

Latvijas Universitāte
Datorikas fakultāte

Reinholds Zviedris

OBJEKTU MONITORINGS AR ZEMA
ENERĢIJAS PATĒRĪĀ IEGULTĀM
IEKĀRTĀM UN HETEROĢĒNIEM
BEZVADU SENSORU TĪKLIEM

Promocijas darba kopsavilkums

Doktora grāda iegūšanai datorzinātnes nozarē
Apakšnozare: datu apstrādes sistēmas un datortīkli

Rīga – 2015

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Universitātes
Datorikas fakultātē
laika posmā no 2007. gada līdz 2015. gadam.



IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

Eiropas Sociālā fonda projekts "Atbalsts dok-
tora studijām Latvijas Universitātē - 2" Nr.
2011/0054/1DP/1.1.2.1.2/11/IPIA/VIAA/002

Darbs sastāv no ievada, 5 nodaļām, nobeiguma, literatūras saraksta un 4 pielikumiem.

Darba forma: disertācija datorzinātnes nozarē, datu apstrādes sistēmu un datortīklu apakšnozarē.

Darba zinātniskais vadītājs: *Dr.sc.comp.*, profesors Leo Seļāvo

- Darba recenzenti:
1. Guntis Arnicāns, *Dr.sc.comp.*, profesors, LU
 2. Aleksejs Zacepins, *Dr.sc.ing.*, docents, LLU
 3. Tomas Krilavičius, *Dr.*, profesors, Vytauto Didžiojo universitetas

Promocijas darba aizstāvēšana notiks 2015. gada 31. augustā 15:00
Latvijas Universitātes
Datorzinātnes nozares promocijas padomes atklātā sēdē
Rīgā, Raiņa bulvārī 29, 413. telpā.

Ar promocijas darbu un tā kopsavilkumu var iepazīties Latvijas Universitātes Bibliotēkā
Rīgā, Raiņa bulvārī 19, 203. telpā.

LU Datorzinātnes nozares

promocijas padomes priekšsēdētājs /Jānis Bārzdīņš/
(paraksts)
promocijas padomes sekretāre /Ruta Ikaunieca/
(paraksts)

© Latvijas Universitāte, 2015

© Reinholds Zviedris, 2015

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. Darba 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 balstoties uz piedāvāto vispārīgo metodi, pierāda, ka tā ir pielietojama.

Atslēgas vārdi

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

Saturs

Vispārējs darba raksturojums	5
Izvēlētās tēmas aktualitāte un pētījuma novitāte	5
Promocijas darba mērķis un uzdevumi	7
Promocijas darbā izmantotās metodes	7
Promocijas darba svarīgākie rezultāti	7
Darba zinātniskā nozīmība un rezultātu aprobācija	8
Promocijas darba apjoms un struktūra	12
1. Vispārējs objektu monitoringa modelis	13
1.1. Kas ir bezvadu sensorās iekārtas un to tīkli?	13
1.2. BST pielietojumi, izaicinājumi un prasības	13
1.3. Monitoringa modelis	14
1.4. Vispārīgā metode iegulto BST iekārtu izveidei	15
2. Izmantotie materiāli un metodes	16
2.1. Izmantotā datortehnika un programmatūra	16
2.2. Izmantotās iegultās iekārtas	16
3. Savvaļas dzīvnieku monitorings, izmantojot BST	17
3.1. Ievads un motivācija	17
3.2. Esošo risinājumu apskats	18
3.3. Risinājums	18
3.4. Eksperimenti	22
3.5. Secinājumi	24
4. Heterogēni rīki izglītībai un izklaidei reālā laikā	25
4.1. Ievads un motivācija	25
4.2. Esošo risinājumu apskats	26
4.3. Risinājums	26
4.4. Eksperimenti un to rezultāti	31
4.5. Secinājumi	31
5. Tīmekļa servisi zema enerģijas patēriņa bezvadu sensoru tīklos	31
5.1. Ievads un motivācija	32
5.2. Esošo risinājumu apskats	33
5.3. Risinājums	33
5.4. Eksperimenti	34
5.5. Secinājumi	37
6. Nobeigums un secinājumi	37
Izmantotā literatūra un avoti	40

Vispārējs darba raksturojums

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 vienkāršāko. Ar vissarežģītākā pakāpi tiek saprasts kustīgs monitorējamais objekts un kustīgs monitorējamais objekts, savukārt, ar visvienkāršāko – statisks monitorējamais objekts un statisks monitorējamais objekts.

Autors ir aprakstījis radīto metodi, tās apakšmodeļus un uz tiem balstītos rīkus objektu monitoringam un datu ievākšanai, lietojot zema enerģijas patēriņa iegultas iekārtas un heterogēnus bezvadu sensoru tīklus.

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 uzsvāru liek uz ērtu un lietotājam draudzīgu risinājumu izveidi.

Izvēlētās tēmas aktualitāte un pētījuma novitāte

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

Tomēr bezvadu sensoru tīklu pētniecībā un izveidē eksistē vairāki izaicinājumi – aparatūras uzbūve, radio sakaru kvalitāte, komunikāciju protokoli, drošība, pieejamība, darbības stabilitāte, darbības vide, lietojumprogrammu izstrāde, informācijas apstrāde, enerģijas taupība un nodrošināšana, kā arī citi – kas kavē pilnvērtīgāku BST izmantošanu ikdienā. Divi būtiskākie pētījumu virzieni ir sensoru tīklu dzīves ilguma paildzināšana un saprātīgu datu ievākšanas sistēmu izstrāde.

Iepriekšminētie izaicinājumi ir jāņem vērā, izstrādājot jaunu, monitoringam piemērotu bezvadu sensoru sistēmu. Veicot izpēti, tika identificēti 3 visbiežāk sastopamie un būtiskākie izaicinājumi – enerģijas taupība, informācijas apstrāde un pieejamība. Šo visu trīs izaicinājumu apvienojums arī tika izvēlēts kā promocijas darba pētījumu pamats, lai radītu metodi, ar kuras palīdzību objektīvi novērtēt, kuri izaicinājumi ir svarīgākie konkrētajam risinājumam.

Lai pārbaudītu metodes pielietojumu praksē, tika realizēti vairāki aprobācijas piemēri.

Ir aktuāla tendence izsekot savaļas dzīvniekus to dabiskajā vidē [1]. Sadarbībā ar LVMI “Silava” pētniekiem tika izveidots savaļas Eirāzijas lūšu monitoringa risinājums, kas spēj autonomi darboties vismaz gadu, vienlaikus ievācot plašu datu kopu, kuru savlaicīgi iespējams nogādāt pētniekiem.

Pasaulē arvien aktīvāk izklaides un izglītības pasākumos tiek iesaistīti spēļošanas elementi [2]. Kopīgi ar dažādu sporta, izklaides un izglītības pasākumu organizatoru Latvijā biedrību ”Autoliste” tika izveidots konceptuāls un praktiski pielietojams risinājums pasākumu vadībai, izmantojot programmatūru un iegultas iekārtas.

Savukārt, lai veiktu datu apmaiņu, parasti sensoru tīklos tiek lietoti dažādi konkrētiem apstākļiem pielāgoti MAC protokoli un virs tiem lietojumspecifiski datu apmaiņas protokoli. Tas rada problēmas dažādu tīklu savienošanai, jo saziņa nav vienota. Tāpēc kā lietojumiem piemērots tiek virzīts *IPv6* transporta protokols ar *6LoWPAN* paplašinājumu, kas nodrošinātu, ka sensoru tīkli un to mezgli ir galējā interneta robeža. Tas risinātu savstarpējo komunikācijas kanālu problēmu, tomēr neatrisināta paliktu problēma kādā formātā attēlot datus.

Kopš 2000. gadu sākuma tiek attīstīta ideja par semantisko tīmekli un datu attēlošanu semantiskā veidā, kas nodrošinātu vienkāršāku saziņu starp dažādām sistēmām un iekārtām. Tas radīja izaicinājumu radīt servisorientēto arhitektūru bezvadu sensoru tīkliem, kas apvienotu *6LoWPAN* un *JSON* tā, lai varētu piekļūt datiem uz sensoru mezgliem tieši, bez speciālu vārteju lietošanas, tomēr joprojām saglabājot zemu enerģijas patēri-

ņu.

Promocijas darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir radīt metodi, kuru pielietojot var izveidot iegulto sensoru 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.

Promocijas darbā izmantotās metodes

Darba izstrādes laikā paveikts: iesaistīto pušu intervijas un literatūras avotu izpēte; hipotēžu pārbaude, izmantojot plaša pielietojuma datortehniku, gatavus elektronikas komponentus un iegultās iekārtas; speciāla pielietojuma iegultu iekārtu izstrāde; praktiski eksperimenti ar izvēlētajām tehnoloģiskajām iekārtām un programmatūru; eksperimentu rezultātu apkopšana un statistiskā analīze.

Promocijas darba svarīgākie rezultāti

Autors darbā ir aprakstījis radītās metodes un rīkus objektu monitoringam un datu ievākšanai, lietojot zema enerģijas patēriņa iegultas iekārtas un heterogēnus bezvadu sensoru tīklus. Radītās metodes un rīki apbēti dzīvē:

- izveidots *LynxNet* risinājums savvaļas dzīvnieku monitoringam [3];
- radīta sistēma un rīki dinamisku sacensību ar spēles elementiem [4] vadībai;

- radīts eksperimentāls risinājums bedru un citus nelīdzenumu fiksācijai uz ceļa virsmas [5];
- radīts eksperimentāls risinājums autonomai automašīnas vadībai kooperatīvā braukšanas scenārijā [6];
- izveidota apkārtējās vides apstākļu monitoringa sistēma augļu dārzam [7];
- izveidota bezvadu sensoru tīkliem piemērota servisorientētā arhitektūra *WSN-SOA*.

Darba zinātniskā nozīmība un rezultātu aprobācija

Promocijas darba 3.-5. nodaļā aprakstītās pētnieciskās aktivitātes daļēji veiktas Elektronikas un datorzinātņu institūta (direktors *Dr.sc.comp.* Modris Greitāns) Eiropas Sociālā fonda projekta Nr. 2009/0219/1DP/1.1.1.2.0/09/APIA/VIAA/020 "Viedo sensoru un tīklotu iegulto sistēmu pētījumu un attīstības centrs" (zinātniskais vadītājs *Dr.sc.comp.* Leo Seļāvo) ietvaros.

Promocijas darba 4. nodaļā aprakstītās pētnieciskās aktivitātes veiktas sadarbojoties ar biedrību "Autoliste" (valdes priekšsēdētāja Māra Niedra).

Promocijas darba 5. nodaļā aprakstītās pētnieciskās aktivitātes daļēji veiktas Latvijas Universitātes pētnieciskā projekta Nr. 2010/ZP-204 "Kiber-fizikālā infrastruktūra un modernas datoru tehnoloģijas mācību ēkām" (zinātniskais vadītājs *Dr.sc.comp.* Leo Seļāvo) ietvaros.

Promocijas darba rezultāti atspoguļoti publikācijās

1. Zviedris, R., Elsts, A., Strazdins, G., *et. al.* (2010a) LynxNet: Wild Animal Monitoring Using Sensor Networks. *Real-World Wireless Sensor Networks – REALWSN'10*, LNCS 6511, Marron P.J. *et. al.*, eds., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010, p. 170–173. Autora ieguldījums 40%, publikācija indeksēta SCOPUS, ISI Web of Knowledge / Web of Science un ACM Digital Library datu bāzēs, citēta 17 reizes pēc Google Scholar datiem.
2. Strazdins, G., Gordjusins, A., Kanonirs, G. *et. al.* (2010b) Team "University of Latvia" GCDC 2011 Technical Paper. Electronically published by GCDC.net, HTAS & TNO, 2010. Autora ieguldījums 15%, citēta 2 reizes pēc Google Scholar datiem.

3. Mednis, A., Strazdins, G., Zviedris, R., *et. al.* (2011a) Real time pothole detection using Android smartphones with accelerometers. *2011 International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems and Workshops (DCOSS 2011)*. IEEE, 2011, p. 1–6. Autora ieguldījums 15%, publikācija indeksēta SCOPUS, ISI Web of Knowledge / Web of Science un IEEE Xplore Digital Library datu bāzēs, citēta 75 reizes pēc Google Scholar datiem.
4. Strazdins, G., Mednis, A., Kanonirs, G. *et. al.* (2011b) Towards Vehicular Sensor Networks with Android Smartphones for Road Surface Monitoring. *CONET 2011. The 2nd International Workshop on Networks of Cooperating Objects*. Electronic Proceedings of CPSWeek'11, 2011. Autora ieguldījums 20%, citēta 25 reizes pēc Google Scholar datiem.
5. Strazdins, G., Mednis, A., Zviedris, R. *et. al.* (2011c) Virtual Ground Truth in Vehicular Sensing Experiments: How to Mark it Accurately. *SENSORCOMM 2011. The 5th International Conference on Sensor Technologies and Applications*. IARIA, 2011, p. 295–300. Autora ieguldījums 20%, citēta 4 reizes pēc Google Scholar datiem.
6. Zviedris, R., Elsts, A., Strazdiņš, Ģ. *et. al.* (2011d) Savvaļas dzīvnieku monitorings, izmantojot bezvadu sensoru tīklus. *Apvienotais Pasaules latviešu zinātnieku III kongress, Tehnisko zinātņu sekcijas tēžu krājums*, Rīga, Latvija, 2011. Autora ieguldījums 60%.
7. Elsts, A., Balass, R., Judvaitis, J. *et. al.* (2012a) SADmote: A Robust and Cost-Effective Device for Environmental Monitoring. *Architecture of Computing Systems – ARCS 2012*, LNCS 7179, Herkendorf A. *et. al.*, eds., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012, p. 225–237. Autora ieguldījums 15%, publikācija indeksēta SCOPUS un ACM Digital Library datu bāzēs, citēta 7 reizes pēc Google Scholar datiem.
8. Zviedris, R., Mednis, A., Mednis, G. (2012b) Heterogeneous Tool Kit for Real-Time Edutainment. *5th International Scientific Conference “APPLIED INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES” (AICT 2012)*, LLU, Jelgava, Latvija, 2012, p. 201–208. Autora ieguldījums 50%.
9. Mednis, A., Zviedris, R. (2012c) RFID Communication: How Well Protected Against Reverse Engineering? *2012 2nd International*

Conference on Digital Information Processing and Communications (ICDIPC 2012), IEEE, 2012, p. 56–61. Autora ieguldījums 30%, publikācija indeksēta SCOPUS un IEEE Xplore Digital Library datu bāzēs.

Referāti semināros un konferencēs

1. Latvijas Universitātes 68. konference, (Rīga, Latvija, 19.02.2010.). Ģirts Strazdiņš, Reinholds Zviedris, Leo Selāvo. Arhitektūras viedajām transporta sensoru un datu mūļu sistēmām.
2. Scientific Summer Camp "Idēju kalvē / Smithy of Ideas 2010" (Traikai, Lietuva, 17.-20.06.2010.). Reinholds Zviedris. Data Mules and Their Usage.
3. REALWSN 2010: 4th Workshop on Real-World Wireless Sensor Networks (Colombo, Sri Lanka, 16.-17.12.2010.). Reinholds Zviedris, Atis Elsts, Ģirts Strazdins, Artis Mednis, Leo Selavo. LynxNet: Wild Animal Monitoring Using Sensor Network.
4. Viedo sensoru un kvantu skaitļošanas seminārs (Rīga, Latvija, 27.05.2011.). Reinholds Zviedris, Atis Elsts, Artis Mednis, Gatis Šūpols, Leo Selāvo. Savvaļas dzīvnieku monitorings ar bezvadu sensoru tīkliem.
5. Viedo sensoru un kvantu skaitļošanas seminārs (Rīga, Latvija, 27.05.2011.). Artis Mednis, Reinholds Zviedris, Andris Gordjušins, Georgijs Kanonirs, Leo Selāvo. Latvijas komandas pieredze viedo auto izaicinājumā GCDC.
6. CONET 2011: The 2nd International Workshop on Networks of Cooperating Objects (Chicago, USA, 11.04.2011.). Ģirts Strazdins, Artis Mednis, Georgijs Kanonirs, Reinholds Zviedris, Leo Selavo. Towards Vehicular Sensor Networks with Android Smartphones for Road Surface Monitoring.
7. MOBISENSOR 2011: The 2nd International Workshop on Mobility in Wireless Sensor Networks at the 7th IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (IEEE DCOSS 2011) (Barselona, Spānija, 29.06.2011.). Artis Mednis, Ģirts Strazdins, Reinholds Zviedris, Georgijs Kanonirs, Leo Selavo. Real

Time Pothole Detection using Android Smartphones with Accelerometers.

8. SENSORCOMM 2011: The 5th International Conference on Sensor Technologies and Applications (Nica, Francija, 21.-27.08.2011.). Ģirts Strazdins, Artis Mednis, Reinholds Zviedris, Georgijs Kanonirs, Leo Selavo. Virtual Ground Thruth in Vehicular Sensing Experiments: How To Mark it Accurately.
9. CONET Summer School 2011: Networked Embedded Systems: Humans in the Loop (Bertinoro, Itālija, 24.-30.07.2011.). Reinholds Zviedris. Wild Animal Monitoring using Sensor Networks.
10. Apvienotais Pasaules latviešu zinātnieku III kongresa un Letonikas IV kongresa "Zinātne, sabiedrība un nacionālā identitāte" apakšsekcija "Datorzinātne un informācijas tehnoloģijas" (Rīga, Latvija, 24.-27.10.2011.). Reinholds Zviedris, Atis Elsts, Ģirts Strazdiņš, Leo Seļāvo, Gatis Šūpols. Savvaļas dzīvnieku monitorings, izmantojot bezvadu sensoru tīklus.
11. ARCS 2012: International Conference on Architecture of Computing Systems (Mīnhene, Vācija, 28.02.-02.03.2012.). Atis Elsts, Rihards Balass (plakāta prezentācija), Janis Judvaitis, Reinholds Zviedris, Ģirts Strazdins, Artis Mednis, Leo Selavo. SADmote: A Robust and Cost-Effective Device for Environmental Monitoring.
12. AICT 2012: The 5th International Scientific Conference on Applied Information and Communication Technologies (Jelgava, Latvija, 26.-27.04.2012.). Reinholds Zviedris, Artis Mednis, Gatis Mednis. Heterogeneous Tool Kit for Real-Time Edutainment.
13. Ceturtais Latvijas Viedo sensoru un tīklotu iegulto sistēmu seminārs (Rīga, Latvija, 21.05.2012.). Reinholds Zviedris, Artis Mednis, Gatis Mednis. Heterogēni rīki izglītībai un izklaidei reālā laikā.
14. ICDIPC 2012: The 2nd International Conference on Digital Information Processing and Communications (Klaipēda, Lietuva, 10.-12.07.2012.). Artis Mednis, Reinholds Zviedris. RFID Communication: How Well Protected Against Reverse Engineering?

Promocijas darba apjoms un struktūra

Darbs apjoms ir 197 lappuses, tajā ietilpst 70 attēli, 13 tabulas un 4 pielikumi.

Pirmajā 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 pielietojot, radot konkrētiem monitoringa mērķiem piemērotas iegultās sensorās iekārtas.

Otrajā nodaļā sniegts pārskats par materiāliem un metodēm, kas izmantoti veicot pētnieciskās aktivitātes promocijas darba izstrādes gaitā. Vispirms aprakstīta izmantotā datortehnika un programmatūra, savukārt, pēc tam sniegts ieskats izmantoto gatavo un speciālo iegulto iekārtu klāstā. Nodaļu noslēdz hipotēžu pārbaudei pielietotās metodes.

Trešajā nodaļā sniegts pārskats par metodēm un rīkiem savvaļas dzīvnieku monitoringam un aktivitātes noteikšanai, izmantojot iegultas iekārtas, bezvadu sensoru tīklus un pārtraukumu noturīgu komunikāciju. Veikts plašs esošo risinājumu apskats. Tālāk seko risinājuma apraksts, kas satur informāciju par sistēmas arhitektūru, radīto aparatūru un programmatūru. Tā kā praksē tika veikti dažādi eksperimenti, tad ir aprakstīti to rezultāti. Nodaļu noslēdz secinājumi.

Ceturtajā nodaļā sniegts pārskats par heterogēniem rīkiem izglītībai un izklaidei reālā laikā. Šo pētījumu ierosināja biedrība "Autoliste", kura bija ieinteresēta savu organizēto pasākumu uzlabošanā, izmantojot tehnoloģiskus palīg līdzekļus, kā arī sniedzot saviem dalībniekiem notikumu atspoguļojumu reālā laikā. Vispirms aplūkotas līdzīgas sistēmas un atsevišķi rīki, pēc tam iztīrāta sistēmas arhitektūra, kam seko pasākumu vadības sistēmas apskats un radītās dinamiskā kontrolpunkta iegultās ierīces. Aprakstīti arī eksperimenti ar dinamiskā kontrolpunkta iekārtu un to rezultāti. Nodaļu noslēdz secinājumi un nākotnes plāni.

Piektajā nodaļā sniegts pārskats par izstrādāto tīmekļa servisu arhitektūru zema enerģijas patēriņa bezvadu sensoru tīklos. Šī pētījuma tēma ir motivēta ar nepieciešamību ērti piekļūt sensoros savāktajiem datiem, neizmantojot speciālu vārteju no interneta tīkla uz bezvadu sensoru tīklu. Ir veikta esošo tīmekļa servisu un komunikācijas protokolu risinājumu izpēte, pēc tam iztīrāts iespējamais risinājums. Visbeidzot ir radīts iegulto iekārtu kopums, ar kuru palīdzību tika pārbaudīts praksē izstrādātais datu apmaiņas risinājums.

Promocijas darba konspektīvs izklāsts

1. Vispārējs objektu monitoringa modelis

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 tīklus (BST). BST, savukārt, nodrošina piekļuvi savāktajai informācijai jebkurā laikā un vietā, ievācot, apstrādājot, analizējot un izplatot datus. Tādejādi, BST faktiski piedalās viedas vides radīšanā un, kā apgalvo pētnieki [8], ir radikāli pārveidojuši datu ievākšanu daudzās nozarēs.

Sensoru mezgla arhitektūra ir salīdzinoši vienkārša – vispārīgā gadījumā tas sastāv no piecām pamatkomponentēm: mikrokontroliera, sensoriem vai aktuatoriem, ārējās atmiņas, raidzuvēreļa 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.

1.2. 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.

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.

Tomēr BST pētniecībā eksistē arī daudzi izaicinājumi aparatūras uzbūvē, radio sakaru kvalitātē, komunikāciju protokolos, drošībā, pieejamībā, darbības stabilitātē, darbības vidē, lietojumprogrammu izstrādē, informācijas apstrādē, enerģijas taupībā un nodrošināšanā. Tas kavē pilnvērtīgāku to izmantošanu ikdienā. Divi būtiskākie pētījumu virzieni ir sensoru tīklu dzīves ilguma paildzināšana un saprātīgu datu ievākšanas sistēmu izstrāde.

Pamatojoties uz pielietojumiem un izaicinājumiem, ir arī apzinātas vispārējās BST prasības – liels sensoru mezglu skaits; zems enerģijas patēriņš; efektīva neliela apjoma atmiņas izmantošana; datu agregācija; tīkla pašorganizēšanās; kopēja signālu apstrāde; pieprasījumu veikšana.

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.

Šīs pakāpes ir izveidotas (skatīt 1.2. tabulu), pamatojoties uz apkopotajiem vispārīgajiem BST izaicinājumiem. Balstoties uz pētījumu saistīto darbu izpēti, autors katram no izvēlētajiem desmit izaicinājumiem piešķir svaru, cik sarežģīti to ir īstenot. Savukārt, katram modelim piešķirts koeficients, cik konkrētais izaicinājums ir būtisks tā realizācijā. Svara un koeficienta reizinājums dod konkrētā izaicinājuma novērtējumu konkrētajam modelim. Novērtējuma summa, arī nosaka realizācijas sarežģītības pakāpi.

Sarežģītākajai realizācijas pakāpei izvēlēts modelis, kur kustīgs subjekts veic kustīga objekta monitoringu. Šai pakāpei ir visaugstākais sarežģītības novērtējums, jo tajā dominē visvairāk izaicinājumu – tai ir būtiska radio sakaru kvalitāte, izmantotie komunikācijas protokoli, pieejamība, darbības stabilitāte, informācijas apstrāde un enerģijas taupība. Vistuvāk šai realizācijas pakāpei atbilst promocijas darbā aprakstītais risinājums savvaļas dzīvnieku monitoringam.

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

Izaicinājums	Svars	Modeļi								Summa
		K-K		K-S		S-K		S-S		
		C	N	C	N	C	N	C	N	
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", savukārt, "C" apzīmē modelim piešķirto koeficientu, bet "N" – tā novērtējumu.

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

Otrās un trešās pakāpes realizācijas pakāpēm atbilst promocijas darbā aprakstītie pētījumi par heterogēniem rikiem izglītībai un izklaidei reālā laikā. Daļēji šai realizācijas pakāpei atbilst arī savvaļas dzīvnieku monitoringa risinājums – bāzes stacijas kā statistiski subjekti veic savvaļas dzīvnieku kā kustīgu objektu monitoringu.

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

Trešās un ceturtais realizācijas pakāpēm atbilst iegultās iekārtas, kas radītas promocijas darbā 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 sensoro iekārtu izveidei, autors pamatojās uz 1.2. tabulas pēdējā kolonā summētajiem kopējiem modeļu no-

vērtējumiem. 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 savvaļas dzīvnieku monitoringam piemērotā risinājuma enerģijas patēriņa analītiskie aprēķini. 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, tādejādi 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.

2. Izmantotie materiāli un metodes

2.1. Izmantotā datortehnika un programmatūra

Visi darbā aprakstītie pētījumi un programmēšanas darbi tika izpildīti uz *Apple* datora, ko darbināja *MacOS X* operētājsistēma. Atsevišķu uzdevumu veikšanai tika izmantoti virtualizācijas risinājumi, lai darbinātu *Ubuntu Linux* un *Microsoft Windows* operētājsistēmas.

Iegulto iekārtu programmatūra pārsvarā tika izstrādāta izmantojot *Arduino IDE*, *IAR Embedded Workbench for TI MSP430* un *Energia* rīkus.

2.2. Izmantotās iegultās iekārtas

Daļa no darbā realizētajām iegultajām sensorajām iekārtām tika radītas ar elektronikas ražotāju piedāvajamiem gatavajiem izstrādes komplektiem vai sensoru moduļiem. Savukārt, daļa ierīču bija speciālās iegultās iekārtas.

No gatavajām iekārtām galvenokārt tika lietoti uz *Texas Instruments MSP430* mikrokontroliera bāzēti izstrādes rīki, kā arī uz *Atmel megaAVR* mikrokontroliera bāzēti *Arduino* izstrādes rīki. *MSP430* ir *Texas Instruments* ražota jauktu signālu mikrokontrolieru sērija. Tam pamatā ir 16 bitu centrālais procesors un tas ir piemērots iegultām iekārtām, kam nepieciešamas zemas izmaksas un, galvenais, zems enerģijas patēriņš. *Arduino* ir rīks, kas izveidots tiem, kas ir ieinteresēti izveidot ātri gan vienkāršas, gan sarežģītas iegultās iekārtas. Tā ir atvērta pirmkoda platforma, kas sastāv no vienkāršiem uz *Atmel megaAVR* 8 bitu mikrokontrolieriem balstītiem risinājumiem un programmatūras izstrādes vides.

Pie speciālajām iegultām iekārtām jāmin *Tmote Sky* un *Tmote Mini* sensoru mezgli, kā arī *Telonic's VHF* uztvērējs.

3. Savvaļas dzīvnieku monitorings, izmantojot BST

3.1. Ievads un motivācija

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.

Savvaļas dzīvnieku monitoringam piemērotas iegultas iekārtas izstrādes ideja radās pateicoties konkrētai un skaidri definētai bioloģijas zinātnieku vēlmei pētīt Eirāzijas lūšus (*Lynx lynx*), bet nākotnē arī citus savvaļas dzīvniekus, piemēram, Eirāzijas pelēkā vilka (*Canis lupus lupus*) vai brūnos lāčus (*Ursus arctos*). Latvijas reģions, kurā tiks izmantota radītā iegultā monitoringa sistēma, ir Ķemeru nacionālais parks.

Savvaļas dzīvnieku monitorings iekļauj sevī informācijas iegūšanu par dzīvnieka uzvedību tā dabiskajā vidē [1]. Šī informācija var tikt izmantota kā zinātniskiem mērķiem, tā arī sugas saglabāšanai.

Primāri tiek ievākta informācija par dzīvnieka atrašanās vietu konkrētos punktos konkrētā laikā. Nākošais līmenis ir informācija par fizioloģiskajiem parametriem, piemēram, sirdsdarbību vai ķermeņa temperatūru, vai aktivitāti, piemēram, medīšanu.

Šobrīd eksistē daudzas dzīvnieku novērošanas un sekošanas sistēmas, kas izmanto GPS uztvērēju un/vai radio sakarus, lai informāciju nodotu tālāk, bet bieži tās ir ar ierobežotām funkcijām. Tas radīja pārlicību, ka jāizveido sistēma, kura būtu spējīga uz ilglaicīgu darbu un piedāvātu plašu iespēju klāstu. To skaitā arī 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 iegultās iekārtas minimālās prasības:

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

Pētījumu laikā ir izveidota iegultā ierīce un metodes, kas piemērotas lūšu monitoringam savvaļā.

3.2. Esošo risinājumu apskats

Darba gaitā tika veikts esošo risinājumu apskats, lai gūtu priekšstatu par pasaulē lietotajām metodēm dzīvnieku izsekošanā.

Tika apskatīti un izanalizēti populārākie un biežāk lietotie risinājumi – *VHF* sekošana, *ARGOS* satelītkošanas, *GPS* sekošana – kā arī citi uz bezvadu sensoru tīkliem bāzētie risinājumi. Katram risinājumam tika apzināti tā plusi un mīnusi.

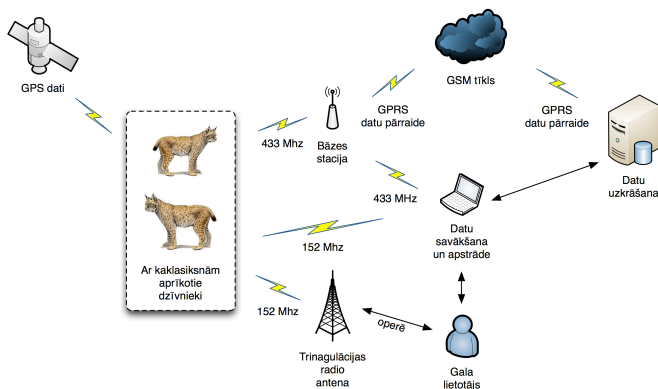
VHF un *ARGOS* sekošana, kā arī senāku realizāciju *GPS* sekošanas risinājumi nav piemēroti, lai tos tīrā veidā lietotu mūsdienās. Jaunākas *GPS* iekārtas, kā arī sensorās iegultās iekārtas paver plašākas iespējas, taču arī tām tika konstatētas neatbilstības izvirzītajām prasībām.

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

3.3. Risinājums

3.3.1. Sistēmas arhitektūra

Piedāvātā sistēmas arhitektūra (skatīt 3.1. attēlu) ir bāzēta uz bezvadu sensoru tīklu un tā mezgliem, ko raksturo mobila datu ievākšana un reta piekļuve tīklam. Arhitektūra piedāvā uz dzīvnieku orientētu paradigmu, kurā datu ievākšana notiek tīmekļa malā.



Att. 3.1.: *LynxNet* sistēmas arhitektūra

3.3.1.1. Darbības princips

Sistēmas darbības pamatprincips ir datu ievākšana par dzīvnieka paražiem tā dabiskajā vidē, izmantojot dzīvnieka kaklasiksniņā iebūvētos sensorus.

Definēti sekojoši pamata uzstādījumi datu ievākšanai – vienu reizi stundā tiek ievākti dati no GPS, āra temperatūras un relatīvā mitruma un apkārtesošās gaismas sensoriem, savukārt, reizi 5 minūtēs 5 sekundes tiek vākti dati ar 20Hz frekvenci no 3D akcelerometra, 3D žiroskopa un 3D magnetometra.

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

3.3.1.2. Datu apmaiņas pakotnes

Sistēmas gala iekārtas mikrokontrolieris no iegūtajiem datiem veido un saglabā iekšējā atmiņā datu apmaiņas pakotnes, kuras pie pirmās izdevības pēc *LIFO* principa nosūta uz bāzes staciju vai gadījumā, ja sistēmā piedalās vairāki ar gala iekārtām aprīkoti dzīvnieki, nodod datus satiktajam dzīvniekam.

Katra sensora rādījums ir noteikta izmēra, kas kopumā nosaka katras datu pakotnes izmēru. Tā kā aktivitātes dati tiek ielasītas sērijās, tad to datu apmaiņas pakotnes tiek veidotas tā, lai pirmā pakotne aprakstītu

sēriju, savukārt, katra sekojošā pakotne varētu tikt sasaistīta ar konkrēto sēriju un saturētu viena mērījuma datus.

Tiek izšķirtas divu veidu datu apmaiņas pakotnes:

- atrašanās vietas un apkārtējās vides datu pakotne, kas satur laika zīmogu, iekārtas unikālo identifikatoru, informāciju par ģeogrāfisko platumu un garumu, GPS sakaru kvalitātes informāciju, apkārtējo temperatūru, relatīvo mitrumu un apkārtesošās gaismas daudzumu un kopā aizņem 20 baitus;
- aktivitātes datu pakotņu sērija, kur 1. pakotne satur laika zīmogu, iekārtas unikālo identifikatoru, sērijas unikālo identifikatoru un izmēru, savukārt, katra sērijas mērījuma pakotne satur sērijas unikālo identifikatoru, iekārtas unikālo identifikatoru, pakotnes unikālo identifikatoru, datus no 3D akselerometra, 3D žiroskopa un 3D magnetometra, kas var tikt izmantoti, lai aprēķinātu dzīvnieka kustības vektoru.

3.3.2. Aparatūra

3.3.2.1. LynxNet gala iekārtas

Kopumā darba ietvaros tika izstrādāti un uzprojektēti trīs *LynxNet* gala iekārtu prototipi, no kuriem dzīvē tika realizēti divi.

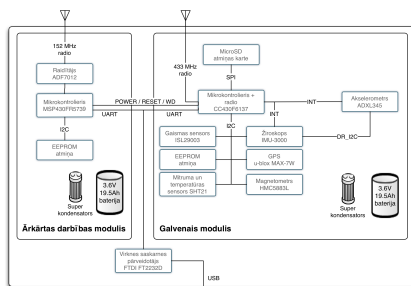
Sākotnējā iegultā iekārta (skatīt 3.2. attēlu) tika radīta, balstoties uz *Tmote Mini* bezvadu sensoru mezglu ar *Texas Instruments MSP430F1611* mikrokontrolieri un iebūvētu *Texas Instruments CC2420* 2,4 GHz raiduztvērēju. Papildus mezglam tika pievienots *LINX TRM-433-LT* 433 MHz raiduztvērējs un antena ar gredzenveida virziendarbības diagrammu. Kā *GPS* uztvērējs tika lietota nedaudz modificēta *Qstarz GPS* iekārta. Temperatūras un relatīvā mitruma mērīšanai tika lietots *Sensiron SHT15* sensors, bet apkārtesošās gaismas mērīšanai tika lietots *Vishay TEMT6000* sensors. Kā barošanas avots tiek izmantots *Qstarz GPS* uztvērējā iebūvētais 1300 mAh 3.7 V litija polimēru akumulators.

Iegultās gala iekārtas jaunākais prototips funkcionāli parādīts 3.3. attēlā. Tas sastāv no galvenā moduļa, kas balstīts uz *Texas Instruments CC430F6137* mikrokontroliera ar iebūvētu 433 MHz raiduztvērēju, un ārkārtas darbības modulis, kas balstīts uz *Texas Instruments MSP430FR5737* mikrokontroliera un *Analog Devices ADF7012* raidītāju, kurš pielāgots darbam 152 MHz frekvencē. Veidojot iekārtas galveno moduli, uzsvars tika likts uz to, lai tas būtu energo efektīvs. Visas tā komponentes ir ar digitālu saskarni, kas ļauj gan vienkāršāk apkopot datus

no tām, gan samazina enerģijas patēriņu. Tiek lietotas sekojošas komponentes: *u-blox MAX-7W GPS/GNSS* uztvērējs; *Analog Devices ADXL345* 3 asu akcelerometrs; *InvenSense IMU-3000* 3 asu žiroskops; *Honeywell HMC5883L* 3 asu magnetometrs; *Sensirion SHT21* relatīvā mitruma un temperatūras sensors; *Intersil ISL29003* gaismas sensors. Izstrādes un testa iekārtai kā enerģijas avots tiek lietots *Enix Energies* litija jonu akumulators ar 3,75 V spriegumu un 6,8 Ah ietilpību, savukārt, produkcijas iekārtai tiek lietota *XENO XL-205F 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 1 F 3,6 V* superkondensators.



Att. 3.2.: Sākotnējā gala iekārta



Att. 3.3.: Jaunākās gala iekārtas prototipa funkcionālā shēma

3.3.2.2. LynxNet bāzes stacija

Bāzes stacija sastāv no 4 galvenajām daļām – *Raspberry Pi* mikrodatora, uz *Texas Instruments CC430F6137* mikrokontroliera ar iebūvētu 433 MHz raidzuvērēju bāzēta komunikāciju moduļa, mobilā platjoslas datu modeļa un uz *Arduino Pro* bāzēta mikrodatora enerģijas patēriņa kontroliera.

Kā enerģijas avots bāzes stacijai tiek lietots svina-skābes 12 V 19 Ah ietilpības akumulators.

3.3.3. Programmatūra

Iekārtu programmatūra ir veidota, izmantojot *MansOS* [9].

LynxNet iekārtām paredzētā programmatūra ievieša sekojošus uzlabojumus *MansOS* – piekļuvi zibatmiņai, relatīvā mitruma, temperatūras un gaismas sensoru dziņus, *GPS* lasījumu analizatoru, *DCO* recalibrācijas at-

balstu, raiduztvērēju dziņus, plašāku uz *MSP430* bāzētu mikrokontrolieru atbalstu, kā arī jaunu *MAC* līmeņa komunikācijas protokola arhitektūru.

3.4. Eksperimenti

3.4.1. Eksperimentu apraksts

Eksperimenti ar sākotnējo iekārtu veikti 2010. gada jūlijā un lūša vietā tika izmantots suns. Tika veikti 433 MHz *LINX TRM-433-LT* un salīdzinošie 2,4 GHz *Texas Instruments CC2420* raiduztvērēju testi Rīgā, Rumbulas lidlaukā un Šampētera mežā. Šādi tika noskaidrotas to spējas gan klajā laukā, gan vidē, kas pietuvināta reālajai – jauktā lapu koku mežā.

Eksperimenti ar jaunāko iekārtu veikti laboratorijas apstākļos.

3.4.2. Rezultāti

3.4.2.1. 433 MHz un 2,4 GHz raiduztvērēju testi

Abu raiduztvērēju testi notika līdzīgā veidā – bāzes stacija atradās fiksētā vietā – Rumbulas lidlauka gadījumā tā tika piestiprināta pie automašīnas, bet Šampētera meža gadījumā – piestiprināta pie koka stumbra.

Savukārt, dzīvnieks ar kakla siksna 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. *TRM-433-LT* raiduztvērēja datu pārraides testu rezultāti apkoti 3.1. tabulā. Audiālā formā 433 MHz signāls bija dzirdams līdz 550 metru distancei, savukārt, 2,4 GHz raiduztvērēja datu pārraide klaja lauka apstākļos spēja strādāt līdz 150 metru distancei, savukārt, meža apstākļos vien tikai līdz 65 metru distancei.

Distance metros	Saņemtās pakotnes		RSSI līmenis	
	Rumbula	Šampēteris	Rumbula	Šampēteris
50	80-100%	80-100%	2700	2800-3000
100	80%	80-100%	2200	2200-2500
150	80%	70-90%	1900-2000	2300
200	40-80%	10-50%	1600-1800	1600-1800
250	10-80%	20-50%	1600-1800	1600-1800

Tabula 3.1.: *TRM-433-LT* raiduztvērēja testu rezultāti, kur "Rumbula" – "Rumbulas lidlauks", "Šampēteris" – "Šampētera mežs", un maksimālais RSSI līmenis var sasniegt 4095.

3.4.2.2. 433 MHz un 868 MHz raiduztvērēja testi

Laboratorijas apstākļos veikti testi ar *TI CC430F6137* mikrokontrolierī iebūvēto raiduztvērēju – vispirms, izmantojot *TI EZ430-Chronos* izstrādes rīku, 868 MHz frekvencē, pēc tam – *EdiMote* iekārtai projektētu moduli, kas sākotnēji darbojās 868 MHz frekvencē, bet vēlāk tika pārveidots, lai darbotos 433 MHz frekvencē.

3.4.2.3. 152 MHz VHF raidītāja testi

Vispirms laboratorijas apstākļos tika veikta esošas *Telonics VHF* iekārtas reversā inženierija un noteikta precīza darba frekvence. Tālāk tika sagatavota atbilstoša ārkārtas moduļa iekārta, kas darbojas 152 MHz frekvencē un veikti testi laboratorijas apstākļos.

3.4.2.4. Aktivitātes noteikšanas testi

Sākotnēji dati tika ievākti *5-DOF* līmenī jeb no 2 asu akselerometra un 3 asu žiroskopa. Savāktie dati ļāva daļēji noteikt dzīvnieka kustības vektoru. Tā kā 1. prototips ir ierobežots gan sensoru izšķirspējā, gan ar apstrādes jaudu, tad dati tika apstrādāti uz datora.

Pilnvērtīgi *9-DOF* līmeņa aktivitātes noteikšanas testi dabā nav veikti, tikai laboratorijas apstākļos un ar atsevišķiem mezgliem, pielāgojot tos darbam ar *LynxNet* programmatūru. Balstoties uz savāktajiem datiem, uz datora modelēts dzīvnieka kustības vektoru. Rezultāti ir labāki nekā no *5-DOF* līmeņa, taču periodiski ir nepieciešami dati no *GPS* iekārtas, pretējā gadījumā dzīvnieka reālais kustības vektors nesakrīt ar uzmodelēto un ir jāveic būtiskas korekcijas.

3.4.2.5. Gala iekārtas dzīves ilguma analītiskie aprēķini

Visa gala iekārtas enerģijas patēriņa aprēķini ir balstīti uz visu 3 līdz šim izstrādāto iekārtu un to komponentu datiem, kas iegūti no to datu lapām. Visu komponentu patērējamā enerģija aprēķinos ir balstīta uz maksimālo vērtību. Realitātē tā var būt zemāka. Visos aprēķinos ņemts vērā plānotais iekārtu dzīves cikls, kā arī izmantoto enerģijas avotu pašizlādes process.

Analītisko aprēķinu rezultāti par gala iekārtu enerģijas patēriņu stundā, kopējo dzīves ilgumu un ievāktu informācijas apjomu skatāmi 3.2. tabulā.

	1. prototips	1.5 prototips	2. prototips
Sistēmas priegums:	3,3 V	3,0 V	3,0 V
Enerģijas avots:	1300 mAh @ 3,6 V	6800 mAh @ 3,75 V	19000 mAh @ 3,6 V
Operācija	mA	mA	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	0,497	0,188	1,873
@ 433 MHz	@ 9,77kbaud	@ 38,4kbaud	@ 38,4kbaud
SD karte	0,058	0,057	0,067
Kopā stundā:	2,175 mA	1,183 mA	3,201 mA
Darbības stundas:	594	5443	5611
Informācijas apjoms:	605 kB	7,9 MB	83,7 MB

Tabula 3.2.: Analītiskie aprēķinu rezultāti *LynxNet* gala iekārtu dzīves ilgumam.

3.4.2.6. Bāzes stacijas dzīves ilguma analītiskie aprēķini

Līdzīgi kā ar gala iekārtu, arī bāzes stacijas enerģijas patēriņš ir rēķināts analītiski, balstoties uz tehniskajā dokumentācijā pieejamo informāciju un iekārtas dzīves ciklu. Kopējais enerģijas patēriņš stundā mikrodatoram, platjoslas modenam un komunikāciju moduļim, kas visi barojas no viena barošanas avota – svina-skābes akumulatora, ir ap 27,34 mA. Savukārt, enerģijas patēriņa kontrolierim, kuram ir pašam savs atsevišķs barošanas avots, enerģijas patēriņš stundā ir 1 mA. Abām iekārtu grupām ar tiem paredzētajiem barošanas avotiem ir nodrošināts darbības termiņš ilgāks par gadu.

3.5. Secinājumi

Kopā izstrādāti trīs *LynxNet* gala iekārtas prototipi, kur katrs nākošais ir energoefektīvāks un ar lielāku datu ieguves izšķirtspēju. Jaunākais izstrādātais prototips izceļas gan ar ātru dzīvnieka atrašanās vietas noteikšanu, gan arī ar to, ka iekārta ir pilnībā digitāla. To nodrošina tikai ar digitālu saskarni aprīkoti sensori, kas ļauj tos izvietot vienā kopnē un lasīt pēc vajadzības, tādējādi nodrošinot zemāku enerģijas patēriņu. Tiesa, pieaudzējot prasības par datu ieguvu, kopējais enerģijas patēriņš jaunākajam 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 ieguvī *9-DOF* līmenī, kamēr citi autoram zināmie risinājumi, ko biologi pielieto savvaļas dzīvnieku monitoringam, nenodrošina vairāk par *6-DOF* līmeni.

Dzīvnieka gala iekārta ir aprīkota arī ar *VHF* raidītāju, kas ļauj tam sekot tradicionālā veidā – veicot triangulāciju. Tā kā *VHF* raidītāju darbiņa atsevišķs ārkārtas modulis, tad gadījumā, ja iekārtas galvenais modulis vairs nav darboties spējīgs, tad izmantojot tikai *VHF* raidītāju iespējams iekārta atgūt.

Izstrādāts arī *LynxNet* bāzes stacijas modulis, kurš nodrošina datu apmaiņu ar gala iekārta, kā arī veic datu uzkrāšanu un nosūtīšanu tālāk bioloģiem, 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.

4. Heterogēni rīki izglītībai un izklaidei reālā laikā

4.1. Ievads un motivācija

Mūsdienās digitālās tehnoloģijas ieņem stabili vietu mūsu dzīvē, t.sk., arī izglītības un izklaides jomās, kur regulāri rodas situācijas, kad nepieciešams veikt vairāku uzdevumu monitoringu un koordināciju dažādās vietās vienlaicīgi. Bieži – ar ierobežotiem resursiem. Eksistē vairāki dažādas sarežģītības pakāpes veidi kā šādas problēmsituācijas iespējams risināt. Viens no veidiem ir pielietot spēļošanas elementus izglītības un izklaides pasākumos [2].

Sporta, izglītības un izklaides 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, radās nepieciešamība veidot tehnoloģiski sarežģītākus pasākumus, kuros būtu iekļauti komplikēti uzdevumi. Tas, savukārt, prasīja vairāk resursu

to kontrolei un ātrai gala rezultātu apkopšanai. Tāpēc tika definētas prasības robustam vadības un monitoringa risinājumam – radīt tīmekļa bāzētu lietojumprogrammu, kas pildītu lietotāja saskarnes un pasākumu vadības funkcijas, un uz mikrokontroliera balstīta iegulta iekārta kā dinamiskais kontrolpunkts.

Pētījumu laikā ir pakāpeniski veidots un attīstīts rīku kopums, kas piemērots gan izglītībai, gan izklaidei. Visi radītie rīki ir aprobēti reālos apstākļos dažāda izmēra un specifiskas auto orientēšanās pasākumos.

4.2. Esošo risinājumu apskats

Veicot rīku kopuma izglītībai un izklaidei izpēti un izstrādes darbu tika apskatīti esošie pētījumi un risinājumi gan brīvdabas, gan iekštelpu uz spēlēm balstītās apmācības jomā. Vairums no esošajiem pētījumiem balstījās uz principiem, kas daļēji pārklājās ar šajā darbā aprakstītajiem, taču pārsvārā tās bija orientētas uz bērnu nevis pieaugušo izglītības pieredzi.

Vienošais paveidiens, kas ir kopīgs gan "Autoliste" organizētajiem pasākumiem, gan citos pētījumos minētajiem, ir balstīts uz stāstu, kas saista kopā dažādus apakšuzdevumus vienā lielā kopīgā uzdevumā.

4.3. Risinājums

4.3.1. Sistēmas arhitektūra

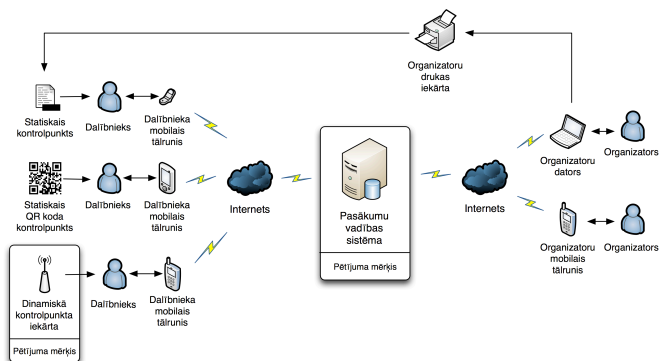
Darba ietvaros veiktie pētījumi balstās uz 4.1. attēlā redzamo sistēmas arhitektūru, kur centrālā loma ir pasākumu vadības sistēmai.

4.3.1.1. Pasākumu vadības sistēma

Izstrādājot pasākumu vadības sistēmu, tika izvirzīti divi mērķi – samazināt organizatoru administratīvos uzdevumus un piedāvāt pasākumu dalībniekiem dinamisku vidi. Papildus tika noteiktas sekojošas nefunkcionālas prasības – sistēmas lietotāji izmantos dažādas mobilas ierīces, kā arī tai ir jābūt pieejamai pēc pieprasījuma un bez speciālas aparatūras izmantošanas.

Pamatojoties uz prasībām, tika izveidota uz tīmekļa tehnoloģijām balstīta pasākumu vadības sistēma. Šāds risinājums nosedza lielāko daļu lietošanā pieejamās mobilās ierīces ar interneta pieslēgumu.

Pasākumu vadības sistēmā iekļauti sekojoši pasākumu organizācijas aspekti: dalībnieku reģistrācija un aktivizācija dalībai pasākumā; uzdevumu



Att. 4.1.: Pasākumu vadības sistēmas arhitektūra

definēšana; kontrolpunktu izvietošana un aktivizācija pārvaldība; automātiska vai manuāla uzdevumu piešķiršana dalībniekiem; sekošana uzdevumu izpildes gaitai; uzdevumu rezultātu novērtēšana; *GPS* pēdu (*track*) analīze; izsekojama saziņa starp pasākuma organizatoriem un dalībniekiem.

Viens no svarīgākajiem organizācijas aspektiem ir uzdevumu un to novērtējumu definēšana, kas dod dalībniekiem savu artavu gala rezultātu novērtējumā. Uzdevums ir piesaistīts konkrētai atrašanās vietai, kā arī var būt pieejams tikai noteiktā laika posmā vai posmos. Uzdevumam ir piesaistīts vismaz viens jautājums un vismaz viens atbildes variants ar konkrētu vērtību punktos. Atkarībā no izvēlētā pārbaudes algoritma, šī vērtība var tikt pieskaitīta dalībnieka rezultātam. 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.

Izvēlētā uzdevumu datu struktūra kopā ar atbilžu pārbaudes algoritmiem teksta virkņu un ciparu atšķirību noteikšanai ir pietiekoša, lai varētu definēt dažāda tipa uzdevumu veidus, piemēram, orientēšanās kontrolpunkta autorizācija, izmantojot viena koda ievadi vai tests uz laiku – uzdevums ar laika ierobežojumu un minimālo skaitu atbildētajiem jautājumiem.

Uzdevumu piešķiršana dalībniekiem ar sistēmas palīdzību pieļauj smalku kontroli pār to, kuri uzdevumi kādā laika momentā ir tiem pieejami. Veidojot dinamiskus pasākumus no šādas pieejas var gūt labumu, piemēram, padarot uzdevumu pieejamu dalībniekam kādā konkrētā laika momentā neatkarīgi no viņa atrašanās vietas vai padarot uzdevumu pieejamu

atkarībā no sasniegtajiem rezultātiem vai piešķirot uzdevumu dalībniekam, balstoties uz kopējo pasākuma stāvokli.

Lai atvieglotu datu ievadi no mobilajam ierīcēm, sistēmā tiek nodrošinātas vairākas ievades metodes – izvēle no iepriekšdefinētiem atbilžu variantiem, tekstuālā ievade un *QR* koda nolasīšana.

Sekošana uzdevumu izpildes gaitai un rezultātu novērtēšana pasākumu vadības sistēmā notiek reālā laikā. Automātiska rezultātu novērtēšana reālā laikā pieļauj sarežģītāku algoritmu izmantošanu. Gan rezultāti, gan dalībnieku atbildes nekavējoties ir pieejami pasākuma organizatoriem, kas pieļauj uzdevumu izpildes gaitas un dalībnieku sniegumu monitorēšanu, nepieciešamības gadījumā veicot korektīvas darbības. Atkarībā no pasākuma noteikumiem un uzdevumu tipa, šie dati var būt pieejami arī pašiem dalībniekiem.

Rezultātu novērtēšana var iekļaut arī *GPS* pēdu analīzi, augšupielādējot pēc pasākuma finiša pasākumu vadības sistēmā *GPS* pēdu datni *GPX* formātā. Iesūtīto datņu analīze var tikt veikta ņemot vērā šādus aspektus – maksimālo ātrumu (t.sk. veicot iespējamo kļūdu korekciju, kas var rasties biežāko aparatūras problēmu dēļ), kontrolpunktu autorizāciju. Iegūtie *GPS* pēdu dati var tikt izmantoti, lai pēc pasākuma izveidotu vizuālu tā reprezentāciju.

Pasākumu vadības sistēmā savstarpējā komunikācija realizēta ziņu formā, kas var tikt nosūtītas individuāli vai grupai, tiek reģistrētas sistēmā un piegādātas adresātam.

Ņemot vērā mobilo iekārtu un lietotņu iespēju attīstības tendences, noris darbs pie programmatūras nākotnes perspektīvām. Ir izstrādāta jauna pasākumu vadības sistēmas arhitektūra, kur galvenais uzsvars likts uz mobilam lietotnēm kā sistēmas saskarni pasākumu dalībniekiem un 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.

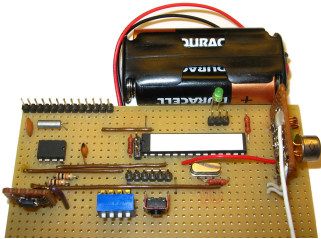
Pēc gatavā projektējuma tiks izstrādātas *Apple iOS* un *Google Android* platformām piemērotas lietotnes. Viedtālrunu lietotnes nodrošinās sekojošas funkcijas – ģeolokāciju, kontrolpunktu autorizāciju un vadību, paplašinātās realitātes funkcijas un ziņapmaiņu.

4.3.1.2. Aparatūra

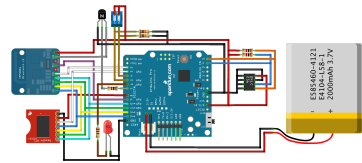
Projektējot un izstrādājot aparatūru, kā mērķis tika uzstādīts nedārga gan ražošanā, gan uzturēšanā, zemas enerģijas patēriņa risinājuma izveide, ar

vienkāršu gala lietotāja saskarni. Tika definētas arī tehniskās prasības: nepieciešamība izmantot mazas darbības rādiusa (*SRD*) iekārtas radio raidītāju; darbība pēc iepriekš ieprogrammēta saraksta; atsevišķa atmiņa datu uzglabāšanai; spēja strādāt autonomi bez barošanas elementu maiņas vismaz 350 stundas.

Dinamiskā kontrolpunkta sākotnējās iekārtas prototips (skatīt 4.2. attēlu) ir balstīts uz *Atmel ATmega328P* mikrokontroliera ar ārēju 8 MHz kristāla oscilatoru. Iekārtas komunikācija ar datoru programmatūras augšupielādei un konfigurācijai notiek virknes režīmā.



Att. 4.2.: Dinamiskā kontrolpunkta iekārta



Att. 4.3.: Ar *Bluetooth 4.0* aprīkotās iekārtas funkcionālā shēma

Sākotnējās iekārtas lietotāja saskarnei tika izvēlēts FM viļņu *SRD* radio raidītājs. Tas tika darīts, jo atbilstošas uztveršanas iekārtas ir plaši pieejamas. Šai lietotāja saskarnei kā atbilstošākais datu pārraides veids tika izvēlēts Morzes kods.

Iegultās iekārtas darbību atbilstoši ieprogrammētajam darbību sarakstam nodrošina tajā iebūvēta reāllaika pulksteņa (*RTC*) mikroshēma *NXP PCF8593P*. Savukārt, lai iegultajai iekārtai nodrošinātu pietiekošu apjomu ar pastāvīgo atmiņu pasākuma dalībniekiem pārraidāmā satura saglabāšanai, tā ir aprīkota ar *EEPROM* atmiņas mikroshēmu *Atmel AT24C64C*. 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 enerģijas avotu.

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 pārraidot 4 simbolu garu kodu un guļot 8 sekundes starp divām secīgām pārraidēm dinamiskā kontrolpunkta iegultā iekārta,

izmantojot 2 AA tipa *Alkaline* baterijas ar tipisko ietilpību 2000 mAh, var autonomi darboties līdz pat 536 stundām. Savukārt, pārraidot 8 simbolu garu kodu, tā var autonomi darboties līdz pat 460 stundām.

Režīms	Patēriņš, mW
Iekārta gul	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 jaunākais prototips ir izveidots (skatīt 4.3. attēlu), izmantojot gatavus, rūpnieciski ražotus moduļus. Kā vadības modulis tiek izmantota *Arduino Pro* iekārta. Saziņai ar *Bluetooth 4.0* iekārtām tiek lietots *Bluefruit LE* modulis. Savukārt, lai kontrolētu laiku, tiek lietots *DeadOn RTC* reāllaika pulksteņa modulis. Šis reāllaika pulksteņa modulis tika izvēlēts tāpēc, ka tas ir precīzāks nekā iepriekš izmantotais, tam ir termoregulēts kristāla oscilators, kā arī papildus 3 V baterija informācijas saglabāšanas nodrošināšanai. Papildus datu un konfigurācijas uzglabāšanai, tāpat kā sākotnējā iekārtā, tiek lietota *EEPROM* atmiņas mikroshēma.

Iegultās iekārtas programmatūra izveidota tā, lai to darbinot, nevajadzētu neko vairāk par datoru ar USB pieslēgvietu un virknes termināla emulācijas programmu, kurā ievadot atbilstošās komandas tiek veikta iekārtas konfigurācija. 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, * – 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. Pēc komandas apstrādes, iegultā iekārta vairumā komandu gadījumu atgriezī paziņojumus, kuri sākas ar nosūtītās komandas numuru un tālāk seko OK vai NOK (*Not OK*), kas savstarpēji ir atdalīti ar * un virkni noslēdz #. 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.).

4.4. Eksperimenti un to rezultāti

Pasākumu vadības sistēma ir izmēģināta vairākos biedrības "Autoliste", apvienības "CDT", kā arī biedrības "4x4 klubs" organizētajos pasākumos kopš 2008. gada maija.

Dinamiskā kontrolpunkta iegultā iekārta prototips aprobēts biedrības "Autoliste" 2011. gada septembrī organizētajā pasākumā. Testus veica 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 *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.

4.5. Secinājumi

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 FM *SRD* raidītāju informācijas pārraidei.

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.

5. Tīmekļa servisi zema enerģijas patēriņa bezvadu sensoru tīklos

5.1. Ievads un motivācija

Bezvadu sensoru tīkli sastāv no dažiem līdz pat vairākiem simtiem vai tūkstošiem sensoru mezglu, kas var būt izvietoti bez noteiktas sistēmas un veic fizisko vai apkārtnes monitoringu. 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, 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 [10].

Bieži komunikācija BST tiek organizēta *Multi-hop* jeb vairāku lēcību formā. Tā tiek panākts, ka attālāki tīkla mezgli sūta datus mezgliem, kas atrodas tuvāk bāzes stacijai, līdz tā sasniegta. Šāda pieeja ir neefektīva gadījumos, kad sensoru mezgli nav izvietoti blīvi. Dēļ palielinātā attāluma starp mezgliem tiek tērēts vairāk enerģijas datu pārraidei. Tomēr, arī ļoti blīvā sensoru tīklā mezgli, kas atradīsies tuvāk bāzes stacijai, būs spiesti tērēt vairāk enerģijas datu pārsūtīšanai no attālākiem mezgliem, šādi ātrāk iztērējot savas enerģijas rezerves.

Kā alternatīva tiešajai komunikācijai eksistē pieeja, kas balstīta uz mobiliem sensoru tīkla mezgliem jeb "datu mūļiem", kas nodrošina efektīvu datu savākšanai un pārsūtīšanu. "Datu mūlis" pārvietojas pa sensoru lauku, savācot datus no sastaptajiem sensoru tīkla mezgliem tajā brīdī, kad komunikācijas distance ir visoptimalākā. Savukārt, vēlāk visi savāktie dati tiek nodoti tālāk bāzes stacijai.

Tas radīja autora interesi izpētīt šo problēmu padziļināti un rast iespēju decentralizēt komunikāciju sensoru tīklā. To iespējams darīt pielāgojot sensoru tīkliem servisa-orientēto arhitektūru un pielietojot tīmekļa tehnoloģijas, kā piemēram tīmekļa servissus.

Autors savā darbā izvirzīja sekojošas prasības tīmekļa servisiem zema enerģijas patēriņa bezvadu sensoru tīklos:

- tiem jāizmanto *6LoWPAN* [11] [12] un pret aizturēm un/vai aizkavēšanām noturīga komunikācija;
- datu apmaiņa jābāzē uz *RESTful* arhitektūras paradigmas;
- tam jābūt sesiju bāzētam, "saglabāt un pārsūtīt" (*store-and-forward*) tipa lietotāja protokolam;

- datu pārsūtīšana jāveic saturu grupējot pa pakotnēm;
- pakotnes jāvar prioretizēt.

5.2. Esošo risinājumu apskats

Servisa-orientētās arhitektūras ideja nav jauna un 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.

Nodaļā apskatīti esošie risinājumi, kas saistīti gan ar bezvadu sensoru tīklos lietotiem MAC un transporta protokoliem, tīmekļa servisiem, gan pret aizturēm un pārtraukumiem drošu komunikāciju.

5.3. Risinājums

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

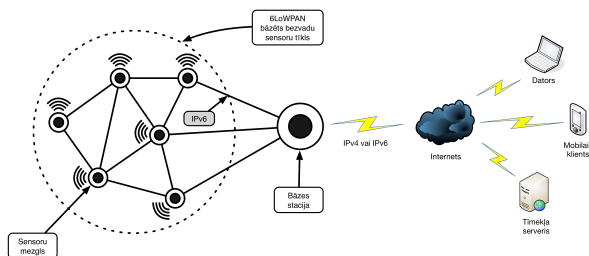
Autors paredz, ka uz iegultās sensorās iekārtas operētājsistēmas līmenī darbojas *WSN-SOA* modulis, kas faktiski ir miniatūrs *HTTP* serveris, kurš saņem *REST* pieprasījumus un nosūta pretī informāciju. Kā transporta protokols tiek lietots *6LoWPAN*, kura izmantošana faktiski nosaka, ka sensorā iegultā 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 datu pakotņu translēšanu no un uz *6LoWPAN* protokolu. Jāatzīmē, ka *HTTP* lietojumu protokols vismaz sensoru tīkla iekšienē darbojas uz *UDP* nevis *TCP* protokola.

Kā datu apmaiņas formāts *WSN-SOA* tiek lietots *JSON*, kas ir atvērta standarta formāts, kas izmanto cilvēkiem izlasāmu tekstu, lai pārraidītu datu objektus, kas sastāv no atribūts-vērtība pāriem.

5.4. Eksperimenti

5.4.1. Sistēmas arhitektūra

Izvēloties piemērotu arhitektūru (skatīt 5.1. attēlu), lai novērtētu WSN-SOA priekšrocības, autors nolēma palikt pie BST salīdzinoši bieži sastopamās, kas sastāv no diviem galvenajiem elementiem – sensoru mezgliem, kas apvienoti bezvadu sensoru tīklā un robežmaršrutizatora jeb bāzes stacijas.



Att. 5.1.: 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 veic bāzes stacija, kas ar pasauli sazinās, izmantojot platjoslas pieslēgumu internetam.

5.4.2. Aparatūra

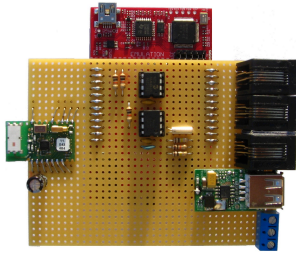
5.4.2.1. Sensoru mezgls

Sensoru mezgls (skatīt 5.2. attēlu) ir paredzēts, lai veiktu meteoroloģisko apstākļu monitoringu, ievācot datus par vēja virzienu un stiprumu, saules enerģijas un nokrišņu daudzumu, gaisa temperatūru un mitrumu.

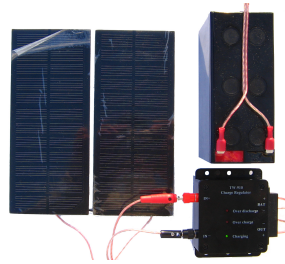
Iekārta bāzēta uz *TI MSP430FR5379* mikrokontroliera. Papildus tiek izmantoti: reālā laika pulksteņa mikroshēma *NXP PCF8593P* datu pārraides sinhronizācijai; *EEPROM* pastāvīgā atmiņa *24LC256* konfigurācijas saglabāšanai un datu uzkrāšanai; 868 MHz raidzuvēvējs *Amber Wireless AMB8420* komunikācijai ar bāzes staciju.

Lai veiktu datu ievākšanu, iekārtai ir pieslēgti ārējie sensoru moduļi – vēja virziena un stipruma sensori, nokrišņu daudzuma sensors, gaisa temperatūras un relatīvā mitruma sensors.

Iekārta iegūst enerģiju no autonoma barošanas avota (skatīt 5.3. attēlu).



Att. 5.2.: Sensoru mezgls



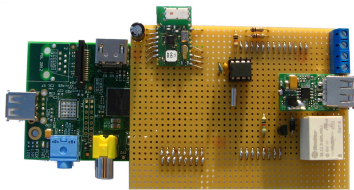
Att. 5.3.: Sensoru mezgla barošanas risinājums

5.4.2.2. Bāzes stacija

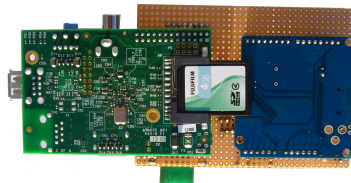
Bāzes stacija (skatīt 5.4. un 5.5. attēlus) ir bāzēta uz *Raspberry Pi* mikrokontrolera, kurš nodrošina gan plašas iespējas datu apkopošanā, saglabāšanā un apstrādē, gan arī ir neliels izmēros un pietiekoši energo taupīgs. Pievienojot bāzes stacijai interneta pieslēgumu, tā kļūst par pilnvērtīgu robežmaršrutizatoru.

Lai uzlabotu energo taupību, papildus tiek lietota *Arduino Pro* iekārta kombinācijā ar reālā laika pulksteņa mikroshēmu *NXP PCF8593P*, kura kontrolē enerģijas patēriņu un brīžos, kad nav nepieciešams bāzes staciju darbināt, izslēdz to ar shēmā iebūvēto releju. *Arduino Pro* iekārta darbojas no sava, neatkarīga barošanas avota. Savukārt, bāzes stacija tiek darbināta no 12 V hermētiska svina-skābes akumulatora.

Saziņai ar sensoru tīklu bāzes stacija izmanto *Amber Wireless AMB8420* 868 MHz raidzuvērēju



Att. 5.4.: Bāzes stacijas augšpuse



Att. 5.5.: Bāzes stacijas apakšpuse

5.4.3. *Programmatūra*

Sensoru mezglam paredzētā programmatūra pirmajā iterācijā tika izveidota izmantojot *Energia* izstrādes rīku. Tas ļāva noprast koda apjomu, lai pēc tam ko līdzīgu, bet efektīvāku radītu ar MansOS [9] palīdzību.

Bāzes stacija kā operētājsistēmu izmanto *Linux* distributīvu *Raspbian*. Sensoru tīkla vadības programmatūra ir rakstīta *Python* un veic komunikāciju ar sensoru mezgliem caur pieslēgto raiduztvērēju, kā arī apkopo informāciju, nosūta to uz ārpusi, izmantojot interneta pieslēgumu.

Ņemot vērā, ka *Raspberry Pi* nevar vienkārši aizmidzināt un pamodināt, tā aizmidzināšanu un pamodināšanu veic uz *Arduino Pro* bāzēts enerģijas patēriņa kontrolieris, kuru vada *Arduino IDE* vidē veidota programmatūra.

5.4.4. *Izaicinājumi*

Datu ieguve no sensoru mezgliem nevienmēr ir viegls uzdevums. Tie var atrasties grūti pieejamās vietās, tāpēc tas rada vairākus unikālus izaicinājumus. Arī *WSN-SOA* gadījumā ar tādiem nācās saskarties un tas ir ļāva iegūt labāku izpratni par iespējamajiem risinājumiem, kas apkopoti zemāk:

- iekārtu miniaturizācija ir būtiska, jo daudzas sistēmas tiek izvietotas ierobežotās vietās un tām ir jābūt netraucējošām;
- enerģijas pārvaldība ir būtiska ilgtermiņa darbībai;
- radio sakaru stabilitāti nevar veiksmīgi novērtēt mitrām un vējainām lokācijās, kas ļoti ietekmē radio viļņu izplatību;
- lai tīkls būtu vieglāk mērogojams, vēlams izmantot vairākas bāzes stacijas;
- sistēmām, kuras atrodas izolētās lokācijās un ko nav iespējams apmeklēt regulāri, ir būtiska attālinātā piekļuve;
- ja sensoru tīklus paredzēts izvietot komandām, kas tos iegādājās kā gatavus risinājumus, tiem ir jāklūst vieglāk uzstādāmiem, uzturamiem un saprotamiem;
- savietojamība starp tādiem gataviem moduļiem kā, piemēram, GPS vai laika apstākļu stacijas, ir ļoti zema un praksē katram integrētajam moduļim ir jāveic atsevišķa koda izstrāde;
- drošības problēmas ir svarīgas visos sensoru tīkla līmeņos, sākot ar fizisko līdz pat datu aizsardzībai no iekļaušanās.

5.5. Secinājumi

Bezvadu sensoru tīkli, kas domāti 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, izvietošanu, 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.

6. Nobeigums un secinājumi

Darbā autors izvirzīja tēzi, ka iespējams radīt vispārīgu metodi iegulto sensoro iekārtu izveidei. Balstoties uz vispārīgo monitoringa modeli un 10 būtiskākajiem bezvadu sensoru tīklu izaicinājumiem tā tika arī izstrādāta. Konceptuāli izstrādātā metode 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 promocijas darbā aprakstītajiem 10 būtiskākajiem 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 apkšmodelis, 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, darbā praktīto atjaunojamo energo resursu monitoringa sistēmu un apkārtējās vides apstākļu monitoringa sistēmu augļu dārzam [7]. Šim apgalvojumam saistībā ar 3. realizācijas sarežģītības pakāpi atbilst arī savvaļas dzīvnieku monitoringam piemērotā bāzes stacija un autoorientēšanās pasākumiem piemērotā dinamiskā kontrolpunkta iegultā iekārta.

Vispārīgā monitoringa modeļa realizācijas 2. sarežģītības pakāpe arī apstiprina izvirzīto hipotēzi, jo heterogēno rīku izglītībai un izklaidei reālā laikā pētījumu aprobācijas piemērs ar autoorientēšanās pasākumu dalībniekiem, kas veic kontrolpunktu monitoringu, izmantojot viedtālruņus un izstrādātais eksperimentālais risinājums bedru un citus nelidzenumu fikšācijai uz ceļa [5] [13] [14].

Vissarežģītākā jeb vispārīgā monitoringa modeļa 1. realizācijas pakāpe arī apstiprina izvirzīto hipotēzi, jo tai atbilst promocijas darbā aprakstītā savvaļas dzīvnieku monitoringam piemērotā gala iekārta, kā arī izstrādātais eksperimentālais risinājums automašīnas autonomai vadībai kooperatīvā braukšanas scenārijā [6].

Strādājot pie iegulto iekārtu izveides, autors secina, ka pirms sensorās sistēmas izveides ir rūpīgi jāveic plānošana, lai izprastu, kurā monitoringa modeli 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, kā piemēram, *Code Composer Studio* izstrādes vide. Tā vietā bieži vienkāršāk un ātrāk par savu izvirzīto pieņēmumu pareizību autors pārlicinājās, izmantojot atvērtā pirmkoda projektus kā piemēram *Arduino IDE* vai *Energia*.

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.

Promocijas darbā aprakstītā savvaļas dzīvnieku monitoringam piemērotā gala iekārta atbalsta aktivitātes datu ieguvu *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 heterogēno rīku izglītībai un izklaidei reālā laikā 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 šī lēmuma pareizību.

Darbā aprakstītais tīmekļa servisorientētās arhitektūras 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 nodērēs 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 veikti pētījumi un aktivitāšu rezultāti ir pietiekami, lai apgalvotu, ka darba izvirzītā tēze par vispārīgu metodi iegulto sensoru iekārtu izveidei ir sasniegta.

Izmantotā literatūra un avoti

- [1] M. L. Morrison, B. Marcot, and W. Mannan. *Wildlife-habitat relationships: concepts and applications*. Island Press, 2012. (Citēts 6. un 17. lappusēs.)
- [2] J. McGonigal. *Reality is broken: Why games make us better and how they can change the world*. Penguin, 2011. (Citēts 6. un 25. lappusēs.)
- [3] 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 7. lappusē.)
- [4] R. Zviedris, A. Mednis, and G. Mednis. Heterogeneous tool kit for real-time edutainment. In *International Scientific Conference: Applied Information and Communication Technologies, 5, Jelgava (Latvia), 26-27 Apr 2012*. LLU, 2012. (Citēts 7. lappusē.)
- [5] 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 8. un 38. lappusēs.)
- [6] 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 8. un 38. lappusēs.)
- [7] 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 8. un 38. lappusēs.)
- [8] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito. The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 54(15):2787–2805, 2010. (Citēts 13. lappusē.)
- [9] 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 21. un 36. lappusēs.)
- [10] K. Martinez, J. K. Hart, and R. Ong. Environmental sensor networks. *Computer*, 37(8):50–56, 2004. (Citēts 32. lappusē.)
- [11] G. Mulligan. The 6LoWPAN architecture. In *Proceedings of the 4th workshop on Embedded networked sensors*, pages 78–82. ACM, 2007. (Citēts 32. lappusē.)
- [12] Z. Shelby and C. Bormann. *6LoWPAN: the wireless embedded internet*, volume 43. Wiley, 2011. (Citēts 32. lappusē.)
- [13] 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 38. lappusē.)
- [14] 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 38. lappusē.)