiska ir arī iegūto datu publicēšanas standartizācija, ko ir iespējams veikt izmantojot semantiskā tīmekļa tehnoloģijas [14]. Tas pamatā ļautu savienotu sensoru tīklus semantiskā tīmeklī, bet šāda savienošana būs sarežģīta, ja sabiedrība nevarēs vienoties uz vienotām ontoloģijām, kas aprakstītu šīs sfēras.

5.4.4.8. Drošība

Drošības problēmas ir svarīgas visos sensoru tīkla līmeņos, sākot ar fizisko līdz pat datu aizsardzībai no iejaukšanās. Sistēmām ir jāsaplūst ar vidi un pēc nepieciešamības jābūt aprīkotām ar brīdinājumiem un informāciju. Tas var būt mazāk problemātiski attālās vietās. Atsevišķas sistēmas var turpināt darboties arī gadījumā, ja viens vai vairāki mezgli nav pieejami to atteices vai bojājuma dēļ.

Datiem var būt nepieciešama aizsardzība pret speciālu vai nejaušu izmaiņšanu. Tomēr drošību nevajag izmantot, lai aizkavētu publisku piekļuvi pie informācijas. Starp drošību un informāciju ir jāpanāk balanss, kas ļautu visām iesaistītajām pusēm uzticēties to sistēmām. Tas dramatiski ietekmēs to attīstību un ieviešanu..

5.5. Secinājumi

Šajā nodaļā autors ir aprakstījis savu pieredzi, izstrādājot *WSN-SOA* – bezvadu sensoru tīkliem piemērotu servisorientētu arhitektūru, kā arī atbilstošo iekārtu prototipus pētījumu aprobācijai. Gan servisorientētās arhitektūras, gan tai atbilstošo iekārtu izstrāde apstiprina darbā izvirzīto hipotēzi, ka ir iespējams izstrādāt iegultās bezvadu sensorās iekārtas, par pamatu ņemot 1.3. nodaļā aprakstīto modeli un 1.4. nodaļā aprakstīto vispārīgo iegulto sensoro iekārtu izstrādes metodi.

Autors secina, ka bezvadu sensoru tīklu iekārtas, kas domātas vides vai objektu monitoringam, joprojām sagādā aizraujošu tehnisku izaicinājumu. Mēs joprojām atrodamies tajā vēstures posmā, kad esam vieni no pirmajiem, kas veic dažādu tipu un apjomu datu kopu apvienošanu savā starpā, ļaujot paplašināt mūsu izpratni par Zemi un tās procesiem kopumā.

Ilgspējīgu sensoro iekārtu izstrāde dabīgai videi ir grūts uzdevums. Komunikāciju tehnoloģijas, enerģijas pārvaldības, izvietojumu, laika apstākļu koriģēšanas, stabilitāte un tālvadības diagnostika – visi uzskaitītie izaicinājumi ir interesanti no pētniecības viedokļa un tāpēc izstrādātais risinājums ir kā sekmējošs faktors, kas ļautu to izmantot citiem bezvadu sensoro sistēmu izstrādātājiem.

Radītais risinājums ir netriviāls ar to, ka lai panāktu vēlamu rezultātu autors ir rēķinājies ar ierobežotiem iegulto sensoro iekārtu resursiem, kā arī to, ka līdz šim brīdim vēl neviens nav radījis bezvadu sensoru tīkliem piemērotu servisorientētu arhitektūru, kura izmantotu uz UDP protokola strādājošu HTTP serveri, kas atbalsta REST pieprasījumus un atgriež datus JSON formātā.

Galvenais gūtais secinājums no pētījumiem – bezvadu sensoru tīklu un to iekārtu apvienošana ar semantisko tīmekli ir būtisks ķēdes posms, kas ļauj no neapstrādātiem datiem iegūt globāli pieejamu, pielietojamu informāciju.

Nobeigums

Secinājumi

Darbā autors izvirzīja tēzi, ka iespējams radīt vispārīgu metodi iegulto sensoru iekārtu izveidei. Tā tika izstrādāta balstoties uz vispārīgo monitoringa modeli un 10 būtiskākajiem bezvadu sensoru tīklu izaicinājumiem. Izstrādātā metode konceptuāli ir derīga, tomēr nav iespējams to radīt pilnībā unikālu, kur definējot visas vajadzības, viennozīmīgi tiktu iegūts rezultāts.

Darbā ir izstrādāti četri apakšmodeļi jeb realizācijas sarežģītības pakāpes ar dažādiem monitorēšanas subjektiem, kas monitorē, un objektiem, ko monitorē – ”kustīgs-kustīgs”, ”kustīgs-statisks”, ”statisks-kustīgs” un ”statisks-statisks”, kuras iespējams pielietot izstrādājot bezvadu sensorās sistēmas.

Jauna pielietojuma gadījumā jādefinē tā atbilstība 1. nodaļā aprakstītajiem desmit bezvadu sensoru tīklu izaicinājumiem un jāsalīdzina ar jau eksistējošajām vispārīgā monitoringa modeļa realizācijas sarežģītības pakāpēm. Tādejādi būtu iespējams novērtēt risinājuma atbilstību kādai no tām un attiecīgi veikt pielāgošanu, ja tas ir iespējams. Gadījumos, kad sarežģītības pakāpes būtiski atšķiras, ir jāveido jauns apakšmodelis, pievienojot to vispārīgajam monitoringa modelim.

Vienkāršākās jeb 3. un 4. realizācijas pakāpes apstiprina izvirzīto hipotēzi, ka pēc viena modeļa iespējams izstrādāt vairākas savstarpēji līdzīgas bezvadu sensorās sistēmas, piemēram, darba 5. nodaļā aprakstīto atjaunojamo energo resursu monitoringa sistēmu un apkārtējās vides apstākļu monitoringa sistēmu augļu dārzam [5]. Šim apgalvojumam saistībā ar 3. realizācijas sarežģītības pakāpi atbilst arī darba 3. nodaļā aprakstītā savvaļas dzīvnieku monitoringa bāzes stacija un 4. nodaļā aprakstītā dinamiskā kontrolpunkta iegultā iekārta.

Vispārīgā monitoringa modeļa realizācijas 2. sarežģītības pakāpe arī apstiprina izvirzīto hipotēzi, jo tai atbilst 4. nodaļā aprakstīto pētījumu aprobācijas piemērs ar au-toorientēšanās pasākumu dalībniekiem, kas veic kontrolpunktu monitoringu, izmantojot viedtālrunus un izstrādātais eksperimentālais risinājums bedru un citu nelīdzenumu fik-

sācijai uz ceļa [3] [17] [18].

Vissarežģītākā jeb vispārīgā monitoringa modeļa 1. realizācijas pakāpe arī apstiprina izvirzīto hipotēzi, jo tai atbilst 3. nodaļā aprakstītā savvaļas dzīvnieku monitoringa gala iekārta, kā arī izstrādātais eksperimentālais risinājums automašīnas autonomai vadībai kooperatīvā braukšanas scenārijā [4].

Strādājot pie iegulto iekārtu izveides, autors secina, ka pirms sensorās sistēmas izveides ir rūpīgi jāveic plānošana, lai izprastu, kurā monitoringa modelī tā iekļausies. To iespējams panākt, apzinot maksimāli daudz risinājuma prasības un vajadzības, samērojot tās ar tehnoloģiskajām iespējām un BST izaicinājumiem.

Darba gaitā autors ir nonācis pie secinājuma, ka nav svarīgi kādus tieši datus ievāc iegultā sensorā iekārta, bet gan tas, cik grūti vai viegli ir panākt, lai iekārta strādātu un ievāktu datus. Vērā ņemams fakts ir arī iekārtu saskarne – tai jābūt lietotājam draudzīgai, lai tas varētu pietiekoši nesarežģīti savāktos datus iegūt no iekārtas un izmantot apstrādei un analīzei.

Atziņas sniedza arī darbs pie programmatūras izstrādes iegultajām iekārtām – ne vienmēr rīki, kas ir domāti inženieriem, ir pielietojami ikdienas situācijās vai ātrai prototipēšanai, piemēram, *Code Composer Studio* [37] izstrādes vide. Tā vietā bieži vienkāršāk un ātrāk par savu izvirzīto pieņēmumu pareizību autors pārliccinājās, izmantojot atvērtā pirmkoda risinājumus, piemēram *Arduino IDE* [32] vai *Energia* [38].

Joprojām eksistē tehnoloģiski šķēršļi, lai radītu ilgtspējīgas iegultās iekārtas, kuras būtu apveltītas gan ar plašu funkcionalitāti, gan pietiekoši ietilpīgu barošanas avotu, bet tomēr būtu izmērā nelielas. Toties, pateicoties *Texas Instruments* un citu mikrokontrolieru ražotāju inženieru darbam, ir pavēries jauns horizonts nelielu un vienkāršu iegulto sistēmu radīšanai, kas pārtiek no enerģijas, kas iegūta no apkārtējās vides.

3. nodaļā aprakstītā savvaļas dzīvnieku monitoringam piemērotā gala iekārta atbalsta aktivitātes datu iegūvi 9-DOF līmenī, kamēr citi autoram zināmie risinājumi, ko biologi pielieto savvaļas dzīvnieku monitoringam, nenodrošina vairāk par 6-DOF līmeni. Izstrādātā iekārta izceļas gan ar efektīvu un ātru dzīvnieka atrašanās vietas noteikšanu, izmantojot vienu no jaunākajiem, mazākajiem un energotaupīgākajiem GPS/GNSS moduļiem, gan arī ar to, ka iekārta ir pilnībā digitāla, jo izmanto tikai sensorus ar digitālu saskarni. Tas ļauj tos visus izvietot vienā kopnē un lasīt pēc vajadzības, kā arī nodrošina mazāku

enerģijas patēriņu.

Strādājot pie 4. nodaļā aprakstītā rīku kopuma, autors secina, ka ir bijis pareizs jau pašā izstrādes sākumā pieņemtais lēmums orientēties uz mobiliem risinājumiem. Līdzšinējās tendences iekārtu miniaturizācijā, jaudas pieaugumā, kā arī lietošanas izplatībā tikai pierāda šīs izvēles pareizību.

Darba 5. nodaļā aprakstītais risinājums ir netriviāls ar to, ka apvieno ierobežotos iegulto sensoru iekārtu resursus un bezvadu sensoru tīkliem piemērotu servisorientētas arhitektūras risinājumu, kurā tiek izmantots uz UDP protokola strādājošs HTTP serveris, kas atbalstīta REST pieprasījumus un atgriež datus JSON formātā.

Darbā gaitā aprakstītā vispārīgā metode iegulto sensoru iekārtu izveidei noderēs ne tikai autoram, strādājot pie jaunu sensoru sistēmu izveides, bet autors pieņem, ka iegūtie rezultāti būs vērtīgi arī citiem BST pētniekiem, kas darbojas pielietojamo BST izstrādē.

Autors secina, ka promocijas darba izstrādes gaitā veiktie pētījumi un aktivitāšu rezultāti ir pietiekami, lai apgalvotu, ka darbā izvirzītā tēze par vispārīgu metodi iegulto sensoru iekārtu izveidei ir sasniegta.

Darba perspektīva

Pie nākotnes darba perspektīvas jāmin labības lauku monitoringa bezvadu sensoru sistēmu, ko plānots izstrādāt, pielietojot 5. nodaļā aprakstītos tīmekļa servissus datu ieguvei no zema enerģijas patēriņa iegultajām iekārtām. Paralēli jau noris izpētes darbs pie vienkāršotas apkārtējās vides apstākļu monitoringa sistēmas darbināšanas no enerģijas, kas iegūta ar lauka apstākļos sastopamu mikrobu jeb bioloģisko degvielas šūnu [301] palīdzību.

Ņemot vērā mobilo ierīču attīstību, noris darbs pie 4. nodaļā aprakstītās pasākumu vadības sistēmas attīstības, veidojot jaunu versiju, kā arī mobilās lietotnes, kas nodrošinātu ne tikai dalībniekiem iespēju autorizēties kontrolpunktos, bet arī organizatoriem sekot dalībnieku gaitām tiešsaistes režīmā. Turpinās arī darbs pie dinamiskā kontrolpunkta 2. prototipa izstrādes un ieviešanas.

Visbeidzot – kopā ar LVMI "Silava" bioloģiem turpinās darbs pie 3. nodaļā aprakstītās savvaļas dzīvnieku monitorēšanas iegultās iekārtas piemērošanas lielāku plēsēju par Eirāzijas lūsi, piemēram, Eirāzijas pelēko vilku, monitoringam.

LynxNet gala iekārtas 2. prototipa principiālās shēmas

Šajā pielikumā publicētas 3.3.2.2. apakšnodaļā aprakstītās *LynxNet* gala iekārtas 2. prototipa principiālās shēmas, kā arī nepieciešamo detaļu saraksti.

A.1. Gala iekārtas moduļu shēmas

Nākošajās lappusēs publicētas atsevišķu moduļu principiālās shēmas, kur pēc marķējumiem ir iespējams noteikt, kurš modelis ir saistīts ar kuru moduli.

Shēmu saraksts:

- USB-UART moduļa un ar to saistīto elementu principiālā shēma (skatīt A.1. attēlu);
- ārkārtas moduļa mikrokontroliera MSP430FR5737 un ar to saistīto elementu principiālā shēma (skatīt A.2. attēlu);
- ārkārtas moduļa radio raidītāja ADF7012 principiālā shēma (skatīt A.3. attēlu);
- galvenā moduļa mikrokontroliera CC430F6137 un ar to saistīto elementu principiālā shēma (skatīt A.4. attēlu);
- iekārtā iekšā esošo sensoru un ar to saistīto elementu principiālā shēma (skatīt A.5. attēlu);
- iekārtas ārpusē esošo sensoru un 7 segmentu displeja un ar tiem saistīto elementu principiālā shēma (skatīt A.6. attēlu);
- litija jonu akumulatoru lādētāju principiālās shēmas (skatīt A.7. attēlu).

A.2. Monitoringa kaklasiksnas detaļu saraksts

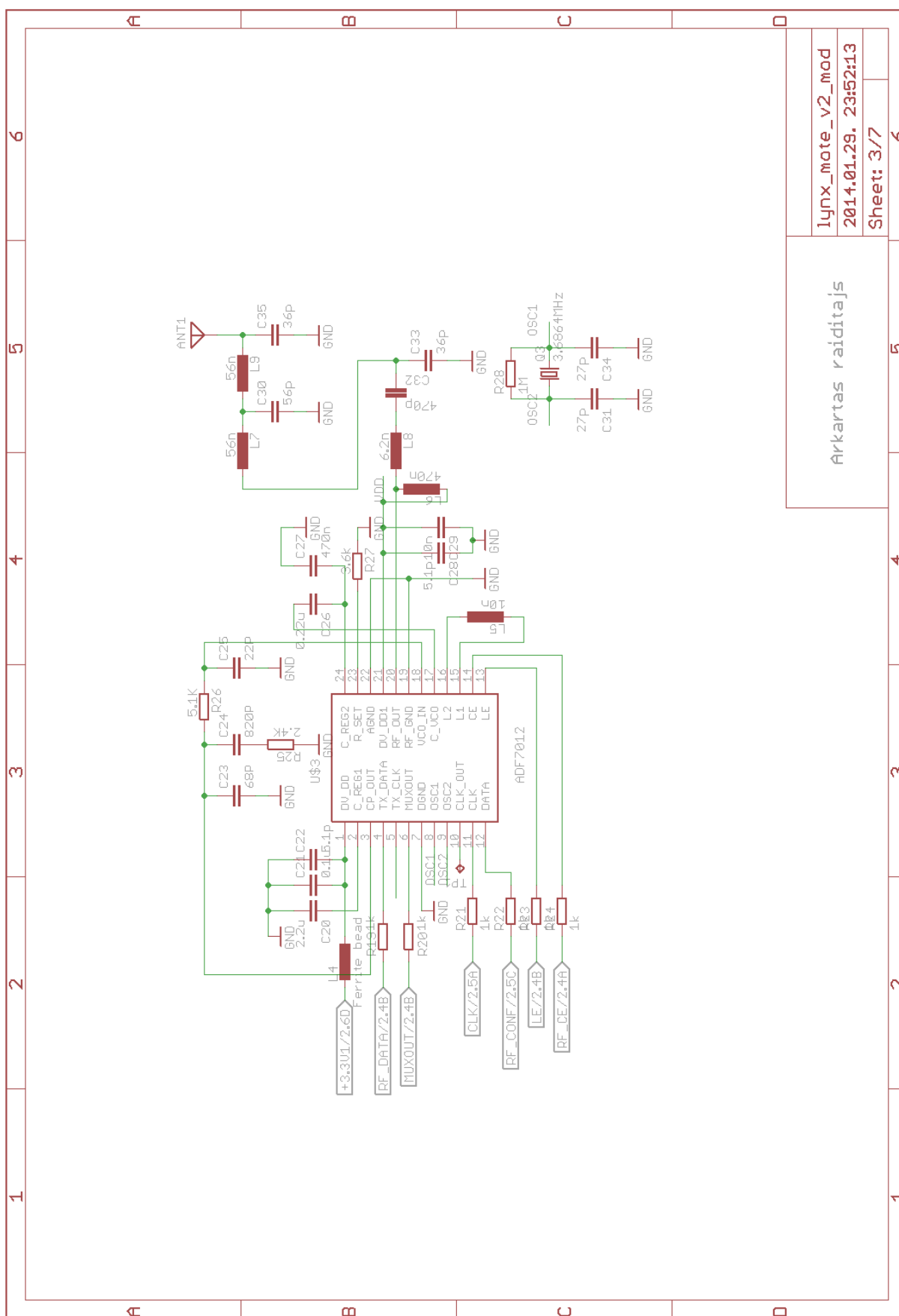
Apzīmējums	Nosaukums	Nomināls	Daudzums
R38	Rezistors	10Ω	1
R1, R2, R7	Rezistors	27Ω	3
R9, R10, R11, R12	Rezistors	100Ω	4
R49, R50, R51, R52	Rezistors	470Ω	4
L1	Induktors	600H	1
L20, L21, L22	Induktors	<100H	3
C7, C8, C15, C18, C21, C63, C66, C73, C75, C77, C78	Kondensators	0.1μF	11
C26, C76	Kondensators	0.22μF	2
R4	Rezistors	1.5KΩ	1
R13, R18, R36, R41	Rezistors	100KΩ	4
C4, C5, C39, C45, C46, C47, C49, C61, C79, C81, C82	Kondensators	100nF	11
R5, R29	Rezistors	10KΩ	2
C1, C29, C53, C54, C65, C83, C84	Kondensators	10nF	7
L5	Induktors	10nH	1
C38, C74	Kondensators	10μF	2
C41, C42	Kondensators	12pF	2
R40	Rezistors	160KΩ	1
L13, L14, L15, L16, L17, L18, L19	Induktors	16nH	7
C10, C36	Kondensators	1F	2
Turpinājums nākošajā lappusē			

Tabula A.1. – turpinājums no iepriekšējās lappuses			
Apzīmējums	Nosaukums	Nomināls	Daudzums
R8, R19, R20, R21, R22, R23, R24, R42, R43, R44, R45, R46, R47, R48	Rezistors	1K Ω	14
R3, R14, R28, R30	Rezistors	1M Ω	4
C17	Kondensators	1nF	1
C6, C67, C72	Kondensators	1 μ F	3
R6, R16, R17, R32, R33, R34	Rezistors	2.2K Ω	6
C20	Kondensators	2.2 μ F	1
L2, L10	Induktors	2.2 μ H	2
R25	Rezistors	2.4K Ω	1
C51, C52	Kondensators	220pF	2
C25	Kondensators	22pF	1
C31, C34, C48, C50	Kondensators	27pF	4
R15, R31	Rezistors	2M Ω	2
C64	Kondensators	2.2nF	1
Q3	Rezonators	3.6864MHz	1
R27	Rezistors	3.6K Ω	1
Q4	Rezonators	32kHz	1
C3	Kondensators	33nF	1
C33, C35	Kondensators	36pF	2
C2, C9, C11, C12, C13, C14, C16, C37, C43, C44	Kondensators	4.7 μ HF	10
IC4	Mikroshēma	4511D	1
C19, C27, C40	Kondensators	470nF	3
Turpinājums nākošajā lappusē			

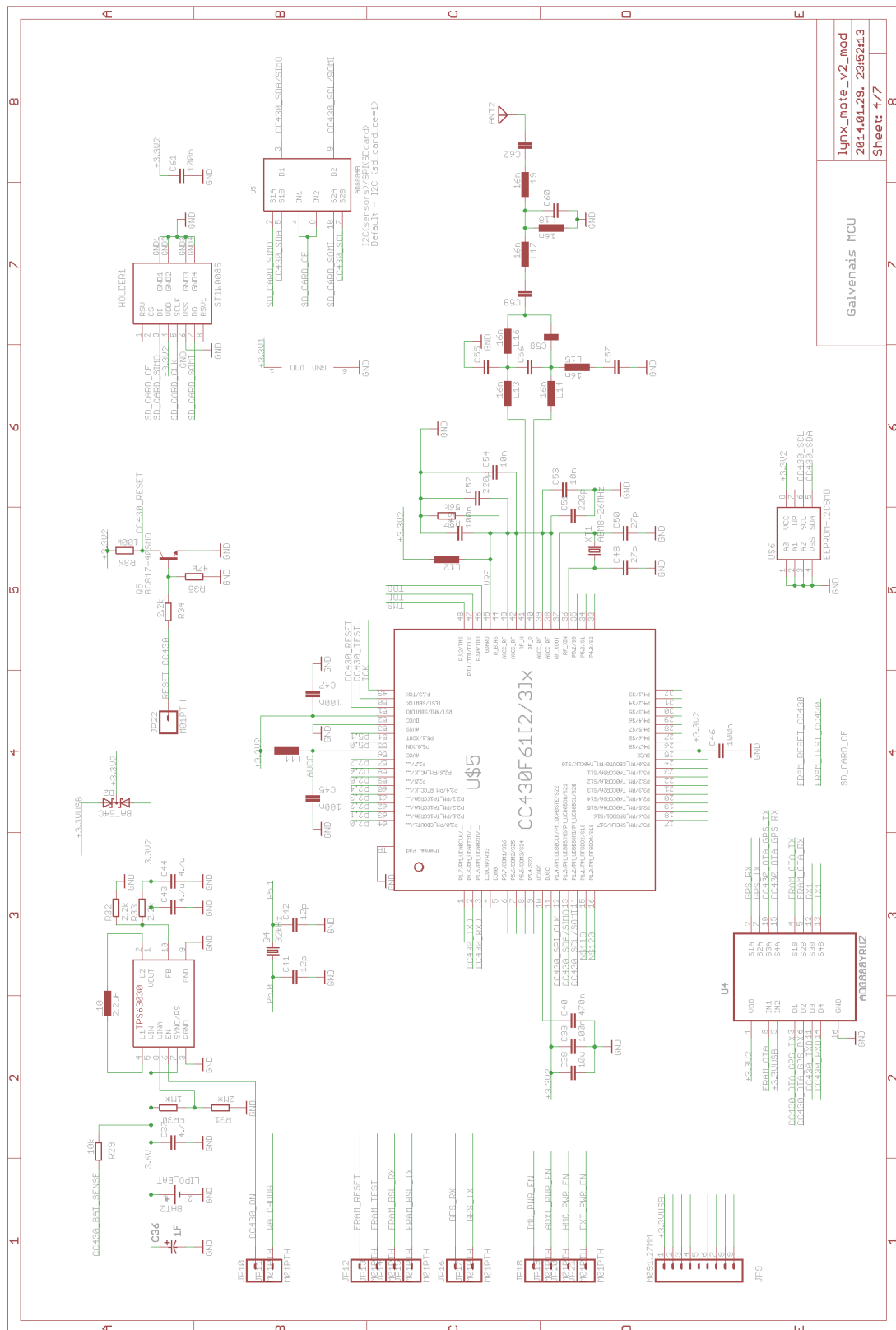
Tabula A.1. – turpinājums no iepriekšējās lappuses			
Apzīmējums	Nosaukums	Nomināls	Daudzums
L6	Induktors	470nH	1
C32	Kondensators	470pF	1
R35	Rezistors	47K Ω	1
C68, C70, C71, C80, C85, C86, C87, C88	Kondensators	4.7 μ H	8
R26	Rezistors	5.1K Ω	1
C22, C28	Kondensators	5.1pF	2
R37	Rezistors	56K Ω	1
L7, L9	Induktors	56nH	2
C30	Kondensators	56pF	1
C69	Kondensators	5pF	1
L8	Induktors	6.2nH	1
C23	Kondensators	68pF	1
Q1	Rezonators	6MHz	1
C24	Kondensators	820pF	1
R39	Rezistors	91K Ω	1
XT1	Kristāls	ABM8-26MHz	1
U\$3	Mikroshēma	ADF7012	1
U8	Mikroshēma	ADG812YRUZ	1
U5	Mikroshēma	ADG884B	1
U2, U4	Mikroshēma	ADG888YRUZ	2
U9	Mikroshēma	ADXL345	1
D1, D2	Diode	BAT54C	2
Q5	Rezonators	BC817-40SMD	1
U\$5	Mikroshēma	CC430F6137	1
U\$2, U\$6	Mikroshēma	EEPROM-I2CSMD	2
L3, L4	Induktors	Ferrite bead	2
Turpinājums nākošajā lappusē			

Tabula A.1. – turpinājums no iepriekšējās lappuses			
Apzīmējums	Nosaukums	Nomināls	Daudzums
IC1	Mikroshēma	FM93C66MT8	1
U\$1	Mikroshēma	MSP430FR5739	1
U\$7	Mikroshēma	HMC5883LSMD	1
U6	Mikroshēma	IMU3000	1
BAT1, BAT2	Litija polimēru baterija	LIPO_BAT	2
LED1	Gaismas diožu bloks	LTS-2301ANC	1
JP1, JP2, JP3, JP4, JP5, JP6, JP7, JP10, JP11, JP12, JP13, JP14, JP15, JP16, JP17, JP18, JP19, JP20, JP21, JP22, JP23, JP24, JP25, JP26	Spraudnis	M01PTH	24
U\$9, U\$10	Mikroshēma	M02NG	2
JP9, JP27	Spraudnis	M091.27MM	2
U7	Mikroshēma	MAX7	1
U11, U12	Mikroshēma	MCP73831	2
X2, X3	Ligzda	MINI-USB-32005-201	2
U10	Mikroshēma	SHT21	1
HOLDER1	SD kartes ligzda	ST1W008S	1
TP1	Testa laukums	TPB1,27	1
U3, U\$4	Mikroshēma	TPS6303X	2
IC3	Mikroshēma	TPS77001	1
IC2	Mikroshēma	TPS77025	1
Turpinājums nākošajā lappusē			

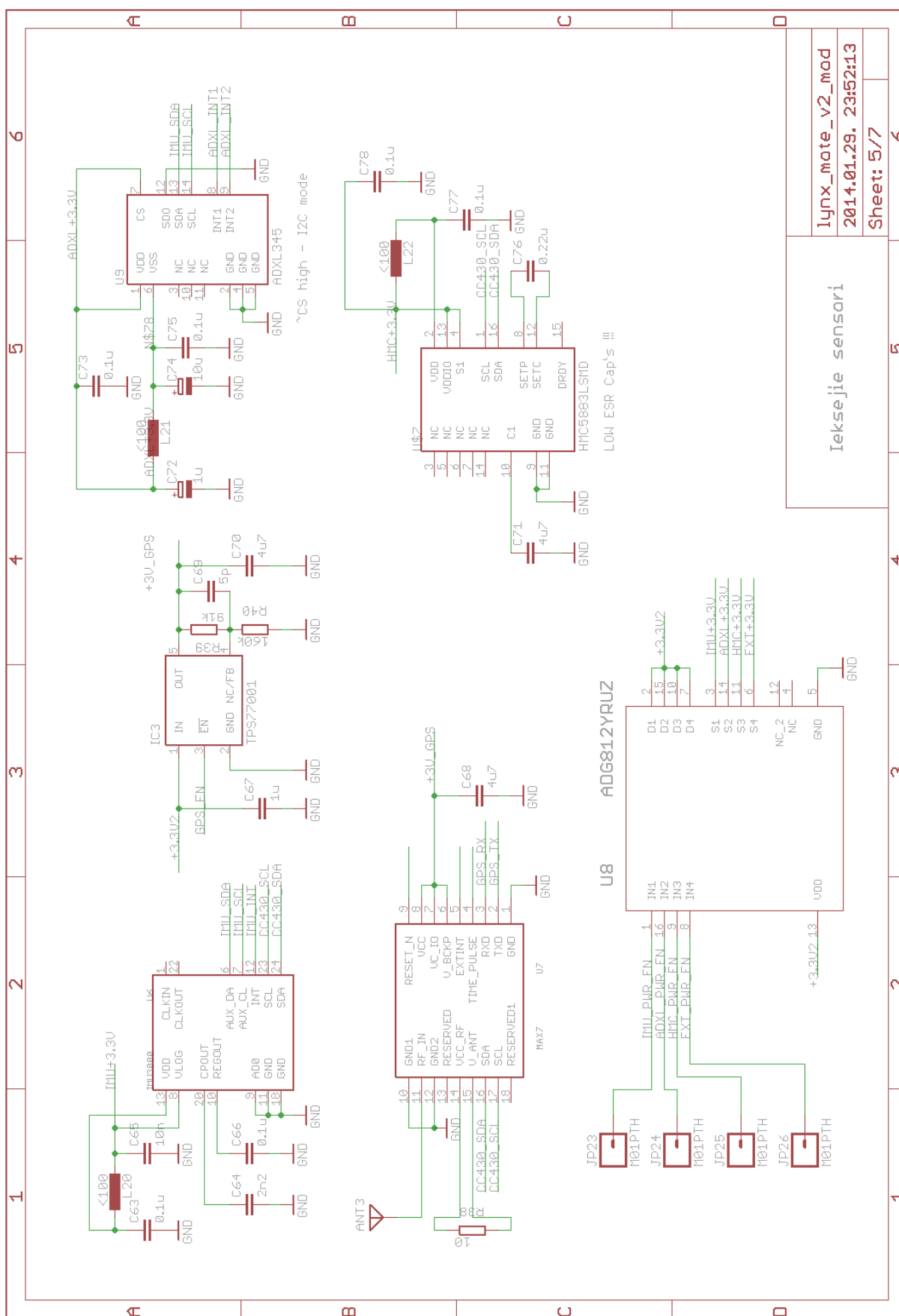
Tabula A.1. – turpinājums no iepriekšējās lappuses			
Apzīmējums	Nosaukums	Nomināls	Daudzums
ANT1, ANT2, ANT3	Antena	ANTENNA	3
C55, C56, C57, C58, C59, C60, C62	Kondensators	C-EUC0402	7
JP28	Spraudnis	M041.27MM	1
JP29	Spraudnis	M051.27MM	1
JP8	Spraudnis	JP1E	1
L11	Induktors	L-EUL0603	1
L12	Induktors	L-EUL0402	1
LED2, LED3	Gaismas diode	LED-FKIT-1206	2
Q2	Rezonators	IRLML6402	1
U\$8	Mikroshēma	ISL29003	1
U1	Mikroshēma	FT2232L	1
X1	Ligzda	MINI-USB-SCHIELD- 32005-201	1



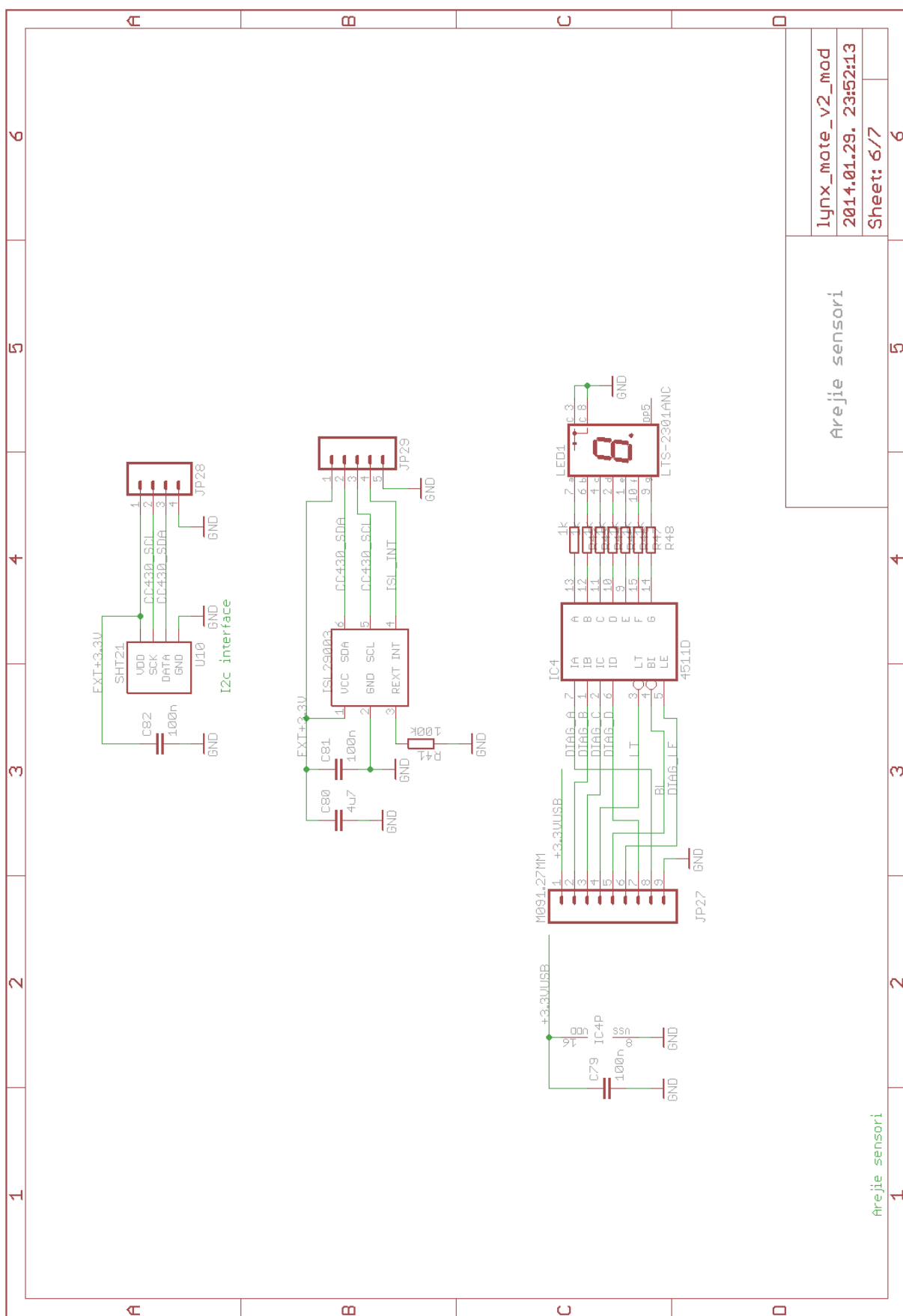
Att. A.3.: Ārkārtas moduļa raidītāja principiālā shēma



Att. A.4.: Galvenā moduļa mikrokontroliera principiālā shēma



Att. A.5.: Iekšējo sensoru principiālā shēma



Att. A.6.: Ārējo sensoru un 7 segmentu displeja principiālā shēma

LynxNet gala iekārtas enerģijas patēriņa aprēķina programmatūra

```
#!/usr/bin/python

# LynxNet energy calculation
# v 3.0
# Created by: Reinholds Zviedris
# Last updated: 15.06.2014.
# ----
# All values comes from:
# * http://jupiter.cs.fmf.lu.lv/dilab/index.php/Izmantojamie_komponenti
# * "LynxNet: Wild Animal Monitoring Using Sensor Networks" paper
# * Data sheets of components used
# * Author's PhD Thesis

import sys

if sys.version_info < (2, 7):
    from optparse import OptionParser
else:
    import argparse

#####
# System variables                                     #
#####

# Show verbose output
verboseFlag = False
# Show Watts instead of Amps
wattsFlag = False
# Real mode
realModeFlag = True
# Radio off
radioOffFlag = False
# Default prototype
prototype = 3
```

```

# Battery power in mAh
battery_power = 19000
# Test battery power in mAh
test_battery_power = 6800
# Battery voltage
battery_voltage = 3.6
# Test battery voltage
test_battery_voltage = 3.75
# System voltage
prototype1_system_voltage = 3.3
prototype2_system_voltage = 3.0
prototype3_system_voltage = prototype2_system_voltage
# Once in how much hours GPS is turned on
hours = 1
# Once in how much hours environmental sensors are turned on
env_hours = hours
# Frequency of activity readings
frequency = 10
# Battery self discharge in % per day
battery_selfdischarge = 0.00022
# Battery self discharge in % per hour
battery_selfdischarge_hourly = battery_selfdischarge / 24

#####
# Current used by devices in mA          #
# Wake-up & operations times in ms      #
# Information based on datasheets        #
#####

# MCU
# Tmote Mini - TI MSP430F1611
prototype1_mcu_working = 2.0
prototype1_mcu_sleeping = 0.001
# TI CC430F6137 @ 16MHz + RAM
prototype2_mcu_working = 2.4
prototype2_mcu_sleeping = 0.002
prototype3_mcu_working = prototype2_mcu_working
prototype3_mcu_sleeping = prototype2_mcu_sleeping

# Radio
# radio LINX TRM-433 - 10000 bps max
prototype1_radio_rx = 6.4
prototype1_radio_rx_on_sec = 0.0022
prototype1_radio_tx = 15.9
prototype1_radio_tx_on_sec = 0.002
prototype1_radio_speed = 10000

```

```

# radio CC430 - 250 kBaud max
prototype2_radio_rx = 17.0 # 433MHz @ 38.4 kBaud (39.321 kbps)
prototype2_radio_rx_on_sec = 0.001
prototype2_radio_tx = 16.8 # 0 dBm
prototype2_radio_tx_on_sec = 0.001
prototype2_radio_speed = 39321
prototype3_radio_rx = prototype2_radio_rx
prototype3_radio_rx_on_sec = prototype2_radio_rx_on_sec
prototype3_radio_tx = prototype2_radio_tx
prototype3_radio_tx_on_sec = prototype2_radio_tx_on_sec
prototype3_radio_speed = prototype2_radio_speed

# GPS
# MTK
prototype1_gps_working = 63.0
prototype1_gps_sleep = 0.0
# FastTrax
prototype2_gps_working = 37.6
prototype2_gps_sleep = 0.015
# U-Blox MAX-7W with active antenna
prototype3_gps_working = 39.5
prototype3_gps_sleep = 0.015

# Humidity & temperature sensor
# SHT15
prototype1_sht = 0.55
prototype1_sht_rh_sec = 8
prototype1_sht_temp_sec = 30
# SHT21
prototype2_sht = 0.3
prototype2_sht_rh_sec = 8
prototype2_sht_temp_sec = 30
prototype3_sht = prototype2_sht
prototype3_sht_rh_sec = prototype2_sht_rh_sec
prototype3_sht_temp_sec = prototype2_sht_temp_sec

# Light sensor
# TEMT6000
prototype1_light = 0.05
prototype1_light_sleep = 0
prototype1_light_measurement_sec = 0.01
prototype2_light = prototype1_light
prototype2_light_sleep = prototype1_light_sleep
prototype2_light_measurement_sec = prototype1_light_measurement_sec
# ISL29003
prototype3_light = 0.29 # 330 uA max

```

```

prototype3_light_sleep = 0.0001 # 1 uA max
prototype3_light_measurement_sec = 0.1

# Accelerometer
# ADXL335
prototype1_accelerometer_high = 0.3
prototype1_accelerometer_low = prototype1_accelerometer_high
prototype1_accelerometer_sleep = 0
prototype1_accelerometer_measurement_sec = 0.005
prototype2_accelerometer_high = prototype1_accelerometer_high
prototype2_accelerometer_low = prototype1_accelerometer_high
prototype2_accelerometer_sleep = prototype1_accelerometer_sleep
prototype2_accelerometer_measurement_sec = \
prototype1_accelerometer_measurement_sec
# ADXL345
prototype3_accelerometer_high = 0.140 # @ >= 100 Hz
prototype3_accelerometer_low = 0.03 # @ < 10 Hz
prototype3_accelerometer_sleep = 0.0001
prototype3_accelerometer_measurement_sec = 0.002

# Gyroscope
# IDG-500
prototype1_gyro = 7.0
prototype1_gyro_sleep = 0
prototype1_gyro_measurement_sec = 0.208
prototype2_gyro = prototype1_gyro
prototype2_gyro_sleep = prototype1_gyro_sleep
prototype2_gyro_measurement_sec = prototype1_gyro_measurement_sec
# IMU 3000
prototype3_gyro = 6.1
prototype3_gyro_sleep = 0.005
prototype3_gyro_measurement_sec = 0.150

# Magnetometer
# HMC5883L
prototype1_compass = 0
prototype1_compass_idle = 0
prototype1_compass_measurement_sec = 0
prototype2_compass = prototype1_compass
prototype2_compass_idle = prototype1_compass_idle
prototype2_compass_measurement_sec = prototype1_compass_measurement_sec
prototype3_compass = 0.1
prototype3_compass_idle = 0.002
prototype3_compass_measurement_sec = 0.056

# Flash/SD card

```

```

# SD
prototype1_sd_working = 50.0
prototype1_sd_standby = 0.2
# MicroSD
prototype2_sd_working = 40.0 # 72 mA max
prototype2_sd_standby = 0.12 # 0.15 mA max
prototype3_sd_working = prototype2_sd_working
prototype3_sd_standby = prototype2_sd_standby

#####
# Device settings
#####

# GPS turned on for X secs
gps_fix_rate_min = 60.0
# Environment sensors turned on for X secs
env_sensors_read_rate_min = 60.0
# Activity sensors turned on for X secs
act_sensors_read_rate_min = 5.0
# Information stored to SD card once every 5 minutes
data_rate_min = 5.0
data_writing_time_sec = 0.5
data_standby_time_sec = 0.5

# Radio packet sizes, including checksum
gps_sensor_packet_size = 22
prototype1_activity_packet_size = 17
prototype1_num_of_activity_packets = 5
prototype2_activity_packet_size = 25
prototype2_num_of_activity_packets = 5
prototype3_activity_packet_size = 12
prototype3_activity_series_packet_size = 26
# Series info packet + data packets
prototype3_num_of_activity_packets = 1 + (act_sensors_read_rate_min \
* frequency)

# How often to initiate MAC exchange if we have data
mac_exchange_interval_min = 5.0

#####
# Helper functions
#####

# Seconds to hours
def s2h(s):
return s / 3600.

```

```

# Hours to days
def h2d(h):
    return h / 24.

# Hours to months
def h2m(h):
    return h2d(h) / 30.4368499

# Hours to years
def h2y(h):
    return h2d(h) / 365.242199

#####
# Functions used for calculations                                #
#####

# Radio bits to miliseconds (OOK modulation + Manchester encoding)
def radio_bits2ms(bits):
    if prototype == 1:
        radio_speed_ms = 1000.0 / prototype1_radio_speed
    else:
        radio_speed_ms = 1000.0 / prototype2_radio_speed
    return (2 * bits * radio_speed_ms) + (18 * radio_speed_ms)

# Overhead of the mac protocol handshake
def mac_initial_overhead_ms():
    return 2 * radio_bits2ms(4 * 8) # sending + listening, 4 byte packets

# Get size of activity packet and additional packets
def get_activity_packet_size():
    if prototype == 1:
        activity_packet_size = prototype1_activity_packet_size
        additional_activity_packet = 0
    elif prototype == 2:
        activity_packet_size = prototype2_activity_packet_size
        additional_activity_packet = 0
    else:
        activity_packet_size = prototype3_activity_series_packet_size
        additional_activity_packet = prototype3_activity_packet_size

    return (activity_packet_size, additional_activity_packet)

# Radio operations calculation in miliseconds
def calc_radio_time_ms():
    num_gps_sensor_packets = 60.0 / ( hours * gps_fix_rate_min )
    if prototype == 1:
        total_activity_packets = ( 60.0 / act_sensors_read_rate_min ) \
            * prototype1_num_of_activity_packets

```

```

radio_rx_on = prototype1_radio_rx_on_sec
radio_tx_on = prototype1_radio_tx_on_sec
elif prototype == 2:
total_activity_packets = ( 60.0 / act_sensors_read_rate_min ) \
* prototype2_num_of_activity_packets
radio_rx_on = prototype2_radio_rx_on_sec
radio_tx_on = prototype2_radio_tx_on_sec
else:
total_activity_packets = ( 60.0 / act_sensors_read_rate_min ) \
* (prototype3_num_of_activity_packets - 1)
radio_rx_on = prototype3_radio_rx_on_sec
radio_tx_on = prototype3_radio_tx_on_sec

(activity_packet_size, additional_activity_packet) = get_activity_packet_size()

num_mac_exchanges = 60.0 / mac_exchange_interval_min

mac_time_tx = num_mac_exchanges * radio_bits2ms(4 * 8) + radio_tx_on
mac_time_rx = mac_time_tx + radio_rx_on

data_time_tx = num_gps_sensor_packets * radio_bits2ms(gps_sensor_packet_size * 8) \
+ total_activity_packets * radio_bits2ms(activity_packet_size * 8) \
+ radio_bits2ms(additional_activity_packet * 8)
data_time_rx = 0 # Assuming that ACKs is not received

return (mac_time_tx + data_time_tx, mac_time_rx + data_time_rx)

# Get misc. sensor settings details
def get_sensors_details():
if prototype == 1:
environment_sensors_read_time_sec = prototype1_sht_rh_sec \
+ prototype1_sht_temp_sec + prototype1_light_measurement_sec
environment_sensors_current = prototype1_sht + prototype1_light
activity_sensors_read_time_sec = prototype1_accelerometer_measurement_sec \
+ prototype1_gyro_measurement_sec \
+ prototype1_compass_measurement_sec
num_of_activity_packets = prototype1_num_of_activity_packets
elif prototype == 2:
environment_sensors_read_time_sec = prototype2_sht_rh_sec \
+ prototype2_sht_temp_sec + prototype2_light_measurement_sec
environment_sensors_current = prototype2_sht + prototype2_light
activity_sensors_read_time_sec = prototype2_accelerometer_measurement_sec \
+ prototype2_gyro_measurement_sec \
+ prototype2_compass_measurement_sec
num_of_activity_packets = prototype2_num_of_activity_packets
else:

```

```

environment_sensors_read_time_sec = prototype3_sht_rh_sec \
+ prototype3_sht_temp_sec + prototype3_light_measurement_sec
environment_sensors_current = prototype3_sht + prototype3_light
activity_sensors_read_time_sec = prototype3_accelerometer_measurement_sec \
+ prototype3_gyro_measurement_sec \
+ prototype3_compass_measurement_sec
num_of_activity_packets = act_sensors_read_rate_min * frequency
return (environment_sensors_read_time_sec, environment_sensors_current, \
activity_sensors_read_time_sec, num_of_activity_packets)

# Calculate current consumption in 1 hour for devices used
def current_consumption_in_h():
    if prototype == 1:
        current_gps_working = prototype1_gps_working
        current_gps_sleep = prototype1_gps_sleep
        gps_fix_time_min = 1.0
        current_mote = prototype1_mcu_working
        current_mote_sleep = prototype1_mcu_sleeping
        current_radio_rx = prototype1_radio_rx
        current_radio_tx = prototype1_radio_tx
        current_sd_working = prototype1_sd_working
        current_sd_standby = prototype1_sd_standby
        current_accel = prototype1_accelerometer_high
        current_gyro = prototype1_gyro
        current_compass = prototype1_compass
        system_voltage = prototype1_system_voltage
    elif prototype == 2:
        current_gps_working = prototype2_gps_working
        current_gps_sleep = prototype2_gps_sleep
        gps_fix_time_min = 0.75
        current_mote = prototype2_mcu_working
        current_mote_sleep = prototype2_mcu_sleeping
        current_radio_rx = prototype2_radio_rx
        current_radio_tx = prototype2_radio_tx
        current_sd_working = prototype2_sd_working
        current_sd_standby = prototype2_sd_standby
        current_accel = prototype2_accelerometer_high
        current_gyro = prototype2_gyro
        current_compass = prototype2_compass
        system_voltage = prototype2_system_voltage
    else:
        current_gps_working = prototype3_gps_working
        current_gps_sleep = prototype3_gps_sleep
        gps_fix_time_min = 0.6
        current_mote = prototype3_mcu_working
        current_mote_sleep = prototype3_mcu_sleeping

```

```

current_radio_rx = prototype3_radio_rx
current_radio_tx = prototype3_radio_tx
current_sd_working = prototype3_sd_working
current_sd_standby = prototype3_sd_standby
current_accel = prototype3_accelerometer_high
current_gyro = prototype3_gyro
current_compass = prototype3_compass
system_voltage = prototype3_system_voltage

gps_time = ( 60 / ( gps_fix_rate_min * hours ) ) * gps_fix_time_min
gps_sleep_time = 60 - gps_time
if verboseFlag == True:
    print 'gps time = ', round(gps_time,2), 'minutes'
    print 'gps sleep time = ', round(gps_sleep_time,2), 'minutes'
gps_working_c = gps_time * ( current_gps_working / 60.0 )
gps_sleeping_c = gps_sleep_time * ( current_gps_sleep / 60.0 )
gps_c = gps_working_c + gps_sleeping_c
if verboseFlag == True:
    if wattsFlag == True:
        gps_working_wc = gps_working_c * system_voltage
        gps_sleeping_wc = gps_sleeping_c * system_voltage
        gps_wc = gps_c * system_voltage
        print 'gps working current = ', round(gps_working_wc,3), 'mW/h'
        print 'gps sleeping current = ', round(gps_sleeping_wc,3), 'mW/h'
        print 'gps total current = ', round(gps_wc,3), 'mW/h'
    else:
        print 'gps working current = ', round(gps_working_c,3), 'mA/h'
        print 'gps sleeping current = ', round(gps_sleeping_c,3), 'mA/h'
        print 'gps total current = ', round(gps_c,3), 'mA/h'

(env_sensors_read_time_sec, env_sensors_current, act_sensors_read_time_sec, \
num_of_act_packets) = get_sensors_details()

act_sensors_time = (60 / act_sensors_read_rate_min) \
* ( (act_sensors_read_time_sec * num_of_act_packets) / 60.0 )
if verboseFlag == True:
print 'single activity sensors read time = ', \
round(act_sensors_read_time_sec,3),'seconds'
    print 'activity sensors time = ', round(act_sensors_time,3),'minutes'
act_sensors_c = act_sensors_time * ( (current_accel + current_gyro \
+ current_compass) / 60.0 )
if verboseFlag == True:
    if wattsFlag == True:
        act_sensors_wc = act_sensors_c * system_voltage
        print 'activity sensors current = ', \
round(act_sensors_wc,3), 'mW/h'

```

```

        else:
            print 'activity sensors current = ', \
round(act_sensors_c,3), 'mA/h'

env_sensors_time = ( 60 / ( env_sensors_read_rate_min * env_hours ) ) \
* ( env_sensors_read_time_sec / 60.0 )
if verboseFlag == True:
    print 'environment sensors time = ', round(env_sensors_time,2),'minutes'
env_sensors_c = env_sensors_time * env_sensors_current
if verboseFlag == True:
    if wattsFlag == True:
        env_sensors_wc = env_sensors_c * system_voltage
        print 'environment sensors current = ', \
round(env_sensors_wc,3), 'mW/h'
    else:
        print 'environment sensors current = ', \
round(env_sensors_c,3), 'mA/h'

sensors_time = act_sensors_time + env_sensors_time
if verboseFlag == True:
    print 'total sensors time = ', round(sensors_time,2),'minutes'
sensors_c = act_sensors_c + env_sensors_c
if verboseFlag == True:
    if wattsFlag == True:
        sensors_wc = sensors_c * system_voltage
        print 'total sensors current = ', round(sensors_wc,3), 'mW/h'
    else:
        print 'total sensors current = ', round(sensors_c,3), 'mA/h'

    if radioOffFlag == False:
        (radio_time_tx, radio_time_rx) = calc_radio_time_ms()
        if verboseFlag == True:
            print 'radio time TX = ',round(radio_time_tx,2), 'ms'
            print 'radio time RX = ',round(radio_time_rx,2), 'ms'
            radio_time_tx /= 60000.
            radio_time_rx /= 60000.
            radio_time = radio_time_rx + radio_time_tx
        if verboseFlag == True:
            print 'radio time = ', round(radio_time,2), 'minutes'
        radio_tx_c = current_radio_tx * radio_time_tx
        radio_rx_c = current_radio_rx * radio_time_rx
        radio_c = radio_tx_c + radio_rx_c
        if verboseFlag == True:
            if wattsFlag == True:
                radio_tx_wc = radio_tx_c * system_voltage
                radio_rx_wc = radio_rx_c * system_voltage

```

```

        radio_wc = radio_c * system_voltage
        print 'radio TX current = ', \
round(radio_tx_wc,3), 'mW/h'
        print 'radio RX current = ', \
round(radio_rx_wc,3), 'mW/h'
        print 'radio current = ', \
round(radio_wc,3), 'mW/h'
    else:
        print 'radio TX current = ', \
round(radio_tx_c,3), 'mA/h'
        print 'radio RX current = ', \
round(radio_rx_c,3), 'mA/h'
        print 'radio current = ', \
round(radio_c,3), 'mA/h'
    else:
radio_time = 0
radio_c = 0
print "radio is off!"

sd_time_w = (60 / data_rate_min) * data_writing_time_sec / 60.0
sd_time_s = (60 / data_rate_min) * data_standby_time_sec / 60.0
sd_time = sd_time_w + sd_time_s
sd_c = ( sd_time_w * ( current_sd_working / 60.0 ) ) \
+ ( sd_time_s * ( current_sd_standby / 60.0 ) )
if verboseFlag == True:
    if wattsFlag == True:
        sd_wc = sd_c * system_voltage
        print 'SD card current = ', round(sd_wc,3), 'mW/h'
    else:
        print 'SD card current = ', round(sd_c,3), 'mA/h'

mote_time = gps_time + radio_time + act_sensors_time \
+ env_sensors_time + sd_time
mote_c = mote_time * ( current_mote / 60.0 )

if verboseFlag == True:
    if wattsFlag == True:
        mote_wc = mote_c * system_voltage
        print 'mote active current = ', \
round(mote_wc,3), 'mW/h'
    else:
        print 'mote active current = ', \
round(mote_c,3), 'mA/h'
        print 'mote time = ', round(mote_time,2), 'minutes per hour'

sleep_time = 60.0 - mote_time

```

```

sleep_c = sleep_time * current_mote_sleep

if verboseFlag == True:
    if wattsFlag == True:
        sleep_wc = sleep_c * system_voltage
        print 'mote sleep current = ', \
round(sleep_wc,3), 'mW/h'
    else:
        print 'mote sleep current = ', \
round(sleep_c,3), 'mA/h'

    total = gps_c + act_sensors_c + env_sensors_c + radio_c \
+ mote_c + sleep_c + sd_c;
    return (total, num_of_act_packets, system_voltage)

# Get system overall lifetime
def system_lifetime():
    # c is in mA
    (c, num_of_act_packets, system_voltage) = current_consumption_in_h()
    if verboseFlag == True:
        if wattsFlag == True:
            wc = c * system_voltage
            print 'total current = ', round(wc,3), 'mW/h'
        else:
            print 'total current = ', round(c,3), 'mA/h'
    # hours = mAh / mA
if realModeFlag == True:
    normal_h = battery_power / c
else:
    normal_h = test_battery_power / c
    self_discharge_percents = normal_h * battery_selfdischarge_hourly
if realModeFlag == True:
    self_discharged_battery = battery_power \
- ( battery_power * self_discharge_percents )
else:
    self_discharged_battery = test_battery_power \
- ( test_battery_power * self_discharge_percents )
    if verboseFlag == True:
        print 'normal_h = ', round(normal_h,2), 'hours or', \
round(h2d(normal_h),2), 'days or', \
round(h2m(normal_h),2), 'months'
        print 'discharge % = ', \
round(self_discharge_percents*100,2), '%'
        h = self_discharged_battery / c
        sensor_packets = 60.0 / act_sensors_read_rate_min
(activity_packet_size, additional_activity_packet) \

```

```

= get_activity_packet_size()

        bytes = ( gps_sensor_packet_size + ( activity_packet_size \
* num_of_act_packets * sensor_packets ) \
+ additional_activity_packet ) * round(h,0)
        kilobytes = bytes / 1024
        megabytes = kilobytes / 1024
if radioOffFlag == True:
print 'NB! Radio transmit turned off!'
if realModeFlag == False:
print 'NB! Test mode battery enabled!'
print '*** Data for prototype version:', prototype
        print 'Total memory used:', bytes, 'bytes or', \
round(kilobytes,1), 'Kbytes or', \
round(megabytes,1), 'Mbytes'
        print 'System lifetime is', round(h,2), 'hours or', \
round(h2d(h),2), 'days or', \
round(h2m(h),2), 'months'

#####
# Main functions with argument parsing      #
#####

def main():
    global verboseFlag
    global wattsFlag
global realModeFlag
global radioOffFlag
    global battery_power
    global hours
    global prototype
global frequency

    description = "LynxNet Device Lifetime Calculator"
    if sys.version_info < (2, 7):
        parser = OptionParser(description=description)
        parser.add_option("-q", "--quiet",
action="store_false", dest="verbose",
default=False,
help="be vewwy quiet (I'm hunting wabbits) [default]")
        parser.add_option("-v", "--verbose",
action="store_true", dest="verbose", default=True,
help="make lots of noise")
        parser.add_option("-t", "--testmode",
action="store_false", dest="realmode", default=True,
help="enable test mode battery option (can't \

```

```

change capacity)")
parser.add_option("-r", "--radiooff",
action="store_true", dest="radiooff", default=False,
help="turn off radio transmit at all")
        parser.add_option("-p", "--prototype",
metavar="VERSION",
default=prototype,
dest="prototype",
help="select for which prototype VERSION to calculate \
lifetime [default: %default]")
        parser.add_option("-b", "--battery",
metavar="CAPACITY",
default=battery_power,
dest="battery",
help="battery CAPACITY in mAh [default: %default]")
        parser.add_option("-g", "--gps",
metavar="HOUR",
default=hours,
dest="hours",
help="GPS reading once per HOUR [default: %default]")
parser.add_option("-f", "--frequency",
metavar="HERTZ",
default=frequency,
destination="frequency",
help="activity reading frequency in HERTZ (only for v3 \
prototype, max. 20Hz) [default: %default]")
        parser.add_option("-w", "--watts",
action="store_true", dest="watts", default=False,
help="show everything in mW instead of mA (enables \
verbose output)")

        (options, args) = parser.parse_args()
        verboseFlag = options.verbose
realModeFlag = options.realmode
radioOffFlag = options.radiooff
        wattsFlag = options.watts
if wattsFlag == True:
verboseFlag = True
        battery_power = int(options.battery)
        prototype = int(options.prototype)
hours = int(options.hours)
frequency = int(options.frequency)
if frequency > 20:
frequency = 20
        else:
        parser = argparse.ArgumentParser(description=description)
        parser.add_argument("-q", "--quiet",

```

```

action="store_false", dest="verbose", default=False,
help="be vewwy quiet (I'm hunting wabbits) [default]")
        parser.add_argument("-v", "--verbose", default=True,
                                action="store_true", dest="verbose",
                                help="make lots of noise")
parser.add_argument("-t", "--testmode", default=True,
action="store_false", dest="realmode",
help="enable test mode battery option (can't change \
capacity)")
parser.add_argument("-r", "--radiooff", default=False,
action="store_true", dest="radiooff",
help="turn off radio transmit at all")
        parser.add_argument("-p", "--prototype",
metavar="VERSION",
default=prototype,type=int,
dest="prototype",
help="select for which prototype VERSION to calculate \
lifetime [default: %(default)s]")
        parser.add_argument("-b", "--battery",
metavar="CAPACITY",
default=battery_power,type=int,
dest="battery",
help="battery CAPACITY in mAh [default: %(default)s]")
        parser.add_argument("-g", "--gps",
metavar="HOURS",
default=hours,type=int,
dest="hours",
help="GPS reading once per HOURS [default: %(default)s]")
parser.add_argument("-f", "--frequency",
metavar="HERTZ",
default=frequency,type=int,
dest="frequency",
help="activity reading frequency in HERTZ (only for v3 \
prototype, max. 20Hz) [default: %(default)s]")
        parser.add_argument("-w", "--watts",
action="store_true", dest="watts", default=False,
help="show everything in mW instead of mA (enables \
verbose output)")
        args = parser.parse_args()
        verboseFlag = args.verbose
realModeFlag = args.realmode
radioOffFlag = args.radiooff
        wattsFlag = args.watts
if wattsFlag == True:
verboseFlag = True
        battery_power = int(args.battery)

```

```
        prototype = int(args.prototype)
        hours = int(args.hours)
frequency = int(args.frequency)
if frequency > 20:
frequency = 20
        system_lifetime()

if __name__ == '__main__':
    main()
```

Dinamiskā kontrolpunkta konfigurācijas komandu saraksts

Šajā pielikumā aprakstītas visas iespējamās komandas un atbildes no dinamiskā kontrolpunkta iegultās iekārtas, ar kurām iespējams veikt tās konfigurāciju, kā arī informācija par to, kuras no komandām saglabā datus atmiņas reģistros.

- **1*YYMMDDW*HHmm#** - ar šo komandu tiek veikta datuma, t.sk. nedēļas dienas, un laika uzstādīšana kontrolpunktam, kur YY ir gada pēdējie 2 cipari (00–99), MM – mēnesis (01–12), DD – datums (01–31), W – nedēļas diena (1–7), HH – stundas (00–23), mm – minūtes (00–59). Ja ievadītie dati ir korekti, atpakaļ tiek saņemta atbilde **1*OK#**, pretējā gadījumā atbilde ir **1*NOK#**.
- **2*XX#** - ar šo komandu tiek uzstādīts dinamiskā kontrolpunkta identifikators, kur XX ir skaitļi (01–99). Ja komanda izpildījusies veiksmīgi, atpakaļ tiek saņemta atbilde **2*XX#**, kur XX ir ievadītie skaitļi, savukārt, pretējā gadījumā atbilde ir **2*NOK#**.
- **3*X#** - ar šo komandu tiek uzstādīts dinamiskā koda garums simbolos, kur X ir skaitlis 4 vai 6. Iekārtā ir paredzēts, ka koda garumu vēlāk var palielināt līdz 8 simboliem garu. Ja komanda izpildījusies veiksmīgi, atpakaļ tiek saņemta atbilde **3*OK#**, pretējā gadījumā atbilde ir **3*NOK#**. Iespējams veikt arī pārbaudi, kāda vērtība šim parametram ir uzstādīta konfigurācijā, ievadot komandu **3#**. Kā atbilde tiks saņemta **3*X#**, kur X būs skaitlis 4 vai 6.
- **4*X#** - šī komanda uzstāda, cik bieži stundas laikā tiks mainīts dinamiskais kods, kur X var būt skaitlis 1, 2, 4, 6, 12, 20, 30. Ja komanda izpildījusies veiksmīgi, atpakaļ tiek saņemta atbilde **4*OK#**, pretējā gadījumā atbilde ir **4*NOK#**. Iespējams veikt arī pārbaudi, kāda vērtība šim parametram ir uzstādīta konfigurācijā, ievadot

komandu 4#. Kā atbilde tiks saņemta 4*X#, kur X būs skaitlis 1, 2, 4, 6, 12, 20 vai 30.

- 5*YMBDBHBmB*YEMEDEHEmE# - ar šo komandu tiek uzstādīts dinamiskā kontrolpunkta darbības laiks, kad tam jāieslēdzas un jāizslēdzas no sacensību režīma, kur YB ir ieslēgšanās gada pēdējie 2 cipari (00–99), MB – ieslēgšanās mēnesis (01–12), DB – ieslēgšanās diena (01–31), HB – ieslēgšanās stunda (00–23), mB – ieslēgšanās minūte, YE – izslēgšanās gada pēdējie 2 cipari (00–99), ME – izslēgšanās mēnesis (01–12), DE – izslēgšanās diena (01–31), HE – izslēgšanās stunda (00–23), mE – izslēgšanās minūte. Ja komanda izpildījusies veiksmīgi, atpakaļ tiek saņemta atbilde 5*OK#, pretējā gadījumā atbilde ir 5*NOK#. Iespējams veikt arī pārbaudi, kāda vērtība šim parametram ir uzstādīta konfigurācijā, ievadot komandu 5#. Kā atbilde tiks saņemta 5*YMBDBHBmB*YEMEDEHEmE#, kur YB ir ieslēgšanās gada pēdējie 2 cipari (00–99), MB – ieslēgšanās mēnesis (01–12), DB – ieslēgšanās diena (01–31), HB – ieslēgšanās stunda (00–23), mB – ieslēgšanās minūte, YE – izslēgšanās gada pēdējie 2 cipari (00–99), ME – izslēgšanās mēnesis (01–12), DE – izslēgšanās diena (01–31), HE – izslēgšanās stunda (00–23), mE – izslēgšanās minūte.
- 6*X*YdMdDdHdmd*YeMeDeHeme# - ar šo komandu iespējams uzstādīt vairākus (līdz 8) klusuma periodus sacensību laikā, kad dinamiskais kontrolpunkts izslēdz raidīšanas režīmu. Konkrētā perioda identifikators tiek norādīts ar mainīgo X, kas ir skaitlis no 1 līdz 8, savukārt, klusuma perioda sākums tiek definēts komandas otrajā daļā, kur Yd ir gada pēdējie 2 cipari (00–99), Md – mēnesis (01–12), Dd – diena (01–31), Hd – stunda (00–23), md – minūte. Klusuma perioda beigas tiek definētas komandas trešajā daļā, kur Ye ir gada pēdējie 2 cipari (00–99), Me – mēnesis (01–12), De – diena (01–31), He – stunda (00–23), me – minūte. Ja komanda izpildījusies veiksmīgi, atpakaļ tiek saņemta atbilde 6*X*OK#, pretējā gadījumā atbilde ir 6*X*NOK#, kur X ir perioda identifikators (1–8). Iespējams veikt arī pārbaudi, kāda vērtība šim parametram ir uzstādīta konfigurācijā, ievadot komandu 6*X#, kur X ir perioda identifikators (1–8). Ja konkrētais periods ir uzstādīts, tad kā atbilde tiks saņemta 6*X*YdMdDdHdmd*YeMeDeHeme#, kur X ir perioda identifikators (1–8), Yd – klusuma sākuma gada pēdējie 2 cipari (00–99), Md – mēnesis (01–12), Dd – diena (01–31),

Hd – stunda (00–23), md – minūte, Ye – klusuma beigu gada pēdējie 2 cipari (00–99), Me – mēnesis (01–12), De – diena (01–31), He – stunda (00–23), me – minūte. Savukārt, ja konkrētais periods nav uzstādīts, kā atbilde tiks saņemta 6*X*NOK#, kur X ir perioda identifikators (1–8).

- 7# - ar šo komandu iespējams noskaidrot, cik kodi būs nepieciešami konkrētajām sacensībām. Ja visi iepriekšējie uzstādījumi ir bijuši korekti, tad ievadot šo komandu tiks saņemta atbilde 7*X#, kur X ir skaitlis no 1 līdz 2048, kas ir šobrīd maksimālais kodu skaits, kas paredzēts iekārtā. Gadījumā, ka kāds no uzstādījumiem ir nekorrekts un nepieciešamo kodu skaitu nav iespējams aprēķināt, kā atbilde tiks saņemta 7*NOK#.
- 8*X*Y# - ar šo komandu tiek saglabāts atmiņā pārraidāmais kods. Mainīgais X ir koda numurs (1–2048), savukārt, Y ir kods skaitliskā. Tā minimālais garums ir 4 simboli, maksimālais 6 (nākotnē – līdz 8). Ja kods ir veiksmīgi saglabāts atmiņā, tiek saņemta atbilde 8*X*OK#, kur X ir koda numurs (1–2048), pretējā gadījumā tiek saņemta atbilde 8*X*NOK#. Ar šīs komandas palīdzību arī iespējams pārbaudīt, kāds kods ir ierakstīts atmiņā. Lai to izdarītu, jānosūta komanda 8*X#. Ja kods ir uzstādīts, tad atpakaļ tiks saņemta atbilde 8*X*Y#, kur X ir koda numurs (1–2048), Y – kods (4 vai 6 ciparus garš), pretējā gadījumā tiks saņemta atbilde 8*X*NOK#, kur X ir koda numurs (1–2048).
- 9*X# - ar šo komandu iespējams dinamiskajam kontrolpunktam uzstādīt konfigurācijas atklādošanas režīmu, kur X ir 1, lai to ieslēgtu, savukārt, 0 – lai izslēgtu. Ja komanda izpildījusies veiksmīgi, atpakaļ tiek saņemta atbilde 9*OK#, pretējā gadījumā atbilde ir 9*NOK#. Ar šo pašu komandu ir iespējams pārbaudīt esošo atklādošanas režīma konfigurāciju, nosūtot 9# – atpakaļ tiks saņemta atbilde 9*X#, kur X atklādošanas režīma statuss (1 – ieslēgts vai 0 – izslēgts).
- 10*X# - ar šo komandu iespējams dinamiskajam kontrolpunktam uzstādīt reāllaika pulksteņa kalibrācijas režīmu, kur X ir 1, lai to ieslēgtu, savukārt, 0 – lai izslēgtu. Ja komanda izpildījusies veiksmīgi, atpakaļ tiek saņemta atbilde 10*OK#, pretējā gadījumā atbilde ir 10*NOK#. Ar šo pašu komandu ir iespējams pārbaudīt esošo reāllaika pulksteņa kalibrācijas režīma konfigurāciju, nosūtot 10# – atpakaļ tiks

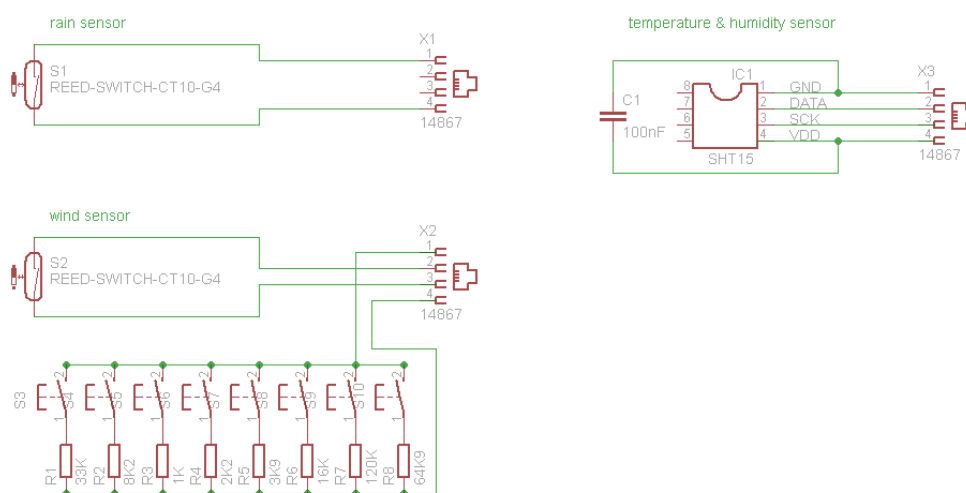
saņemta atbilde 10*X#, kur X reāllaika pulksteņa kalibrācijas režīma statuss (1 – ieslēgts vai 0 – izslēgts).

- 11*X# - ar šo komandu iespējams dinamiskajam kontrolpunktam uzstādīt vai to attiecināt sākotnējā režīmā tiek dzēsti visi atmiņā esošie kodi, kur X ir 1, lai to dzēstu, savukārt, 0 – lai tie netiktu dzēsti. Ja komanda izpildījusies veiksmīgi, atpakaļ tiek saņemta atbilde 11*OK#, pretējā gadījumā atbilde ir 11*NOK#. Ar šo pašu komandu ir iespējams pārbaudīt vai attiecināt dinamisko kontrolpunktu sākotnējā režīmā tiks dzēsti visi atmiņā esošie kodi, nosūtot 11# – atpakaļ tiks saņemta atbilde 11*X#, kur X būs šī režīma statuss (1 – kodi tiks dzēsti vai 0 – kodi netiks dzēsti).
- 99*XXXX# - ar šo komandu dinamiskais kontrolpunkts tiek atiestatīts sākuma stāvoklī, t.i. pārraidāma koda garums tiek iestatīts kā 4; koda pārraidīšanas biežums tiek iestatīts kā 1; tiek iztīrīti 5. un 6. komandas reģistri; gadījumā, ja ir uzstādīts 11. reģistrā, ka jādzēš no atmiņas visi kodi, tas tiks izdarīts; tiks izslēgts atklūdošanas režīms (9. reģistrs), reāllaika pulksteņa kalibrācijas režīms (10. reģistrs) un uzstādīts, ka kodus no atmiņas attiecināšanas gadījumā nevajag dzēst (11. reģistrs). Komandas parametrs XXXX ir PIN kods, kurš ieprogrammēts dinamiskajā kontrolpunktā. To bez programmatūras maiņas nav iespējams nomainīt. Ja komanda izpildījusies veiksmīgi, atpakaļ tiek saņemta atbilde 99*OK#, pretējā gadījumā (t.sk. arī nepareiza PIN koda gadījumā) atbilde ir 99*NOK#.
- Visu pārējo ievadīto simbolu vai komandu gadījumā dinamiskais kontrolpunkts atgriezīs atbildi 0*NOK#.

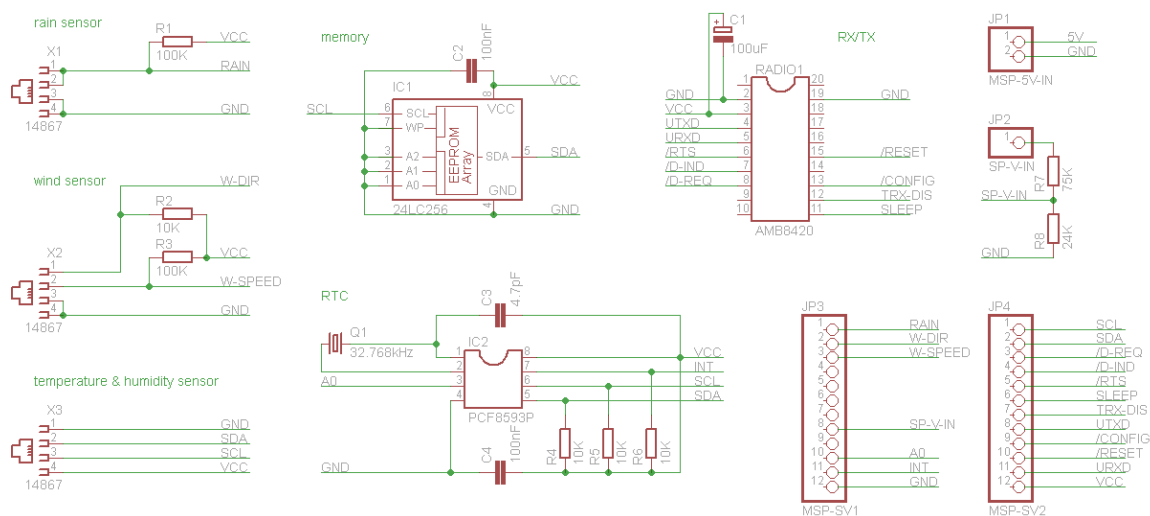
Sensoru mezgla un bāzes stacijas principiālās shēmas

Šajā pielikumā publicētas 5.4.2. nodaļā aprakstīto sensoru mezgla un bāzes stacijas principiālās shēmas, kā arī nepieciešamo detaļu saraksti.

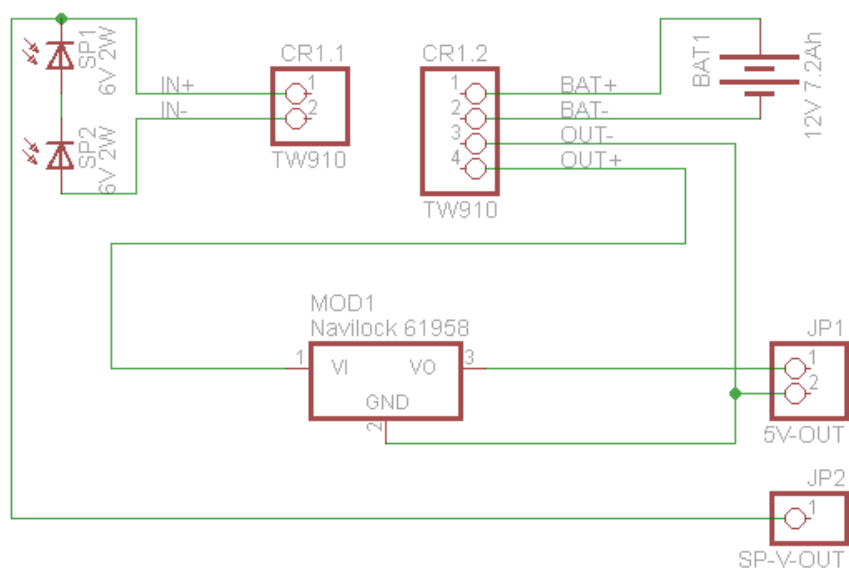
D.1. Sensoru mezgla shēmas



Att. D.1.: Sensoru mezgla ārējo sensoru principiālā shēma



Att. D.2.: Sensoru mezgla pastāvīgās atmiņa, reālā laika pulksteņa un raidzūtvērēja principiālā shēma

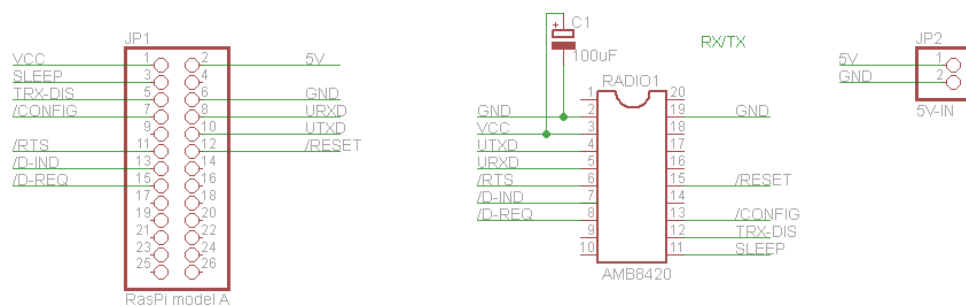


Att. D.3.: Sensoru mezgla autonomā barošanas avota principiālā shēma

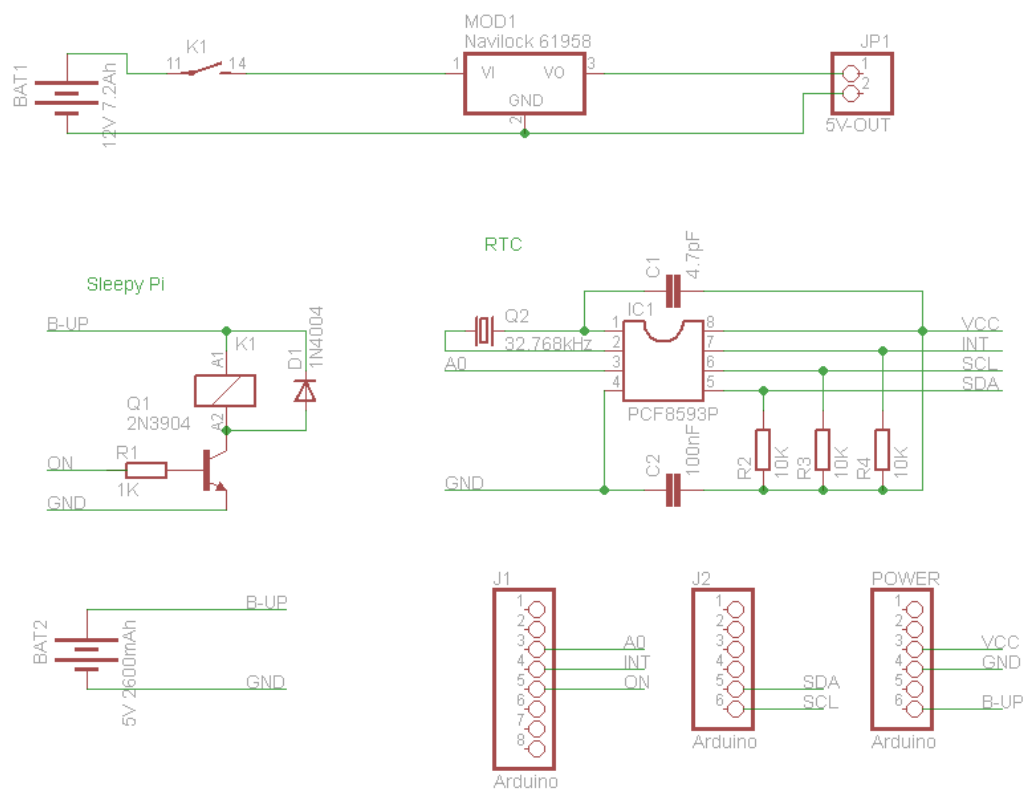
D.2. Sensoru mezgla detaļu saraksts

Apzīmējums	Nosaukums	Nomināls	Daudzums
Rain sensor	Nokrišņu sensors	SEN-09842	1
Wind sensor	Vēja sensors	SEN-09842	1
Temperature & humidity sensor	Temperatūras un mitruma sensors	SHT15	1
1.C1, 2.C2, 2.C4	Kondensators	100nF	3
2.C3	Kondensators	4.7pF	1
2.C1	Elektrolītiskais kondensators	100 μ F	1
2.R1, 2.R3	Rezisotrs	100K Ω	2
2.R2, 2.R4, 2.R5, 2.R6	Rezistors	10K Ω	4
2.R7	Rezistors	75K Ω	1
2.R8	Resistors	24K Ω	1
2.X1, 2.X2, 2.X3	Ligzda	RJ11	3
2.IC1	Pastāvīgā atmiņa	24LC256	1
2.IC2	RTC pulkstenis	PCF8593P	1
2.IC1, 2.IC2	Ligzda	DIL08	2
2.Q1	Rezonators	32,768kHz	1
2.RADIO1	Raiduztvērējs	AMB8420	1
2.JP3, 2.JP4	Spraudnis	1x12p(m)	2
2.JP3, 2.JP4	Ligzda	1x12p(f)	2
3.SP1, 3.SP2	Saules panelis	6V 2W	2
3.CR1	Akumulatora uzlādes regulators	TW-910	1
3.BAT1	Svina-skābes akumulators	12V 7.2Ah	1
3.MOD1	Sprieguma regulators	Navilock 61958	1
2.MSP	Mikrokontrolieris	MSP-EXP430FR5739	1

D.3. Bāzes stacijas shēmas



Att. D.4.: Bāzes stacijas raiduztvērēja principiālā shēma



Att. D.5.: Bāzes stacijas barošanas avota un enerģijas patēriņa kontroles moduļa principiālā shēma

D.4. Bāzes stacijas detaļu saraksts

Apzīmējums	Nosaukums	Nomināls	Daudzums
2.C2	Kondensators	100nF	1
2.C1	Kondensators	4.7pF	1
1.C1	Elektrolītiskais kondensators	100 μ F	1
2.R1	Rezisotrs	1K Ω	1
2.R2, 2.R3, 2.R4	Rezisotrs	10K Ω	3
2.IC1	RTC pulkstenis	PCF8593P	1
2.IC1	Ligzda	DIL08	1
2.Q2	Rezonators	32,768kHz	1
1.RADIO1	Raiduztvērējs	AMB8420	1
1.JP1	Spraudnis	1x8p(m)	1
1.JP1	Ligzda	1x8p(f)	1
2.J2, 2.POWER	Spraudnis	1x6p(m)	2
2.J2, 2.POWER	Ligzda	1x6p(f)	2
2.J1	Spraudnis	1x8p(m)	1
2.J1	Ligzda	1x8p(f)	1
2.BAT1	Svina-skābes akumulators	12V 7.2Ah	1
2.MOD1	Sprieguma regulators	Navilock 61958	1
2.K1	Relejs	36.11	1
2.Q1	Tranzistors	2N3904	1
2.D1	Diode	1N4004	1
2.BAT2	Rezerves sprieguma baterija	5V 2600mAh	1
1.RasPi	Mikrokontrolieris	Raspberry Pi Model A	1
2.Arduino	Enerģijas patēriņa kontroles modulis	Arduino Pro	1

Izmantotā literatūra un avoti

- [1] R. Zviedris, A. Elsts, G. Strazdins, A. Mednis, and L. Selavo. LynxNet: Wild Animal Monitoring Using Sensor Networks. In Pedro Marron, Thiemo Voigt, Peter Corke, and Luca Mottola, editors, *Real-World Wireless Sensor Networks*, volume 6511 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 170–173. Springer Berlin / Heidelberg, 2010. (Citēts 1., 2., 6. un 11. lappusēs.)
- [2] R. Zviedris, A. Mednis, and G. Mednis. Heterogeneous tool kit for real-time education. In *International Scientific Conference: Applied Information and Communication Technologies, 5, Jelgava (Latvia), 26-27 Apr 2012*. LLU, 2012. (Citēts 1. un 7. lappusēs.)
- [3] A. Mednis, G. Strazdins, R. Zviedris, G. Kanonirs, and L. Selavo. Real time pothole detection using Android smartphones with accelerometers. In *Distributed Computing in Sensor Systems and Workshops (DCOSS), 2011 International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2011. (Citēts 1., 6. un 125. lappusēs.)
- [4] G. Strazdins, A. Gordjusins, G. Kanonirs, V. Kurmis, A. Mednis, R. Zviedris, and L. Selavo. Team University of Latvia GCDC 2011 Technical Paper. In *GCDC 2011*. HTAS, TNO, 2010. (Citēts 1., 6. un 125. lappusēs.)
- [5] A. Elsts, R. Balass, J. Judvaitis, R. Zviedris, G. Strazdins, A. Mednis, and L. Selavo. SADmote: A Robust and Cost-Effective Device for Environmental Monitoring. *Architecture of Computing Systems–ARCS 2012*, pages 225–237, 2012. (Citēts 1., 6., 11., 119. un 124. lappusēs.)
- [6] L. Selavo, A. Wood, Q. Cao, T. Sookoor, H. Liu, A. Srinivasan, Y. Wu, W. Kang, J. Stankovic, D. Young, and J. Porter. LUSTER: wireless sensor network for environmental research. In *Proceedings of the 5th international conference on Embedded networked sensor systems*, SenSys '07, pages 103–116, New York, NY, USA, 2007. ACM. (Citēts 2., 108. un 119. lappusēs.)

- [7] G. Werner-Allen, K. Lorincz, M. Ruiz, O. Marcillo, J. Johnson, J. Lees, and M. Welsh. Deploying a wireless sensor network on an active volcano. *Internet Computing, IEEE*, 10(2):18–25, 2006. (Citēts 2. un 11. lappusēs.)
- [8] J. Polastre, R. Szewczyk, A. Mainwaring, D. Culler, and J. Anderson. Analysis of wireless sensor networks for habitat monitoring. *Wireless sensor networks*, pages 399–423, 2004. (Citēts 2. lappusē.)
- [9] M. L. Morrison, B. Marcot, and W. Mannan. *Wildlife-habitat relationships: concepts and applications*. Island Press, 2012. (Citēts 2. lappusē.)
- [10] Silava. Latvijas Valsts mežzinātnes institūts. <http://www.silava.lv/>, 2008. [atsauce 06.01.2011.]. (Citēts 2., 24., 28., 29. un 32. lappusēs.)
- [11] J. McGonigal. *Reality is broken: Why games make us better and how they can change the world*. Penguin, 2011. (Citēts 3. lappusē.)
- [12] G. Mulligan. The 6LoWPAN architecture. In *Proceedings of the 4th workshop on Embedded networked sensors*, pages 78–82. ACM, 2007. (Citēts 3., 107. un 109. lappusēs.)
- [13] Z. Shelby and C. Bormann. *6LoWPAN: the wireless embedded internet*, volume 43. Wiley, 2011. (Citēts 3., 107. un 109. lappusēs.)
- [14] T. Berners-Lee, J. Hendler, O. Lassila, et al. The semantic web. *Scientific american*, 284(5):28–37, 2001. (Citēts 3., 106. un 122. lappusēs.)
- [15] W. Wahlster. The semantic product memory: an interactive black box for smart objects. In *SemProM*, pages 3–21. Springer, 2013. (Citēts 3. lappusē.)
- [16] A. Mednis and R. Zviedris. RFID communication: How well protected against reverse engineering? In *Digital Information Processing and Communications (ICDIPC), 2012 Second International Conference on*, pages 56–61. IEEE, 2012. (Citēts 6. un 47. lappusēs.)

- [17] G. Strazdins, A. Mednis, G. Kanonirs, R. Zviedris, and L. Selavo. Towards Vehicular Sensor Networks with Android Smartphones for Road Surface Monitoring. In *Electronic Proceedings of CPSWeek'11*. CONET, 2011. (Citēts 6. un 125. lappusēs.)
- [18] G. Strazdins, A. Mednis, R. Zviedris, G. Kanonirs, and L. Selavo. Virtual Ground Truth in Vehicular Sensing Experiments: How to Mark it Accurately. In *SENSORCOMM 2011, The Fifth International Conference on Sensor Technologies and Applications*, pages 295–300, 2011. (Citēts 7. un 125. lappusēs.)
- [19] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. Wireless sensor networks: a survey. *Computer networks*, 38(4):393–422, 2002. (Citēts 10. lappusē.)
- [20] M. Tubaishat and S. K. Madria. Sensor networks: an overview. *Potentials, IEEE*, 22(2):20–23, 2003. (Citēts 10. lappusē.)
- [21] C. Buratti, A. Conti, D. Dardari, and R. Verdone. An overview on wireless sensor networks technology and evolution. *Sensors*, 9(9):6869–6896, 2009. (Citēts 10. lappusē.)
- [22] S. Tilak, N. B. Abu-Ghazaleh, and W. Heinzelman. A taxonomy of wireless micro-sensor network models. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 6(2):28–36, 2002. (Citēts 10. lappusē.)
- [23] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito. The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 54(15):2787–2805, 2010. (Citēts 10. un 51. lappusēs.)
- [24] N. Xu, S. Rangwala, K. K. Chintalapudi, D. Ganesan, A. Broad, R. Govindan, and D. Estrin. A wireless sensor network for structural monitoring. In *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 13–24. ACM, 2004. (Citēts 11. lappusē.)
- [25] P. Juang, H. Oki, Y. Wang, M. Martonosi, L. S. Peh, and D. Rubenstein. Energy-efficient computing for wildlife tracking: design tradeoffs and early experiences with ZebraNet. *ACM SIGOPS operating systems review*, 36(5):96–107, 2002. (Citēts 11., 42. un 44. lappusēs.)

- [26] T. Liu, C. M. Sadler, P. Zhang, and M. Martonosi. Implementing software on resource-constrained mobile sensors: experiences with Impala and ZebraNet. In *Proc. MobySys'04*, pages 256–269, 2004. (Citēts 11., 44. un 112. lappusēs.)
- [27] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin. Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 56–67. ACM, 2000. (Citēts 15. lappusē.)
- [28] Apple. MacOS X. <http://www.apple.com/osx/>, 2012. [atsauce 27.08.2012.]. (Citēts 19. lappusē.)
- [29] Canonical Ltd. Ubuntu Linux. <http://www.ubuntu.com/>, 2012. [atsauce 27.08.2012.]. (Citēts 19. lappusē.)
- [30] Microsoft. Windows. <http://windows.microsoft.com/en-US/windows/home>, 2012. [atsauce 27.08.2012.]. (Citēts 19. lappusē.)
- [31] Atmel. ATmega328P. <http://www.atmel.com/devices/ATMEGA328P.aspx>, 2009. [atsauce 15.01.2012.]. (Citēts 19. un 97. lappusēs.)
- [32] Arduino. <http://arduino.cc/>, 2005. [atsauce 30.09.2011.]. (Citēts 19., 22., 76., 97., 101., 117., 118. un 125. lappusēs.)
- [33] Atmel. Atmel Studio 6. http://www.atmel.com/microsite/atmel_studio6/, 2013. [atsauce 14.04.2013.]. (Citēts 19. lappusē.)
- [34] Texas Instruments. MSP430™ Ultra-Low Power 16-Bit Microcontrollers. http://www.ti.com/llds/ti/microcontroller/16-bit_msp430/overview.page, 2008. [atsauce 02.07.2012.]. (Citēts 19. un 20. lappusēs.)
- [35] C. Liechti, D. Diky, and P. A. Bigot. GCC toolchain for MSP430. <http://sourceforge.net/projects/mspgcc/>, 2011. [atsauce 30.09.2011.]. (Citēts 19. lappusē.)

- [36] IAR Systems. IAR Embedded Workbench for TI MSP430. <http://www.iar.com/en/Products/IAR-Embedded-Workbench/TI-MSP430/>, 2012. [atsauce 27.08.2012.]. (Citēts 19. lappusē.)
- [37] Texas Instruments. Code Composer Studio. <http://www.ti.com/tool/Ccstudio>, 2012. [atsauce 27.08.2012.]. (Citēts 19. un 125. lappusēs.)
- [38] R. Wessels et al. Energia. <http://www.energia.nu>, 2012. [atsauce 17.12.2013.]. (Citēts 19., 118. un 125. lappusēs.)
- [39] The Raspberry Pi Foundation. Raspberry Pi – An ARM GNU/Linux box for \$25. <http://www.raspberrypi.org/>, 2006. [atsauce 02.07.2012.]. (Citēts 20., 23., 60., 76., 116. un 118. lappusēs.)
- [40] Python Software Foundation. Phyton programming language. <https://www.python.org/>, 2001. [atsauce 02.07.2012.]. (Citēts 20. lappusē.)
- [41] Velleman Inc. Two-channel USB PC Oscilloscope. <http://www.vellemanusa.com/products/view/?country=us&lang=enu&id=522377>, 2011. [atsauce 27.08.2012.]. (Citēts 20. lappusē.)
- [42] Texas Instruments. MSP430 LaunchPad Value Line Development kit. <http://www.ti.com/tool/msp-exp430g2>, 2010. [atsauce 30.03.2012.]. (Citēts 21. lappusē.)
- [43] Texas Instruments. MSP-EXP430FR5739 Experimenter Board. <http://www.ti.com/tool/msp-exp430fr5739>, 2011. [atsauce 15.01.2012.]. (Citēts 21. lappusē.)
- [44] Texas Instruments. MSP-EXP430F5529 USB LaunchPad Evaluation Kit. <http://www.ti.com/tool/msp-exp430f5529lp>, 2013. [atsauce 14.09.2013.]. (Citēts 21. lappusē.)
- [45] Sentilla. Tmote Sky. <http://sentilla.com/files/pdf/eol/tmote-sky-datasheet.pdf>, 2005. [atsauce 01.07.2010.]. (Citēts 24. lappusē.)
- [46] Sentilla. Tmote Mini. http://sentilla.com/files/pdf/eol/Tmote_Mini_Datasheet.pdf, 2005. [atsauce 01.07.2010.]. (Citēts 24. un 54. lappusēs.)

- [47] Texas Instruments. MSP430F1611 16-bit Ultra-Low-Power MCU. <http://www.ti.com/product/msp430f1611>, 2002. [atsauce 01.07.2010.]. (Citēts 24. un 54. lappusēs.)
- [48] Telonics Wildlife Tracking. <http://www.telonics.com/wildlife.php>, 1978. [atsauce 01.07.2010.]. (Citēts 24., 31., 32. un 34. lappusēs.)
- [49] L. Cohen, L. Manion, K. Morrison, and K. R. B. Morrison. *Research methods in education*. Psychology Press, 2007. (Citēts 25. lappusē.)
- [50] J. W. Creswell. *Educational research: Planning, conducting, and evaluating quantitative and qualitative research (3rd Edition)*. Prentice Hall, 2008. (Citēts 25. lappusē.)
- [51] D. L. Mech and L. Boitani. *Wolves: behavior, ecology, and conservation*. University of Chicago Press, 2010. (Citēts 28. lappusē.)
- [52] Ķemeru nacionālais parks. <http://www.kemeru.gov.lv/>, 1997. [atsauce 27.08.2012.]. (Citēts 29., 71. un 72. lappusēs.)
- [53] M. Moreau, S. Siebert, A. Buerkert, and E. Schlecht. Use of a tri-axial accelerometer for automated recording and classification of goats' grazing behaviour. *Applied Animal Behaviour Science*, 119(3):158–170, 2009. (Citēts 29. lappusē.)
- [54] Y. Guo, P. Corke, G. Poulton, T. Wark, G. Bishop-Hurley, and D. Swain. Animal behaviour understanding using wireless sensor networks. In *Local Computer Networks, Proceedings 2006 31st IEEE Conference on*, pages 607–614. IEEE, 2006. (Citēts 29. un 44. lappusēs.)
- [55] R. J. Moll, J. J. Millspaugh, J. Beringer, J. Sartwell, and Z. He. A new 'view' of ecology and conservation through animal-borne video systems. *Trends in ecology & evolution*, 22(12):660–668, 2007. (Citēts 29. un 30. lappusēs.)
- [56] D. Chabot. The use of heart rate telemetry in assessing the metabolic cost of disturbances. In *Transactions of the North American Wildlife and Natural Resources Conference*, volume 56, pages 256–263, 1991. (Citēts 29. lappusē.)

- [57] W. Stöhr. Longterm heartrate telemetry in small mammals: A comprehensive approach as a prerequisite for valid results. *Physiology & Behavior*, 43(5):567–576, 1988. (Citēts 29. lappusē.)
- [58] V. A. Langman. A radio-biotelemetry system for monitoring body temperature and activity levels in the zebra finch. *The Auk*, pages 375–383, 1973. (Citēts 29. lappusē.)
- [59] R. A. Garrott and R. M. Bartmann. Evaluation of vaginal implants for mule deer. *The Journal of wildlife management*, 48(2):646–648, 1984. (Citēts 29. lappusē.)
- [60] Lotek. Wireless Fish & Wildlife Monitoring. <http://www.lotek.com/>, 1984. [at-sauce 19.07.2012.]. (Citēts 29., 31., 32., 34., 35., 38., 40., 41., 42. un 43. lappusēs.)
- [61] R. P. Wilson. Reconstructing the past using futuristic developments: trends and perspectives in logger technology for penguins. *Mem. Natl. Inst. Pol. Res., Spec. Issue*, 58:34–49, 2004. (Citēts 29. lappusē.)
- [62] P. Dickinson, C. Qing, S. Lawson, and R. Freeman. Automated visual monitoring of nesting seabirds. In *Workshop on visual observation and analysis of animal and insect behaviour, Istanbul*, 2010. (Citēts 30. lappusē.)
- [63] T. Burghardt, P. J. Barham, N. Campbell, I. C. Cuthill, R. B. Sherley, and T. M. Leshoro. A fully automated computer vision system for the biometric identification of African penguins (*Spheniscus demersus*) on Robben Island. In E. J. Woehler, editor, *6th International Penguin Conference (IPC07)*, page 19, September 2007. (Citēts 30. un 48. lappusēs.)
- [64] R. B. Sherley, T. Burghardt, P. J. Barham, N. Campbell, and I. C. Cuthill. Spotting the difference: towards fully-automated population monitoring of African penguins *Spheniscus demersus*. *Endangered Species Research*, 11(2):101–111, 2010. (Citēts 30. lappusē.)
- [65] T. Burghardt and J. Calic. Analysing animal behaviour in wildlife videos using face detection and tracking. In *Vision, Image and Signal Processing, IEE Proceedings-*, volume 153, pages 305–312. IET, 2006. (Citēts 30. un 48. lappusēs.)

- [66] J. H. Rife. *Automated robotic tracking of gelatinous animals in the deep ocean*. PhD thesis, Stanford University, 2003. (Citēts 30. lappusē.)
- [67] W. A. Watkins, M. A. Daher, J. E. George, and D. Rodriguez. Twelve years of tracking 52-Hz whale calls from a unique source in the North Pacific. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 51(12):1889–1901, 2004. (Citēts 30. lappusē.)
- [68] W. Hu, N. Bulusu, C. T. Chou, S. Jha, A. Taylor, et al. The design and evaluation of a hybrid sensor network for cane-toad monitoring. In *Information Processing in Sensor Networks, 2005. IPSN 2005. Fourth International Symposium on*, pages 503–508. IEEE, 2005. (Citēts 30. un 48. lappusēs.)
- [69] Argos. Worldwide tracking and environmental monitoring by satellite. <http://www.argos-system.org>, 1986. [atsauce 24.11.2010.]. (Citēts 30., 35., 36., 37., 38. un 43. lappusēs.)
- [70] L. D. Mech and M. Shannon. A Critique of Wildlife Radio-Tracking and its Use in National Parks. A report to the US National Park Service., 2002. (Citēts 31. lappusē.)
- [71] W. W. Cochran and R. D. Lord Jr. A radio-tracking system for wild animals. *The Journal of Wildlife Management*, pages 9–24, 1963. (Citēts 31. lappusē.)
- [72] Biotrack. Specialists in animal monitoring equipment. <http://www.biotrack.co.uk/>, 1994. [atsauce 06.01.2011.]. (Citēts 31., 32., 34. un 44. lappusēs.)
- [73] R. Kenward. *Wildlife radio tagging: equipment, field techniques and data analysis*. Academic Press London, 1987. (Citēts 31. un 35. lappusēs.)
- [74] Sirtrack. Wildlife Tracking Solutions. <http://www.sirtrack.com/>, 1986. [atsauce 06.08.2011.]. (Citēts 31., 32., 34., 37., 38., 40., 41. un 43. lappusēs.)
- [75] L. D. Mech and S. M. Barber. A critique of wildlife radio-tracking and its use in national parks. *A report to the US National Park Service*, 2002. (Citēts 32. un 33. lappusēs.)

- [76] G. Cederlund, T. Dreyfert, and P. A. Lemnell. *Radiotracking techniques and the reliability of systems used for larger birds and mammals*. 1979. (Citēts 32. lappusē.)
- [77] Automated Radio Telemetry System Initiative. <http://www.princeton.edu/~wikelski/research/>, 2007. [atsauce 07.08.2011.]. (Citēts 32., 34. un 35. lappusēs.)
- [78] R. M. Smith and B. Trevor-Deutsch. A practical, remotely-controlled, portable radio telemetry receiving apparatus. *A handbook on biotelemetry and radio tracking*. Pergamon Press, Oxford, UK, pages 269–273, 1980. (Citēts 33. lappusē.)
- [79] W. W. Cochran, D. W. Warner, J. R. Tester, and V. B. Kuechle. Automatic radio-tracking system for monitoring animal movements. *BioScience*, pages 98–100, 1965. (Citēts 33. un 35. lappusēs.)
- [80] K. L. Heezen and J. R. Tester. Evaluation of radio-tracking by triangulation with special reference to deer movements. *The Journal of Wildlife Management*, pages 124–141, 1967. (Citēts 33. lappusē.)
- [81] R. Kenward. *A manual for wildlife radio tagging*. Academic Press, 2001. (Citēts 33. lappusē.)
- [82] R. C. Johnson, editor. *Antenna engineering handbook*. McGraw-Hill, New York, 3rd edition, 1993. (Citēts 33. un 34. lappusēs.)
- [83] W. W. Cochran and L. L. Pater. Direction finding at ultra high frequencies (UHF): improved accuracy. *Wildlife Society Bulletin*, pages 594–599, 2001. (Citēts 33. lappusē.)
- [84] P. J. Seddon and R. Maloney. *Tracking wildlife radio-tag signals by light fixed-wing aircraft*. Department of Conservation Wellington, New Zealand, 2004. (Citēts 33., 34. un 43. lappusēs.)
- [85] R. P. Larkin, A. Raim, and R. H. Diehl. Performance of a non-rotating direction-finder for automatic radio tracking (desempeño de un localizador no-rotativo para

- radiotelemetría automática). *Journal of Field ornithology*, pages 59–71, 1996. (Citēts 34. lappusē.)
- [86] J. Abe, J. Takada, M. Denda, and A. Akeyama. Real-Time Location Estimation System for Wild Animals. In *Papers of Technical Meeting on Instrumentation and Measurement, IEE Japan*, volume 1001, pages 37–40, 2006. (Citēts 34. lappusē.)
- [87] C. Carroll. Ocelots: Following the Stealth Hunter. *National Geographic*, pages 66–77, 2005. (Citēts 34. lappusē.)
- [88] G. C. White and R. A. Garrott. *Analysis of wildlife radio-tracking data*. Academic press San Diego, California, 1990. (Citēts 34., 35. un 43. lappusēs.)
- [89] B. Naef-Daenzer, D. Früh, M. Stalder, P. Wetli, and E. Weise. Miniaturization (0.2 g) and evaluation of attachment techniques of telemetry transmitters. *Journal of Experimental Biology*, 208(21):4063–4068, 2005. (Citēts 34. un 35. lappusēs.)
- [90] F. Lindzey, H. Sawyer, C. Anderson, and B. Babulis. Performance of store-on-board GPS collars on elk, mule deer, and mountain lions in Wyoming, USA. In *Tracking Animals with GPS International Conference. Aberdeen, Scotland*, pages 29–31, 2001. (Citēts 35. un 43. lappusēs.)
- [91] D. B. Siniff and J. R. Tester. Computer analysis of animal-movement data obtained by telemetry. *BioScience*, pages 104–108, 1965. (Citēts 35. lappusē.)
- [92] M. L. Gorman, M. G. L. Mills, and J. French. Satellite tracking of the African wild dog *Lycaon pictus*. *Wildlife telemetry: remote monitoring and tracking of animals*, pages 219–228, 1992. (Citēts 35. lappusē.)
- [93] Inc. Microwave Telemetry. Successfully Tracking Wildlife from Soaring Heights to the Depths of the Sea. <http://microwavetelemetry.com/>, 1991. [atsauce 01.04.2012.]. (Citēts 36., 37., 38. un 43. lappusēs.)
- [94] J. M. Burns and M. A. Castellini. Dive data from satellite tags and time-depth recorders: A comparison in weddell seal pups. *Marine Mammal Science*, 14(4):750–764, 1998. (Citēts 37. lappusē.)

- [95] D. Austin, J. I. McMillan, and W. D. Bowen. A three-stage algorithm for filtering erroneous argos satellite locations. *Marine Mammal Science*, 19(2):371–383, 2003. (Citēts 37. lappusē.)
- [96] F. Royer and M. Lutcavage. Filtering and interpreting location errors in satellite telemetry of marine animals. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 359(1):1–10, 2008. (Citēts 37. lappusē.)
- [97] North star science and technology, llc. <http://www.northstarst.com/>, 1984. [atsauce 01.04.2012.]. (Citēts 37., 38. un 43. lappusēs.)
- [98] L. Peske and M. J. McGrady. A system for locating satellite-received transmitters (ptts) in the field. *Wildlife Society Bulletin*, 33(1):307–312, 2005. (Citēts 37. lappusē.)
- [99] P. W. Robinson, D. Costa, J. Arnould, M. Weise, C. Kuhn, S. E. Simmons, S. Villegas, and Y. Tremblay. Animal Tracking ARGOS vs GPS. *AGU Fall Meeting Abstracts*, pages C1716+, December 2006. (Citēts 38. lappusē.)
- [100] K. A. Keating, W. G. Brewster, and C. H. Key. Satellite telemetry: performance of animal-tracking systems. *The Journal of wildlife management*, pages 160–171, 1991. (Citēts 38. lappusē.)
- [101] M. Wikelski, R. W. Kays, N. J. Kasdin, K. Thorup, J. A. Smith, and G. W. Swenson. Going wild: what a global small-animal tracking system could do for experimental biologists. *Journal of Experimental Biology*, 210(2):181–186, 2007. (Citēts 38. lappusē.)
- [102] Official U.S. Government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics. <http://www.gps.gov/>, 1997. [atsauce 12.09.2012.]. (Citēts 38. un 39. lappusēs.)
- [103] S. Tomkiewicz. GPS Application for Wildlife – A Review. *Telonics Quarterly*, 9(1):1–12, 1996. (Citēts 38. lappusē.)

- [104] E. D. Kaplan and C. J. Hegarty. *Understanding GPS: principles and applications*. Artech House Publishers, 2006. (Citēts 38. lappusē.)
- [105] Russian Federal Space Agency. Information and Analysis Center. <http://glonass-iac.ru/>, 2005. [atsauce 12.09.2012.]. (Citēts 38. lappusē.)
- [106] u-blox AG. ANTARIS 4 GPS Modules System Integration Manual (SIM). <http://www.u-blox.com/en/download/documents-a-resources/antaris-4-gps-modules-resources.html>, 2007. [atsauce 12.09.2012.]. (Citēts 39. un 40. lappusēs.)
- [107] u-blox AG. IT530 FTX miniature GPS module. <https://www.u-blox.com/en/product/it530>, 2008. [atsauce 27.05.2014.]. (Citēts 40. lappusē.)
- [108] C. M. Coelho, L. F. B. de Melo, M. A. L. Sábató, D. N. Rizel, and R. J. Young. A note on the use of GPS collars to monitor wild maned wolves *Chrysocyon brachyurus*. *Applied Animal Behaviour Science*, 105(1):259–264, 2007. (Citēts 40. lappusē.)
- [109] R. G. D'Eon. Effects of a stationary GPS fix-rate bias on habitat-selection analyses. *The Journal of Wildlife Management*, pages 858–863, 2003. (Citēts 40. lappusē.)
- [110] Africa Wildlife Tracking. <http://www.awt.co.za/>, 2003. [atsauce 07.05.2012.]. (Citēts 40., 42. un 43. lappusēs.)
- [111] Followit. Wildlife. <http://wildlife.followit.se/>, 1999. [atsauce 10.02.2012.]. (Citēts 40. un 41. lappusēs.)
- [112] P. G. Ryan, S. L. Petersen, G. Peters, and D. Gremillet. GPS tracking a marine predator: the effects of precision, resolution and sampling rate on foraging tracks of African penguins. *Marine Biology*, 145(2):215–223, 2004. (Citēts 40. un 41. lappusēs.)
- [113] Wildtrack Telemetry Systems Limited. Creators of Fastloc® Location Technology. <http://www.wildtracker.com/>, 2000. [atsauce 19.07.2012.]. (Citēts 41. lappusē.)
- [114] BlueSky Telemetry. <http://www.blueskytelemetry.co.uk/>, 1995. [atsauce 07.05.2012.]. (Citēts 42. lappusē.)

- [115] Telit. Wireless Solutions. <http://www.telit.com/>, 1997. [atsauce 07.05.2012.]. (Citēts 42. lappusē.)
- [116] T. Wark, C. Crossman, W. Hu, et al. The design and evaluation of a mobile sensor/actuator network for autonomous animal control. In *Proc. IPSN'07*, pages 206–215, 2007. (Citēts 44. un 45. lappusēs.)
- [117] M. Heurich, H. Kiener, and L. Bufka. GPS GSM lynx tracking in the Bavarian Forest National Park. <http://www.environmental-studies.de/projects/24/GPS-lynx-tracking/gps-lynx-tracking.html>, 2005. [atsauce 11.2.2010.]. (Citēts 44. lappusē.)
- [118] R. N. Handcock, D. L. Swain, G. J. Bishop-Hurley, K. P. Patison, T. Wark, P. Valencia, P. Corke, and C. J. O'Neill. Monitoring animal behaviour and environmental interactions using wireless sensor networks, GPS collars and satellite remote sensing. *Sensors*, 9(5):3586–3603, 2009. (Citēts 44. un 45. lappusēs.)
- [119] P. Zhang, C. M. Sadler, S. A. Lyon, and M. Martonosi. Hardware design experiences in ZebraNet. In *Proc. SenSys'04*, pages 227–238, 2004. (Citēts 44. lappusē.)
- [120] C. L. Burdett, R. A. Moen, G. J. Niemi, and L. D. Mech. Defining space use and movements of canada lynx with global positioning system telemetry. *Journal of Mammalogy*, 88(2):457–467, 2007. (Citēts 44. lappusē.)
- [121] Ron A. Moen, Christopher L. Burdett, and Gerald J. Niemi. Movement and habitat use of canada lynx during denning in minnesota. *Journal of Wildlife Management*, 72(2):1507–1513, 2008. (Citēts 44. lappusē.)
- [122] R. Jurdak, P. Corke, D. Dharman, G. Salagnac, C. Crossman, P. Valencia, and G.-B. Hurley. Energy-efficient localization for virtual fencing. In *Proceedings of the 9th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, IPSN '10, pages 388–389, New York, NY, USA, 2010. ACM. (Citēts 44. lappusē.)

- [123] P. Sikka, P. Corke, and L. Overs. Wireless sensor devices for animal tracking and control. In *Local Computer Networks, 2004. 29th Annual IEEE International Conference on*, pages 446–454. IEEE, 2004. (Citēts 44. lappusē.)
- [124] Z. Butler, P. Corke, R. Peterson, and D. Rus. From robots to animals: virtual fences for controlling cattle. *The International Journal of Robotics Research*, 25(5-6):485, 2006. (Citēts 44. un 45. lappusēs.)
- [125] V. Dyo, S. A. Ellwood, D. W. Macdonald, A. Markham, C. Mascolo, B. Pásztor, S. Scellato, N. Trigoni, R. Wohlers, and K. Yousef. Evolution and sustainability of a wildlife monitoring sensor network. In *Proceedings of the 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, SenSys '10, pages 127–140, New York, NY, USA, 2010. ACM. (Citēts 45. lappusē.)
- [126] A. Markham, N. Trigoni, S. A. Ellwood, and D. W. Macdonald. Revealing the hidden lives of underground animals using magneto-inductive tracking. In *Proceedings of the 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, SenSys '10, pages 281–294, New York, NY, USA, 2010. ACM. (Citēts 45. lappusē.)
- [127] J.-H. Huang, Y.-Y. Chen, Y.-T. Huang, P.-Y. Lin, Y.-C. Chen, Y.-F. Lin, S.-C. Yen, P. Huang, and L.-J. Chen. Rapid Prototyping for Wildlife and Ecological Monitoring. *IEEE Systems Journal*, 4:198–209, June 2010. (Citēts 45. lappusē.)
- [128] P. G. Brits and Engelbrecht H. A. Design of an ad hoc wireless network for animal tracking and environmental management. In *Proc. of Southern Africa Telecommunication Networks and Applications Conference*, 2009. (Citēts 45. un 50. lappusēs.)
- [129] E. S. Nadimi, H. T. Søgaaard, T. Bak, and F. W. Oudshoorn. Zigbee-based wireless sensor networks for monitoring animal presence and pasture time in a strip of new grass. *Comput. Electron. Agric.*, 61:79–87, May 2008. (Citēts 45. lappusē.)
- [130] R. P. Wilson, N. Liebsch, I. M. Davies, F. Quintana, H. Weimerskirch, S. Storch, K. Lucke, U. Siebert, S. Zankl, G. Müller, et al. All at sea with animal tracks; methodological and analytical solutions for the resolution of movement. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 54(3):193–210, 2007. (Citēts 45. lappusē.)

- [131] R. P. Wilson, M.-P. T. Wilon, R. Link, H. Mempel, and N. J. Adams. Determination of movements of African penguins *Spheniscus demersus* using a compass system: dead reckoning may be an alternative to telemetry. *Journal of Experimental Biology*, 157(1):557–564, 1991. (Citēts 45. lappusē.)
- [132] R. W. Davis, L. A. Fuiman, T. M. Williams, and B. J. Le Boeuf. Three-dimensional movements and swimming activity of a northern elephant seal. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 129(4):759–770, 2001. (Citēts 45. un 46. lappusēs.)
- [133] Y. Mitani, K. Sato, S. Ito, M. F. Cameron, D. B. Siniff, and Y. Naito. A method for reconstructing three-dimensional dive profiles of marine mammals using geo-magnetic intensity data: results from two lactating Weddell seals. *Polar Biology*, 26(5):311–317, 2003. (Citēts 45. lappusē.)
- [134] R. P. Wilson. Beyond rings on birds for determination of movements: Wither the archival tag? *Ardea*, 89:231–240, 2001. (Citēts 46. lappusē.)
- [135] W.-W. Kao. Integration of GPS and dead-reckoning navigation systems. In *Vehicle Navigation and Information Systems Conference, 1991*, volume 2, pages 635–643. IEEE, 1991. (Citēts 46. lappusē.)
- [136] G. Welch and G. Bishop. An introduction to the Kalman filter, 1995. (Citēts 46. lappusē.)
- [137] E. J. Krakiwsky, C. B. Harris, and R. V. C. Wong. A Kalman filter for integrating dead reckoning, map matching and GPS positioning. In *Position Location and Navigation Symposium, 1988. Record. Navigation into the 21st Century. IEEE PLANS'88., IEEE*, pages 39–46. IEEE, 1988. (Citēts 46. un 66. lappusēs.)
- [138] T. Wark, C. Crossman, P. Valencia, P. Corke, G. Bishop-Hurley, and D. Swain. A sensor network for compression and streaming of GPS trajectory data. In *Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems*, SenSys '08, pages 439–440, New York, NY, USA, 2008. ACM. (Citēts 46. lappusē.)

- [139] S. Shepard. *RFID: radio frequency identification*. McGraw-Hill New York, 2005. (Citēts 46. lappusē.)
- [140] Oregon RFID. Innovative tracking solutions. <http://www.oregonrfid.biz/>, 2003. [atsauce 11.09.2013.]. (Citēts 46. un 47. lappusēs.)
- [141] ISO. Radio frequency identification of animals — Code structure. ISO 11784:1996, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1996. (Citēts 46. lappusē.)
- [142] D. L. Swain, L. A. Wilson, and J. Dickinson. Evaluation of an active transponder system to monitor spatial and temporal location of cattle within patches of a grazed sward. *Applied Animal Behaviour Science*, 84(3):185–195, 2003. (Citēts 47. lappusē.)
- [143] D. Mascanzoni and H. Wallin. The harmonic radar: a new method of tracing insects in the field. *Ecological Entomology*, 11(4):387–390, 1986. (Citēts 47. lappusē.)
- [144] J. R. Riley and A. D. Smith. Design considerations for an harmonic radar to investigate the flight of insects at low altitude. *Computers and Electronics in Agriculture*, 35(2):151–169, 2002. (Citēts 47. lappusē.)
- [145] E. T. Cant, A. D. Smith, D. R. Reynolds, and J. L. Osborne. Tracking butterfly flight paths across the landscape with harmonic radar. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 272(1565):785–790, 2005. (Citēts 47. lappusē.)
- [146] M. E. O’Neal, D. A. Landis, E. Rothwell, L. Kempel, and D. Reinhard. Tracking insects with harmonic radar: a case study. *American Entomologist*, 50(4):212–218, 2004. (Citēts 47. lappusē.)
- [147] R. W. Piper and S. G. Compton. A novel technique for relocating concealed insects. *Ecological Entomology*, 27(2):251–253, 2002. (Citēts 47. lappusē.)
- [148] V. A. Drake. Radar observations of moths migrating in a nocturnal low-level jet. *Ecological Entomology*, 10(3):259–265, 1985. (Citēts 47. lappusē.)

- [149] R. P. Wilson, J. J. Ducamp, W. G. Rees, B. M. Culik, and K. Niekamp. Estimation of location: global coverage using light intensity. *Wildlife telemetry: remote monitoring and tracking of animals*, pages 131–134, 1992. (Citēts 47. lappusē.)
- [150] R. L. Delong, B. S. Stewart, and R. D. Hill. Documenting migrations of northern elephant seals using day length. *Marine Mammal Science*, 8(2):155–159, 1992. (Citēts 47. lappusē.)
- [151] R. P. Wilson, D. Grémillet, J. Syder, M. A. M. Kierspel, S. Garthe, H. Weimerskirch, C. Schafer-Neth, J. A. Scolaro, C-A. Bost, J. Plotz, et al. Remote-sensing systems and seabirds: their use, abuse and potential for measuring marine environmental variables. *Marine Ecology Progress Series*, 228:241–261, 2002. (Citēts 47. un 48. lappusēs.)
- [152] R. A. Phillips, J. R. D. Silk, J. P. Croxall, V. Afanasyev, and D. R. Briggs. Accuracy of geolocation estimates for flying seabirds. *MARINE ECOLOGY-PROGRESS SERIES-*, 266:265–272, 2004. (Citēts 48. lappusē.)
- [153] S. L. H. Teo, A. Boustany, S. Blackwell, A. Walli, K. C. Weng, and B. A. Block. Validation of geolocation estimates based on light level and sea surface temperature from electronic tags. *Marine Ecology Progress Series*, 283:81–98, 2004. (Citēts 48. lappusē.)
- [154] T. L. Cutler and D. E. Swann. Using remote photography in wildlife ecology: a review. *Wildlife Society Bulletin*, pages 571–581, 1999. (Citēts 48. lappusē.)
- [155] R. D. Heilbrun, N. J. Silvy, M. E. Tewes, and M. J. Peterson. Using automatically triggered cameras to individually identify bobcats. *Wildlife Society Bulletin*, pages 748–755, 2003. (Citēts 48. lappusē.)
- [156] L. Silveira, A. T. A. Jacomo, and J. A. F. Diniz-Filho. Camera trap, line transect census and track surveys: a comparative evaluation. *Biological Conservation*, 114(3):351–355, 2003. (Citēts 48. lappusē.)
- [157] C.-E. Chen, A. M. Ali, and H. Wang. Design and testing of robust acoustic arrays for localization and enhancement of several bird sources. In *Proceedings of the*

- 5th international conference on Information processing in sensor networks*, pages 268–275. ACM, 2006. (Citēts 48. lappusē.)
- [158] S. Mazhar, T. Ura, and R. Bahl. Vocalization based individual classification of humpback whales using support vector machine. In *OCEANS 2007*, pages 1–9. IEEE, 2007. (Citēts 48. un 49. lappusēs.)
- [159] P. K. McGregor, T. Dabelsteen, C. W. Clark, J. L. Bower, and J. Holland. Accuracy of a passive acoustic location system: empirical studies in terrestrial habitats. *Ethology Ecology & Evolution*, 9(3):269–286, 1997. (Citēts 48. lappusē.)
- [160] A. S. Gaunt, L. W. Oring, and Ornithological Council. *Guidelines to the use of wild birds in research*. Ornithological Council Washington, DC, 1999. (Citēts 49. lappusē.)
- [161] E. R. Buchler. A chemiluminescent tag for tracking bats and other small nocturnal animals. *Journal of Mammalogy*, 57(1):173–176, 1976. (Citēts 49. lappusē.)
- [162] M. F. Bin Saliman. Intelligent controller system for an intramedullary nail, 2010. (Citēts 49. lappusē.)
- [163] A. Khetarpal and R. Kothari. Easy-access power dome, 2009. (Citēts 49. lappusē.)
- [164] Analog Devices. ADF7021: High Performance Narrowband ISM Transceiver IC. <http://www.analog.com/en/rfif-components/rfif-transceivers/adf7021/products/product.html>, 2009. [atsauce 01.07.2010.]. (Citēts 49. lappusē.)
- [165] Analog Devices. ADF7012: Multichannel ISM Band FSK/GFSK/OOK/GOOK/ASK Transmitter. <http://www.analog.com/en/rfif-components/rfif-transceivers/adf7012/products/product.html>, 2009. [atsauce 30.09.2011.]. (Citēts 49., 56. un 59. lappusēs.)
- [166] J. Kenny. All-In-One APRS Transmitter. <http://digitalcommons.calpoly.edu/eesp/154/>, 2012. [atsauce 07.05.2012.]. (Citēts 49. lappusē.)

- [167] Greig A. Wombat. <https://github.com/adamgreig/wombat>, 2012. [atsauce 02.07.2012.]. (Citēts 50. lappusē.)
- [168] Radiometrix. Radio Modules – RF Modules – Wireless Modules. <http://www.radiometrix.com/>, 1985. [atsauce 24.11.2010.]. (Citēts 50. lappusē.)
- [169] A. Elsaify, P. Padhy, K. Martinez, and G. Zou. GWMAC: A TDMA Based MAC Protocol for a Glacial Sensor Network. In *Proceedings of the 4th ACM workshop on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor, and ubiquitous networks*, PE-WASUN '07, pages 54–61, New York, NY, USA, 2007. ACM. (Citēts 50. un 108. lappusēs.)
- [170] Ritron. RTU Telemetry. http://www.ritron.com/prod_rtu.html, 1999. [atsauce 24.11.2010.]. (Citēts 50. lappusē.)
- [171] K. Fall. A delay-tolerant network architecture for challenged internets. In *Proceedings of the 2003 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*, pages 27–34. ACM, 2003. (Citēts 50. lappusē.)
- [172] K. Fall and S. Farrell. DTN: an architectural retrospective. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 26(5):828–836, 2008. (Citēts 50. un 111. lappusēs.)
- [173] R. C. Shah, S. Roy, S. Jain, and W. Brunette. Data MULEs: modeling and analysis of a three-tier architecture for sparse sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 1(2-3):215 – 233, 2003. Sensor Network Protocols and Applications. (Citēts 50. lappusē.)
- [174] Z. J. Haas and T. Small. A new networking model for biological applications of ad hoc sensor networks. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, 14(1):27–40, 2006. (Citēts 50. lappusē.)
- [175] H. Jun, W. Zhao, M. H. Ammar, E. W. Zegura, and C. Lee. Trading latency for energy in densely deployed wireless ad hoc networks using message ferrying. *Ad Hoc Networks*, 5(4):444–461, 2007. (Citēts 50. lappusē.)

- [176] R.C. Shah, S. Roy, S. Jain, and W. Brunette. Data mules: Modeling and analysis of a three-tier architecture for sparse sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 1(2-3):215–233, 2003. (Citēts 50. un 112. lappusēs.)
- [177] SD Association. SD Standards. <https://www.sdcard.org/home/>, 1999. [atsauce 10.10.2013.]. (Citēts 52. lappusē.)
- [178] Texas Instruments. CC2420 Single-Chip 2.4 GHz IEEE 802.15.4 Compliant and ZigBee™ Ready RF Transceiver. <http://www.ti.com/product/cc2420>, 2003. [atsauce 01.07.2010.]. (Citēts 54., 66. un 68. lappusēs.)
- [179] Linx Technologies. LT Series Long Range RF Transceiver Modules. <http://www.linxtechnologies.com/en/products/modules/lt-rf-transceiver>, 2001. [atsauce 01.07.2010.]. (Citēts 54. un 66. lappusēs.)
- [180] QStarz International Co. BT-Q1000 Super 51-CH Performance GPS Travel Recorder. <http://www.qstarz.com/Products/GPS%20Products/BT-Q1000-F.htm>, 2007. [atsauce 20.06.2010.]. (Citēts 54. lappusē.)
- [181] Sensiron. SHT15 - Digital Humidity Sensor (RH&T). <http://www.sensirion.com/en/products/humidity-temperature/humidity-sensor-sht15/>, 2008. [atsauce 01.07.2010.]. (Citēts 54. lappusē.)
- [182] Vishay Semiconductors. TEMENT6000X01 Ambient Light Sensor. <http://www.vishay.com/product?docid=81579>, 2004. [atsauce 30.03.2011.]. (Citēts 54. un 57. lappusēs.)
- [183] SparkFun Electronics. IMU Analog Combo Board - 5 Degrees of Freedom IDG500/ADXL335. <https://www.sparkfun.com/products/retired/9268>, 2009. [atsauce 20.06.2010.]. (Citēts 54. lappusē.)
- [184] InvenSense. IDG-500 Integrated Dual-Axis Gyroscope. <http://www.invensense.com/mems/gyro/idg500.html>, 2005. [atsauce 30.03.2011.]. (Citēts 54. un 57. lappusēs.)

- [185] Analog Devices. ADXL335: Small, Low Power, 3-axis ± 3 G Accelerometer. <http://www.analog.com/en/mems-sensors/mems-accelerometers/adxl335/products/product.html>, 2009. [atsauce 30.03.2011.]. (Citēts 54. un 57. lappusēs.)
- [186] Texas Instruments. CC430F6137 - MSP430™ SoC with RF Core. <http://www.ti.com/product/cc430f6137>, 2009. [atsauce 30.03.2011.]. (Citēts 56., 57. un 60. lappusēs.)
- [187] Texas Instruments. MSP430FR573x, MSP430FR572x Mixed Signal Microcontroller. <http://www.ti.com/product/msp430fr5737>, 2011. [atsauce 10.02.2012.]. (Citēts 56. un 59. lappusēs.)
- [188] u-blox AG. IT300 GPS Receiver Module. https://www2.u-blox.com/images/downloads/Product_Docs/IT300_PS.pdf, 2009. [atsauce 27.05.2014.]. (Citēts 57. lappusē.)
- [189] Sensiron. SHT21 - Digital Humidity Sensor (RH&T). <http://www.sensirion.com/en/products/humidity-temperature/humidity-sensor-sht21/>, 2009. [atsauce 30.03.2011.]. (Citēts 57. lappusē.)
- [190] FTDI Chip. FT2232D - Dual USB UART/FIFO IC. <http://www.ftdichip.com/Products/ICs/FT2232D.htm>, 2006. [atsauce 30.03.2011.]. (Citēts 57. lappusē.)
- [191] Enix Energies. 800040 3.75V 6.8Ah. <http://www.farnell.com/datasheets/17681.pdf>, 2006. [atsauce 30.03.2011.]. (Citēts 57., 58. un 59. lappusēs.)
- [192] MAX-7 series - Compact u-blox 7 GPS/GNSS modules. <http://www.u-blox.com/en/gps-modules/pvt-modules/max-7.html>, 2013. [atsauce 10.10.2013.]. (Citēts 57. lappusē.)
- [193] Analog Devices. ADXL345: 3-axis, ± 2 G/ ± 4 G/ ± 8 G/ ± 16 G Digital Accelerometer. <http://www.analog.com/en/mems-sensors/mems-inertial-sensors/adxl345/products/product.html>, 2009. [atsauce 30.12.2011.]. (Citēts 57. un 66. lappusēs.)

- [194] InvenSense. IMU-3000 Triple Axis MotionProcessor™ Gyroscope. <http://invensense.com/mems/gyro/imu3000.html>, 2012. [atsauce 30.12.2011.]. (Citēts 57. un 66. lappusēs.)
- [195] Honeywell. HMC5883L 3-Axis Digital Compass IC. <http://www.magneticsensors.com/three-axis-digital-compass.php>, 2012. [atsauce 05.03.2012.]. (Citēts 57. lappusē.)
- [196] Intersil. ISL29003: Light-to-Digital Output Sensor with High Sensitivity, Gain Selection, Interrupt and I2C Interface. <http://www.intersil.com/en/products/optoelectronics/ambient-light-sensors/light-to-digital-sensors/ISL29003.html>, 2011. [atsauce 04.01.2012.]. (Citēts 57. lappusē.)
- [197] Xeno Energy. Xeno Energy XL-205F battery. <http://www.xenoenergy.com/eng/prod/genaral06.asp>, 2010. [14.09.2011.]. (Citēts 58. un 59. lappusēs.)
- [198] Panasonic. Electric Double Layer Capacitor RG EECRG0V105H. <http://industrial.panasonic.com/www-cgi/jvcr13pz.cgi?E+PZ+3+ABC0021+EECRGOV105H+7+WW>, 2012. [30.11.2013.]. (Citēts 58. un 59. lappusēs.)
- [199] M. Thompson, P. Green, et al. Raspbian. <http://www.raspbian.org/>, 2006. [atsauce 02.07.2012.]. (Citēts 60. un 118. lappusēs.)
- [200] R. Ruskuls and L. Selavo. EdiMote: a flexible sensor node prototyping and profiling tool. *Real-World Wireless Sensor Networks*, pages 194–197, 2010. (Citēts 60. un 70. lappusēs.)
- [201] G. Strazdins, A. Elsts, and L. Selavo. MansOS: easy to use, portable and resource efficient operating system for networked embedded devices. In *Proceedings of the 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, SenSys '10, pages 427–428, New York, NY, USA, 2010. ACM. (Citēts 60., 97. un 118. lappusēs.)
- [202] A. Elsts, J. Judvaitis, and L. Selavo. Poster Abstract: SEAL: An Easy-to-use Sensor Node Application Development System. Presented in 9th European Conference of Wireless Sensor Networks (EWSN 2012), 2012. (Citēts 60. un 118. lappusēs.)

- [203] A. S. Tanenbaum. *Computer Networks, 4th edition*. Prentice Hall, 2003. (Citēts 62. lappusē.)
- [204] T. K. Moon. *Error correction coding: mathematical methods and algorithms*. Wiley-Blackwell, 2005. (Citēts 62. lappusē.)
- [205] Micron. M25P80 Serial Flash Embedded Memory. <https://www.micron.com/~media/documents/products/data-sheet/nor-flash/serial-nor/m25p/m25p80.pdf>, 2011. [atsauce 28.06.2012.]. (Citēts 64. lappusē.)
- [206] S. Watanabe, M. Izawa, A. Kato, Y. Ropert-Coudert, and Y. Naito. A new technique for monitoring the detailed behaviour of terrestrial animals: a case study with the domestic cat. *Applied Animal Behaviour Science*, 94(1):117–131, 2005. (Citēts 65. lappusē.)
- [207] R. P. Wilson, C. R. White, F. Quintana, L. G. Halsey, N. Liebsch, G. R. Martin, and P. J. Butler. Moving towards acceleration for estimates of activity-specific metabolic rate in free-living animals: the case of the cormorant. *Journal of Animal Ecology*, 75(5):1081–1090, 2006. (Citēts 65. lappusē.)
- [208] B. D. Hansen, B. D. X. Lascelles, B. W. Keene, A. K. Adams, and A. E. Thomson. Evaluation of an accelerometer for at-home monitoring of spontaneous activity in dogs. *American journal of veterinary research*, 68(5):468–475, 2007. (Citēts 65. lappusē.)
- [209] B. D. X. Lascelles, B. D. Hansen, A. Thomson, C. C. Pierce, E. Boland, and E. S. Smith. Evaluation of a digitally integrated accelerometer-based activity monitor for the measurement of activity in cats. *Veterinary anaesthesia and analgesia*, 35(2):173–183, 2008. (Citēts 65. lappusē.)
- [210] R. P. Wilson, E. L. C. Shepard, and N. Liebsch. Prying into the intimate details of animal lives: use of a daily diary on animals. *Endangered Species Research*, 4(1-2):123–137, 2008. (Citēts 65. lappusē.)

- [211] T. Noda, J. Okuyama, T. Koizumi, N. Arai, and M. Kobayashi. Monitoring attitude and dynamic acceleration of free-moving aquatic animals using a gyroscope. *Aquatic Biology*, 16(3):265–276, 2012. (Citēts 66. lappusē.)
- [212] Texas Instruments. EZ430-Chronos. <http://processors.wiki.ti.com/index.php/EZ430-Chronos>, 2009. [atsauce 30.03.2011.]. (Citēts 70. lappusē.)
- [213] OpenChronos. EZ430-Chronos. <https://github.com/poelzi/OpenChronos>, 2010. [atsauce 30.03.2011.]. (Citēts 70. lappusē.)
- [214] Coudé R. Radio mobile. <http://www.cplus.org/rmw/english1.html>, 1988. [atsauce 24.11.2010.]. (Citēts 71. un 72. lappusēs.)
- [215] Autoliste. <http://autoliste.lv/>, 2001. [atsauce 27.08.2012.]. (Citēts 78., 79. un 84. lappusēs.)
- [216] CDT. <http://cdtlapsa.wordpress.com/>, 2009. [atsauce 30.12.2011.]. (Citēts 79. lappusē.)
- [217] J. Verhaegh, I. Soute, A. Kessels, and P. Markopoulos. On the design of Camelot, an outdoor game for children. In *Proceedings of the 2006 conference on Interaction design and children*, pages 9–16. ACM, 2006. (Citēts 80. lappusē.)
- [218] K. Facer, R. Joiner, D. Stanton, J. Reid, R. Hull, and D. Kirk. Savannah: mobile gaming and learning? *Journal of Computer Assisted Learning*, 20(6):399–409, 2004. (Citēts 80. lappusē.)
- [219] J. McGonigal. *This might be a game: ubiquitous play and performance at the turn of the twenty-first century*. PhD thesis, University of California, 2006. (Citēts 80. lappusē.)
- [220] J. McGonigal. Why I Love Bees: A case study in collective intelligence gaming. *The John D. and Catherine T. MacArthur Foundation Series on Digital Media and Learning*, pages 199–227, 2007. (Citēts 80. lappusē.)

- [221] J. McGonigal. The puppet master problem: Design for real-world, mission-based gaming. *Second Person: Role-Playing and Story in Games and Playable Media*, 2007. (Citēts 80. lappusē.)
- [222] J. McGonigal. Gaming can make a better world. *Tedcom*, 2010. (Citēts 80. lappusē.)
- [223] R. Magielse and P. Markopoulos. Heartbeat: an outdoor pervasive game for children. In *Proceedings of the 27th international conference on Human factors in computing systems*, pages 2181–2184. ACM, 2009. (Citēts 80. lappusē.)
- [224] T. Bekker, J. Sturm, and B. Eggen. Designing playful interactions for social interaction and physical play. *Personal and Ubiquitous Computing*, 14(5):385–396, 2010. (Citēts 80. un 101. lappusēs.)
- [225] A. D. Cheok, K. H. Goh, W. Liu, F. Farbiz, S. W. Fong, S. L. Teo, Y. Li, and X. Yang. Human Pacman: a mobile, wide-area entertainment system based on physical, social, and ubiquitous computing. *Personal and Ubiquitous Computing*, 8(2):71–81, 2004. (Citēts 81. lappusē.)
- [226] D. de Vasconcelos Campos and R. de Beauclair Seixas. Command and Control: A low cost framework to remotely monitor military training. In *Proceedings of the 2011 Military Modeling & Simulation Symposium*, pages 36–43. Society for Computer Simulation International, 2011. (Citēts 81. lappusē.)
- [227] O. Sotamaa. All the world’s a botfighter stage: Notes on location-based multi-user gaming. In *CGDC Conference Proceedings*, pages 35–45. Citeseer, 2002. (Citēts 81. lappusē.)
- [228] A. D. Cheok, A. Sreekumar, C. Lei, and L. N. Thang. Capture the flag: mixed-reality social gaming with smart phones. *Pervasive Computing, IEEE*, 5(2):62–69, 2006. (Citēts 82. lappusē.)
- [229] S. Casey, B. Kirman, and D. Rowland. The gopher game: a social, mobile, locative game with user generated content and peer review. In *Proceedings of the international conference on Advances in computer entertainment technology*, pages 9–16. ACM, 2007. (Citēts 82. lappusē.)

- [230] Groundspeak, Inc. Geocaching. <http://www.geocaching.com/>, 2000. [atsauce 28.08.2012.]. (Citēts 82. lappusē.)
- [231] K. O'Hara. Understanding geocaching practices and motivations. In *Proceedings of the twenty-sixth annual SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pages 1177–1186. ACM, 2008. (Citēts 82. lappusē.)
- [232] L. B. Gram-Hansen. Geocaching in a persuasive perspective. In *Proceedings of the 4th International Conference on Persuasive Technology*, page 34. ACM, 2009. (Citēts 82. lappusē.)
- [233] Groundspeak, Inc. Wherigo. <http://www.wherigo.com/>, 2001. [atsauce 28.08.2012.]. (Citēts 82. lappusē.)
- [234] P. Wallace. Development of a place-based mobile game for groundwater education. *Proceedings from SITE*, pages 3866–3871, 2009. (Citēts 82. lappusē.)
- [235] Niantic Labs. Ingress. <https://www.ingress.com/>, 2012. [atsauce 17.03.2013.]. (Citēts 83. lappusē.)
- [236] H. Hodson. Google's Ingress game is a gold mine for augmented reality. *New Scientist*, 216(2893):19, 2012. (Citēts 83. lappusē.)
- [237] A. Sadilek and H. Kautz. Recognizing multi-agent activities from GPS data. In *Twenty-Fourth AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2010. (Citēts 83. lappusē.)
- [238] A. Sadilek and H. Kautz. Modeling and reasoning about success, failure, and intent of multi-agent activities. *Ubiquitous Computing: Mobile Context-Awareness*, 2010. (Citēts 83. lappusē.)
- [239] Garmin, Ltd. Garmin Chirp Owner's Manual. http://static.garmincdn.com/pumac/Chirp_OM_EN.pdf, 2010. [atsauce 15.01.2012.]. (Citēts 83. lappusē.)
- [240] Autoorientēšanās pasākums Makatana. <http://makatana.xelluc.lv/>, 2011. [atsauce 30.03.2012.]. (Citēts 83. lappusē.)

- [241] Catan GmbH. Settlers of Catan. <http://www.catan.com/>, 1995. [atsauce 17.03.2013.]. (Citēts 83. lappusē.)
- [242] Days of Wonder Inc. Ticket to Ride. <http://www.daysofwonder.com/tickettoride/en/usa/>, 2004. [atsauce 17.03.2013.]. (Citēts 83. lappusē.)
- [243] C. Tull. *WAP 2.0 Development*. Que Publishing, 2002. (Citēts 86. lappusē.)
- [244] F.F.I.E. Council. Authentication in an internet banking environment. 2011. (Citēts 91. lappusē.)
- [245] Gemius. Consumers go mobile in cee – mobile market overview. http://files.gemius.pl/Reports/2014/Consumers_go_mobile_in_CEE_2014, 2014. [atsauce 05.01.2015.]. (Citēts 96. lappusē.)
- [246] ERC. RECOMMENDATION 70-03 (Troms 1997 and subsequent amendments), Relating to the use of short-range devices (SRD), Recommendation adopted by the Frequency Management, Regulatory Affairs and Spectrum Engineering Working Groups. <http://www.erodocdb.dk/docs/doc98/official/pdf/rec7003e.pdf>, 1997. [atsauce 07.05.2012.]. (Citēts 97. lappusē.)
- [247] L. Selavo et al. MansOS. <http://mansos.net/>, 2007. [atsauce 28.08.2012.]. (Citēts 97. lappusē.)
- [248] Future Technology Devices International, Ltd. FTDI Chip. <http://www.ftdichip.com/>, 2012. [atsauce 15.01.2012.]. (Citēts 97. lappusē.)
- [249] B. Incepinar. Simple FM transmitter with a single transistor. <http://tacashi.tripod.com/elctrncs/smplfmtr/smplfmtr.htm>, 2001. [atsauce 15.01.2012.]. (Citēts 98. lappusē.)
- [250] Niigata Seimitsu Co., Ltd. NS73M-61LU-0101 FM Stereo Transmitter Module. http://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/General/NS73_Datasheet.pdf, 2006. [atsauce 15.01.2012.]. (Citēts 98. lappusē.)
- [251] J. Domburg. AVR-based FM-transmitter. <http://spritesmods.com/?art=avrfrmtr>, 2012. [atsauce 10.02.2012.]. (Citēts 98. lappusē.)

- [252] Arduino Forum. Arduino + Wire = Morse Code AM Radio Beacon. <http://www.arduino.cc/cgi-bin/yabb2/YaBB.pl?num=1170901754>, 2007. [atsauce 15.01.2012.]. (Citēts 99. lappusē.)
- [253] NXP, B.V. PCF8593 Low Power Clock and Calendar IC. http://www.nxp.com/documents/data_sheet/PCF8593.pdf, 2010. [atsauce 30.09.2011.]. (Citēts 99., 115. un 117. lappusēs.)
- [254] Atmel. 2-Wire Serial EEPROM AT24C32C AT24C64C. http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc5298.pdf, 2008. [atsauce 15.01.2012.]. (Citēts 99. lappusē.)
- [255] A. Lackorzynski, M. A. Godisch, et al. Minicom. <http://alioth.debian.org/projects/minicom>, 2012. [atsauce 27.08.2012.]. (Citēts 99. lappusē.)
- [256] Adafruit. Bluefruit LE - Bluetooth Low Energy (BLE 4.0) - nRF8001 Breakout - v1.0. <http://www.adafruit.com/products/1697>, 2014. [atsauce 10.12.2014.]. (Citēts 101. lappusē.)
- [257] Adafruit. SparkFun DeadOn RTC Breakout - DS3234. <https://www.sparkfun.com/products/10160>, 2011. [atsauce 10.12.2014.]. (Citēts 101. lappusē.)
- [258] K. Martinez, J. K. Hart, and R. Ong. Environmental sensor networks. *Computer*, 37(8):50–56, 2004. (Citēts 106. lappusē.)
- [259] Barry & Associates, Inc. Service oriented architecture definition. http://www.service-architecture.com/web-services/articles/service-oriented_architecture_soa_definition.html, 2000. (Citēts 106. lappusē.)
- [260] Darrow, B. When it comes to the connected home, it's keep it simple, stupid. <https://gigaom.com/2012/09/21/when-it-comes-to-the-connected-home-its-keep-it-simple-stupid/>, 2012. [atsauce 14.11.2012.]. (Citēts 107. lappusē.)
- [261] L. Richardson and S. Ruby. *RESTful web services*. O'Reilly Media, 2007. (Citēts 107. lappusē.)

- [262] C. Schroth and T. Janner. Web 2.0 and SOA: Converging concepts enabling the internet of services. *IT professional*, 9(3):36–41, 2007. (Citēts 107. lappusē.)
- [263] G. P. Halkes, T. van Dam, and K. G. Langendoen. Comparing energy-saving MAC protocols for wireless sensor networks. *Mobile Networks and Applications*, 10(5):783–791, 2005. (Citēts 108. lappusē.)
- [264] A. El-Hoiydi and J.-D. Decotignie. Low power downlink MAC protocols for infrastructure wireless sensor networks. *Mobile Networks and Applications*, 10(5):675–690, 2005. (Citēts 108. lappusē.)
- [265] M. Buettner, G. V. Yee, E. Anderson, and R. Han. X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks. In *Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 307–320. ACM, 2006. (Citēts 108. lappusē.)
- [266] I. Rhee, A. Warrier, M. Aia, J. Min, and M. L. Sichitiu. Z-MAC: a hybrid MAC for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 16(3):511–524, 2008. (Citēts 108. lappusē.)
- [267] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In *INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, volume 3, pages 1567–1576. IEEE, 2002. (Citēts 108. lappusē.)
- [268] E. Avilés-López and J. A. García-Macías. TinySOA: a service-oriented architecture for wireless sensor networks. *Service Oriented Computing and Applications*, 3(2):99–108, 2009. (Citēts 110. lappusē.)
- [269] T. Luckenbach, P. Gober, S. Arbanowski, A. Kotsopoulos, and K. Kim. TinyREST: a protocol for integrating sensor networks into the internet. In *Proc. of REALWSN*, 2005. (Citēts 110. lappusē.)
- [270] E. Zeeb, A. Bobek, H. Bohn, S. Prüter, A. Pohl, H. Krumm, I. Lück, F. Golatowski, and D. Timmermann. WS4D: SOA-Toolkits making embedded systems ready for

Web Services. *Open Source Software and Productlines 2007 (OSSPL07)*, 2007. (Citēts 110. lappusē.)

- [271] N. B. Priyantha, A. Kansal, M. Goraczko, and F. Zhao. Tiny web services: design and implementation of interoperable and evolvable sensor networks. In *Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems*, pages 253–266. ACM, 2008. (Citēts 110. lappusē.)
- [272] S. De Deugd, R. Carroll, K. E. Kelly, B. Millett, and J. Ricker. Soda: Service oriented device architecture. *Pervasive Computing, IEEE*, 5(3):94–96, 2006. (Citēts 110. lappusē.)
- [273] J. Leguay, M. Lopez-Ramos, K. Jean-Marie, and V. Conan. An efficient service oriented architecture for heterogeneous and dynamic wireless sensor networks. In *Local Computer Networks, 2008. LCN 2008. 33rd IEEE Conference on*, pages 740–747. Ieee, 2008. (Citēts 110. lappusē.)
- [274] J. Leguay, M. Lopez-Ramos, K. Jean-Marie, and V. Conan. Service oriented architecture for heterogeneous and dynamic sensor networks. In *Proceedings of the second international conference on Distributed event-based systems*, pages 309–312. ACM, 2008. (Citēts 110. lappusē.)
- [275] D. Yazar and A. Dunkels. Efficient application integration in IP-based sensor networks. In *Proceedings of the First ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Buildings*, pages 43–48. ACM, 2009. (Citēts 111. lappusē.)
- [276] M. C. Chuah, L. Cheng, and B. D. Davison. Enhanced disruption and fault tolerant network architecture for bundle delivery (EDIFY). In *Global Telecommunications Conference, 2005. GLOBECOM'05. IEEE*, volume 2, pages 6–pp. IEEE, 2005. (Citēts 111. lappusē.)
- [277] L. Wood, W. M. Eddy, and P. Holliday. A bundle of problems. In *Aerospace conference, 2009 IEEE*, pages 1–17. IEEE, 2009. (Citēts 111. lappusē.)

- [278] W. Ivancic, L. Wood, P. Holliday, W. M. Eddy, D. Stewart, C. Jackson, and J. Northam. Experience with delay-tolerant networking from orbit. In *Advanced Satellite Mobile Systems, 2008. ASMS 2008. 4th*, pages 173–178. IEEE, 2008. (Citēts 111. lappusē.)
- [279] M. Ho and K. Fall. Poster: Delay tolerant networking for sensor networks. In *Proc. of IEEE Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, 2004. (Citēts 111. lappusē.)
- [280] P. McDonald, D. Geraghty, I. Humphreys, S. Farrell, and V. Cahill. Sensor network with delay tolerance (sendt). In *Computer Communications and Networks, 2007. ICCCN 2007. Proceedings of 16th International Conference on*, pages 1333–1338. IEEE, 2007. (Citēts 111. lappusē.)
- [281] A. Dunkels, B. Grönvall, and T. Voigt. Contiki - a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors. *Local Computer Networks, Annual IEEE Conference on*, 0:455–462, 2004. (Citēts 111. lappusē.)
- [282] M. Loubser. Delay tolerant networking for sensor networks. *SICS Research Report*, 2006. (Citēts 111. lappusē.)
- [283] S. Farrell, V. Cahill, D. Geraghty, I. Humphreys, and P. McDonald. When TCP breaks: Delay-and disruption-tolerant networking. *Internet Computing, IEEE*, 10(4):72–78, 2006. (Citēts 111. lappusē.)
- [284] A. Kurnikov. Web browser for delay-tolerant networks. Master’s thesis, 2010. (Citēts 111. lappusē.)
- [285] I. Psaras, L. Wood, and R. Tafazolli. Delay-/disruption-tolerant networking: State of the art and future challenges. *University of Surrey, UK, Tech. Rep*, 2010. (Citēts 112. lappusē.)
- [286] K. W. Chen. *Cafnet: A carry-and-forward delay-tolerant network*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2007. (Citēts 112. lappusē.)

- [287] S. Jain, R. C. Shah, W. Brunette, G. Borriello, and S. Roy. Exploiting mobility for energy efficient data collection in wireless sensor networks. *Mobile Networks and Applications*, 11(3):327–339, 2006. (Citēts 112. lappusē.)
- [288] T. Antoniou, I. Chatzigiannakis, G. Mylonas, S. Nikoletseas, and A. Boukerche. A new energy efficient and fault-tolerant protocol for data propagation in smart dust networks using varying transmission range. In *Simulation Symposium, 2004. Proceedings. 37th Annual*, pages 43–52. IEEE, 2004. (Citēts 112. lappusē.)
- [289] S. B. Eisenman, E. Miluzzo, N. D. Lane, R. A. Peterson, G.-S. Ahn, and A. T. Campbell. BikeNet: A mobile sensing system for cyclist experience mapping. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 6(1):6, 2009. (Citēts 112. lappusē.)
- [290] S. Farrell and V. Cahill. LTP-T: A Generic Delay Tolerant Transport Protocol. Technical report, Technical Report TCD-CS-2005-69, Computer Science, Trinity College Dublin, 2005. (Citēts 113. lappusē.)
- [291] A. Dunkels, J. Alonso, T. Voigt, H. Ritter, and J. Schiller. Connecting wireless sensor networks with TCP/IP networks. *Wired/Wireless Internet Communications*, pages 583–594, 2004. (Citēts 113. lappusē.)
- [292] M. Benger, S. Cohen, and R. Peleg. HTTP over UDP, Final Report. http://www.cs.technion.ac.il/Courses/Computer-Networks-Lab/projects/spring2000/http_udp/index.htm, 2000. [atsauce 14.08.2012.]. (Citēts 113. lappusē.)
- [293] D. Crockford. RFC 4627: JSON. <http://www.ietf.org/rfc/rfc4627.txt>, 2006. (Citēts 113. lappusē.)
- [294] Amber Wireless. Low-cost RF module 868 MHz with antenna AMB8420. <http://amber-wireless.de/58-1-AMB8420.html>, 2012. [atsauce 02.07.2012.]. (Citēts 116. un 117. lappusēs.)
- [295] Spell Foundry. Sleepy Pi. <http://spellfoundry.com/products/sleepy-pi/>, 2013. [atsauce 30.11.2013.]. (Citēts 117. lappusē.)

- [296] A. Mainwaring, D. Culler, J. Polastre, R. Szewczyk, and J. Anderson. Wireless sensor networks for habitat monitoring. In *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*, pages 88–97. ACM, 2002. (Citēts 121. lappusē.)
- [297] Y. Gsottberger, X. Shi, G. Stromberg, T. F. Sturm, and W. Weber. Embedding low-cost wireless sensors into universal plug and play environments. In *Wireless Sensor Networks*, pages 291–306. Springer, 2004. (Citēts 122. lappusē.)
- [298] A. Lins, E. F. Nakamura, A. A. F. Loureiro, and C. J. N. Coelho Jr. BeanWatcher: a tool to generate multimedia monitoring applications for wireless sensor networks. In *Management of Multimedia Networks and Services*, pages 128–141. Springer, 2003. (Citēts 122. lappusē.)
- [299] F. C. Delicato, P. F. Pires, L. Pinnez, L. Fernando, and L. F. R. da Costa. A flexible web service based architecture for wireless sensor networks. In *Distributed Computing Systems Workshops, 2003. Proceedings. 23rd International Conference on*, pages 730–735. IEEE, 2003. (Citēts 122. lappusē.)
- [300] F. C. Delicato, P. F. Pires, L. Pirmez, and L. F. R. da Carmo. A service approach for architecting application independent wireless sensor networks. *Cluster Computing*, 8(2):211–221, 2005. (Citēts 122. lappusē.)
- [301] R. A. Bullen, T. C. Arnot, J. B. Lakeman, and F. C. Walsh. Biofuel cells and their development. *Biosensors and Bioelectronics*, 21(11):2015–2045, 2006. (Citēts 126. lappusē.)