

LATVIJAS UNIVERSITĀTE

ARTIS MEDNIS

**DALĪTO SISTĒMU IZMANTOŠANA
TRANSPORTA LĪDZEKĻU KUSTĪBAS
RAKSTURLIELUMU FIKSĒŠANĀ UN APSTRĀDĒ**

Promocijas darbs

Rīga - 2012

LATVIJAS UNIVERSITĀTE
Datorikas fakultāte

ARTIS MEDNIS

**DALĪTO SISTĒMU IZMANTOŠANA
TRANSPORTA LĪDZEKĻU KUSTĪBAS
RAKSTURLIELUMU FIKSĒŠANĀ UN APSTRĀDĒ**

Promocijas darbs
datorzinātņu doktora (Dr.sc.comp.) zinātniskā grāda iegūšanai

Nozare: datorzinātnes
Apakšnozare: datu apstrādes sistēmas un datortīkli

Zinātniskais vadītājs:
Profesors , Dr. sc. comp.,
G.ARNICĀNS

R ī g a - 2012



EIROPAS SAVIENĪBA



LATVIJAS
UNIVERSITĀTE
ANNO 1919

IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā

“Atbalsts doktora studijām Latvijas Universitātē – 2”

ANOTĀCIJA

Šajā darbā aprakstīti autora veikti pētījumi ar mērķi izstrādāt un eksperimentāli pārbaudīt atsevišķas datu ieguves un apstrādes metodikas, kas balstītas uz kolektīvo mērījumu pieejas implementāciju mobilos, uz transporta līdzekļiem bāzētos sensoru tīklos.

Mērķa sasniegšanai izmantotas literatūras avotu studijas, hipotēžu pārbaude, izmantojot plaša pielietojuma datortehniku, viedtālruņu adaptācija specifisku kolektīvo mērījumu vajadzībām, speciāla pielietojuma iegultu iekārtu izstrāde, praktiski eksperimenti ar izvēlētajām tehnoloģiskajām iekārtām un programmatūru, kā arī eksperimentu rezultātu apkopošana un statistiskā analīze. Darba rezultāts ir vairākas datu ieguves un apstrādes metodikas, kas balstītas uz kolektīvo mērījumu pieeju un mobiliem, uz transporta līdzekļiem bāzētiem sensoru tīkliem un izstrādāto metodiku novērtējums.

ATSLĒGVĀRDI: Kolektīvie mērījumi, mobili sensoru tīkli, metodikas, mikrofoloni, akselerometri, pozīcijas noteikšana.

ABSTRACT

In this paper author describes his research with the goal to develop and experimentally verify specific data recording and processing methodologies based on participatory sensing approach implementation in mobile vehicle based sensor networks.

To reach this goal, author performed study of literature, testing of hypothesis using general purpose computer devices, adaptation of smartphones for participatory sensing, development of special purpose embedded devices, practical experiments with selected technical equipment and software as well as gathering of experimental results and following statistical analysis. The result of this research are several data acquisition and processing methodologies based on participatory sensing approach and mobile vehicle based sensor networks as well as evaluation of these methodologies.

KEYWORDS: Participatory sensing, mobile sensor networks, methodologies, microphones, accelerometers, position determination.

SATURS

APZĪMĒJUMU SARAKSTS	1
IEVADS	3
1. LITERATŪRAS PĀRSKATS	8
1.1. Dalītās sistēmas	8
1.2. Statiski un mobili sensori	9
1.3. Mikrofoloni un to izmantošana datu ieguvei	11
1.4. Akselerometri un to izmantošana datu ieguvei.....	12
1.5. Datu ģeomarķēšana.....	14
2. MATERIĀLI UN METODEDES.....	15
2.1. Hipotēžu pārbaude, izmantojot plaša pielietojuma datortehniku	15
2.2. Viedtālruņu adaptācija specifisku kolektīvo mērijumu vajadzībām.....	18
2.3. Speciāla pielietojuma iegultu iekārtu izstrāde	19
2.3.1. Ievads.....	19
2.3.2. Literatūras pārskats.....	20
2.3.3. Tehniskās prasības.....	21
2.3.4. Implementācija	22
2.3.5. Novērtējums	25
2.3.6. Iegultās iekārtas GCDC sacensību vajadzībām.....	27
3. PIEDZĪVOJUMU SACĪKŠU NORISES KONTROLE, IZMANTOJOT BEZVADU SENSORU TĪKLUS.....	30
3.1. Ievads.....	30
3.2. Orientēšanās uzdevums	31
3.3. Piedzīvojumu sacīkšu kontroles sistēma	34
3.4. Implementācija	35
3.5. Secinājumi	36
4. CEĻA SEGUMA MONITORINGS, IZMANTOJOT MOBILUS SENSORU TĪKLUS AR MIKROFONIEM	37
4.1. Ievads.....	37
4.2. Literatūras pārskats.....	38
4.3. Eksperimentu apraksts.....	39
4.4. Rezultāti.....	45
4.5. Diskusija.....	49
5. CEĻA SEGUMA MONITORINGS, IZMANTOJOT VIEDTĀLRUŅUS AR AKSELEROMETRIEM.....	51
5.1. Ievads.....	51
5.2. Literatūras pārskats.....	52

5.3.	Eksperimentu apraksts	54
5.4.	Rezultāti.....	57
5.5.	Diskusija	62
6.	TRANSPORTA LĪDZEKĻA STĀVOKĻA MONITORINGS, IZMANTOJOT IEGULTAS IEKĀRTAS AR AKSELEROMETRIEM	64
6.1.	Ievads.....	64
6.2.	Literatūras pārskats.....	65
6.3.	Eksperimentu apraksts	66
6.4.	Rezultāti.....	74
6.5.	Diskusija	75
7.	TRANSPORTA LĪDZEKĻA POZĪCIJAS NOTEIKŠANA, IZMANTOJOT VAIRĀKUS SBAS UZTVĒRĒJUS UN DATUS NO LOKĀLĀM BĀZES STACIJĀM	76
7.1.	Ievads.....	76
7.2.	Literatūras pārskats.....	77
7.3.	Eksperimentu apraksts	78
7.4.	Rezultāti un diskusija	88
8.	KOMERCIĀLAS RFID SISTĒMAS DROŠĪBAS PĀRBAUDE, IZMANTOJOT REVERSĀS INŽENIERIJAS PIEEJU UN PLAŠA PIELIETOJUMA APARATŪRU UN PROGRAMMATŪRU	90
8.1.	Ievads.....	90
8.2.	Literatūras pārskats.....	91
8.3.	Eksperimentu apraksts.....	92
8.4.	Rezultāti un diskusija	99
	REZULTĀTI	101
	SECINĀJUMI	105
	PATEICĪBAS	107
	IZMANTOTĀ LITERATŪRA UN AVOTI.....	108
	PIELIKUMI.....	120
1.	PIELIKUMS. PROGRAMMU AUTOLISTESLAVE UN AUTOLISTEMASTER STRUKTŪRA	120
2.	PIELIKUMS. CEĻA SEGUMA BOJĀJUMU KLASES	121
3.	PIELIKUMS. IZMANTOTO AKSELEROMETRU PARAMETRU ATŠĶIRĪBAS	124

TABULAS

2.1. tabula. Eksperimentos izmantotā portatīvā datora parametri	16
3.1. tabula. Eksistējošo kontroles iekārtu funkcionalitātes salīdzinājums	33
3.2. tabula. Piedzīvojumu sacīkšu kontroles sistēmas konceptuālais tehniskais risinājums	34
4.1. tabula. Testu braucieniem izvēlētā ceļu tīkla fragmenta parametri	43
4.2. tabula. Testu braucieniem parametri	44
5.1. tabula. Testu braucieniem izmantotā ceļu tīkla fragmenta parametri	58
5.2. tabula. Android bāzētu viedtālrunu akselerometru atšķirības (vidējās vērtības 10 minūšu testa braucienam)	59
5.3. tabula. Izvēlēto algoritmu true positive statistika ceļa seguma bojājumu klašu kontekstā	62
6.1. tabula. Modificētā STDEV algoritma veikspēja transporta līdzekļa stāvokļa noteikšanā	69
6.2. tabula. Transporta līdzekļa stāvokļa noteikšanas algoritma veikspēja dažādiem transporta līdzekļiem, izmantojot kā robežas vērtības $T_{low}=0,05$ g un $T_{high}=0,1$ g.....	72
9.1. tabula. Zinātniskās publikācijas, kas saistītas ar promocijas darba izpildi	102
9.2. tabula. Zinātniskās konferences un semināri, kur prezentēti promocijas darba izpildes rezultāti	102
9.3. tabula. Pārējās zinātniskās publikācijas, kas tapušas ar promocijas darba autora līdzdalību	103
9.4. tabula. Zinātniskās konferences un semināri, kur prezentēti saistīto pētījumu rezultāti	104
10.1. tabula. Eksistējošo un izstrādāto mobilu monitoringa metodiku salīdzinājums, vērtējot to atbilstību pielietojumam ceļa seguma monitoringam mobilos, uz transporta līdzekļiem balstītos sensoru tīklos	106

ATTĒLI

2.1. attēls: Sākotnējiem eksperimentiem izmantotais plaša pielietojuma datortehnikas un ārēju sensoru moduļu komplekts	17
2.2. attēls: Magnētiska meteo datu ieguves iekārta uz sensoru moduļa USB Weather Board v2 bāzes. Pa kreisi - konstrukcija, pa labi - novietojums uz transporta līdzekļa virsbūves	17
2.3. attēls: Alternatīvie enerģijas nodrošināšanas risinājumi. Pa kreisi - nepārtrauktās barošanas avots APC Smart-UPS 420 [35], pa labi - 12VDC->220VAC konvertors Minwa MWDAP300AF [36]	18
2.4. attēls: Android viedtālruni kā mobilas datu ieguves un apstrādes iekārtas	19
2.5. attēls: Iegultās iekārtas pamatmodulis: A – bezvadu sensoru tīklu modulis Tmote Mini, B – IMU Analog Combo Board, C – sensori SHT15 un TEMT6000, D – sprieguma regulatori, E – SD atmiņas karte	22
2.6. attēls: Iegultās iekārtas mikroфона papildmodulis	23
2.7. attēls: Iegultās iekārtas GPS papildmodulis	24
2.8. attēls: Iegultās iekārtas Wi-Fi papildmodulis	25
2.9. attēls: Iegultās iekārtas Bluetooth papildmodulis	25
2.10. attēls: Akselerometra dati no izstrādātās iegultās iekārtas (fragments, datu ieguve 37x sekundē)	26
2.11. attēls: Akselerometra dati no viedtālruna HTC Desire (fragments, datu ieguve 53x sekundē)	26
2.12. attēls: GCDC sacensību transporta līdzekļa IPPS signāla formētāja modulis	27
2.13. attēls: GCDC sacensību transporta līdzekļa akseleratora un bremžu sistēmu vadības, kā arī lietotāja saskarnes modulis	28
2.14. attēls: GCDC sacensību transporta līdzekļa UPS bloka un datora modifikācijas	29
3.1. attēls: Klasisko orientēšanas sacensību uzdevums	31
3.2. attēls: Piedzīvojumu sacīkšu orientēšanās uzdevums	31
3.3. attēls: Mehāniskas mobilo aģentu sistēmas funkcionālā shēma	32
3.4. attēls: Elektroniskas mobilo aģentu sistēmas funkcionālā shēma	32
3.5. attēls: Eksistējošo mobilo multi-aģentu sistēmu datu plūsmu shēma	33
3.6. attēls: Piedzīvojumu sacīkšu kontroles sistēmas datu plūsmu shēma	34
3.7. attēls: KPMA iekārta uz bezvadu sensoru mezgla Tmote Sky bāzes	35
4.1. attēls: Mobilas sensoru tīklu sistēmas arhitektūra	40
4.2. attēls: Mobilas sensoru tīklu sistēmas komunikācijas funkcionalitātes potenciālā evolūcija	41
4.3. attēls: Pirmais testētais ceļa seguma fragments ar vizuāli pamanāmu bojājumu	42

4.4. attēls: Skaņas signāls no pirmā testētā ceļa seguma fragmenta ar marķētu bojājuma detektēšanas vietu (programma Audacity [29], iztveršanas frekvence 96 kHz)	43
4.5. attēls: Eksperimentos izmantotais 4,4 km garais ceļu tīkla fragments ar manuāli marķētām ceļa seguma bojājumu koordinātēm	44
4.6. attēls: Skaņas signāls no viena testu brauciena ar marķētām bojājumu detektēšanas vietām (programma Audacity [29], iztveršanas frekvence 96 kHz, sliekšņa līmenis 50%)	45
4.7. attēls: Marķēts ceļa seguma bojājums un tā tiešā tuvumā detektēti notikumi. Pozīcijas, kas atrodas ne tālāk kā 15 metrus, tiek uzskatītas par true positive	46
4.8. attēls: Kopējais potenciālo ceļa seguma bojājumu skaits, kā arī par true positive atzīto detektēto notikumu skaits katram no izmantotajiem sliekšņa līmeņiem (kopskaits visos 10 testu braucienos)	47
4.9. attēls: True positive īpatsvars katram no izmantotajiem sliekšņa līmeņiem (sliekšņa līmeņus virs 60% raksturo 100% true positive īpatsvars)	48
4.10. attēls: Sadalījums distancēm starp notikumiem, kuri tika detektēti, balstoties uz ierakstītā skaņas signāla analīzi, un ceļa seguma bojājumiem, kuri tika marķēti, apsekojot izvēlēto ceļu tīkla fragmentu katram no izmantotajiem sliekšņa līmeņiem (sliekšņa līmeņus virs 30% raksturo 80% distances līdz 20 metriem)	49
4.11. attēls: Atpazīto ceļa seguma bojājumu statistika, balstoties uz ierakstītā skaņas signāla analīzi, izmantojot dažādus sliekšņa līmeņus	50
5.1. attēls: Algoritms Z-THRESH. Meklējamie notikumi atbilst mērījumiem, kuru vērtības pārsniedz noteiktus specifiskus sliekšņa līmeņus uz vietas	55
5.2. attēls: Algoritms Z-DIFF. Meklējamie notikumi atbilst secīgiem mērījumiem, kuru starpības vērtības pārsniedz noteiktus specifiskus sliekšņa līmeņus	56
5.3. attēls: Algoritms STDEV(Z). Meklējamie notikumi atbilst mērījumiem, kuru standartnovirzes vērtības pārsniedz noteiktus specifiskus sliekšņa līmeņus	56
5.4. attēls: Algoritms G-ZERO. Meklējamie notikumi atbilst mērījumu kortežiem, kuru visu 3 asu vērtības atrodas zem noteiktiem specifiskiem sliekšņa līmeņiem	57
5.5. attēls: Algoritma Z-THRESH veikspēja, izmantojot dažādus sliekšņa līmeņus	60
5.6. attēls: Algoritma Z-DIFF veikspēja, izmantojot dažādus sliekšņa līmeņus	60
5.7. attēls: Algoritma STDEV(Z) veikspēja, izmantojot dažādus sliekšņa līmeņus un slīdošā loga izmēru 20 mērījumi	61
5.8. attēls: Algoritma G-ZERO veikspēja, izmantojot dažādus sliekšņa līmeņus	61
6.1. attēls: Eksperimentā izmantotais 4,5 km garais ceļu tīkla fragments. Marķētajās vietās GNSS uztvērējs fiksējis transporta līdzekļa ātrumu 0 km/h	67

6.2. attēls: Eksperimentā fiksētais transporta līdzekļa BMW 323 Touring ātruma profils (fragments). Transporta līdzekļa apstāšanos reprezentē vietas, kur fiksēts ātrums 0 km/h	68
6.3. attēls: Eksperimentā fiksētais transporta līdzekļa BMW 323 Touring aktivitātes profils (fragments). Transporta līdzekļa apstāšanos reprezentē vietas, kur fiksēta 3 asu paātrinājumu standartnoviržu summa, mazāka par 0,04 g	68
6.4. attēls: Eksperimentā izmantotais 4,5 km garais ceļu tīkla fragments. Marķētajās vietās modificētais STDEV algoritms fiksējis transporta līdzekļa aktivitātes profilu, mazāku par 0,04 g	70
6.5. attēls: Eksperimentā fiksētais transporta līdzekļa Setra S415 HDH aktivitātes profils (fragments). Transporta līdzekļa apstāšanos reprezentē vietas, kur fiksēta 3 asu paātrinājumu standartnoviržu summa, mazāka par 0,03 g	71
6.6. attēls: Eksperimentos izmantotais komponents POGA v. 1b uz bezvadu sensoru tīklu mezgla Tmote Mini bāzes	72
6.7. attēls: Transporta līdzekļa aktivitātes profils (fragments). Augšā - dati no vieglā auto Volvo V70, apakšā - dati no satiksmes autobusa Setra S415 HDH. Aktivitāte(0) raksturo algoritma noteikto transporta līdzekļa stāvēšanu uz vietas	74
7.1. attēls: Transporta līdzekļa pozīcijas noteikšanas metodikas arhitektūra. Datiem, kuri tiek saņemti no vairākiem SBAS uztvērējiem, tiek aprēķinātas vidējās vērtības. Pēc tam pozīcija tiek koriģēta, izmantojot datus no publiska bāzes staciju tīkla, kuri tiek saņemti, izmantojot bezvadu Tīmekļa pieslēgumu	78
7.2. attēls: Statiskās datu ieguves režīma tests, izmantojot vienu SBAS uztvērēju. Pa kreisi – pozīcijas nobīdes ceļš, pa labi pozīcijas nobīdes sadalījums	79
7.3. attēls: Statiskās datu ieguves režīma tests, izmantojot divus SBAS uztvērējus. Pa kreisi – pozīcijas nobīdes ceļi, pa labi pozīcijas nobīdes sadalījumi. Augšā – dati no Magellan eXplorer XL, apakšā – dati no Magellan eXplorer 210	80
7.4. attēls: Statiskās datu ieguves režīma tests, izmantojot divu SBAS uztvērēju sistēmu. Pa kreisi – pozīcijas nobīdes ceļš, pa labi pozīcijas nobīdes sadalījums	81
7.5. attēls: Dinamiskās datu ieguves režīma testa laikā izmantotais 67 km garais ceļa fragments .	82
7.6. attēls: Dinamiskās datu ieguves režīma tests izmantojot divu SBAS uztvērēju sistēmu. Sistēmas pozīcijas datu nobīde, izmantojot datu apvienošanu ar 1 sekundes granularitāti	83

7.7. attēls: Dinamiskās datu ieguves režīma tests izmantojot divu SBAS uztvērēju sistēmu. Sistēmas pozīcijas datu nobīdes sadalījuma funkcija, izmantojot datu apvienošanu ar 1 sekundes granularitāti – pa kreisi rietumu-austrumu virzienā (lon), pa labi ziemeļu-dienvidu virzienā (lat)	84
7.8. attēls: Transporta līdzekļa pozīcijas datu apvienošana izmantojot granularitāti 1/10 sekundes. Pozīcijas no SBAS uztvērēja B tiek pārrēķinātas, izmantojot laika zīmogus no SBAS uztvērēja A	84
7.9. attēls: Dinamiskās datu ieguves režīma tests izmantojot divu SBAS uztvērēju sistēmu. Sistēmas pozīcijas datu nobīde, izmantojot datu apvienošanu ar 1 sekundes granularitāti	85
7.10. attēls: Dinamiskās datu ieguves režīma tests izmantojot divu SBAS uztvērēju sistēmu. Sistēmas pozīcijas datu nobīdes sadalījuma funkcija, izmantojot datu apvienošanu ar 1/10 sekundes granularitāti – pa kreisi rietumu-austrumu virzienā (lon), pa labi ziemeļu-dienvidu virzienā (lat)	86
7.11. attēls: Korekcijas dati no RTK bāzes stacijām. Pa kreisi – dati no stacijas Siguldā, pa labi – dati no stacijas Valmierā. Vidū – lokālo pozīcijas mērījumu dati no stacionāri novietota SBAS uztvērēja Cēsīs	87
7.12. attēls: Koriģēto pozīciju nobīdes sadalījums. Pa kreisi – izmantoti korekcijas dati no RTK stacijas Valmierā, pa labi - izmantoti korekcijas dati no RTK stacijas Siguldā	87
7.13. attēls: Koriģētās pozīcijas nobīdes sadalījums. Izmantoti korekcijas dati no divām RTK stacijām Valmierā un Siguldā	88
8.1. attēls: RFID lasītāja izsaukuma ziņojums – sekvence ar ar OOK modulētām svārstībām ar 125 kHz frekvenci	93
8.2. attēls: RFID birkas saliktais atbildes ziņojums – sekvence no 36 vienkāršajiem atbildes ziņojumiem ar pieaugošu laika intervālu starp tiem	94
8.3. attēls: RFID birkas vienkāršais atbildes ziņojums – sekvence no 25 mainīga ilguma ON vienumiem ar 24 fiksēta ilguma OFF vienumiem starp tiem	95
8.4. attēls: Komponenti Arduino Duemilanove, papildināts ar RFID lasītāja simulēšanas moduli	96
8.5. attēls: Komponenti Arduino Duemilanove, papildināts ar RFID birkas simulēšanas moduli ..	96
8.6. attēls: Detalizēts RFID birkas vienkāršais atbildes ziņojums: a – preambula, b – kvaternārie ID cipari #6-#9, c - kvaternārie ID cipari #2-#5, d - kvaternārais ID cipars #1 ar nezīmīgo nulli, e – postambula	97
P1.1. attēls: Programmas AutolisteSlave v.1.1 struktūra	120
P1.2. attēls: Programmas AutolisteMaster v.1.1 struktūra	120

P2.1. attēls: <i>Ceļa bojājumu klases liela bedre paraugs. Laiks 24.03.2011 14:20, koordinātes N 56:58.900 E 024:11.529</i>	121
P2.2. attēls: <i>Ceļa bojājumu klases maza bedre paraugs. Laiks 24.03.2011 14:20, koordinātes N 56:58.902 E 024:11.525</i>	121
P2.3. attēls: <i>Ceļa bojājumu klases bedru klāsteris paraugs. Laiks 24.03.2011 14:19, koordinātes N 56:58.880 E 024:11.527</i>	122
P2.4. attēls: <i>Ceļa bojājumu klases plaisa paraugs. Laiks 24.03.2011 14:18, koordinātes N 56:58.871 E 024:11.526</i>	122
P2.5. attēls: <i>Ceļa bojājumu klases kanalizācijas akas vāks paraugs. Laiks 24.03.2011 14:41, koordinātes N 56:58.730 E 024:10.559</i>	123
P3.1. attēls: <i>3 asu akselerometra dati no viedtālruņa Samsung Galaxy S (fragments)</i>	124
P3.2. attēls: <i>3 asu akselerometra dati no viedtālruņa HTC Desire (fragments)</i>	124
P3.3. attēls: <i>3 asu akselerometra dati no viedtālruņa Samsung i5700 (fragments)</i>	125
P3.4. attēls: <i>3 asu akselerometra dati no modificēta LynxNet kaklasikses prototipa (fragments)</i> .	125
P3.5. attēls: <i>References dati (RoadMic) no datoram pieslēgta ārēja elektreta mikroфона (fragments)</i>	126

APZĪMĒJUMU SARAKSTS

1PPS	One Pulse Per Second
2DRMS	Twice the Distance Root Mean Square
AC	Alternating Current
ADC	Analog-to-Digital Converter
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DC	Direct Current
DCD	Data Carrier Detect
DGPS	Differential Global Positioning System
DSP	Digital Signal Processing
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
FN	False Negative
FP	False Positive
GCDC	Grand Cooperative Driving Challenge
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPR	Ground Penetrating Radar
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
I2C	Inter-Integrated Circuit
ID	Identifier
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMU	Inertial Measurement Unit
IP	Internet Protocol
MCU	MicroController Unit
MEMS	MicroElectroMechanical Systems
NMEA	National Marine Electronics Association
OOK	On-Off Keying
PC	Personal Computer
PIN	Personal Identification Number
PWM	Pulse-Width Modulation
RAM	Random-Access Memory
RC	Resistor-Capacitor

RFID	Radio-Frequency Identification
RSU	Road Side Unit
RTK	Real Time Kinematic
SBAS	Satellite Based Augmentation System
SD	Secure Digital
SMS	Short Message Service
SPI	Serial Peripheral Interface
TN	True Negative
TP	True Positive
UPS	Uninterruptible Power Supply
USART	Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter
USB	Universal Serial Bus
V2I	Vehicle-to-Infrastructure
V2V	Vehicle-to-Vehicle
Wi-Fi	Wireless Fidelity

IEVADS

Mūsdienu pasauli raksturo nepieciešamība pieņemt aizvien vairāk lēmumu. Lai lēmuma pieņemšana būtu pēc iespējas objektīvāka, ir nepieciešams noteikts informācijas daudzums. Savukārt informāciju iespējams iegūt, apkopojot, kombinējot un interpretējot noteiktu daudzumu datu.

Lēmuma pieņemšana var tikt balstīta gan uz tiešā veidā iegūtiem operatīvajiem datiem, kas raksturo aktuālo situāciju, gan netiešā veidā iegūtiem vēsturiskajiem datiem, kas raksturo līdzīgas situācijas pagātnē. Vēsturisko datu izmantošana aktuālā lēmuma pieņemšanas procesā teorētiski palielina iespēju objektīvi novērtēt situāciju un pieņemt adekvātu lēmumu.

Cilvēka spējām apstrādāt datus un pieņemt lēmumus, neizmantojot papildus tehniskos risinājumus, diemžēl ir zināmas robežas, kuras nosaka gan fizioloģiskās īpatnības, gan pieejamo datu apjoms. Līdz ar to pastāv iespēja sekojošiem uzlabojumiem:

1. operatīvo datu apkopošana un sākotnēja apstrāde – tiek samazināts cilvēkam interpretējamo datu apjoms;
2. vēsturisko datu apkopošana un uzkrāšana – tiek radīta bāze situācijas vēlākai analīzei.

Viens no līdzekļiem šo uzlabojumu veikšanai ir mobilu sensoru tīklu izmantošana. Lai atvieglotu šādu tīklu izveidi, nereti sensoru izvietošanai tiek izmantoti jau eksistējoši mobili objekti, piemēram, transporta līdzekļi, kuri veic regulārus [1] vai neregulārus [2] maršrutus. Laikā, kad tika uzsākta promocijas darba izstrāde, šādus tīklus raksturoja tādi aspekti kā specifiskas aparatūras platformas, nepieciešamība izmantot papildus ārējus sensorus, kā arī iegūto datu pārsūtīšana bez to sākotnējās priekšapstrādes. Līdz ar to minētais līdzeklis bija potenciāli piemērots izmantošanai datu ieguves un apstrādes eksperimentos ar zinātniska rakstura ievirzi.

Cits līdzeklis uzlabojumu veikšanai ir *participatory sensing* pieejas izmantošana, ko raksturo ikdienā lietojamu mobilu iekārtu izmantošana interaktīvu sensoru tīklu veidošanā, kas, savukārt, ļauj veikt apkārtējo vidi raksturojošu datu ieguvei, apstrādi un koplietošanu [3]. Būtiski šādas pieejas aspekti ir plaša pielietojuma aparatūras izmantošana, datu ieguve, izmantojot aparatūrā iebūvētus iekšējos sensorus, iegūto datu sākotnējā priekšapstrāde ar mērķi samazināt pārsūtāmo datu apjomu un līdz ar to arī samazinot katra atsevišķā datu avota uzturēšanas izmaksas, kā arī potenciālais pielietojums praktisku uzdevumu automatizētai veikšanai. LZA Akadēmiskajā terminu datubāzē AkadTerm terminam *participatory sensing* pagaidām nav oficiāla latviskojuma, līdz ar to autors sava promocijas darba ietvaros lieto terminu *kolektīvie mērījumi*.

Promocijas darba izstrādes uzsākšanas laikā šādi kolektīvo mērījumu risinājumi tikai sāka parādīties, un to pielietojums bija saistīts ar citiem domēniem, nevis mobiliem, uz transporta

līdzekļiem bāzētiem sensoru tīkliem. Līdz ar to promocijas darba ietvaros tika nolemts pārbaudīt hipotēzi par abu minēto līdzekļu apvienošanu vienā jaunā līdzeklī.

Hipotēze

Transporta līdzekli, apkārtējo vidi un ceļa infrastruktūru raksturojošo datu ieguvei, sākotnējai apstrādei, apkopošanai un uzkrāšanai ir iespējams izmantot mobilus, uz transporta līdzekļiem bāzētus sensoru tīklus, kas veidoti, implementējot kolektīvo mērījumu pieeju.

Darba mērķis

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt un eksperimentāli pārbaudīt atsevišķas datu ieguves un apstrādes metodikas, kas balstītas uz kolektīvo mērījumu pieejas implementāciju mobilos, uz transporta līdzekļiem bāzētos sensoru tīklos.

Darba uzdevumi

Promocijas darba mērķa sasniegšanai veicami sekojoši uzdevumi:

1. Iegūt teorētisko zināšanu kopumu par potenciāli izmantojamām tehnoloģijām.
2. Izstrādāt atsevišķas datu ieguves un apstrādes metodikas, kas balstītas uz kolektīvo mērījumu pieejas implementāciju mobilos, uz transporta līdzekļiem bāzētos sensoru tīklos.
3. Veikt praktiskus eksperimentus ar mobilu, uz transporta līdzekļiem bāzētu sensoru tīklu prototipiem, kuros implementētas izstrādātās datu ieguves un apstrādes metodikas.
4. Veikt praktisko eksperimentu laikā iegūto datu apstrādi un statistisko analīzi.
5. Balstoties uz praktiskajos eksperimentos iegūto datu apstrādes un statistiskās analīzes rezultātiem, apstiprināt vai noliegt hipotēzi par kolektīvo mērījumu pieejas implementācijas iespējamību mobilos, uz transporta līdzekļiem bāzētos sensoru tīklos.

Izmantotās metodes

Darba izstrādes laikā veiktas literatūras avotu studijas, hipotēžu pārbaude, izmantojot plaša pielietojuma datortehniku, viedtālrunu adaptācija specifisku kolektīvo mērījumu vajadzībām, speciāla pielietojuma iegultu iekārtu izstrāde, praktiski eksperimenti ar izvēlētajām tehnoloģiskajām iekārtām un programmatūru, kā arī eksperimentu rezultātu apkopošana un statistiskā analīze.

Faktoloģiskā materiāla avoti

Darba izstrādes laikā izmantota informācija no 130 faktoloģiskā materiāla avotiem, t.sk. 21 žurnāla, 15 grāmatām, 29 rakstiem grāmatās, 15 konferenču tēzēm, 5 patentiem un 45 elektroniskiem informācijas avotiem.

Darba struktūra

Darba apjoms ir 138 lapas, tajā ietilpst 78 attēli, 15 tabulas un 3 pielikumi. Darba izstrāde veikta 2007. g. oktobrī – 2012. g. novembrī Latvijas Universitātes Datorikas fakultātē (Rīga) un Elektronikas un datorzinātņu institūtā (Rīga).

Pirmajā nodaļā sniegts īss literatūras pārskats. Vispirms aplūkoti atsevišķi ar promocijas darba tematiku saistīti pamattermini - dalītās sistēmas, statiski un mobili sensori, pēc tam specifisku promocijas darba izstrādes laikā izmantotu sensoru veidi - mikrofoloni un akselerometri, kā arī to pielietošana datu ieguvei. Nodaļas nobeigumā īsumā iztirzāti atsevišķi datu ģeomarkēšanas jeb pozīcijas metadatu pievienošanas aspekti.

Otrajā nodaļā sniegts pārskats par materiāliem un metodēm, kas izmantoti, veicot pētniecības aktivitātes promocijas darba izstrādes laikā. Vispirms aplūkota sākotnējo hipotēžu pārbaude, izmantojot plaša pielietojuma datortehniku un ārējus sensoru moduļus, pēc tam īsi iztirzāta viedtālrunu adaptācija specifisku mērījumu vajadzībām. Nodaļas nobeigumā aprakstīta atsevišķu speciāla pielietojuma iegultu iekārtu izstrāde.

Trešajā nodaļā sniegts pārskats par izstrādāto piedzīvojumu sacīkšu norises kontroles sistēmu, kas bāzēta uz bezvadu sensoru tīklu mezgliem. Šī pētījuma tēma ir motivēta ar nepieciešamību apgūt bezvadu sensoru tīklu tehnoloģijas un izvērtēt to piemērotību promocijas darba pamata tēmas izstrādē. Izstrādātā sistēma var rast pielietojumu arī ar transportu saistītās jomās, piemēram, piedzīvojumu sacīkstēs, kur visa distance vai atsevišķa distances daļa tiek veikta, izmantojot noteiktus transporta līdzekļus.

Vispirms aplūkoti atsevišķi eksistējošie bezvadu sensoru tīklu un klasisko orientēšanās sacīkšu kontroles risinājumi, pēc tam iztirzātas sistēmas implementācijai noteiktās prasības un izvēlētais sistēmas konceptuālais modelis. Nodaļas nobeigumā atrodams sistēmas implementācijas apraksts, kas ietver specifiskus aparatūras adaptācijas un programmatūras izstrādes darbus.

Ceturtajā nodaļā sniegts pārskats par izstrādāto ceļa seguma monitoringa metodiku, kas bāzēta uz mobiliem sensoru tīkliem ar mikrofoloniem (RoadMic). Vispirms aplūktas statistiku un mobilo sensoru tīklu iespējas un atsevišķi eksistējošie mobilo sensoru tīklu risinājumi, pēc tam iztirzātas metodikas implementācijai noteiktās tehniskās prasības un izvēlētais datu ieguves un

apstrādes algoritms. Nodaļas nobeigumā atrodams metodikas novērtējums, kas balstīts uz reāli veiktiem datu ieguves un apstrādes eksperimentiem.

Piektajā nodaļā sniegts pārskats par izstrādāto ceļa seguma monitoringa metodiku, kas bāzēta uz viedtālruniem ar iebūvētiem akselerometriem (Potroid). Šī aktivitāte ir turpinājums 4. nodaļā aprakstītajam pētījumam un ietver plaša pielietojuma aparatūras izmantošanu datu ieguvei un sākotnējai apstrādei.

Vispirms aplūkoti eksistējošie uz akselerometriem bāzētie ceļa seguma monitoringa risinājumi, pēc tam iztirzātas metodikas implementācijai noteiktās tehniskās prasības un izvēlētie datu apstrādes algoritmi. Nodaļas nobeigumā atrodams metodikas novērtējums, kas balstīts uz reāli veiktiem datu ieguves un apstrādes eksperimentiem.

Sestajā nodaļā sniegts pārskats par izstrādāto transporta līdzekļa stāvokļa (atrašanās kustībā vai stāvēšana uz vietas) monitoringa metodiku, kas bāzēta uz iegultām iekārtām ar akselerometriem. Vispirms aplūkoti atsevišķi eksistējošie transporta līdzekļa stāvokļa monitoringa risinājumi, pēc tam iztirzātas metodikas implementācijai noteiktās tehniskās prasības un izvēlētais datu ieguves un apstrādes algoritms. Nodaļas nobeigumā atrodams metodikas novērtējums, kas balstīts uz reāli veiktiem datu ieguves un apstrādes eksperimentiem.

Septītajā nodaļā sniegts pārskats par izstrādāto transporta līdzekļa pozīcijas noteikšanas metodiku, kas bāzēta uz vairākiem SBAS uztvērējiem un datiem no lokālajām bāzes stacijām. Šī pētījuma tēma ir motivēta ar nepieciešamību iegūt kvalitatīvus pozīcijas metadatus 4., 5. un 6. nodaļā aprakstītajām kolektīvo mērījumu metodikām, kā arī ar nepieciešamību iegūt kvalitatīvus pozīcijas datus 2.3.6. nodaļā aprakstītajam GCDC sacensību auto.

Vispirms aplūkoti atsevišķi eksistējošie uz specifiskām salīdzinoši dārgām RTK un IMU iekārtām bāzētie transporta līdzekļa pozīcijas noteikšanas risinājumi, pēc tam iztirzāta metodikas implementācija, kuras pamatā ir vairāku vienkāršu salīdzinoši lētu SBAS uztvērēju, kā arī reālā laika datu no lokālajām bāzes stacijām izmantošana. Nodaļas nobeigumā atrodams metodikas novērtējums, kas balstīts uz reāli veiktiem datu ieguves un apstrādes eksperimentiem.

Astotajā nodaļā sniegts pārskats par izstrādāto komerciālas RFID sistēmas reversās inženierijas metodiku, kas bāzēta uz plaša pielietojuma aparatūru un programmatūru. Šī pētījuma tēma ir motivēta ar nepieciešamību kritiski izvērtēt komerciāli pieejamu komponentu piemērotību izmantošanai uz transporta līdzekļiem bāzētos sensoru tīklos, t.sk. to aizsardzību pret reverso inženieriju.

Vispirms aplūkoti eksistējošie RFID sistēmu risinājumi un to iedalījums atkarībā no pielietojuma un drošības pakāpes, tipiski veidi, kā tiek veikti uzbrukumi RFID sistēmām, kā arī tipiski veidi, kā tiek veidota RFID sistēmu aizsardzība pret noteiktu veidu uzbrukumiem. Tālāk seko

metodikas implementācijai noteiktās tehniskās prasības, konkrētā RFID komunikācijas protokola fiziskā un loģiskā līmeņa izpēte, kā arī aparatūras un programmatūras izstrāde ar mērķi simulēt neeksistējošu RFID birku ar brīvi izvēlētu ID numuru. Nodaļas nobeigumā atrodams metodikas novērtējums, kas balstīts uz reāli veiktiem eksperimentiem datu apmaiņā starp reālu RFID lasītāju un simulētu RFID birku.

1. LITERATŪRAS PĀRSKATS

Šajā nodaļā autors sniegs īsu literatūras pārskatu. Vispirms tiks aplūkoti atsevišķi ar promocijas darba tematiku saistīti pamattermini - dalītās sistēmas, statistiski un mobili sensori, pēc tam specifisku promocijas darba izstrādes laikā izmantotu sensoru veidi - mikrofoni un akcelerometri, kā arī to pielietošana datu ieguvei. Nodaļas nobeigumā īsumā iztirzāti atsevišķi datu ģeomarkēšanas jeb pozīcijas metadatu pievienošanas aspekti.

1.1. Dalītās sistēmas

Dalītā sistēma - sistēma, kura sastāv no daudzām atsevišķām skaitļošanas iekārtām. Katrai sistēmas sastāvā ietilpstošajai skaitļošanas iekārtai ir deleģēta noteikta uzdevuma vai vairāku uzdevumu veikšana. Iekārtas sazinās savā starpā, izmantojot noteiktu datu pārraides tīklu. Uzdevumu izpildes un ar to saistītās saziņas mērķis ir noteikta mērķa sasniegšana ([4], 3.lpp.).

Laikā, kad tika ieviests termins „dalītās sistēmas”, ar to apzīmēja datoru tīklus, kur atsevišķie tīklā ietilpstošie datori bija izvietoti noteiktā, salīdzinoši plašā ģeogrāfiskajā apvidū ([5], 1.lpp.). Mūsdienās termina nozīme ir paplašinājusies, un to attiecina arī uz tādām sistēmām, kur uz viena fiziska datora darbojas vairāki autonomi procesi, kuri sazinās savā starpā ar ziņojumu palīdzību. Līdz ar to var uzskatīt, ka dalītā sistēma atbilst sekojošiem nosacījumiem:

1. sistēmu veido vairāki atsevišķi skaitļošanas vienumi, katram no tiem ir sava lokālā atmiņa;
2. sistēmu veidojošie vienumi komunicē savā starpā ar ziņojumu palīdzību;
3. sistēma spēj darboties arī tad, ja atsevišķi to veidojošie vienumi pārtrauc savu darbību;
4. sistēmu veido heterogēni vienumi, kuru konfigurācija var tikt mainīta sistēmas darbības laikā;
5. katrs atsevišķais vienums pārzin tikai savu lokāli deleģēto uzdevumu vai uzdevumus ([6], 291.lpp.).

Eksistē divi galvenie iemesli, kamdēļ ir vērts izmantot dalītās sistēmas. Viens no tiem ir nepieciešamība izmantot datu pārraides tīklu, jo dati tiek iegūti vienā vietā, bet izmantoti citā vietā. Otrs iemesls ir iespēja veikt to pašu uzdevumu, ko būtu iespējams izdarīt bez dalītās sistēmas izmantošanas, bet iegūstot kādu papildus labumu, piemēram, samazinot sistēmas pilnīga atteikuma risku, vai arī atvieglojot sistēmas uzturēšanu ([7], 877.lpp.) un potenciālo paplašināšanu. Tipiski dalīto sistēmu piemēri ir:

1. telekomunikāciju tīkli:
 - a. fiksēto un mobilo telefonu tīkli;
 - b. datoru tīkli;
 - c. bezvadu sensoru tīkli;

2. tīkla lietojumprogrammas:
 - a. vispasaules tīmeklis (*World Wide Web*);
 - b. vienādranga (*peer-to-peer*) tīkli;
 - c. tīklā spēlējamās reālā laika datorspēles;
 - d. dalītas datubāzes un datubāzu pārvaldības sistēmas;
 - e. dalītas datņu sistēmas;
 - f. dalītas datu apstrādes sistēmas;
3. komplicētu procesu kontrole reālā laikā:
 - a. aviosatiksmes kontroles sistēmas;
 - b. industriālo procesu kontroles sistēmas.

Promocijas darba ietvaros tiek apskatīts specifisks dalīto sistēmu veids – mobilu bezvadu sensoru tīkli transporta līdzekļu kontekstā. Savukārt konkrētā dalīto sistēmu veida ietvaros galvenā uzmanība ir veltīta datu ieguvei, sākotnējai apstrādei, apkopošanai un uzkrāšanai, izmantojot kolektīvo mērījumu pieeju.

1.2. Statiski un mobili sensori

Sensors - ierīce, kuras uzdevums ir noteikt kāda objekta fizikālo stāvokli (piemēram, drukāšanas galviņas novietojumu) vai tā fizikālo kvalitāti (piemēram, temperatūru) un pārveidot to datora ieejas signālā. Parasti sensors ģenerē analogsignālu, kas pirms tā ievadīšanas datorā ar analogdiskrēto pārveidotāju tiek pārvērts par ciparsignālu.

Eksistē dažādas pieejas, kā izveidot un uzturēt sensoru tīklus. Ja klasifikācija tiek veikta, balstoties uz sensoru tīkla dinamiku, tad izšķir statiskus sensoru tīklus, mobilus sensoru tīklus un hibrīdus sensoru tīklus.

Statiskos sensoru tīklos gan pētāmā parādība, gan sensori, gan parādības pētnieks ir stacionāri. Kā tipisku piemēru var minēt sensoru tīklu, kas izveidots, lai veiktu temperatūras mērījumus. Dati tiek iegūti un apkopoti tīkla līmenī, bet pēc tam, izmantojot speciālu izdalītu galveno sensoru mezglu, nosūtīti parādības pētniekam. Tīkla konfigurācija tiek veikta sensoru izvietojuma laikā, pēc tam jau izveidotā tīklā tiek pārraidīti no sensoriem iegūtie dati. Datu pārraide no to ieguves vietas līdz izdalītajam galvenajam sensoru mezglam var ietvert vienu vai vairākus posmus.

Mobilos sensoru tīklos vai nu pētāmā parādība, vai sensori, vai arī parādības pētnieks ir mobili. Līdz ar to nepietiek tikai ar sākotnējo tīkla konfigurāciju, bet to ir nepieciešams mainīt, atkarībā no tīkla aktuālā stāvokļa. Tīkla konfigurācijas izmaiņas var tikt iniciētas gan no parādības pētnieka, gan no sensoru puses.

Ja tiek izmantota reaktīvā pieeja, kur konfigurācijas izmaiņu iniciators ir parādības pētnieks, tad sākotnēji tiek izveidoti vairāki iespējamie konfigurācijas varianti, aktīvajai darbībai izmantojot vienu no tiem. Brīdī, kad aktīvais konfigurācijas variants vairs nespēj nodrošināt tīkla darbību, notiek pāreja uz nākošo iespējamo konfigurācijas variantu. Ja neviens no esošajiem konfigurācijas variantiem vairs nav spējīgs darboties, tiek veikta jaunu variantu izveide, kas atbilst aktuālajam tīkla stāvoklim.

Ja tiek izmantota proaktīvā pieeja, kur konfigurācijas izmaiņu iniciators ir kāds no sensoriem, tad komunikāciju uzturošie sensori kontrolē savu spēju turpināt uzsākto komunikāciju. Konstatējot potenciāli iespējamo komunikācijas pārtraukumu, tiek aktivizēts mehānisms, kas mēģina pārlikt izpildi uz citiem tīklā ietilpstošiem sensoriem. Ja komunikācija arī pēc šādām aktivitātēm nav iespējama, tiek nosūtīts ziņojums parādības pētniekam, kurš veido jaunu konfigurācijas variantu izveidi atbilstoši aktuālajam tīkla stāvoklim.

Mobilus sensoru tīklus var klasificēt, balstoties uz atsevišķu tā komponentu mobilitāti. Šis aspekts ir būtisks, jo no tā ir atkarīga komunikācija sensoru tīklā – gan infrastruktūra, gan datu nogādes modeļi, kā arī izmantotie protokoli. Eksistē vairākas klases:

1. Mobils parādības pētnieks. Šajā gadījumā pētāmā parādība un sensori ir statiski. Kā piemēru var minēt temperatūras sensorus, kas izvietoti grūti pieejamā teritorijā. Lai iegūtu datus no šāda sensoru tīkla, tiek izmantots tam pāri lidojošs lidaparāts.
2. Mobili sensori. Šajā gadījumā sensori ir kustīgi attiecībā viens pret otru, kā arī parādības pētnieku. Kā piemēru var minēt satiksmes monitoringu, izmantojot sensorus, kas uzstādīti taksometros. Kustības laikā sensori sazinās viens ar otru un apmainās ar iegūtajiem datiem. Šī saziņa var būt ne tikai stihiska, bet arī kooperatīva, respektīvi, tiek organizēta mērķtiecīga datu izplatīšana.
3. Mobila pētāmā parādība. Šajā gadījumā sensori un parādības pētnieks ir statiski. Kā piemēru var minēt sensoru tīklu, kas izveidots, lai detektētu tā teritorijā esošus dzīvniekus. Ņemot vērā pētāmās parādības specifiku, tīkla infrastruktūras veidošanā ir nepieciešams izmantot notikumu bāzētu pieeju, respektīvi, aktivizēt tikai tos sensorus, kuru tuvumā jau ir konstatēta pētāmā parādība [8].

Hibrīdi sensoru tīkli ietver gan statiskus, gan mobilus sensorus. Pat salīdzinoši neliela skaita mobilu sensoru iekļaušana tīkla konfigurācijā ļauj uzlabot tādus tīkla raksturlielumus kā tīkla pārklājums, ziņojumu maršrutēšana, ziņojumu aiztures un enerģijas patēriņš [9][10][11][12].

1.3. Mikrofoloni un to izmantošana datu ieguvei

Mikrofolons ir ierīce akustisku svārstību pārvēršanai elektriskās svārstībās skaņas pastiprināšanas, pārraidīšanas, ierakstīšanas vai mērīšanas nolūkos. Atkarībā no konstrukcijas un elektriskā signāla ieguves veida izšķir vairākus mikrofolonu tipus.

Kondensatora mikrofolona membrāna, kuru iesvārsta akustiskās svārstības, darbojas kā viena no kondensatora platēm. Mainoties attālumam starp platēm, mainās kondensatora kapacitāte. Uzlādējot kondensatoru ar fiksētu lādiņu, kapacitātes izmaiņas rada sprieguma izmaiņas uz kondensatora izvadiem. Cita metodika paredz mikrofolona sastāvā ietilpstošā kondensatora izmantošanu, lai mainītu augstfrekvences ģenerators darba frekvenci. Viekāršākie šā tipa mikrofoloni tiek izmantoti karaoke vajadzībām, bet sarežģītākie – profesionāliem skaņas ierakstiem.

Elektreta mikrofolona darbības princips ir līdzīgs iepriekš minētā kondensatora mikrofolona darbības principam, tikai ārēja barošanas avota vietā tiek izmantots pastāvīgi uzlādēts ferroelektrisks materiāls. Salīdzinoši zemo ražošanas izmaksu dēļ lielākajā daļā šobrīd ražoto iegulto iekārtu tiek izmantoti šā tipa mikrofoloni [13].

Dinamiskā mikrofolona membrāna ir savienota ar spolīti, kura atrodas pastāvīgā magnētiskajā laukā. Akustisko svārstību ietekmē notiek spolītes kustība, līdz ar to tajā inducējas elektriskās svārstības. Lai uzlabotu mikrofolona frekvenču diapazonu un tā vienmērīgumu, tiek izmantotas arī vairākas membrānas, pēc tam apvienojot iegūtos signālus.

Lentas mikrofolona princips ir līdzīgs iepriekš minētā dinamiskā mikrofolona darbības principam, tikai spolītes vietā ir plāna gofrēta metāla lenta. Šā mikrofolona tipa īpatnība ir simetriskā virziendarbības diagramma.

Ogles mikrofolons sastāv no kapsulas ar membrānu, kura pildīta ar ogles granulām, kā arī diviem elektrodiem. Elektrodiem tiek pievadīts spriegums, un caur ogles granulām plūst strāva, kuras stiprums ir proporcionāls spiedienam, kādu uz ogles granulām izdara membrāna. Mikrofoloni tika izmantoti agrīnajos telefona aparātos, tiem bija raksturīga zemas kvalitātes skaņa un ierobežots frekvenču diapazons.

Pjezoelektriskā mikrofolona darbības pamatā ir pjezoeletriskais efekts – materiāla spēja radīt elektrisko spriegumu deformācijas ietekmē. Šā tipa mikrofolonus raksturo augsta izejas pretestība, līdz ar to tie tika izmantoti sadzīves audio aparātūrā laikā, kad šādas aparātūras elementu pamata bāze bija radiolampas. Pjezoelektriskie kontaktmikrofoloni tiek izmantoti, lai pieslēgtu skaņu pastipriņošanai aparātūrai akustiskos mūzikas instrumentus, piemēram, ģitāras un bungas. Vēl šāda tipa mikrofolonus izmanto, veicot skaņu ierakstus specifiskos apstākļos, piemēram, zem ūdens vai augsta atmosfēras spiediena apstākļos.

Optiskās šķiedras mikrofonu pārveido akustiskās svārstības elektriskajās svārstībās, mērot izmaiņas gaismas spilgtumā [14]. Lāzera izstarota gaisma caur optisko šķiedru tiek padota uz diafragmētu reflektoru. Diafragmai ir piesaistīta membrāna, kura akustisko svārstību ietekmē maina diafragmas atvērumu. Aiz diafragmas un otras optiskās šķiedras seko gaismas jutīgs detektors, kurš pārveido gaismas signālus elektriskajos signālos. Šā tipa mikrofonu ir nejutīgs pret elektriskajiem, magnētiskiem, elektrostatiskajiem un radioaktīvajiem traucējumiem, līdz ar to piemērots dažādiem specifiskiem industriāliem un militāriem pielietojumiem.

Lāzera mikrofonu darbības pamatā ir lāzera stara atstarošanās leņķa izmaiņas, ja to vērš pret virsmu, uz kuru iedarbojas akustiskās svārstības, piemēram, pret loga stiklu telpai, kurā notiek konfidenciālas pārrunas. Jaunākie pētījumi šajā jomā ir noveduši pie iespējas izmantot skaņas detektēšanai lāzera staru, kas tiek vērsts caur dūmiem vai tvaikiem, kuros ir meklējamās skaņas svārstības [15].

MEMS mikrofonu tiek saukti arī par mikrofonu mikroshēmām vai silīcija mikrofoniem. Šādu mikrofonu membrānas tiek veidotas tieši mikroshēmas kristāla silīcija slāņos, nereti kopā ar darbībai nepieciešamo priekšpastiprinātāju. Darbības pamatā parasti ir iepriekš minētais kondensatora mikrofonu princips [16].

Viens no veidiem, kā mikrofonu tiek izmantoti sensoru tīklu kontekstā, ir lokalizācija pēc akustiskajam svārstībām [17] [18]. Lai noteiktu skaņas avota atrašanās vietu, tiek izmantoti vairāki mikrofonu jeb mikrofonu masīvs, kā arī dati par katra atsevišķā mikrofonu atrašanās vietu un virziendarbības diagrammu.

Cits mikrofonu pielietojuma veids sensoru tīklu kontekstā ir aktivitāšu detektēšana, respektīvi, pēc akustiskā signāla šablona, kā arī citām pazīmēm tiek detektētas noteikta veida aktivitātes. Šajā gadījumā mikrofonu var būt arī tikai viens no izmantotajiem sensoriem multimodālā sensoru sistēmas risinājumā [19].

Mikrofonu tiek izmantoti arī pētījumos, kas ir saistīti ar urbānas vides akustisko trokšņu mērījumiem un to nākotnes prognožu sastādīšanu [20].

1.4. Akselerometri un to izmantošana datu ieguvei

Akselerometrs ir elektromehāniska ierīce, kas tiek izmantota, lai mērītu paātrinājumu. Paātrinājums var būt gan statisks, piemēram, brīvās krišanas paātrinājums, kā arī dinamisks, piemēram, mērāmā objekta pārvietošanās vai vibrācijas. Atkarībā no konstrukcijas un elektriskā signāla ieguves veida izšķir vairākus akselerometru tipus.

Kondensatora akcelerometra darbības pamatā ir kapacitātes izmaiņas, kuras ir proporcionālas mērītajam paātrinājumam. Paātrinājumu nosaka, salīdzinot miera stāvokļa kapacitāti un kapacitāti, kas nomērīta pie noteikta paātrinājuma.

Pjezoelektriskajos akcelerometros izmanto kristālus, kam piemīt pjezoeletriskais efekts. Paātrinājumam mehāniski iedarbojoties uz akcelerometra kristālu, tiek radīts elektriskais spriegums, kura amplitūda ir proporcionāla mērītajam paātrinājumam.

Pjezorezistīvie akcelerometri izmanto līdzīgu darbības principu ka iepriekš minētie pjezoelektriskie akcelerometri, tikai šajā gadījumā proporcionāli mērītajam paātrinājumam mainās materiāla elektriskā pretestība.

Holla efekta akcelerometru darbības pamatā ir paātrinājumam proporcionālas izmaiņas magnētiskajā laukā, kuras rada attiecīgas mērāmā sprieguma izmaiņas.

Magnetorezistīvie akcelerometri izmanto līdzīgu darbības principu ka iepriekš minētie Holla efekta akcelerometri, tikai šajā gadījumā proporcionāli magnētiskā lauka izmaiņām mainās materiāla elektriskā pretestība.

Siltuma pārnese akcelerometrā ietilpst siltuma avots un apkārt tam izvietoti termorezistori siltuma izplatības diagrammas mērīšanai. Miera stāvoklī siltums izplatās no siltuma avota simetriski, bet paātrinājuma ietekmē siltuma izplatība kļūst nesimetriska.

MEMS akcelerometrus, līdzīgi, kā MEMS mikrofonus, konstruktīvi veido kā mikroshēmas vai mikroshēmu sastāvdaļas. Tieši šā tipa akcelerometru attīstība ir radījusi priekšnoteikumus aizvien plašākai šā tipa sensoru pielietojumam.

Lai izvēlētos akcelerometru, kas vislabāk piemērots konkrētajam pielietojumam, ir nepieciešams izvērtēt tā raksturlielumus:

1. Dinamiskais diapazons – maksimālās pozitīvā un negatīvā paātrinājuma amplitūdas, pie kurām akcelerometrs atgriež korektas un neizkropļotas mērījumu vērtības. Parasti tiek uzdots g mērvienībās.
2. Jūtība – izejas signāla izmaiņu atkarība no paātrinājuma izmaiņām. Parasti tiek uzdots mV/g mērvienībās.
3. Frekvenču diapazons – maksimālā un minimālā frekvence, pie kurām akcelerometrs atgriež korektas un neizkropļotas mērījumu vērtības. Parasti tiek uzdots Hz mērvienībās.
4. Mērījumu ass – asu skaits, kurā tiek veikti paātrinājuma mērījumi. Tipiski mēdz būt vienas ass vai trīs asu akcelerometri.
5. Izmēri un masa – lai neietekmētu mērījumu rezultātus, paša akcelerometra masai jābūt būtiski mazākai nekā mērāmā objekta masai [21].

Viens no akselerometru pielietojumiem ir noteiktu paātrinājuma vērtību pārsniegšanas konstatēšana un attiecīgu darbību izpilde, piemēram, transporta līdzekļa drošības spilvenu aktivizēšana ceļu satiksmes negadījuma laikā [22].

Akselerometri tiek izmantoti, lai noteiktu kāda objekta slīpumu attiecībā pre Zemes virsmu, ātrumu, kā arī specifiskas vibrācijas, piemēram, lai brīdinātu par tuvojošos zemestrīci [23].

Klasiski pozīcijas noteikšanas risinājumi ārpus telpām tipiski tiek veidoti, izmantojot signālus no kāda GNSS servisa. Lai uzlabotu šādā veida iegūtas objekta pozīcijas precizitāti, tiek izmantoti dati no papildus sensoriem, t.sk. akselerometriem [24].

1.5. Datu ģeomarķēšana

Datu ģeomarķēšana ir process, kura laikā datiem, kas var būt gan fotogrāfijas, gan video, gan Tīmekļa resursi un dažāda veida ziņojumi, tiek pievienoti metadati, kas satur ģeogrāfisku identifikācijas informāciju. Tipiskā gadījumā šādos metadatos tiek saglabāti dati par ģeogrāfiskā platuma un garuma koordinātēm. Kā papildus opcijas var tikt saglabāti arī dati par augstumu virs jūras līmeņa, azimutu, attālumu, koordinātu noteikšanas precizitāti, kā arī ģeogrāfiskās vietas nosaukumu. Visplašāk šādi metadati tiek izmantoti, lai marķētu fotogrāfijas.

Ģeomarķēšanas laikā izveidotie metadati ļauj veikt dažāda veida datu atlases pēc ģeogrāfiskā izvietojuma principa, piemēram, atlasīt fotogrāfijas, kas uzņemtas noteiktā ģeogrāfiskā apvidū [25].

Attīstoties kolektīvo mērījumu pieejai, kuru raksturo liels iesaistīto sensoru un iegūto datu apjoms, ir būtiski veikt iegūto datu piesaisti noteiktām vietām, turklāt vēlams to veikt automātiski, bez papildus noslodzes datu ieguvē iesaistītajam personālam [3].

Eksistē divas metodikas, kā tiek veikta datu ģeomarķēšana. Pirmā metodika paredz metadatu iegūvi un pievienošanu vienlaicīgi ar pamata datu iegūvi. Lai to veiktu, tipiski tiek izmantoti integrēti vai ārēji GNSS uztvērēji. Otrā metodika paredz metadatu iegūvi un pievienošanu pēc pamata datu ieguves, piemēram, salīdzinot datu ieguves laikus un laikus no atsevišķi veiktiem maršruta žurnalizācijas pierakstiem.

Datu ģeomarķēšana rada arī nosacījumus, kas ir par pamatu noteikta veida draudiem saistībā ar privātumu [26]. Analizējot informāciju no publiski pieejamiem ģeomarķētiem materiāliem, iespējams noteikt personas atrašanās vietu un tipiskos pārvietošanās ieradumus. Lai samazinātu šādus draudus, nepieciešams veikt attiecīgus pasākumus, piemēram, metadatu dzēšanu pirms attiecīgo materiālu izvietojšanas publiski pieejamos resursos.

2. MATERIĀLI UN METODEDES

Šajā nodaļā autors sniegs pārskatu par materiāliem un metodēm, kas tika izmantoti, veicot promocijas darba izstrādes laikā plānotās pētniecības aktivitātes. Vispirms tiks aplūkota sākotnējo hipotēžu pārbaude, izmantojot plaša pielietojuma datortehniku un ārējus sensoru moduļus, pēc tam īsi iztirzāta viedtālrunu adaptācija specifisku mērījumu vajadzībām. Nodaļas nobeigumā aprakstīta atsevišķu speciāla pielietojuma iegultu iekārtu izstrāde.

2.1. Hipotēžu pārbaude, izmantojot plaša pielietojuma datortehniku

Veicot pētījumus, kas saistīti ar datu ieguvu un apstrādi dažādos transporta līdzekļos, nepieciešams izmantot atbilstošu tehnisko aprīkojumu – gan datu ieguvei, gan datu apstrādei, kā arī izmantotās aparatūras nodrošināšanai ar elektroenerģiju. Uzsākot pētījumus, tiek izvirzītas sākotnējās hipotēzes, kuru pārbaudei nepieciešams veikt noteiktu eksperimentu apjomu. 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, kā arī jau gatavus sensoru moduļus un elektroenerģijas nodrošināšanas risinājumus.

Laikā, kad autors uzsāka darbus pie promocijas darba izstrādes, plaša pielietojuma datortehnikas attīstības tendences bija sasniegušas posmu, kad no jauna saražoto portatīvo datoru skaits pārsniedza no jauna saražoto galda datoru skaitu [27]. Attiecīgā laika posma portatīvie datori bija spējīgi noteiktu laiku (tipiski – līdz pat vairākām stundām) darboties, izmantojot elektroenerģiju no iebūvētā akumulatora, kā arī nodrošināt dažādas saskarnes ar ārējām iekārtām. Abi šie aspekti ir būtiski, ja nepieciešams veikt datu ieguvu un apstrādi transporta līdzeklī. Ņemot vērā iepriekš minētās tendences, tika pieņemts lēmums eksperimentu veikšanai transporta līdzekļos izmantot tieši portatīvos datorus. Atsevišķi autora izmantotā portatīvā datora [28] un tā programmnodrošinājuma raksturlielumi ir uzskaitīti tabulā 2.1.

Programmatūra atsevišķiem sākotnējiem datu ieguves eksperimentiem tika veidota, izmantojot Microsoft Visual Studio 2008 un programmēšanas valodu Visual Basic. Lai nodrošinātu programmatūras pielietojumu vairākās populārās personālo datoru operētājsistēmās, tika izmantota Mono platforma. Vēlākos eksperimentos tika izmantoti arī citi, jau gatavi programmatūras rīki, piemēram, Audacity [29], SoX [30], gpsd [31], EasyGPS [32] utt.

Eksperimentos izmantotā portatīvā datora parametri

<i>Parametrs</i>	<i>Vērtība</i>
<i>Modelis</i>	<i>Acer Extensa 5230</i>
<i>Procesors</i>	<i>Intel Celeron 2.00 GHz</i>
<i>Operatīvā atmiņa</i>	<i>2 GB</i>
<i>Cietais disks</i>	<i>160 GB</i>
<i>Akumulators</i>	<i>4400 mAh / 2,5 h</i>
<i>Saskarnes (izmantotās)</i>	<i>3x USB 2.0 / ārējā mikrofona ligzda</i>
<i>Sensori (izmantotie)</i>	<i>Iebūvētais mikrofons</i>
<i>Operētājsistēmas</i>	<i>Windows XP / Ubuntu 10.04</i>
<i>Programmatūras izstrādes vide</i>	<i>Microsoft Visual Studio 2008 / Mono</i>

Sākotnējo eksperimentu laikā bija paredzēts veikt transporta līdzekļa vibrāciju, akustisko trokšņu, kā arī apkārtējās vides temperatūras, atmosfēras spiediena, apgaismojuma un gaisa mitruma mērījumus. Lai veiktos mērījumus piesaistītu noteiktām ģeogrāfiskajām koordinātēm, bija nepieciešams izmantot kādu ģeomarkēšanas metodiku.

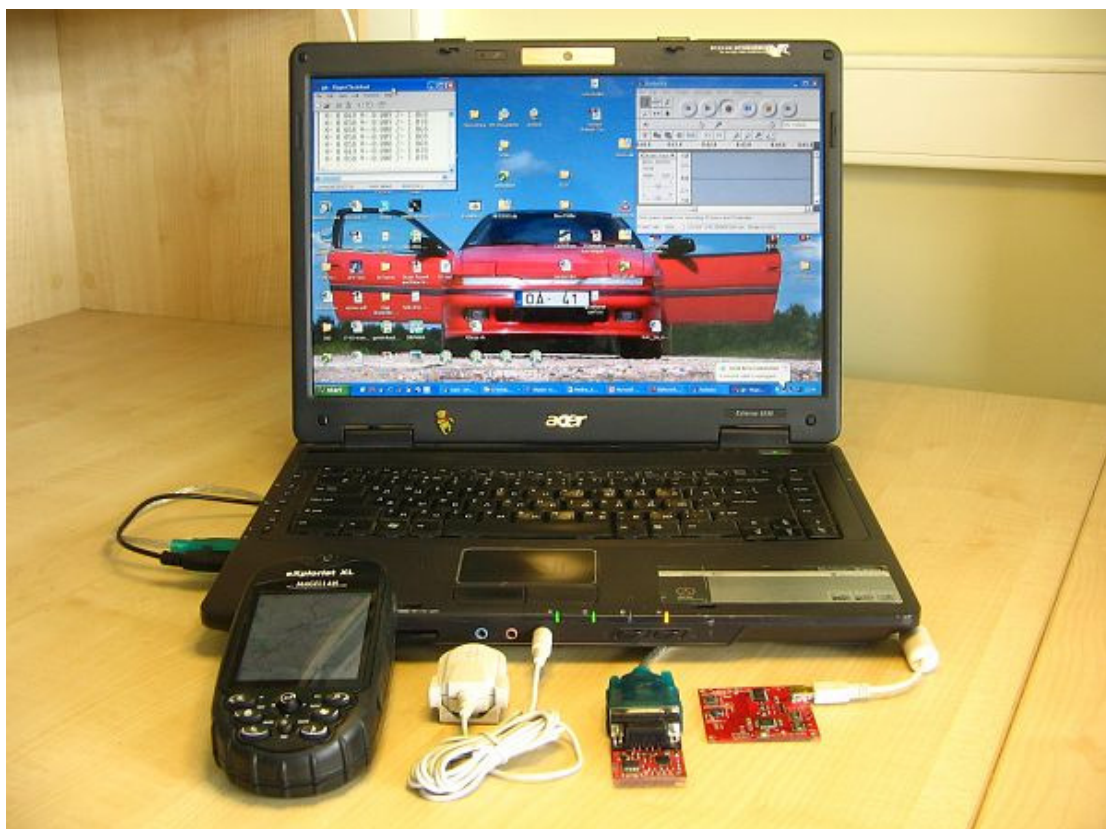
Sākotnējiem transporta līdzekļa vibrāciju mērījumiem tika izmantots sensoru modulis SerAccel v5 [33]. Tā sastāvā ietilpst mikrokontrolieris 16LF88 un 3 asu akselerometrs MMA7260Q. Moduļa savienojumam ar portatīvo datoru tika izmantota RS232 saskarne un RS232-USB pāreja HL-340.

Sākotnējiem akustisko trokšņu mērījumiem tika izmantots ārējs elektretu mikrofons. Mikrofona savienojumam ar portatīvo datoru tika izmantota ārējā mikrofona ligzda. Vēlāku eksperimentu laikā tika izmantots arī portatīvā datora iebūvētais mikrofons.

Sākotnējiem apkārtējās vides temperatūras, atmosfēras spiediena, apgaismojuma un gaisa mitruma mērījumiem tika izmantots sensoru modulis USB Weather Board v2 [34]. Tā sastāvā ietilpst mikrokontrolieris Atmega328, kā arī atmosfēras spiediena sensors SCP1000, gaisa mitruma un apkārtējās vides temperatūras sensors SHT15 un apgaismojuma sensors TEMT6000. Moduļa savienojumam ar portatīvo datoru tika izmantota USB saskarne.

Mērījumu piesaistīšanai noteiktām ģeogrāfiskajām koordinātēm tika izmantota metodika, kuras pamatā ir signāli no GPS sistēmas pavadoņiem. Signālu uztveršanai tika izmantots SBAS uztvērējs Magellan eXplorist XL. Uztvērēja savienojumam ar portatīvo datoru tika izmantota USB saskarne.

Attēlā 2.1. ir redzams sākotnējiem eksperimentiem izmantotais plaša pielietojuma datortehnikas un ārēju sensoru moduļu komplekts, bet attēlā 2.2. – magnētiska meteo datu ieguves iekārta uz sensoru moduļa USB Weather Board v2 bāzes.



2.1. att. Sākotnējiem eksperimentiem izmantotais plaša pielietojuma datortehnikas un ārēju sensoru moduļu komplekts.



2.2. att. Magnētiska meteo datu ieguves iekārta uz sensoru moduļa USB Weather Board v2 bāzes. Pa kreisi - konstrukcija, pa labi - novietojums uz transporta līdzekļa virsbūves.

Lai nodrošinātu datu ieguves un apstrādes aparāturu ar nepieciešamo elektroenerģiju gadījumos, kad atsevišķu eksperimentu ilgums pārsniedz portatīvā datora akumulatora veiktspēju, tika izmantoti alternatīvi risinājumi, kas ļauj izmantot kā enerģijas avotu transporta līdzekļa elektrosistēmu. Eksperimentos tika izmantoti vairāki transporta līdzekļi. Viens no tiem bija aprīkots ar stacionāri iebūvētu nepārtrauktās barošanas avotu APC Smart-UPS 420, bet citos tika izmantots portatīvais 12VDC->220VAC konvertors Minwa MWDAP300AF.



2.3. att. Alternatīvie enerģijas nodrošināšanas risinājumi. Pa kreisi - nepārtrauktās barošanas avots APC Smart-UPS 420 [35], pa labi - 12VDC->220VAC konvertors Minwa MWDAP300AF [36].

2.2. Viedtālrunu adaptācija specifisku kolektīvo mērījumu vajadzībām

Laikā, kad autors veica darbus pie promocijas darba izstrādes, plaša pielietojuma datortehnikas attīstības tendences sasniedza posmu, kad galda datoru un portatīvo datoru konkurences cīņā iejaucās un vērā ņemamus panākumus guva jauns plaša pielietojuma datortehnikas tips – viedtālruni [37]. Šī datortehnikas tipa iekārtas raksturo ne vien ar jau ierastajiem portatīvajiem datoriem samērojama skaitļošanas jauda un spēja noteiktu laiku darboties autonomi, izmantojot iebūvētos akumulatorus, bet arī atsevišķu iebūvētu sensoru esamība, piemēram, GPS uztvērēji un akcelerometri.

Ņemot vērā minētās attīstības tendences, dabiski radās vēlme pārbaudīt jau izstrādāto ceļa seguma monitoringa metodiku, izmantojot datu ieguvei un apstrādei šāda tipa iekārtas. Sākotnēji tika veikti eksperimenti, lai noskaidrotu, vai skaņas dati, kas iegūti no viedtālruna mikrofona, ir pietiekami, lai veiktu ceļa seguma bojājumu detektēšanu braucošā transporta līdzeklī. Eksperimentu rezultātā tika noskaidrots, ka esošā viedtālruna mikrofona signālu apstrāde ietver arī signāla kompresiju, kas padara neiespējamu iepriekš izstrādātās metodikas tiešu izmantošanu. Savukārt sekojošie eksperimenti, kas ietvēra līdzīgas hipotēzes pārbaudi attiecībā uz akcelerometru datu izmantošanu, vismaz daļai eksperimentos izmantoto viedtālrunu bija sekmīgi.

Veicot koncepcijas pārbaudes eksperimentus [38] (skat. attēlu 2.4.), tika iegūti pirmie iespāidi par iekārtas kopumā, kā arī atsevišķu sensoru piemērotību:

1. Ņemot vērā pieejamo skaitļošanas jaudu, akumulatoru ietilpību un dažādās komunikācijas iespējas, viedtālruņi neapšaubami ir piemēroti, lai veiktu atsevišķus specifiskus kolektīvos mērījumus.
2. Ņemot vērā viedtālruņos iebūvēto sensoru īpatnības, kā arī to ierobežoto pieejamību no savas veidotās programmatūras, vismaz pagaidām viedtālruņi būtu uzskatāmi par piemērotiem instrumentiem indikatīvu, nevis precīzu mērījumu veikšanai.



2.4. att. Android viedtālruņi kā mobīlas datu ieguves un apstrādes iekārtas.

2.3. Speciāla pielietojuma iegultu iekārtu izstrāde

2.3.1. Ievads

Sensors ir ierīce, kas paredzēta noteiktu fizikālo mērījumu veikšanai. Tipisks sensora mērījuma rezultāts ir analogs signāls, kurš pēc tam, izmantojot ADC, tiek pārveidots par ciparu signālu un apstrādāts, izmantojot kādu skaitļošanas iekārtu. Nereti ir nepieciešams veikt mērījumus nevis vienā, bet vairākās vietās, līdz ar to nepieciešams konfigurēt, izvietot un apkalpot noteiktu skaitu atsevišķu sensoru. Šādai pieejai – lielāka skaita statistiski izvietotu sensoru izmantošanai ir arī savi trūkumi, jo agrāk vai vēlāk radīsies mērogojamības un uzturēšanas problēmas. Lai novērstu šīs problēmas, lielāku skaitu statistiski izvietotu sensoru var aizvietot ar mazāku skaitu mobilu sensoru. Viens no šādu mobilu sensoru nesējobjektu tipiem ir transporta līdzekļi. Minētie objekti ļauj ne tikai veikt mērījumus salīdzinoši plašā ģeogrāfiskajā apvidū, bet arī iegūt sensora darbībai nepieciešamo enerģiju no nesējobjekta resursiem, kā arī rada mazāk striktus ierobežojumus ierīces izmēriem, svaram un enerģijas patēriņam.

Eksistē vairākas datu kategorijas, kuras var tikt iegūtas, izmantojot transporta līdzekļus kā sensoru nesējobjektus. Pirmkārt, tie ir dati par pašu transporta līdzekli, piemēram, braukšanas

ātrums un pozīcija. Otrkārt, tas ir transporta līdzekļa vadītājs, kuru raksturo tādi parametri kā pulss un reakcijas laiks. Treškārt, tie ir apkārtējās vides mērījumi, piemēram, dati par akustisko un atmosfēras piesārņojumu. Visbeidzot – transporta līdzekļi pārvietojas, izmantojot speciālu infrastruktūru, t.sk. ceļa segumu, kura regulārs monitorings ļauj laicīgi novērtēt tā bojājumu rašanos un līdz ar to optimizēt nepieciešamos uzturēšanas darbus.

Tālākā tekstā aprakstītā iegultā iekārta tika izstrādāta ar mērķi iegūt rīku ceļa seguma monitoringam, izmantojot mikrofonu un akselerometrus, kā arī meteoroloģisko datu ieguvei, kas varētu būt noderīgi detalizētu ceļa meteo informācijas karšu izveidē. Mobilu sensoru platforma iegultas iekārtas veidā ļauj veikt lielāka apjoma eksperimentus, jo to var operatīvi uzstādīt uz dažādiem transporta līdzekļiem un līdz ar to veikt eksperimentus bez tiešas pētnieciskā personāla līdzdalības. Būtisks pamudinājums iegultās iekārtas izstrādei bija iepriekš izstrādātās ceļa seguma monitoringa metodikas, izmantojot vispārēja pielietojuma datortehniku un Android viedtālrunus, kuras aprakstītas promocijas darba 4. un 5. nodaļā, kā arī izaicinājums implementēt šīs metodikas speciāla pielietojuma iegultajā iekārtā.

2.3.2. Literatūras pārskats

Pēc autora rīcībā esošās informācijas, termins „transporta līdzekļu bāzēti sensoru tīkli” (*vehicular sensor networks*) pirmo reizi tika izmantots 2006. gadā, kad Kalifornijas Universitātes (*University of California*) un Boloņas Universitātes (*University of Bologna*) pētnieki deklarēja jaunu sensoru tīklu paradigmu – transporta līdzekļu izmantošanu sensoru nesējobjektu amplitūdā [39]. Šo paradigmu raksturoja salīdzinoši augsta skaitļošanas jauda un iegūto datu glabātuves apjoms, līdz ar to arī tīkla izveides un uzturēšanas izmaksas varētu raksturot kā salīdzinoši augstas. Kā primārie transporta līdzekļu bāzētu sensoru tīklu pielietojumi tika deklarēti dažādi urbānā monitoringa scenāriji, piemēram, ielu attēlu iegūšana, transporta līdzekļu numurzīmju atpazīšana, kā arī noderīgas informācijas nodošana transporta līdzekļu vadītājiem vai policijas darbiniekiem [40]. Citi potenciālie pielietojuma scenāriji, kurus deklarēja citi pētnieki, ietvēra infrastruktūras vienumu, piemēram, ceļa seguma, monitoringu [2], transporta līdzekļu stāvvietu informācijas apkopošanu reālā laikā [41], atmosfēras piesārņojuma mērījumus pilsētas teritorijā [42] un vispārēju mobilo uzraudzību [43].

Papildus komunikācijai starp atsevišķiem transporta līdzekļiem (V2V jeb *vehicle-to-vehicle*) transporta līdzekļu bāzētos sensoru tīklos var tikt realizēta arī komunikācija starp atsevišķiem transporta līdzekļiem un ceļa infrastruktūras vienumiem jeb *Road Side Units* (V2I jeb *vehicle-to-infrastructure*) [44] [45]. Šajā gadījumā sensoru tīkla mezglu skaits var būt salīdzinoši liels, līdz ar to nepieciešams nodrošināt efektīvu katra konkrētā mezgla identifikāciju [46]. Atšķirībā no

tradicionālajiem bezvadu sensoru tīkliem, kur tīkla mezgli ir izvietoti statiski noteiktās vietās, transporta līdzekļu bāzētos sensoru tīklus raksturo dinamiskas tīkla topoloģijas izmaiņas. Līdz ar to optimālu datu pārraidi tīkla ietvaros nosaka optimāli izvēlēts katras atsevišķās datu pārraides ilgums un sniedzamības attālums [47]. Neskatoties uz to, datu ieguvē, izmantojot dinamiskos transporta līdzekļu bāzētos sensoru tīklus, ir jāreķinās ar specifiskām aizturēm, kuru izcelsme var būt saistīta ar datu mūļu (*data mules*) un vairāku lēcienu datu pārsūtīšanas (*multi-hop forwarding*) izmantošanu [48].

Izstrādāto iegulto iekārtu raksturo salīdzinoši zema skaitļošanas jauda un iegūto datu glabātuves apjoms, kas ir raksturīgi tradicionālajiem bezvadu sensoru tīkliem. Šo aspektu kombinācija ar transporta līdzekļiem kā sensoru nesējobjektiem ļauj veikt uzdevumus, kur tīklam, kas sastāv no liela daudzuma sensoru mezglu ar salīdzinoši zemām izveides un izturēšanas izmaksām ir priekšrocības, salīdzinājumā ar tīklu, kas sastāv no maza daudzuma sensoru mezglu ar salīdzinoši augstām izveides un izturēšanas izmaksām.

2.3.3. Tehniskās prasības

Pirms iegultās iekārtas pirmā prototipa izstrādes tika formulētas sekojošas tehniskās prasības:

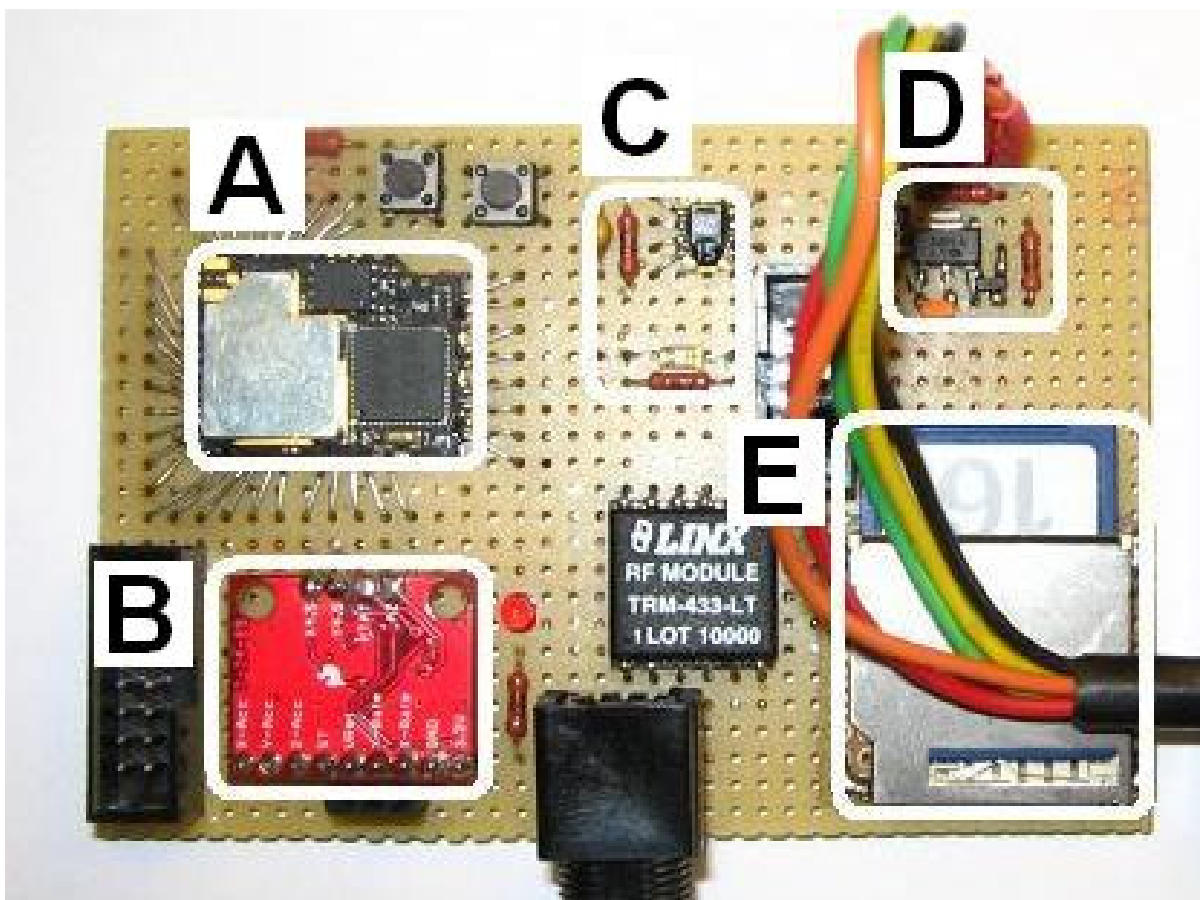
1. Pirmais iegultās iekārtas prototips veidojams uz tāda MCU bāzes, kuru raksturo salīdzinoši zemas izmaksas un salīdzinoši plašs pielietojums tradicionālo bezvadu sensoru tīklu domēnā. Optimāla MCU izvēle katram aprobētajam iegultās iekārtas izmantošanas scenārijam būtu nākošais solis iegultās iekārtas prototipa attīstīšanā. Šis solis, savukārt ir ārpus promocijas darbā aprakstīto pētījumu ietvara.
2. Minimālajai iegultās iekārtas pirmā prototipa sensoru kopai ir jāiekļauj mikrofons, kas ļautu implementēt RoadMic metodiku [49], akselerometri, kas ļautu implementēt Potroid metodiku [50], kā arī atsevišķus meteo sensorus, kas ļautu veikt eksperimentus detalizētu ceļa meteo informācijas karšu izveidē. Papildus ir jānodrošina iespēja pievienot pozīcijas metadatus, izmantojot GPS servisu, kā arī iespēja papildināt jau esošo sensoru kopu ar citiem sensoriem.
3. Iegultās iekārtas pirmā prototipa enerģijas pamatavotam ir jābūt tā nesējobjekta – transporta līdzekļa elektrosistēmai, bet rezerves avotam – iekārtas iekšējām baterijām, nodrošinot automātisku pārslēgšanos starp pamatavotu un rezerves avotu. Iekšējo bateriju automātiska uzlāde un enerģijas ieguve no apkārtējās vides būtu nākošie soļi iegultās iekārtas prototipa attīstīšanā. Šie soļi, savukārt ir ārpus promocijas darbā aprakstīto pētījumu ietvara.
4. Iegultās iekārtas pirmā prototipa iegūto sensoru datu un pozīcijas metadatu saglabāšana veicama, izmantojot datu nesēju, kuru raksturo relatīvi plaša izplatība, ka arī iespēja izņemt to no iegultās iekārtas datu nolasīšanai. Vairāku datu nesēju tipu, kā arī vairāku datu nesēju

vienumu atbalsts būtu nākošie soļi iegultās iekārtas prototipa attīstīšanā. Šie soļi, savukārt ir ārpus promocijas darbā aprakstīto pētījumu ietvara.

5. Iegultās iekārtas pirmā prototipa iegūto sensoru datu un pozīcijas metadatu pārraidīšana veicama, izmantojot komunikācijas kanālu, kuru raksturo relatīvi plaša izplatība. Komunikācijas aparatūras izmantošana citiem scenārijiem, piemēram, mobilai komunikācijas infrastruktūras izpētei, būtu nākošais solis iegultās iekārtas prototipa attīstīšanā. Šis solis, savukārt ir ārpus promocijas darbā aprakstīto pētījumu ietvara.

2.3.4. Implementācija

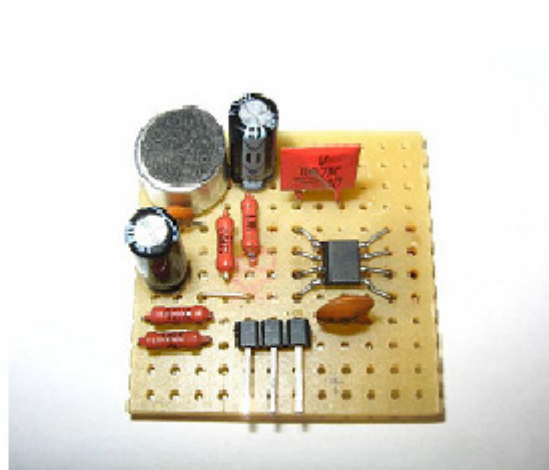
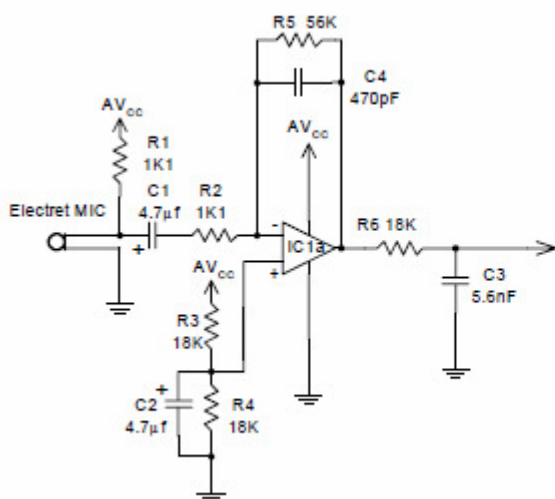
Iegultās iekārtas pirmā prototipa izstrāde tika veikta, izmantojot par pamatu LynxNet kaklasiksnas iekārtas pirmo prototipu. Minētā kaklasiksna tika izstrādāta sadarbībā ar pētniekiem, kuru primārais izpētes objekts ir savvaļas dzīvnieki un to paradumi [51]. Šāda pieeja nodrošināja tūlītēju atsevišķu iepriekš definēto tehnisko prasību izpildi, savukārt abu iekārtu kopējā aparatūras platforma veicināja programmatūras atkalizmantojamību.



2.5. att. Iegultās iekārtas pamatmodulis: A – bezvadu sensoru tīklu modulis Tmote Mini, B – IMU Analog Combo Board, C – sensori SHT15 un TEMT6000, D – sprieguma regulatori, E – SD atmiņas karte.

Iegultās iekārtas pirmā prototipa pamatā ir bezvadu sensoru tīklu mezgls Tmote Mini (skat. attēlu 2.5. – A), kurā ietilpst Texas Instruments mikrokontrolieris MSP430F1611, Texas Instruments/Chipcon 2,4 GHz raidzuvērejs CC2420 un ST pastāvīgā atmiņa M25P80. Identisks mikrokontrolieris tiek izmantots arī citos bezvadu sensoru tīklu mezglos, piemēram, EPIC [52], 3MATE! [53] u.c. Šāda plaši izplatīta mikrokontroliera izvēle ļāva izmantot pieredzi no iepriekšējām aktivitātēm bezvadu sensoru tīklu jomā, kā arī nodrošināja savietojamību ar jau izstrādātu programmatūru.

Lai iegultajā iekārtā būtu iespējams implementēt RoadMic metodiku, pamatmodulis tika papildināts ar papildmoduli, kura sastāvā ietilpa elektrets mikrofons BCM9765P-44 un atbilstoša priekšpastiprinātāja kaskāde uz operācijpastiprinātāja TS952ID bāzes (skat. attēlu 2.6.). Priekšpastiprinātāja izeja ir pievienota mikrokontroliera ADC ieejai #7.

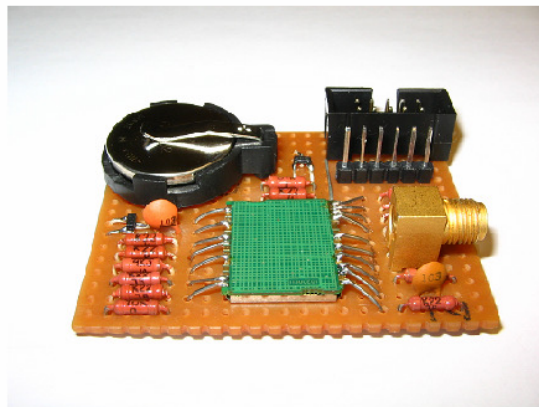
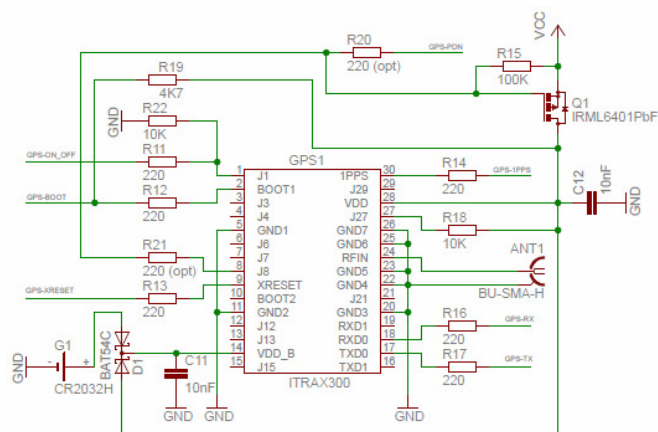


2.6. att. Iegultās iekārtas mikroфона papildmodulis

Lai iegultajā iekārtā būtu iespējams implementēt Potroid metodiku, pamatmodulis tika papildināts ar SparkFun IMU Analog Combo Board (skat. attēlu 2.5. – B), kura sastāvā ietilpa 3-asu akselerometrs ADXL335 un 2-asu žiroskops IDG500. Akselerometra X, Y un Z asu izejas ir pievienotas mikrokontroliera ADC ieejām #0, #1 un #2, bet žiroskopa X un Y izejas - mikrokontroliera ADC ieejām #3 un #4.

Lai nodrošinātu iespēju veikt eksperimentus detalizētu ceļa meteo informācijas karšu izveidē, pamatmodulī tika iekļauts mitruma un temperatūras sensors SHT15, kā arī gaismas sensors TEMT6000 (skat. attēlu 2.5. – C). SHT15 ir pievienots mikrokontrolierim, izmantojot I2C saskarni, bet TEMT6000 – izmantojot ADC ieeju #5. Atmosfēras spiediena sensora SCP1000 iekļaušana būtu nākošais solis iegultās iekārtas prototipa attīstīšanā. Šis solis, savukārt ir ārpus promocijas darbā aprakstīto pētījumu ietvara.

Lai nodrošinātu iespēju pievienot iegūtajiem datiem pozīcijas metadatus, pamatmodulis tika papildināts ar GPS papildmoduli, kura sastāvā ietilpa Fastrax komponents IT300 (skat. attēlu 2.7.). Papildmodulis ir pievienots mikrokontrolierim, izmantojot USART #0 saskarni. Komunikācijai tiek izmantots NMEA protokols. GPS moduļa darbība, izmantojot komunikācijai SiRF protokolu, būtu nākošais solis iegultās iekārtas prototipa attīstīšanā. Šis solis, savukārt ir ārpus promocijas darbā aprakstīto pētījumu ietvara.



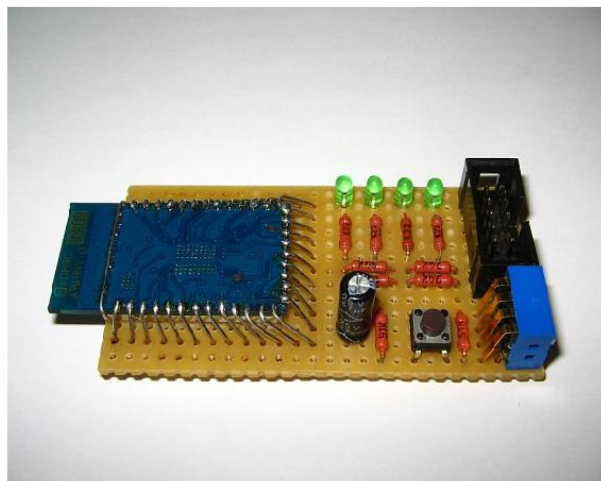
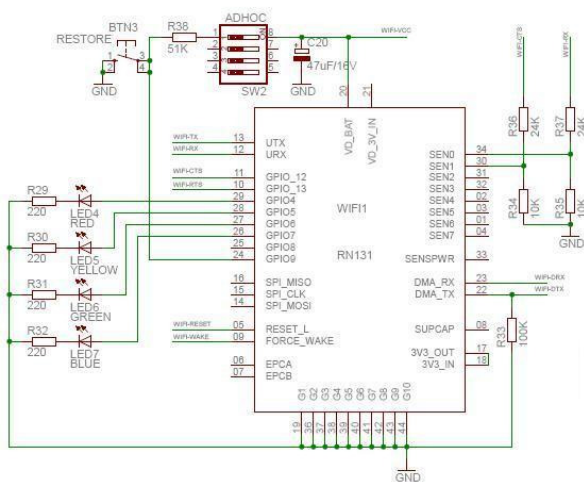
2.7. att. Iegultās iekārtas GPS papildmodulis

Lai nodrošinātu iespēju izmantot transporta līdzekļa elektrosistēmu kā iegultās iekārtas darbībai nepieciešamās enerģijas pamatavotu, tika izmantoti divi secīgi sprieguma regulatori (skat. attēlu 2.5. – D). Pirmais no tiem paredzēts 5V sprieguma, bet otrs – 3,3V sprieguma iegūšanai. Kā rezerves enerģijas avots tiek izmantots bloks no četrām AA tipa baterijām. Automātiska pārslēgšanās starp pamatavotu un rezerves avotu tiek nodrošināta, izmantojot *Schottky* diodes, kuras raksturo mazs sprieguma kritums.

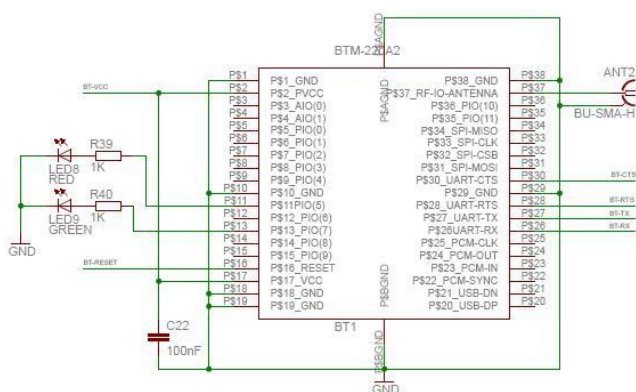
Lai nodrošinātu iespēju saglabāt iegūtos sensoru datus un pozīcijas metadatus, tika izmantota SD tipa atmiņas karte (skat. attēlu 2.5. – E). Datu nesējs ir pievienots mikrokontrolierim SPI režīmā, izmantojot atbilstoši konfigurētu USART #1 saskarni.

Lai nodrošinātu iespēju pārraidīt iegūtos sensoru datus un pozīcijas metadatus, tika izvēlētas divas iespējas. Pirmā iespēja ir Wi-Fi jeb IEEE 802.11b/g standarta bezvadu sakaru tīkli, kura var tikt izmantota vidējas distances komunikācijā, un otrā – Bluetooth, kura var tikt izmantota īsas distances komunikācijā. Wi-Fi komunikācijas aparatūra tika implementēta kā papildmodulis uz Rowing Networks komponenta RN-131C bāzes (skat. attēlu 2.8.), bet Bluetooth komunikācijas aparatūra - kā papildmodulis uz Rayson komponenta BT-220A2 bāzes (skat. attēlu 2.9.). Abi minētie papildmoduļi komunikācijai ar mikrokontrolieri izmanto seriālo saskarni. Iegultās iekārtas prototipēšanas laikā pamatmodulī ietilpstošā mikrokontroliera USART #0 saskarnei vienlaicīgi

iespējams pieslēgt tikai vienu papildmoduli ar seriālo saskarni – GPS, Wi-Fi vai Bluetooth. Saskaņņu komutācija, izmantojot no programmatūras vadāmu multiplexoru, būtu nākošais solis iegultās iekārtas prototipa attīstīšanā. Šis solis, savukārt ir ārpus promocijas darbā aprakstīto pētījumu ietvara.



2.8. att. Iegultās iekārtas Wi-Fi papildmodulis



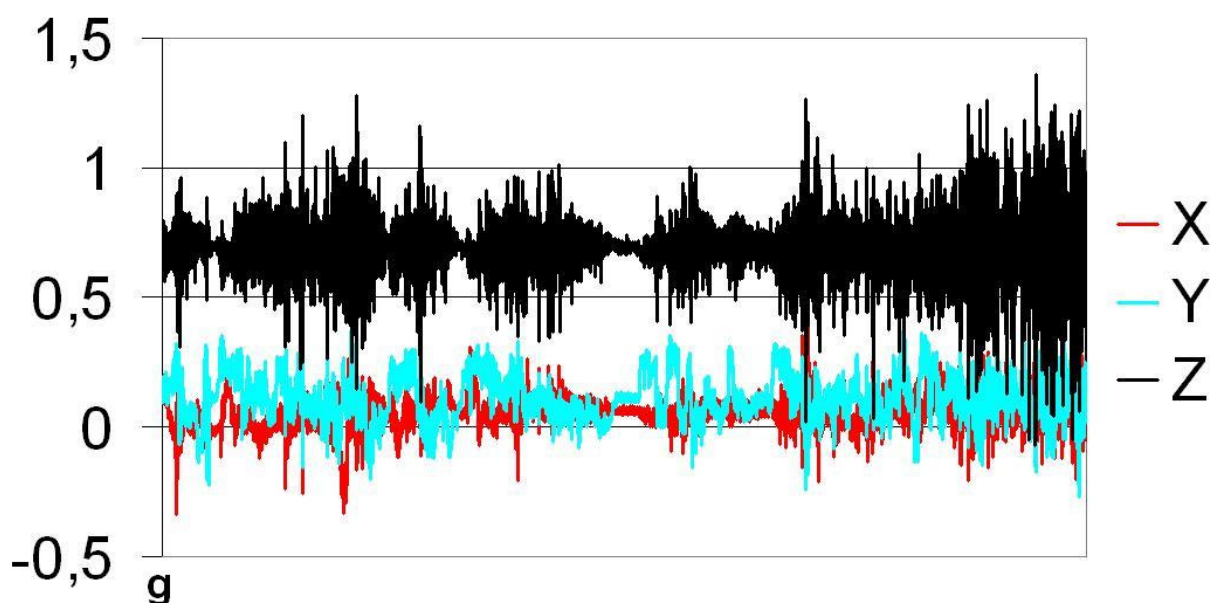
2.9. att. Iegultās iekārtas Bluetooth papildmodulis

2.3.5. Novērtējums

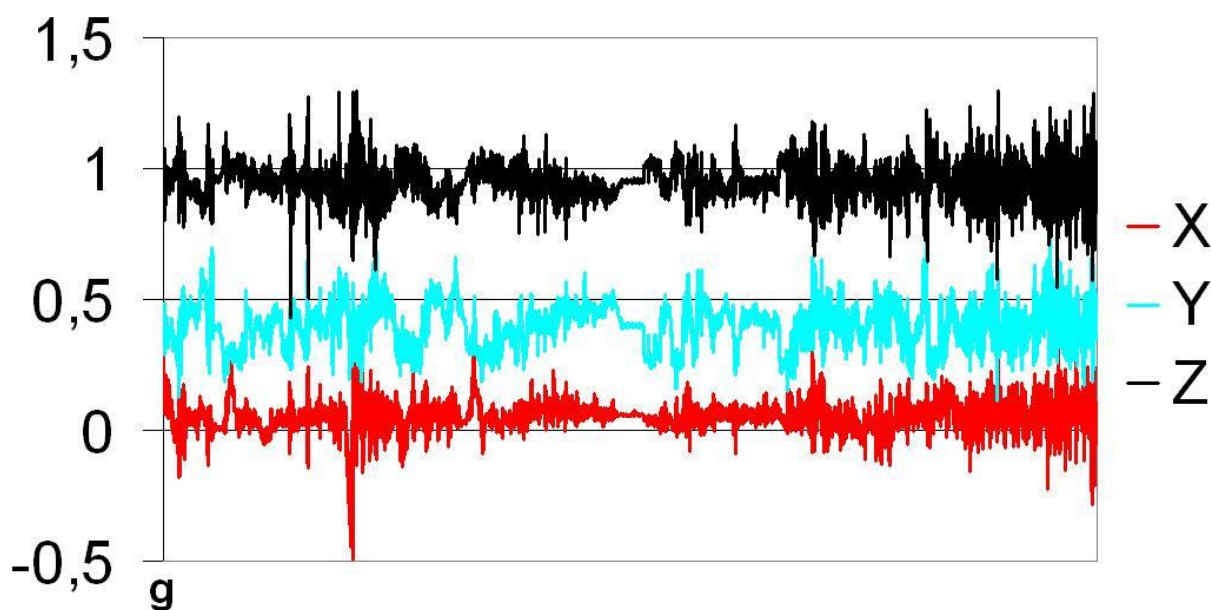
Lai novērtētu izstrādātās iegultās iekārtas atbilstību plānotajam pielietojumam, tika veiktas sekojošas aktivitātes:

1. testa brauciens datu ieguvei, izmantojot izstrādāto iegulto iekārtu un HTC Desire viedtālruni;
2. akselerometru datu ieguve ceļa seguma bojājumu noteikšanai, izmantojot Potroid metodiku;
3. abās izmantotajās iekārtās iegūto akselerometru datu salīdzinošā analīze.

Akselerometru datu ieguve tika veikta 37x sekundē, izmantojot izstrādāto iegulto iekārtu (skat. attēlu 2.10.) un 53x sekundē, izmantojot Android viedtālruni (skat. attēlu 2.11.). Iegūto datu analīze parādīja, ka, ņemot vērā neredzams atšķirīgo datu ieguves iekārtu novietojumu testa brauciena laikā, iegūtie dati ir praktiski identiski, un līdz ar to izstrādātā iegultā iekārta ir piemērota izmantošanai ceļa seguma monitoringam, izmantojot Potroid metodiku. Iegultās iekārtas salīdzinoši labākā jutība akselerometra Z ass kontekstā var tikt uzskatīta par priekšrocību, jo tieši šīs ass vērtības visvairāk ietekmē datu ieguves laikā fiksētie ceļa seguma bojājumi.



2.10. att. Akselerometra dati no izstrādātās iegultās iekārtas (fragments, datu ieguve 37x sekundē).



2.11. att. Akselerometra dati no viedtālruna HTC Desire (fragments, datu ieguve 53x sekundē).

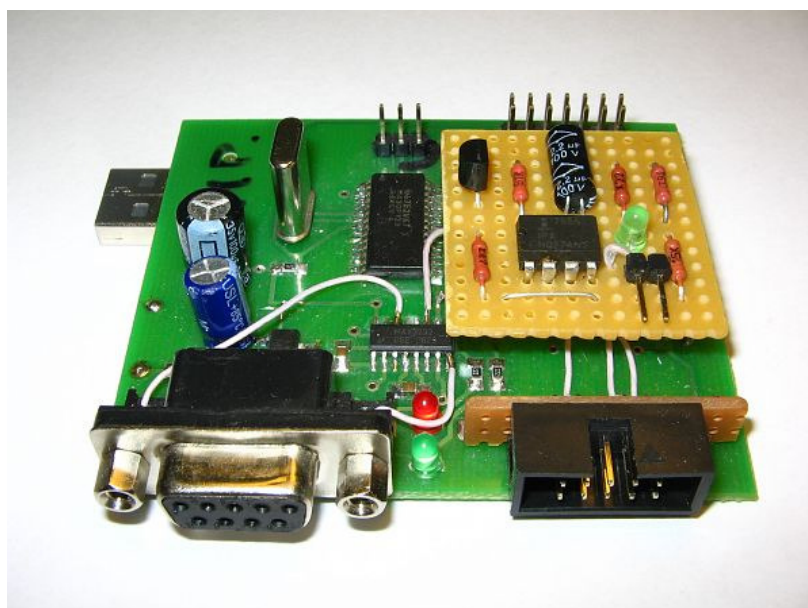
Būtiska izstrādātās iegultās iekārtas priekšrocība pār Android viedtālruni, kas adaptēts atbilstoši Potroid metodikai, un portatīvo datoru, kas adaptēts atbilstoši RoadMic metodikai, ir praktiskā iespēja izmantot transporta līdzekļa elektrosistēmu kā enerģijas pamatavotu darbības nodrošināšanai. Šāda pieeja ļauj veikt ilgstošas datu ieguves un apstrādes sesijas un būtiski samazina sesijas pārtraukuma risku sakarā ar enerģijas trūkumu iekšējā enerģijas avotā.

Promocijas darba 2. nodaļas 3.1-3.5. apakšnodaļās aprakstītā pētījuma rezultāti ir prezentēti konferencē „AICT 2012: The 6th International Conference on Application of Information and Communication Technologies” (Tbilisi, Gruzija, 17-19.10.2012), kā arī publicēti IEEE izdotajā konferences zinātnisko rakstu krājumā (skat. tabulu 9.1.), kas indeksēts SciVerse Scopus un IEEE Xplore Digital Library datubāzēs.

2.3.6. Iegultās iekārtas GCDC sacensību vajadzībām

Piedaloties GCDC sacensību transporta līdzekļa sagatavošanā, autors veica ne tikai 7.nodaļā aprakstītās pozīcijas noteikšanas metodikas izstrādi, bet arī atsevišķus darbus, kas saistīti ar specifisku iegulto iekārtu izstrādi. Neskatoties uz to, ka šīs iegultās iekārtas pagaidām ir izmantotas tikai GCDC sacensību transporta līdzekļa sastāvā, šajā nodaļā tiek iekļauts neliels to apraksts.

Lai nodrošinātu iespēju izmantot GCDC transporta līdzekļa tehniskajā aprīkojumā ietilpstošā datora laika sinhronizācijai GPS signālu, papildus jau esošajam GPS modulim uz Fastrax komponenta IT300 bāzes tika implementēts attēlā 2.12. redzamais 1PPS signāla impulsa formētājs uz Intersil Corporation komponenta ICM7555 bāzes. Signāla formētāja izeja tika pieslēgta datora RS232 saskarnes DCD ieejai.



2.12. att. GCDC sacensību transporta līdzekļa 1PPS signāla formētāja modulis

Turpinot darbus pie GCDC sacensību auto tehniskā aprīkojuma izstrādes, tika implementēta iekārta, kas paredzēta auto akceleratora un bremžu sistēmas vadībai, kā arī nodrošina lietotāja saskarni ar auto vadītāju. Attēlā 2.13. redzamā iekārta sastāv no trim atsevišķiem, savstarpēji saistītiem moduļiem. Katrs no šiem moduļiem ir veidots uz Atmel Corporation mikrokontroliera ATmega328P bāzes, un tā komunikācija ar auto tehniskajā aprīkojumā ietilpstošo datoru notiek, izmantojot USB saskarni, kas veidota uz FTDI Ltd. mikroshēmas FT232RL bāzes. Iekārtas barošana tiek nodrošināta no 12V auto elektrosistēmas, izmantojot atbilstošu sprieguma pārveidotāja mikroshēmu 7805.



2.13. att. GCDC sacensību transporta līdzekļa akceleratora un bremžu sistēmu vadības, kā arī lietotāja saskarnes modulis

Auto akceleratora sistēmas vadība ir implementēta, izmantojot divus mikrokontroliera ADC kanālus, kas veic oriģinālā elektroniskā akceleratora pedāļa izejas spriegumu nolasi. Lai vadītu auto oriģinālo dzinēja vadības bloku, tiek izmantoti divi mikrokontroliera PWM kanāli, kas kopā ar atbilstošām RC ķēdēm nodrošina iespēju formēt nepieciešamos vadības spriegumus. Ja auto vadītājs veic manipulācijas ar akceleratora pedāli, mikrokontrolieris pārslēdzas manuālās braukšanas režīmā un darbojas kā ieejas spriegumu translators. Savukārt, ja auto vadītājs manipulācijas ar akceleratora pedāli neveic, bet tiek saņemtas komandas no datora, mikrokontrolieris pārslēdzas automātiskās braukšanas režīmā, PWM kanālu izejās tiek formēti un uz auto oriģinālo dzinēja vadības bloku tiek padoti šīm komandām atbilstošie vadības spriegumi.

Auto bremžu sistēmas vadība ir implementēta, izmantojot četrus lielas jaudas komutācijas tranzistorus, kas ļauj vadīt trīs pneimatiskās sistēmas vārstus, kā arī kompresora komutācijas releju. Divi mikrokontroliera ADC kanāli tiek izmantoti, lai kontrolētu spiedienu atsevišķos pneimatiskās sistēmas komponentos, savukārt pa vienam ADC kanālam rezervēts oriģinālā bremžu pedāļa pozīcijas kontrolei un sensoram, kas ļauj noteikt, vai auto vadītājs veic manuālu oriģinālā bremžu

pedāļa nospiešanu. Viens mikrokontroliera digitālais kanāls tiek izmantots, lai fiksētu, vai oriģinālais bremžu pedālis atrodas nospiebtā vai atlaistā stāvoklī.

Lietotāja saskarne ar auto vadītāju ir izveidota, izmantojot četras pogas un 13 gaismas diodes. Tā nodrošina sekojošu funkcionalitāti:

1. četru sistēmas moduļu (akselerators, bremzes, IMU un GPS) statusa vizuālo indikāciju;
2. sistēmas režīma (automātiskā/manuālā braukšana) kontroli un vizuālo indikāciju;
3. sistēmas piespiedu pāreju manuālās braukšanas režīmā;
4. auto tehniskajā aprīkojumā ietilpstošā UPS bloka attālinātu ieslēgšanu un izslēgšanu;
5. auto tehniskajā aprīkojumā ietilpstošā datora attālinātu ieslēgšanu un izslēgšanu.

Auto tehniskajā aprīkojumā ietilpstošajiem UPS blokam un datoram tika veiktas attēlā 2.14 redzamās modifikācijas, kas nodrošina iespēju veikt to attālinātu ieslēgšanu un izslēgšanu.



2.14. att. GCDC sacensību transporta līdzekļa UPS bloka un datora modifikācijas.

3. PIEDZĪVOJUMU SACĪKŠU NORISES KONTROLE, IZMANTOJOT BEZVADU SENSORU TĪKLUS

Šajā nodaļā autors sniegs pārskatu par izstrādāto piedzīvojumu sacīkšu norises kontroles sistēmu, kas bāzēta uz bezvadu sensoru tīklu mezgliem. Vispirms tiks aplūkoti atsevišķi eksistējošie bezvadu sensoru tīklu un klasisko orientēšanās sacīkšu kontroles risinājumi, pēc tam iztirzātas sistēmas implementācijai noteiktās prasības un izvēlētais sistēmas konceptuālais modelis. Nodaļas nobeigumā atrodams sistēmas implementācijas apraksts, kas ietver specifiskus aparatūras adaptācijas un programmatūras izstrādes darbus.

Aprakstītā pētījuma tēma nav tiešā veidā saistīta ar promocijas darba pamata tēmu. Tās izvēle un sekojošā pētījuma izstrāde ir saistīta ar nepieciešamību apgūt bezvadu sensoru tīklu tehnoloģijas un izvērtēt to piemērotību promocijas darba pamata tēmas izstrādē. Neskatoties uz to, izstrādātā sistēma var rast pielietojumu arī ar transportu saistītās jomās, piemēram, piedzīvojumu sacīkstēs, kur distance vai daļa no tās tiek veikta, izmantojot noteiktus transporta līdzekļus.

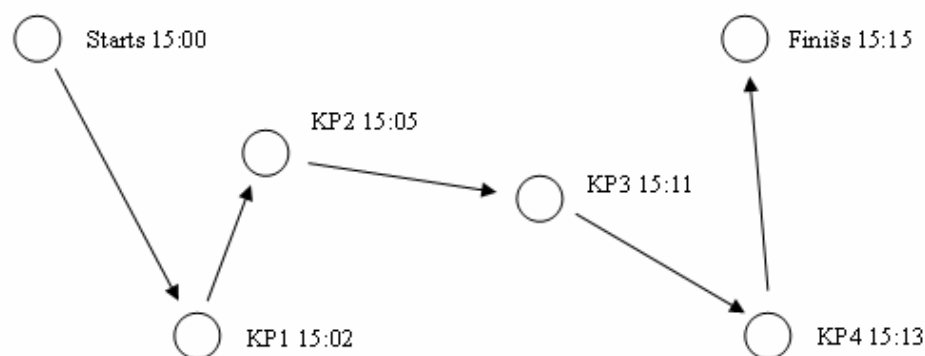
3.1. Ievads

Informācijas un komunikāciju tehnoloģiju attīstību pēdējos piecpadsmit gados raksturo arvien plašākais dažādu bezvadu risinājumu pielietojums. Kā populārāko un plašāk zināmo piemēru var minēt publiskos mobilo sakaru tīklus, kuru abonētu skaitam ir tendence sasniegt un pat pārsniegt fiksēto sakaru tīklu abonētu skaitu. Līdzīga attīstība notiek arī Interneta pieslēgumu segmentā, kur arvien vairāk abonētu izvēlas bezvadu pieeju Internetam. Protams, bezvadu tehnoloģiju attīstība notiek arī citos virzienos. Viens no šādiem perspektīviem virzieniem, kas ir attīstījies pēdējo piecu gadu laikā, ir bezvadu sensoru tīkli, kuru primārie uzdevumi ir kontrole, kā arī datu vākšana un sākotnējā apstrāde [54]. Bezvadu sensoru tīklu praktiskais pielietojums ir visnotaļ plašs – tos izmanto gan zooloģiskiem, seismoloģiskiem utml. apkārtējās vides novērojumiem, gan arī tādiem specifiskiem mērķiem kā militārās tehnikas pārvietošanās fiksēšana un snaiperu lokalizācija [55]. Šādos tīklos izmantoto aparatūru raksturo nelieli izmēri un mazs enerģijas patēriņš, līdz ar to paveras iespēja veidot mobilus risinājumus arī citās nozarēs, kur šobrīd bezvadu tehnoloģiju izmantošana vēl nav tik populāra.

3.2. Orientēšanās uzdevums

Klasisko orientēšanās sacensību laikā veicamo uzdevumu (skat. attēlu 3.1.) var formulēt sekojoši:

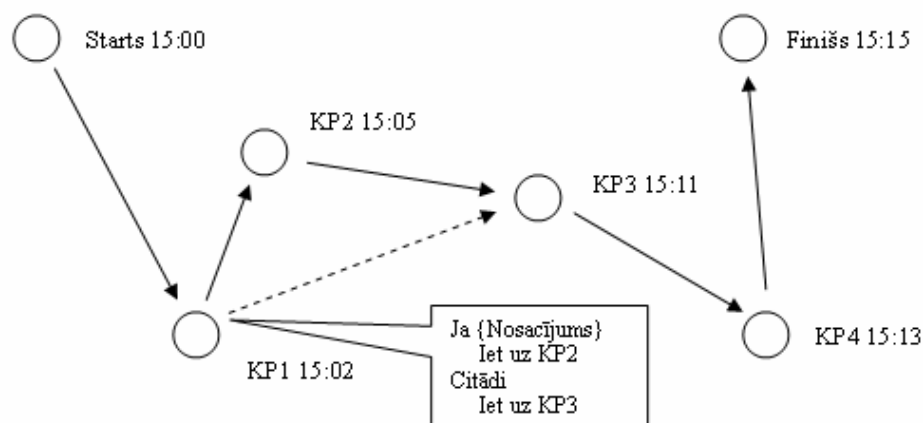
1. sacensību dalībnieks veic noteiktu, fiksētu garuma distanci;
2. sacensību dalībnieks atzīmējas distancē izvietotajos kontrolpunktos;
3. tiek fiksēts distances veikšanai patērētais laiks.



3.1. att. Klasisko orientēšanās sacensību uzdevums

Piedzīvojumu sacīkšu laikā veicamo orientēšanās uzdevumu (skat. attēlu 3.2.) var formulēt sekojoši:

1. sacensību dalībnieks veic distanci, kuras konfigurācija ir atkarīga no dalībnieka jau veiktās distances daļas;
2. sacensību dalībnieks atzīmējas distancē izvietotajos kontrolpunktos, saņemot informāciju par to, kādā secībā veicama turpmākā distances daļa;
3. tiek fiksēts distances veikšanai patērētais laiks.



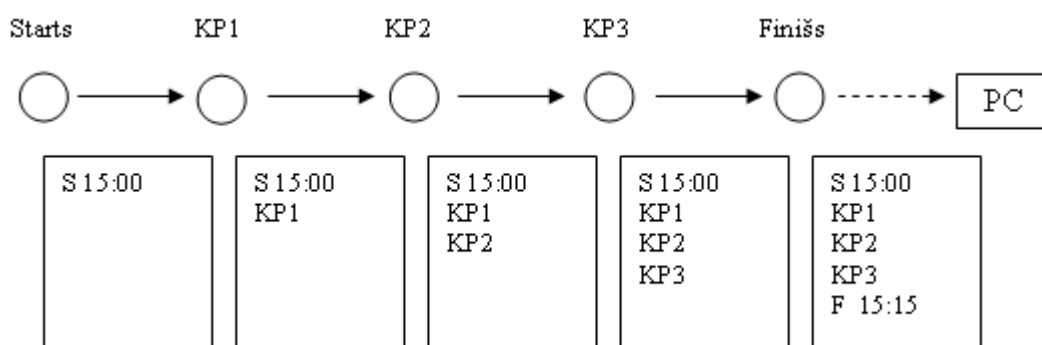
3.2. att. Piedzīvojumu sacīkšu orientēšanās uzdevums

Lai kontrolētu klasisko orientēšanās sacensību norisi, ir nepieciešams veids, kā fiksēt sacensību dalībnieka kontrolpunktu apmeklējumus. Šim nolūkam tiek izmantotas multi-aģentu sistēmas, kuras sastāv no divu klašu mobilajiem aģentiem:

1. kontrolpunktu mobilie aģenti (KPMA) – aprīkojums, kas pirms sacensību sākuma tiek izvietots apmeklējamajos kontrolpunktos;
2. sacensību dalībnieku mobilie aģenti (SDMA) – ekipējums, ar ko sacensību dalībnieki tiek apgādāti uz distances veikšanas laiku.

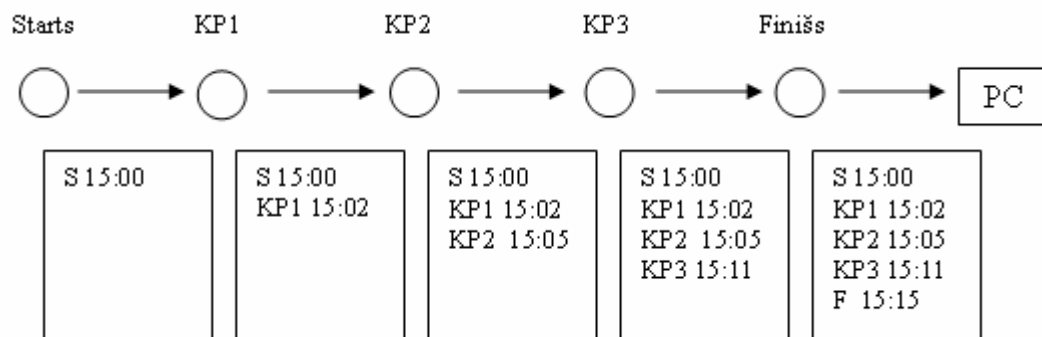
Mobilo multi-aģentu sistēmas var būt:

1. mehāniskas (skat. attēlu 3.3.):
 - 1.1. kontrolpunktā novietotas paroleles norakstīšana dalībnieka kontrolkartiņā;
 - 1.2. dalībnieka kontrolkartiņas kompostrēšana ar kontrolpunktā novietotu kompostieri;



3.3. att. Mehāniskas mobilo aģentu sistēmas funkcionālā shēma

2. elektroniskas (skat. attēlu 3.4.):
 - 2.1. Emit [56];
 - 2.2. SportIdent [57].



3.4. att. Elektroniskas mobilo aģentu sistēmas funkcionālā shēma

Informācijas apjoms par sacensību norisi, kā arī tās pieejamība ir tiešā veidā atkarīgi no izmantotā mobilo multi-aģentu sistēmas tehniskā risinājuma (skat. tabulu 3.1.).

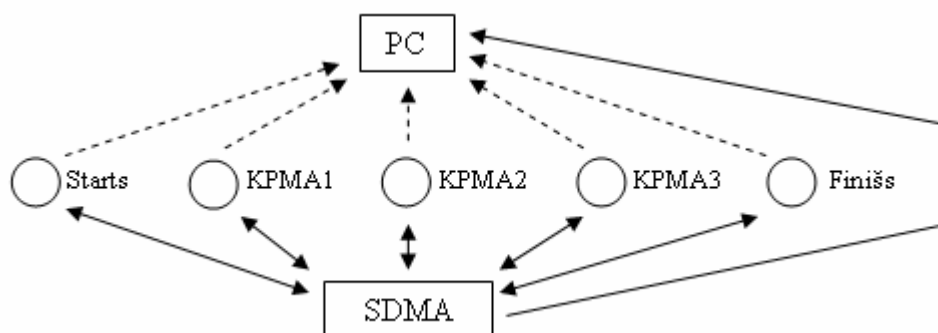
3.1. tabula

Eksistējošo kontroles iekārtu funkcionalitātes salīdzinājums

	<i>Mehāniskās kontroles iekārtas</i>		<i>Elektroniskās kontroles iekārtas</i>	
	<i>KPMA</i>	<i>SDMA</i>	<i>KPMA</i>	<i>SDMA</i>
<i>Kontrolpunkta apmeklējuma fakts</i>	-	+	+	+
<i>Kontrolpunkta apmeklējuma laiks</i>	-	-	+	+
<i>Datu pieejamība tiešsaistes režīmā</i>	-	-	+*	-

* tikai ar papildus aparatūras risinājumu

Analizējot tabulā apkopoto informāciju, autors nonāca pie secinājuma, ka atsevišķas eksistējošās mobilo multi-aģentu sistēmas ļauj saņemt datus par kontrolpunktu apmeklējumu tiešsaistes režīmā, un šāda funkcionalitāte ir pietiekama klasisko orientēšanās sacensību kontrolei. Diemžēl piedzīvojumu sacensībām raksturīgo orientēšanās uzdevumu dinamiski mainīgo distances konfigurāciju eksistējošās mobilās multi-aģentu sistēmas nenodrošina, jo kontrolpunktu apmeklējumu datu apstrādi un lēmuma pieņemšanu par tālāk veicamā uzdevuma saturu nav iespējams veikt. Tam par iemeslu ir eksistējošo sistēmu datu plūsmas (skat. attēlu 3.5.), kuras neparedz informācijas apstrādi un atgriezenisko saiti tiešsaistes režīmā.



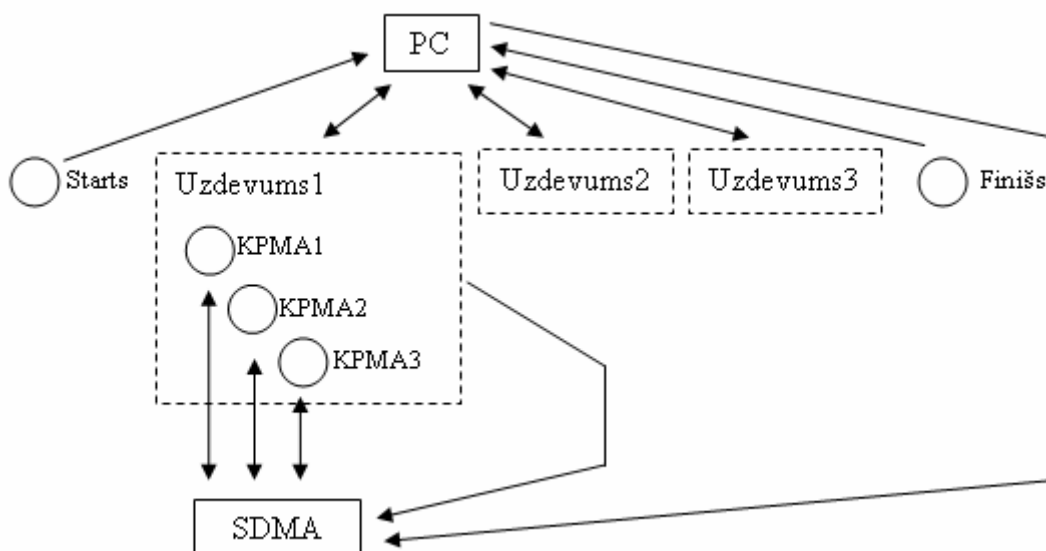
3.5. att. Eksistējošo mobilo multi-aģentu sistēmu datu plūsmu shēma

3.3. Piedzīvojumu sacīkšu kontroles sistēma

Projektējot piedzīvojumu sacīkšu kontroles sistēmu, tika izvirzīts mērķis novērst esošo mobilo multi-aģentu sistēmu trūkumus un pievienot trūkstošo funkcionalitāti:

1. KPMA identificē konkrēto sacīkšu dalībnieku un ir informēts par dalībnieka līdzi šim paveikto;
2. atkarībā no līdzi šim veiktās distances daļas sacīkšu dalībnieks saņem instrukcijas tālākajai distances veikšanai;
3. par noteiktu sacīkšu uzdevumu paveikšanu informācija tiešsaistes režīmā nonāk pie sacīkšu organizatoriem.

Ņemot vērā minētās prasības, tika izstrādāta jauna datu plūsmu shēma (skat. attēlu 2.6.), kā arī analizēts, kādi aparatūras un programmatūras vienumi būtu izmantojami konceptuālā risinājuma praktiskajā implementācijā (skat. tabulu 2.2.).



3.6. att. Piedzīvojumu sacīkšu kontroles sistēmas datu plūsmu shēma

3.2. tabula

Piedzīvojumu sacīkšu kontroles sistēmas konceptuālais tehniskais risinājums

Komponents	Risinājums
Uzdevuma kontroli veicošās KPMA iekārtas	Bezvadu sensoru tīkls + mobilais telefons
SDMA iekārta	Bezvadu sensoru tīkla mezgls + mobilais telefons
Interfeisi PC-Uzdevums, PC-SDMA, Uzdevums-SDMA	GSM SMS

3.4. Implementācija

Piedzīvojumu sacīkšu kontroles sistēmas konceptuālais tehniskais risinājums tika realizēts, uzbūvējot vienkāršotu sistēmas aparatūras un programmatūras modeli, kurš tika praktiski izmantots sabiedriskās organizācijas Autoliste pasākuma Autochase: eVocation norises kontrolē 2008. gada 24. maijā.

Sistēmas aparatūras risinājums tika veidots, izmantojot bezvadu sensoru tīklu mezglus Tmote Sky [58], kurus raksturo sekojoši tehniskie parametri:

1. 250kbps 2.4GHz IEEE 802.15.4 Chipcon Wireless Transceiver;
2. 8MHz Texas Instruments MSP430 microcontroller (10k RAM, 48k Flash);
3. Integrated onboard antenna with 50m range indoors / 125m range outdoors.

Lai nodrošinātu bezvadu sensoru mezglu darbību lauka apstākļos, konstrukcija tika ievietota hermētiskā platmasas konteinerā (skat. attēlu 2.7.).



3.7. att. KPMA iekārta uz bezvadu sensoru mezgla Tmote Sky bāzes

Sistēmas programmatūras risinājums tika veidots, izmantojot speciāli bezvadu sensoru tīkliem paredzēto operētājsistēmu TinyOS, kuras būtiskākā iezīme ir balstīšanās uz notikumiem [59]. Programmas kods tika rakstīts programmēšanas valodā nesC, kura sintaktiski ir radniecīga valodai C, taču satur arī specifiskus, tieši bezvadu sensoru tīklu programmām raksturīgus elementus [60]. Kā izstrādes vide tika izmantota Cygwin. Iepriekš minētā vienkāršotā sistēmas modeļa vajadzībām tika uzrakstītas programmas AutolisteSlave un AutolisteMaster (skat. 1.pielikumu), kuru izpildāmā koda apjoms bija attiecīgi 27KB un 26KB.

3.5. Secinājumi

Bezvadu sensoru tīklus ir iespējams izmantot, lai risinātu sekojoša veida uzdevumus:

1. datu apkopošana par tīkla darbības zonā fiksētiem notikumiem;
2. lēmuma pieņemšana un izpilde, balstoties tikai uz tīklā pieejamiem datiem;
3. datu nosūtīšana uz centralizētu serveri tālākai apstrādei, ar iespēju saņemt izpildei tajā pieņemtu lēmumu;
4. datu pārsūtīšana starp dažādiem tīkliem, izmantojot mobilus bezvadu sensoru tīklu mezglus, kas pārvietojas vairāku tīklu darbības zonās.

Promocijas darba 3. nodaļā aprakstītā pētījuma rezultāti ir prezentēti Daugavpils Universitātes 50. starptautiskajā zinātniskajā konferencē (Daugavpils, Latvija, 16.05.2008), kā arī publicēti Daugavpils Universitātes izdotajā konferences zinātnisko rakstu krājumā (skat. tabulu 9.1.).

4. CEĻA SEGUMA MONITORINGS, IZMANTOJOT MOBILUS SENSORU TĪKLUS AR MIKROFONIEM

Šajā nodaļā autors sniegs pārskatu par izstrādāto ceļa seguma monitoringa metodiku, kas bāzēta uz mobiliem sensoru tīkliem ar mikrofoniem. Vispirms tiks aplūkotas statistiku un mobilo sensoru tīklu iespējas un atsevišķi eksistējošie mobilo sensoru tīklu risinājumi, pēc tam iztirzātas metodikas implementācijai noteiktās tehniskās prasības un izvēlētais datu ieguves un apstrādes algoritms. Nodaļas nobeigumā atrodams metodikas novērtējums, kas balstīts uz reāli veiktiem datu ieguves un apstrādes eksperimentiem.

4.1. Ievads

Sensoru tīklus, kuri ir uzstādīti uz transporta līdzekļiem, raksturo salīdzinoši mazāka atkarība no pieejamiem enerģijas, atmiņas un skaitļošanas jaudas resursiem – ierobežojumiem, kuri ir raksturīgi tradicionālajiem bezvadu sensoru tīkliem un to autonomus enerģijas avotus izmantojošiem mezgliem. Šis aspekts ļauj veidot resursu prasīgākus risinājumus. Būtisku lomu spēlē arī atsevišķu sensoru tīklu mezglu mobilitāte, kas ļauj iegūt datus par apjomīgāku ģeogrāfisko teritoriju, tajā pat laikā samazinot nepieciešamo sensoru tīklu mezglu skaitu un datu ieguvei nepieciešamo laiku. Protams, jāņem vērā arī mobilo sensoru tīklu mezglu ietekme uz iegūtajiem datiem. Salīdzinot ar zināmās vietās statistiski izvietotiem sensoru tīklu mezgliem, mobilo sensoru tīklu mezglu izmantošana ir saistīta ar nepieciešamību noteikt sensoru tīklu mezgla aktuālo atrašanās vietu, kā arī potenciāli augstākiem trokšņu līmeņiem un plašākiem derīgo signālu vērtību diapazoniem. Līdz ar to augstākas prasības tiek izvirzītas arī šādā veida iegūto datu apstrādei.

Šāda, uz mobilo sensoru tīklu bāzes veidota sistēma var veikt skaņas ierakstu, izmantojot mobilus mikrofonus. Analizējot iegūtos skaņas datu ierakstus, iespējams veidot apvidus akustiskā piesārņojuma kartes [61], kā arī detektēt noteikta veida notikumus, piemēram, ceļa seguma bojājumus, ar attiecīgu skaņas signālu aprīkota operatīvā transporta līdzekļa tuvošanos, kā arī veikt kopējās satiksmes intensitātes mērījumus. Sākotnēji šādu sistēmu varētu izmantot entuziastisku autovadītāju kopiena, bet pielietojumu būtu iespējams paplašināt, piesaistot noteikta veida sabiedriskos transporta līdzekļus, piemēram, satiksmes autobusus un taksometrus. Līdz ar to sistēmā izmantotajai aparatūrai jābūt salīdzinoši viegli pieejamai, t.sk. iegādes un uzturēšanas izmaksu ziņā. Jau šobrīd eksistē Tīmekļa vietnes, kuras paredzētas ceļa seguma bojājumu informācijas reģistrēšanai, piemēram, `potholes.co.uk` [62]. Šāda, ar mobiliem mikrofoniem aprīkota sistēma būtu piemērots datu ieguves avots minētā veida Tīmekļa vietnēm.

Lai noskaidrotu, vai koncepcija par šādas sistēmas izveides iespējamību ir reāla, nepieciešams pārbaudīt sekojošu hipotēzi – vai braucošā transporta līdzeklī ar parastu elektretu mikrofonu veikts skaņas ieraksts ir pietiekams, lai pēc tā analīzes iegūto datu kvalitāte ļautu detektēt ceļa seguma bojājumus un uz šīs metodikas bāzes izveidot mobilu sensoru tīklu. Turklāt jāņem vērā arī šāda risinājuma vispārināšanas iespēja – izmantojot atšķirīgus sensorus un atšķirīgus datu apstrādes algoritmus, pastāv iespēja adaptēt sistēmu arī citu, atšķirīgu notikumu detektēšanai. Protams, nepieciešams veikt arī izstrādātās metodikas veiktspējas un precizitātes novērtējumu.

4.2.Literatūras pārskats

Eksistē eksperimenti, kuru laikā tikuši veikti mērījumi ar mobiliem, t.sk. uz noteikta veida transporta līdzekļiem uzstādītiem sensoriem. Daļā no šiem eksperimentiem kā skaņas signāla sensori ir tikuši izmantoti mikrofoni.

Kā vienu no piemēriem var minēt Dartmutas Koledžā izstrādāto SoundSense sistēmu [63], kurā notikumu detektēšanai tiek izmantota skaņas signālu analīzes programma mobilajiem telefoniem. Tiesa, šīs programmas funkcionalitāte nav paredzēta ar transporta līdzekļiem saistītu notikumu detektēšanai.

Cita šajā pat organizācijā izstrādātā sistēma, BikeNet [64], ir paredzēta, lai iegūtu datus par velosipēdistu veikto maršrutu raksturlielumiem, piemēram, gaisa piesārņojumu noteiktos maršruta posmos. Šīs sistēmas sensoru aprīkojumā ietilpst arī mikrofoni, kuri tiek izmantoti, lai fiksētu apkārtnējās vides akustiskā fona līmeni. Atšķirībā no BikeNet sistēmas funkcionalitātes, izstrādājamā ceļa seguma monitoringa metodikā būs nepieciešams iekļaut sarežģītāku iegūto skaņas signālu datu apstrādi.

Nericell sistēma [65] ir paredzēta darbināšanai mobilajos telefonos, un tajā ir realizēta tādu notikumu detektēšana, kā transporta līdzekļa bremsēšana, skaņas signāla darbināšana un ceļa seguma bojājumu lokalizācija. Skaņas signālu dati tiek izmantoti transporta līdzekļu skaņas signālu darbināšanas detektēšanai, bet ceļa seguma bojājumu lokalizācijai tiek izmantoti dati no citiem sensoriem.

Pothole Patrol sistēma [2] ir veidota kā iegulta iekārta ceļa seguma bojājumu detektēšanai un šīs informācijas tālākai pārraidei. Sistēma ir salīdzinoši komplicēta, tajā tiek izmantoti iegulti datori un specifiski sensori – akselerometri, GPS uztvērējs, kā arī Wi-Fi saskarne. Vienkārši sensori, kā parasts elektretu mikrofons, sistēmas sastāvā netiek izmantoti.

Orientējoties uz vispārināma mobilu sensoru tīklu risinājumu izstrādi, nepieciešams apzināties, ka vienkārša skaņas ieraksta veikšana ar sekojošu iegūto datu sliekšņošanu nav uzskatāma par universālu visaptverošu risinājumu. Orientējoties uz atšķirīgiem sensoru veidiem,

kas atbilstu atšķirīgiem detektējamo notikumu tipiem, kļūst skaidrs, ka Nericell sistēmā izmantotā pieeja ar mobilo telefonu kā datu ieguves un apstrādes iekārtu būtiski ierobežo risinājuma vispārīgās iespējas. Piemēram, mobilo telefonu konstrukcijā ir paredzēta skaņas signālu apstrāde, kuras mērķis ir samazināt apkārtējo trokšņu līmeni un uzlabot dzirdamību. Savukārt, gadījumā, kad mobilā telefona mikrofons tiek izmantots kā skaņas signāla sensors, šāda skaņas signālu apstrāde var kļūt par datu kvalitāti ierobežojošo faktoru.

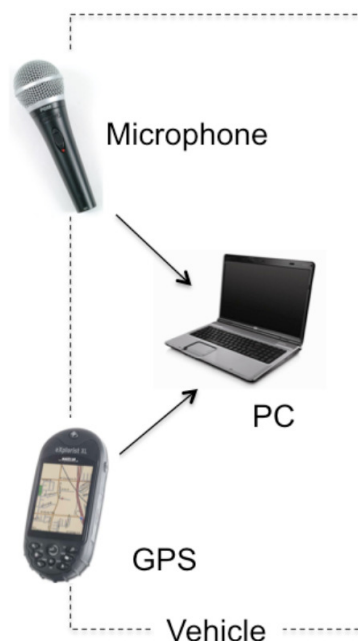
4.3. Eksperimentu apraksts

Kā pirmais darbs pirms eksperimentu uzsākšanas tika formulētas tehniskās prasības, kas būtu par pamatu mobilas sensoru tīklu sistēmas izstrādei. Prasību formulēšanā liela loma bija praktiskajam aspektam, lai sistēma būtu potenciāli pievilcīga plašai lietotāju kopienai:

1. Zemas izveides un uzturēšanas izmaksas. Specifisku sensoru un iegultu datu apstrādes sistēmu, kā arī mobilo sakaru izmantošana datu ieguvei, apstrādei un reālā laika pārraidei nav paredzēta.
2. Izmantoto aparatūras vienumu pieejamība. Sistēmā izmantojami komponenti, kurus iespējams iegādāties parastā sadzīves elektronikas vai elektronisko komponentu veikalā.
3. Sistēmas potenciālajiem lietotājiem nav nepieciešamas specifiskas programmēšanas un datoru administrēšanas prasmes.
4. Iegūto datu saglabāšana, izmantojot parastu personālo datoru. Kā alternatīva datu ieguves un saglabāšanas iekārta varētu būt mobilais telefons ar atbilstošiem aparatūras un programmatūras resursiem. Pašreizējā situācijā optimālais iekārtas veids varētu būt portatīvais dators. Pieļaujama arī iegulto iekārtu izmantošana, ja vien uz tām ir iespējams darbināt savietojamu operētājsistēmu.
5. Plašs izmantojamo sensoru diapazons, kurš neaprobežojas tikai ar mikrofoniem. Saskarnes starp sensoriem un personālo datoru netiek specificētas.
6. Programmatūras platformas neatkarība. Nepieciešams nodrošināt savietojamību ar populārākajām personālo datoru operētājsistēmām, piemēram, Windows, Linux un MacOS.
7. Sistēmai ir jāspēj darboties apstākļos, kuros sastopams lietus, sniegs un vējš. Darbība ekstrēmos apstākļos, piemēram, viesuļvētrā vai zem ūdens, nav nepieciešama.
8. Sistēmai ir jānodrošina iegūto datu ģeomarķēšanas funkcionalitāte, līdz ar to nepieciešams iekļaut saskarni ar kādu no eksistējošajiem lokalizācijas servisiem.
9. Sistēmai ir jābūt spējīgai iegūt, uzglabāt un apstrādāt ievērojumu datu daudzumu, kas noteiktos gadījumos var būt arī vairāku GB apjomā. Lai arī skaņas dati, kas iegūti, izmantojot salīdzinoši zemas iztveršanas frekvences, neprasa šāda apjoma atmiņas resursus, jāņem vērā, ka tālākā sistēmas attīstības gaitā var tikt izmantoti arī sensori, kurus raksturo daudz augstāks iegūto datu

apjoms, piemēram, video kameras. Līdz ar to tādi atmiņas resursi kā ārējas atmiņas kartes ar salīdzinoši nelielu ietilpību nav piemēroti izmantošanai sistēmas sastāvā kā vienīgais datu saglabāšanas resurss.

Balstoties uz formulētajām tehniskajām prasībām, tika veikta mobilas sensoru tīklu sistēmas arhitektūras (skat. attēlu 4.1.) izstrāde. Vienīgais pašlaik izmantotais sensors ir mikrofons, bet ir pieļaujama sistēmas papildināšana ar citiem sensoriem. GPS uztvērējs un mikrofons ir pieslēgti personālajam datoram. Visi minētie sistēmas komponenti ir novietoti transporta līdzekļa iekšienē, bet iespējama arī sensoru un GPS uztvērēja uzstādīšana transporta līdzekļa ārpusē. GPS uztvērēja izmantošana transporta līdzekļa lokalizācijas vajadzībām ir skaidrojama ar optimālu izmaksu un pieejamības attiecību.



4.1. att. Mobilas sensoru tīklu sistēmas arhitektūra

Lai veiktu lokācijas un laika bāzētu notikumu detektēšanu, analizējot braucošā transporta līdzeklī veiktu skaņas ieraktu, tika izveidots sekojošs algoritms:

1. Tiek veikts sinhrons skaņas un veiktā ceļa GPS pozīciju ieraksts.
2. Tiek veikta GPS pozīciju interpolācija, lai noteiktu transporta līdzekļa atrašanās vietu starp divām secīgām, ik pēc sekundes noteiktām GPS pozīcijām.
3. Tiek veikta skaņas ieraksta pārdiskretizācija ar zemāku iztveršanas frekvenci. Šāda veidā tiek samazināts saglabājamo datu apjoms.
4. Attiecīgajiem skaņas ieraksta fragmentiem tiek piesaistītas ģeogrāfiskās koordinātes, kuras atbilst nevis punktiem, bet nelieliem ģeogrāfiskajiem apvidiem.

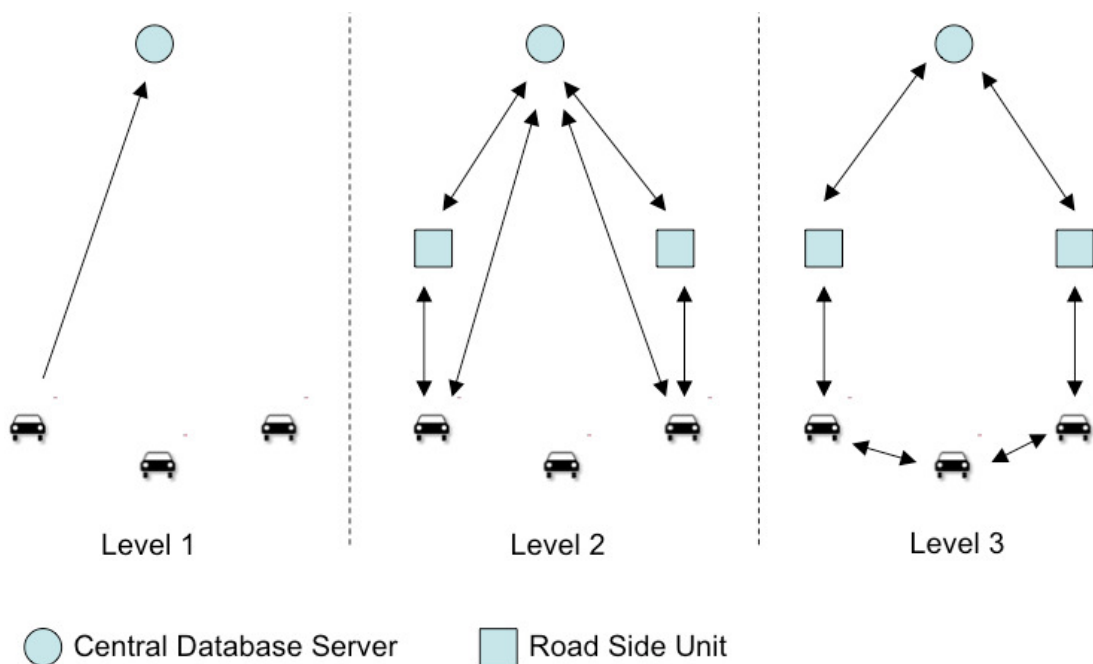
5. Izmantojot DSP metodes, tiek veikta notikumu detektēšana katram ģeogrāfiskajam apvidum. Metodes izvēle ir atkarīga no meklējamo notikumu tipa.

Veicot ceļa seguma bojājumu detektēšanu, tika izmantoti sekojoši parametri:

1. Skaņas signālu iztveršana ar frekvenci 200 Hz.
2. Slietkšņošana kā ceļa seguma bojājumu detektēšanas funkcija.

Veicot izstrādājamās ceļa seguma monitoringa metodikas koncepcijas pārbaudes testa braucienus, tika izmantota skaņas signāla iztveršana ar frekvenci 96 kHz. Analizējot iegūtos skaņas signāla datus, tika konstatēts, ka ceļa seguma bojājumus raksturo zemo frekvenču svārstības diapazonā līdz 100 Hz. Līdz ar to ceļa seguma bojājumu detektēšanu būtu iespējams veikt, samazinot skaņas signāla iztveršanas frekvenci līdz 200 Hz. Šādā veidā ir iespējams arī būtiski samazināt iegūto datu saglabāšanai nepieciešamo atmiņas apjomu.

Lai sensoru sistēma kļūtu par sensoru tīklu, nepieciešams paredzēt un izveidot arī komunikācijas funkcionalitāti. Šāda sensoru tīkla komunikācijas funkcionalitātes potenciālā evolūcija ir atainota attēlā 4.2.



4.2. att. Mobilas sensoru tīklu sistēmas komunikācijas funkcionalitātes potenciālā evolūcija

Pirmajā līmenī komunikācija ar centrālo datubāzu serveri tiek realizēta tiešā veidā, izmantojot mobilo sakaru tehnoloģijas, piemēram, EDGE un GPRS. Šāda pieeja ir optimāla, ja komunikācijā piedalās tikai neliela daļa no visiem transporta līdzekļiem, tiek veikta tikai datu augšupielāde, kā arī datu apjoms ir salīdzinoši neliels (mērāms KB).

Palielinoties atbilstoši aprīkoto transporta līdzekļu skaitam un datu apjomam (mērāms MB), kā komunikācijas starpposms tiek izmantotas arī speciālas, ceļu tehniskā aprīkojuma infrastruktūrā

ietilpstošas RSU iekārtas vai publiski pieejami Wi-Fi resursi [66]. Tiek veikta ne tikai iegūto datu augšupielāde, bet arī programatūras jauninājumu, datu pārskatu un datu ieguvē veicamo uzdevumu lejupielāde.

Brīdī, kad lielākā daļa transporta līdzekļu ir iesaistīti šāda veida komunikācijā, tieša komunikācija ar centrālo datubāzu serveri kļūst resursu ietilpīga un līdz ar to apgrūtināta. Tās vietā tiek paplašināta V2I komunikācija ar RSU iekārtām, kā arī attīstīta tieša V2V komunikācija ar citiem tuvumā esošajiem transporta līdzekļiem [67].

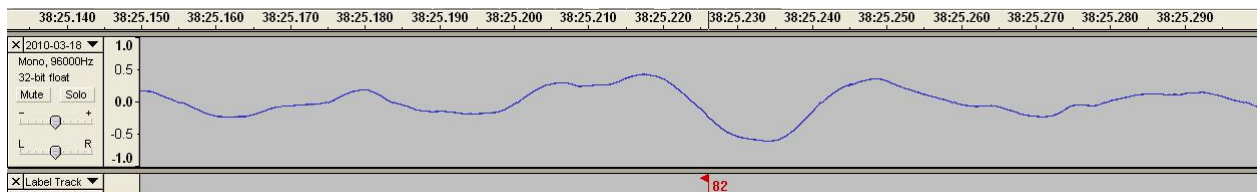
Jāņem vērā, ka šī darba ietvaros tika izstrādāta metodika, nevis visaptverošs pabeigts risinājums. Veidojot pirmo mobilu sensoru tīklu sistēmas prototipu, funkcionalitāte, kas nodrošina komunikāciju ar centrālo datubāzu serveri, netika iekļauta. Šis darbs ietilpst tālāk plānotajās aktivitātēs. Datu apstrāde izstrādātās metodikas novērtēšanai tika veikta pēc datu ieguves, nevis tās laikā. Neskatoties uz to, izstrādātā metodika ir paredzēta izmantošanai tieši mobilu sensoru tīklu kontekstā, jo tikai daudzu atsevišķu mobilu sensoru mezglu datu apkopošana ļauj iegūt informāciju par noteiktiem apkārtējās vides parametriem un notikumiem.

Lai novērtētu izstrādāto metodiku, tika veikti eksperimenti ceļa seguma bojājumu detektēšanā, izmantojot braucošā transporta līdzeklī veiktu skaņas ierakstu. Sākumā tika izvirzīta hipotēze, ka starp skaņas ierakstu un ceļa seguma bojājumiem būs novērojama korelācija. Lai iegūtu pirmos iespaidus, kādas pēdas skaņas ierakstā atstāj ceļa seguma bojājums, tika atrasts attēlā 4.3. redzamais ceļa seguma fragments ar vizuāli pamanāmu bojājumu, kā arī veikts pirmais testu brauciens un skaņas ieraksts.



4.3. att. Pirmais testētais ceļa seguma fragments ar vizuāli pamanāmu bojājumu

Analizējot iegūtos datus, tika konstatēts, ka ceļa seguma bojājums skaņas ierakstā ir identificējams ar attēlā 4.4. redzamajām zemas frekvences svārstībām ar salīdzinoši lielu amplitūdu. Līdz ar to tika pieņemts lēmums veikt ceļa seguma bojājumu detektēšanu, izmantojot sliekšņošanu un noteiktas specifiskas amplitūdas vērtības.



4.4. att. Skaņas signāls no pirmā testētā ceļa seguma fragmenta ar marķētu bojājuma detektēšanas vietu (programma Audacity [29], iztveršanas frekvence 96 kHz)

Lai apstiprinātu izvirzīto hipotēzi, tika veikta testu braucieni sērija reālos apstākļos. Vispirms tika veikta testu braucieniem izvēlētā ceļu tīkla fragmenta apsekošana un eksistējošo ceļa seguma bojājumu marķēšana, izmantojot koordinātu noteikšanai GPS uztvērēju. Visi ceļa seguma bojājumi tika sadalīti piecās klasēs – lielas bedres, mazas bedres, bedru klāsteri, plaisas un kanalizācijas aku vāki (skat. 2.pielikumu). Testu braucieniem izvēlētā ceļu tīkla fragmenta parametri ir aprakstīti tabulā 4.1., bet izvēlētā ceļu tīkla fragmenta karte ar marķētām ceļa seguma bojājumu koordinātēm redzama attēlā 4.5.

4.1. tabula

Testu braucieniem izvēlētā ceļu tīkla fragmenta parametri

<i>Parametrs</i>	<i>Vērtība</i>
<i>Ceļa fragmenta garums</i>	<i>4,4 km</i>
<i>Lielas bedres</i>	<i>3</i>
<i>Mazas bedres</i>	<i>18</i>
<i>Bedru klāsteri</i>	<i>30</i>
<i>Plaisas</i>	<i>25</i>
<i>Kanalizācijas aku vāki</i>	<i>29</i>
<i>Kopā</i>	<i>105</i>



4.5. att Eksperimentos izmantotais 4,4 km garais ceļu tīkla fragments ar manuāli marķētām ceļa seguma bojājumu koordinātēm

Pavisam tika veikti 10 testu braucieni, kuru laikā, izmantojot portatīvajam datoram pieslēgtu elektreta mikrofoni un programmu Audacity [29], tika veikts skaņas ieraksts braucošā transporta līdzeklī. Visi testu braucieni tika veikti vienas dienas laikā. Vienā no 10 testu braucieniem skaņas ieraksta veikšanas laikā tika darbināta arī transporta līdzekļa iebūvētā audioaparātūra. Lai arī detalizēta analīze šī testu brauciena laikā iegūto datu salīdzināšanai ar pārējo testu braucieniem laikā iegūtajiem datiem pētījuma ietvaros netika veikta, būtiska transporta līdzekļa audioaparātūras darbības ietekme uz datu ieguves procesu netika konstatēta. Testa braucieniem parametri ir aprakstīti tabulā 4.2.

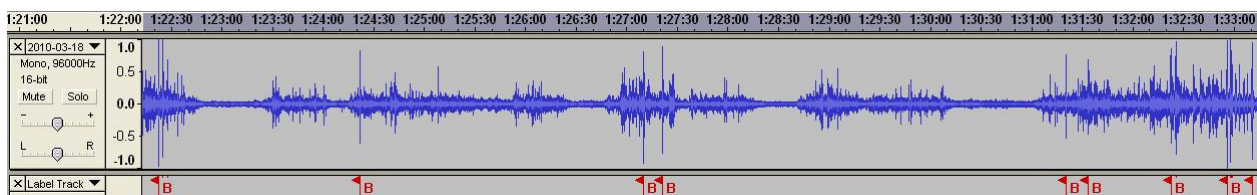
4.2. tabula

Testu braucieniem parametri

<i>Parametrs</i>	<i>Vērtība</i>
<i>Braucieniem skaits</i>	<i>10</i>
<i>Kopējais laiks</i>	<i>1 h 53 min</i>
<i>Kopējā distance</i>	<i>43,53 km</i>
<i>Maksimālais ātrums</i>	<i>59,81 km/h</i>

<i>Vidējais ātrums</i>	<i>24,01 km/h</i>
<i>Mikroфона tips</i>	<i>Elektreteta</i>
<i>GPS uztvērējs</i>	<i>Magellan eXplorist XL</i>
<i>Transporta līdzeklis</i>	<i>Volkswagen Sharan</i>
<i>Portatīvais dators</i>	<i>Acer Extensa 5230</i>

Ceļa seguma bojājumu detektēšana tika veikta, veicot skaņas signāla datu sliekšņošanu pēc amplitūdas, kā arī nosakot detektēto notikumu ģeogrāfiskās koordinātes. Viena testu brauciena skaņas ieraksts ar marķētām detektēto ceļa seguma bojājumu vietām ir redzams attēlā 4.6.



4.6. att. Skaņas signāls no viena testu brauciena ar marķētām bojājumu detektēšanas vietām (programma Audacity [29], iztveršanas frekvence 96 kHz, sliekšņa līmenis 50%)

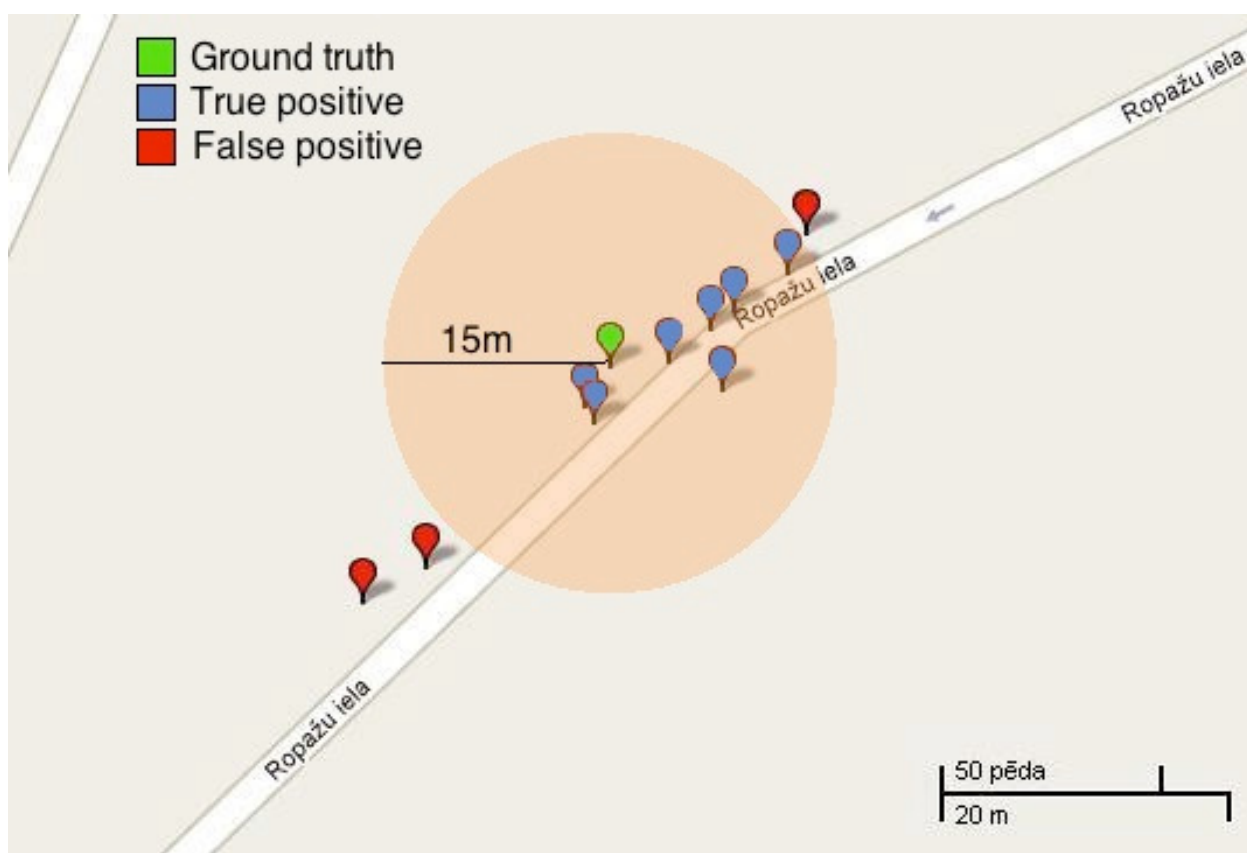
4.4. Rezultāti

Lai novērtētu izstrādāto ceļu seguma bojājumu detektēšanas metodiku, tika analizētas distances starp ceļa seguma bojājumiem, kuri tika detektēti, balstoties uz ierakstītā skaņas signāla analīzi, un ceļa seguma bojājumiem, kuri tika marķēti, apsekojot izvēlēto ceļu tīkla fragmentu.

Viens no faktoriem, kas ir jāņem vērā, novērtējot izstrādātās metodikas precizitāti, ir lokalizācijai izmantotā risinājuma – GPS precizitāte. Eksperimentos apzināti tika izmantots parasts GPS uztvērējs, kurš ir pieejams caurmēra autovadītājam. Lai lietotu šāda veida metodiku, nav nepieciešams augstas precizitātes GPS uztvērējs no militārās vai ģeodēzijas pielietojuma sfēras. Līdz ar to metodika paredz GPS pozīcijas pieejamību 1x sekundē un tās precizitāti robežās no ± 3 līdz ± 30 metriem. Praktisko eksperimentu veikšanas laikā tipiska GPS uztvērēja precizitāte svārstījās robežās no ± 10 līdz ± 15 metriem, kas uzskatāms par atbilstošu rādījumu, ņemot vērā testu braucieniem izvēlēto ceļu tīkla fragmenta atrašanos urbānā apvidū, kuru raksturo gan daudzstāvu apbūve, gan arī noteikts daudzums ceļu malās augošu koku. Šībrīža metodikas novērtēšanā tika izmantotas šīs precizitātes mediānas vērtības, savukārt nākotnē metodiku būtu iespējams arī uzlabot, izmantojot katras konkrētās noteiktās GPS pozīcijas precizitātes vērtību. Transporta līdzeklis

eksperimentu laikā, ar nelieliem izņēmumiem, pārvietojās ar ātrumu līdz 50 km/h jeb līdz ~14 m/s. Līdz ar to kopējā tipiskā pozīcijas precizitāte šo eksperimentu kontekstā tika novērtēta ar ± 15 metriem, kas ir maksimums no abiem iepriekš minētajiem faktoriem.

Balstoties uz šo precizitātes novērtējumu, tika definēts, ka skaņas signāla apstrādes rezultātā detektēts notikums atbilst marķētam ceļa seguma bojājumam tādā gadījumā, ja attālums starp tiem ir ne lielāks par 15 metriem. Šis pieņēmums ir uzskatāms par salīdzinoši konservatīvu, jo lokalizācijas precizitāte atsevišķos gadījumos var būt arī sliktāka. Attēlā 4.7 ir redzams piemērs marķētam ceļa seguma bojājumam un detektētiem notikumiem tā tiešā tuvumā: 7 no 10 pozīcijām (70%) atrodas tuvāk par 15 metriem un ir uzskatāmas par *true positive*, bet 3 no 10 pozīcijām (30%) – tālāk par 15 metriem un ir uzskatāmas par *false positive*.

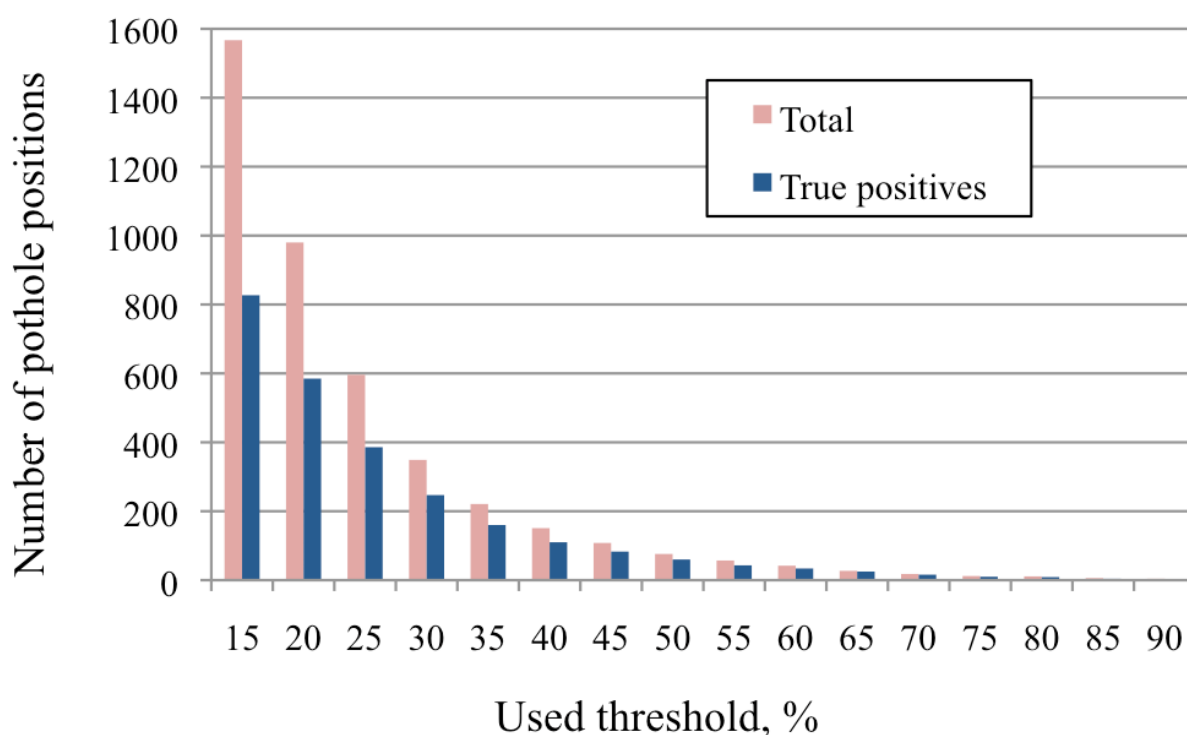


4.7. att. Marķēts ceļa seguma bojājums un tā tiešā tuvumā detektēti notikumi. Pozīcijas, kas atrodas ne tālāk kā 15 metrus, tiek uzskatītas par *true positive*

Ceļa seguma bojājumu detektēšana tika veikta, izmantojot dažādus sliekšņa līmeņus diapazonā no 15% līdz 90% ar soli 5%. 100% atbilst maksimālajam mikroфона un portatīvā datora skaņas kartes skaļumam jeb analogajam signālam ar 1V amplitūdu. Attēlā 4.8. redzams kopējais potenciālo ceļa seguma bojājumu skaits, kā arī par *true positive* atzīto detektēto notikumu skaits katram no izmantotajiem sliekšņa līmeņiem. Sliekšņa līmeņi, kas mazāki par 30%, ļauj detektēt daudzus potenciālos ceļa seguma nelīdzenumus, bet sliekšņa līmeņi, kas lielāki par 65% - tikai

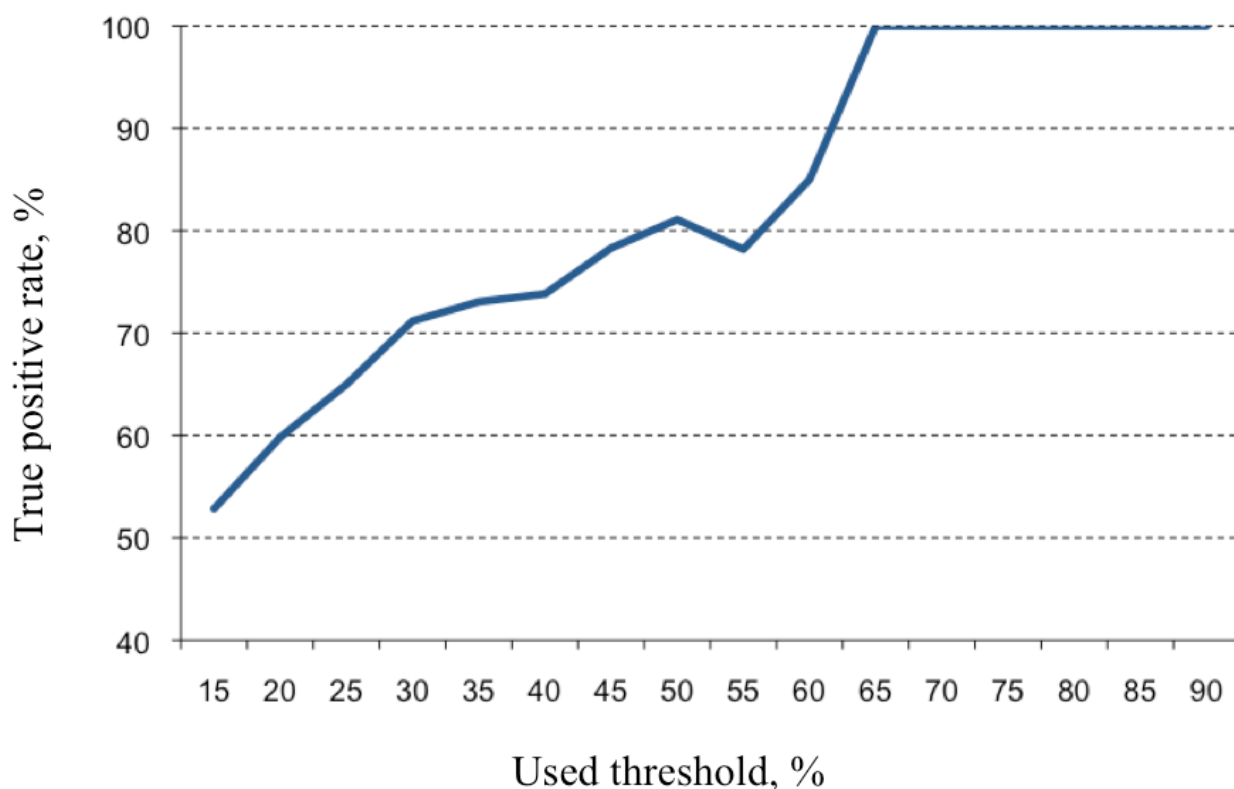
nedaudzus. Kā redzams attēlā 4.9., notikumi, kas detektēti, izmantojot zemu sliekšņa līmeņus, satur daudz *false positive* jeb šķietamus ceļa seguma bojājumus, bet notikumi, kas detektēti, izmantojot sliekšņa līmeņus, kas lielāki par 65%, satur tikai *true positive* jeb reālus ceļa seguma bojājumus. Līdz ar to tika izdarīts secinājums, ka ceļa seguma bojājumu detektēšanā, veicot skaņas signāla datu sliekšņošanu pēc amplitūdas, var izdalīt trīs nosacītos intervālus:

1. *Trokšņains* (sliekšņa līmenis $\leq 30\%$): daudz vibrāciju, daudz trokšņu.
2. *Jutīgs* (sliekšņa līmenis no 35% līdz 60%): visi ceļa seguma bojājumi ar vidēju ticamību.
3. *Konservatīvs* (sliekšņa līmenis $\geq 60\%$): tikai būtiskākie ceļa seguma bojājumi, bet ar augstu ticamību.



4.8. att. Kopējais potenciālo ceļa seguma bojājumu skaits, kā arī par *true positive* atzīto detektēto notikumu skaits katram no izmantotajiem sliekšņa līmeņiem (kopskaits visos 10 testu braucienos)

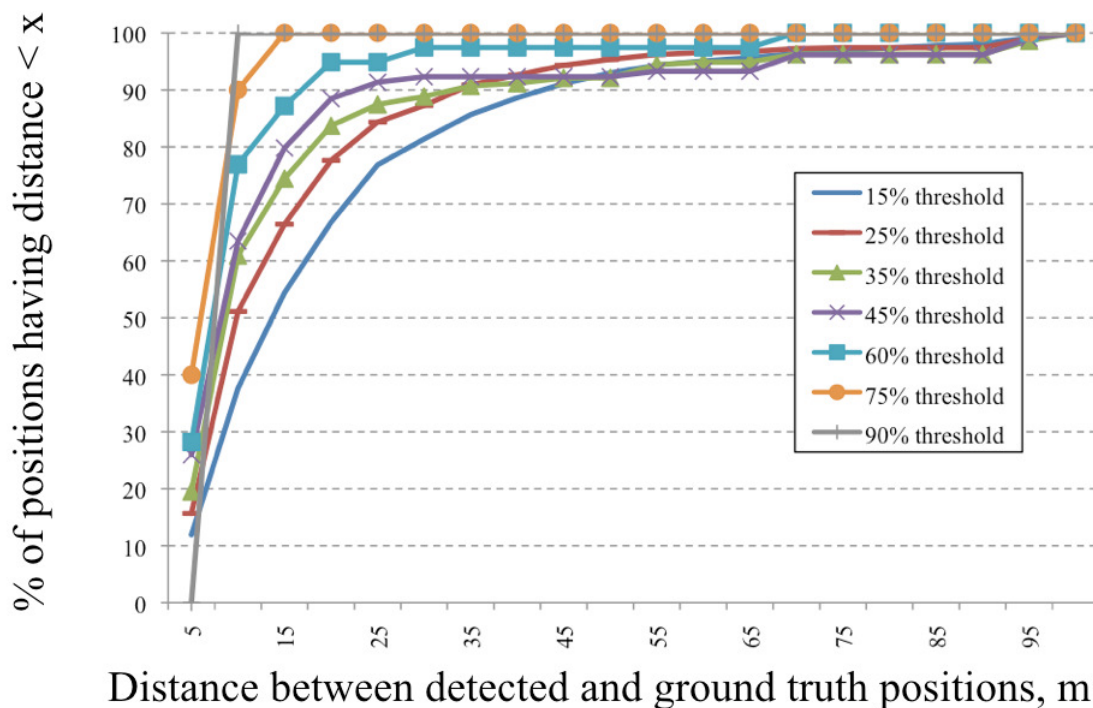
Protams, šīs robežas starp intervāliem ir atkarīgas gan no izmantotā transporta līdzekļa, gan arī no izmantotā mikroфона. Līdz ar to katram transporta līdzeklīm, kas tiktu izmantots šādu datu ieguvei, būtu nepieciešama sākotnējā kalibrēšana. Neskatoties uz to, ir pamats izvirzīt hipotēzi, ka sadalījums starp trim iepriekš minētajiem intervāliem pastāvētu arī citos sistēmas konfigurācijas variantos. Daži koncepcijas pārbaudes eksperimenti jau ir tikuši veikti, izmantojot kā transporta līdzekļus satiksmes autobusus un citu, 90 km garu ceļu tīkla fragmentu, taču pilns šīs hipotēzes apstiprinājums ietilpst tālāk plānotās aktivitātēs.



4.9. att. *True positive* īpatsvars katram no izmantotajiem sliekšņa līmeņiem (sliekšņa līmeņus virs 60% raksturo 100% *true positive* īpatsvars)

Detektētie notikumi, kam tuvākajos 100 metros neatradās neviens marķēts ceļa seguma bojājums, eksperimentu kontekstā tika uzskatīti par troksni un izslēgti no tālākas apstrādes. Šādi notikumi tika detektēti, tikai izmantojot sliekšņa līmeņus, kas zemāki par 35%, un to īpatsvars bija mazāks nekā 3% no visiem detektētajiem notikumiem.

Tika analizēts arī sadalījums distancēm starp notikumiem, kuri tika detektēti, balstoties uz ierakstītā skaņas signāla analīzi, un ceļa seguma bojājumiem, kuri tika marķēti, apsekojot izvēlēto ceļu tīkla fragmentu. Analīzes rezultāts ir redzams attēlā 4.10. Izmantojot sliekšņa līmeņus diapazonā no 35% līdz 60%, vairāk nekā 80% detektēto notikumu atrodas ne tālāk kā 20 metrus no marķēta ceļa seguma bojājuma. Izmantojot sliekšņa līmeņus, augstākus par 60%, visi detektētie notikumi atrodas ne tālāk kā 10 metrus no marķēta ceļa seguma bojājuma, kas ir uzskatāms par visnotaļ augstu precizitāti. Diemžēl izvēlētajā ceļu tīkla fragmentā bija salīdzinoši neliels (mazāk nekā 30) izteiktu ceļa seguma bojājumu skaits, līdz ar to secinājumam par 100% precīzu šāda tipa ceļa seguma bojājumu detektēšanu pietrūkst pietiekami apjomīgas testa datu kopas.



4.10. att. Sadalījums distancēm starp notikumiem, kuri tika detektēti, balstoties uz ierakstītā skaņas signāla analīzi, un ceļa seguma bojājumiem, kuri tika marķēti, apsekojot izvēlēto ceļu tīkla fragmentu katram no izmantotajiem sliekšņa līmeņiem (sliekšņa līmeņus virs 30% raksturo 80% distances līdz 20 metriem)

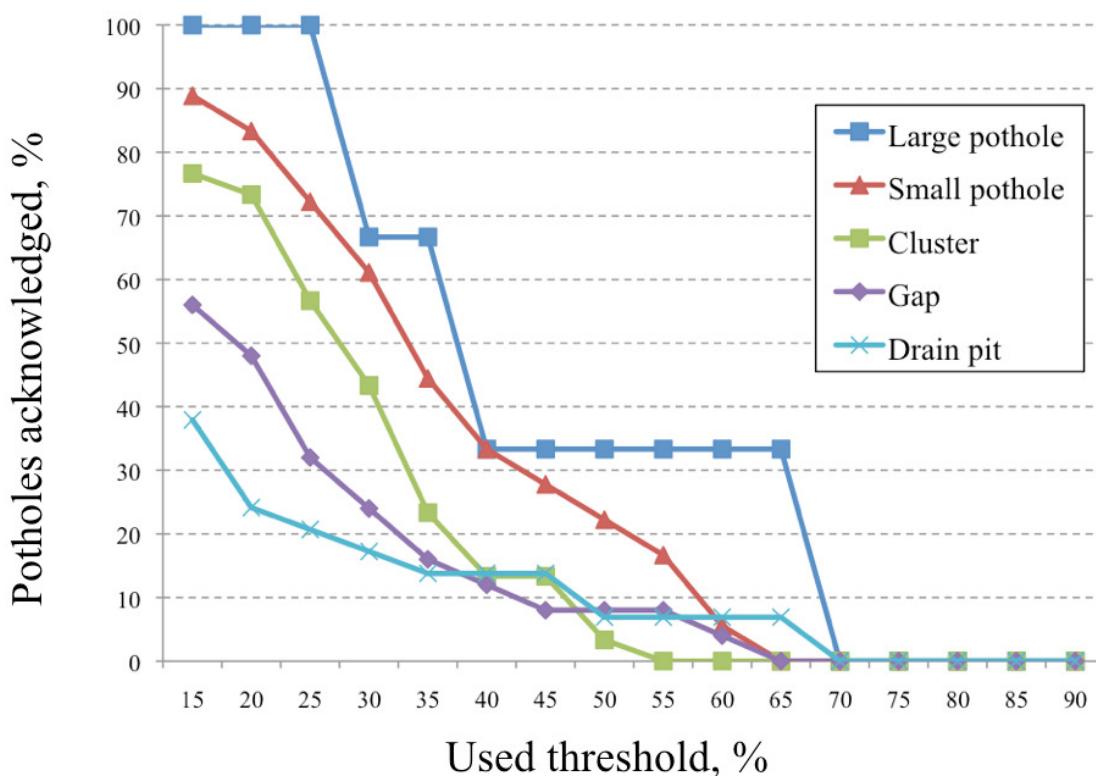
4.5. Diskusija

Lai noskaidrotu, kādus marķētos ceļa seguma bojājumu klašu objektus iespējams detektēt, izmantojot izstrādāto metodiku, tika definēts kritērijs šāda objekta viennozīmīgai atpazīšanai: marķēts ceļa seguma bojājums tiek uzskatīts par atpazītu, ja 10 testa braucienu laikā ir detektēti vismaz 4 notikumi, kas klasificējas kā *true positive*. Statistika par atpazītajiem ceļa seguma bojājumiem ir redzam attēlā 4.11.

Lielas bedres, kuras attiecīgi izraisa lielākās transporta līdzekļa vibrācijas, tiek atpazītas vislabāk – līdz pat 100% apmērā. Mazas bedres rada mazākas transporta līdzekļa vibrācijas, līdz ar to šā tipa objektu atpazīšana ir nedaudz mazāka – līdz pat 90% apmērā. Līdz ar to var secināt, ka metodika ir piemērota tieši dažāda apjoma bedru detektēšanai.

Objekti, kas tika klasificēti kā kanalizācijas aku vāki, tiek atpazīti tikai daļā gadījumu – līdz pat 40% apjomā. To var uzskatīt arī par pozitīvu faktoru, jo šāda tipa objekti, lai arī neapšaubāmi noteiktā mērā ietekmē kopējo braukšanas komfortu, lielākajā daļā gadījumu tomēr nav uzskatāmi par ceļa seguma bojājumiem, un līdz ar to nav izstrādātās metodikas mērķa objekti. Līdzīgu secinājumu var izdarīt arī par plaisām, kuras ir otrs mazāk atpazītais objekta tips – līdz pat 60% apjomā.

Iemesls, kādēļ bedru klāstera tipa objekti tika atpazīti tikai līdz pat 80% apjomā, meklējams gan to izmēros, gan arī izmantotajā eksistējošo ceļa seguma bojājumu marķēšanas metodikā. Lielākajā daļā gadījumu bedru klāstera izmērs pārsniedza 5 metrus, savukārt izmantotā eksistējošo ceļa seguma bojājumu marķēšanas metodika paredzēta galvenokārt punktveida objektu marķēšanai. Līdz ar to marķēšanas metodiku būtu nepieciešams uzlabot, piemēram, ieviešot papildus atribūtu – bedru klāstera izmēru.



4.11. att. Atpazīto ceļa seguma bojājumu statistika, balstoties uz ierakstītā skaņas signāla analīzi, izmantojot dažādus sliekšņa līmeņus

Ceļa seguma bojājumu detektēšanu iespējams optimizēt vai nu maksimāli daudzu objektu ne tik ticamai detektēšanai, vai arī maksimāli ticamai tikai nedaudzu būtiskāko objektu detektēšanai. Šāda optimizācija ir veicama, attiecīgi izvēloties zemāku vai augstāku sliekšņa vērtību.

Tālākas plānotās aktivitātes izstrādājamās ceļa seguma monitoringa sistēmas kontekstā iekļaus eksperimentus ar dažādiem transporta līdzekļiem un mikrofoniem, kā arī precizitātes uzlabošanu, izmantojot papildus DSP metodes un multimodālus sensorus.

Promocijas darba 4. nodaļā aprakstītā pētījuma rezultāti ir prezentēti zinātniskajā vasaras nometnē „Smithy of Ideas” (Traķi, Lietuva, 17-20.06.2010) un konferencē „NDT 2010: The 2nd International Conference on 'Networked Digital Technologies'” (Prāga, Čehija, 07-09.07.2010), kā arī publicēti Springer izdotajā konferences zinātnisko rakstu krājumā (skat. tabulu 9.1.), kas indeksēts SciVerse Scopus un ISI Web of Knowledge / Web of Science datubāzēs.

5. CEĻA SEGUMA MONITORINGS, IZMANTOJOT VIEDTĀLRUŅUS AR AKSELEROMETRIEM

Šajā nodaļā autors sniegs pārskatu par izstrādāto ceļa seguma monitoringa metodiku, kas bāzēta uz viedtālruņiem ar iebūvētiem akcelerometriem. Vispirms tiks aplūkoti eksistējošie uz akcelerometriem bāzētie ceļa seguma monitoringa risinājumi, pēc tam iztirzātas metodikas implementācijai noteiktās tehniskās prasības un izvēlētie datu apstrādes algoritmi. Nodaļas nobeigumā atrodams metodikas novērtējums, kas balstīts uz reāli veiktiem datu ieguves un apstrādes eksperimentiem.

5.1. Ievads

Ceļa seguma stāvoklis ir viens no faktoriem, kas tiešā veidā ietekmē transporta līdzekļu pārvietošanās drošību un komfortu. Līdz ar to gan ceļu tīkla uzturētāji, gan transporta līdzekļu vadītāji ir ieinteresēti pēc iespējas operatīvāk novērst radušos ceļa seguma bojājumus. Lai tas būtu iespējams, ir nepieciešama aktuālā informācija par ceļu seguma stāvokli.

Viens no veidiem, kā iegūt informāciju par ceļa seguma bojājumiem, ir cilvēku ziņojumi atbildīgajām institūcijām. Pieņemot, ka cilvēki savās darbībās būs objektīvi un godīgi, šādā veida iegūtai informācijai būs augsts ticamības novērtējums. Tomēr jāņem vērā arī tas, ka šādu ziņojumu veikšana prasa veikt noteikta veida vairāk vai mazāk manuālas darbības, kā arī iesniegtie ziņojumi raksturos tikai noteiktus ceļu posmus, nevis visu ceļu tīklu.

Nākošais veids informācijas ieguvei ir statistiskā analīze, kur ceļa seguma bojājumu iespējamība tiek novērtēta atkarībā no tā, cik intensīvi tiek izmantots konkrētais ceļa posms. Datus par ceļa posma izmantošanas intensitāti šajā gadījumā iegūst, ievietojot ceļa segumā speciālus sensorus, kas ļauj atpazīt vibrācijas, kā arī veikt garāmbraucošo transporta līdzekļu uzskaiti [68].

Eksistē risinājumi, kur ceļa seguma monitoringam tiek izmantotas specifiskas GPR radariekārtas [69], turklāt ir izstrādāti un pieejami arī komerciāli produkti [70]. Diemžēl šādu tehnoloģiju plašu izmantošanu kavē būtiskās aprīkojuma izmaksas. Līdz ar to informācijas ieguves apjomu un granularitāti būtu iespējams uzlabot, izmantojot daudzu atsevišķu salīdzinoši vienkāršu informācijas ieguves avotu sadarbību jeb kolektīvos mērījumus.

Viekāršākā šādas sadarbības metode būtu atklāto ceļa seguma bojājumu fotografēšana un fotogrāfiju augšupielāde centralizētā informācijas apkopošanas vietnē. Tomēr šādai sadarbībai būtu jābūt salīdzinoši aktīvai, kā arī būtu nepieciešami noteikti resursi augšupielādēto attēlu analīzei. Šajā kontekstā piemērotāka varētu būt automātiska informācijas ieguve ar pēc iespējas minimālu cilvēka līdzdalību. Tas ļautu ne vien iegūt informāciju par pēc iespējas lielāku ceļu tīkla daļu, bet arī ļautu

samazināt cilvēciskā faktora radīto kļūdu skaitu, kā arī atkarību no sadarbībā iesaistīto cilvēku skaita un entuziasma.

Automātiski veiktu informācijas ieguvei būtu iespējams veikt, izmantojot šim nolūkam gan speciāli konstruētas iegultas sensoru iekārtas, gan arī viedtālruņus ar jau iebūvētiem sensoriem. Lai arī iegultas iekārtas ļautu veikt gan aparatūru optimizējošas un uzlabojošas modifikācijas, gan arī precīzākus mērījumus, viedtālruņu aizvien pieaugošā izplatība ir nozīmīgs faktors, kas varētu veicināt šādas informācijas ieguves risinājuma praktiskā pielietojuma popularitāti.

Lai izveidotu ceļa seguma monitoringa sistēmu, kuru akceptētu un izmantotu plašs iesaistīto lietotāju loks, nepieciešams, lai šāda sistēma radītu lietotājam saprotamu pievienoto vērtību, tajā pat laikā saprātīgi izmantojot lietotāja aparatūras resursus. Līdz ar to tiek piedāvāts sistēmu veidot kā papildus funkcionalitāti jau esošām navigācijas sistēmām, piemēram, Waze [71], kuras jau šobrīd izmanto reālā laika satiksmes informāciju, kura, savukārt, tiek apkopota, izmantojot sadarbības metodi.

Automātiskajām iegultajām sistēmām, kā arī viedtālruņiem, ir divas galvenās sensoru klases, kuras var tikt izmantotas ceļa seguma bojājumu detektēšanai – mikrofoni un akselerometri. Izstrādātā metodika ir bāzēta uz akselerometru datu apstrādi un ir uzskatāma par turpinājumu sākotnējām koncepcijas formulēšanas un pārbaudes aktivitātēm [72]. Metodikas sākotnējā implementācija ir veikta, izmantojot Android operētājsistēmu [73].

5.2. Literatūras pārskats

Eksistē dažādas mobilas, uz transporta līdzekļiem bāzētas sensoru sistēmas ceļa seguma bojājumu detektēšanai. Daļa no šīm sistēmām datu ieguvei izmanto akselerometrus. Šajā apakšnodaļā tiks īsumā apskatīti eksistējošās sistēmās izmantotie datu apstrādes algoritmi, kā arī analizētas iespējas implementēt šos algoritmus iekārtās ar ierobežotiem aparatūras un programmatūras resursiem, piemēram, viedtālruņos ar Android operētājsistēmu.

BusNet sistēma [1], kura izstrādāta Kolombo Universitātē, kā aparatūras platformu izmanto Crossbow MICAZ bezvadu sensoru tīklu mezglus un atsevišķus papildus sensoru moduļus - akselerometru un GPS uztvērēju. Šajā sistēmā nav realizēta datu apstrāde reālajā laikā. Iegūtie dati tiek saglabāti lokāli, lai tos vēlāk pārraidītu pa bezvadu tīklu speciāliem datu savākšanas mezgliem, kas izvietoti autobusu pieturās. Vienīgais algoritms, kas ir saistīts ar ceļa seguma bojājumu detektēšanu, veic paātrinājuma mērījumus, un, balstoties uz tiem, uzsāk datu ieguves seansu. Šādā veidā tiek panākta datiem atvēlētās atmiņas resursu taupīgāka izmantošana.

Pothole Patrol sistēma [2], kura izstrādāta Masačūsetsas Tehnoloģiju Institutā, kā aparatūras un programmatūras platformu izmanto Soekris 4801 iegultos datorus ar Linux operētājsistēmu un

ārējiem akselerometriem (datu ieguve tiek veikta 380 reizes sekundē), kā arī ārēju GPS uztvērēju. Ceļa seguma bojājumu detektēšanas algoritms ir bāzēts uz vienkāršu mašīnmācīšanās (*machine-learning*) metodi. Ieejas dati ir X un Z asu paātrinājuma, kā arī transportlīdzekļa ātruma vērtības. Algoritms sastāv no pieciem secīgiem filtriem - *speed*, *high-pass*, *z-peak*, *xz-ratio* and *speed vs. z-ratio*. Katrs filtrs tiek izmantots, lai nodalītu no tālākās apstrādes vienu vai vairākus detektēto notikumu tipus, kas nav saistīti ar ceļa seguma bojājumiem, piemēram, transporta līdzekļa durvju aizvēršanas un dzelzceļa pārbrauktuvju šķērsošanas. Lai optimizētu beidzamo trīs filtru parametrus, tiek lietots speciāls to trenēšanas process.

Nericell [65] un TrafficSense [74] sistēmas, kuras izstrādātas Microsoft Research India, izmanto kā aparatūras un programmatūras platformu viedtālruņus ar Windows Mobile operētājsistēmu un daudzus ārējus sensorus – akselerometrus (datu ieguve tiek veikta 310 reizes sekundē), mikrofonus un GPS uztvērējus. Algoritmi ceļa seguma bojājumu detektēšanai *z-sus* (transporta līdzekļa ātrumiem līdz 25 km/h) un *z-peak* (transporta līdzekļa ātrumiem virs 25 km/h) ir bāzēti uz vienkāršu heuristisku sliekšņošanu. Papildus algoritms *virtual reorientation* tiek izmantots, lai kompensētu brīvi izvēlētu viedtālruņa novietojumu braucošajā transporta līdzeklī.

Sistēma, kas izstrādāta Nacionālajā Taivānas Universitātē [75], kā aparatūras platformu izmanto uz motocikliem uzstādītus mobilos telefonus HTC Diamond, kam ir iebūvēti akselerometri (datu ieguve tiek veikta līdz 25 reizēm sekundē), kā arī ārējus GPS uztvērējus. Ceļa seguma bojājumu detektēšana tiek veikta, izmantojot vadītas un nevadītas mašīnmācīšanās metodes. Klienta pusē tiek veikta filtrēšana, segmentēšana un raksturlielumu atdalīšana. Servera pusē tiek izmantoti divi mācīšanās modeļi – *support vector machine* un *a smooth road model*. Ceļa bojājumu detektēšana tiek veikta, izmantojot histogrammas sekvencēm, kas sastāv no trīsdimensiju un kopējā paātrinājuma datiem. Segmenta garums tiek variēts tā, lai tas atbilstu no 0,5 līdz 2 sekundēm transporta līdzekļa kustības laika.

Pētnieki no Jyväskylä Universitātes piedāvā ceļa seguma bojājumu detektēšanas metodi [76], kas balstīta uz datizraces risinājumiem. Lai arī testi uzrāda labus rezultātus, šāda komplicēta pieeja nav piemērota implementācijai uz platformas ar ierobežotiem aparatūras un programmatūras resursiem. Neskatoties uz to, atsevišķas aprakstītās metodes varētu tikt realizētas arī reālā laikā veiktā datu apstrādē.

Vienkārši, uz sliekšņošanu balstīti algoritmi (piemēram, *z-sus* un *z-peak*), neapšaubāmi ir piemēroti implementācijai uz viedtālruņiem ar Android operētājsistēmu. Tomēr jāatzīmē, ka pieejamie aparatūras un programmatūras resursi ir pietiekami, lai darbinātu arī nedaudz sarežģītākus algoritmus ar labākiem ceļa seguma bojājumu detektēšanas parametriem. Izstrādātā ceļa seguma bojājumu detektēšanas metodika atšķiras no eksistējošajām ar sekojošiem aspektiem:

1. Piedāvātais risinājums paredz sarežģītāku un heuristiskāku reālā laika datu apstrādi, izmantojot ierobežotus aparatūras un programmatūras resursus.
2. Koncentrēšanās uz ceļa seguma bojājumiem kā vienu specifisku notikumu tipu paredz labāku pieejamo sensoru datu izmantošanu.

5.3. Eksperimentu apraksts

Kā pirmais darbs pirms eksperimentu uzsākšanas tika formulētas tehniskās prasības, kas būtu par pamatu ceļa seguma bojājumu detektēšanas sistēmas izstrādei:

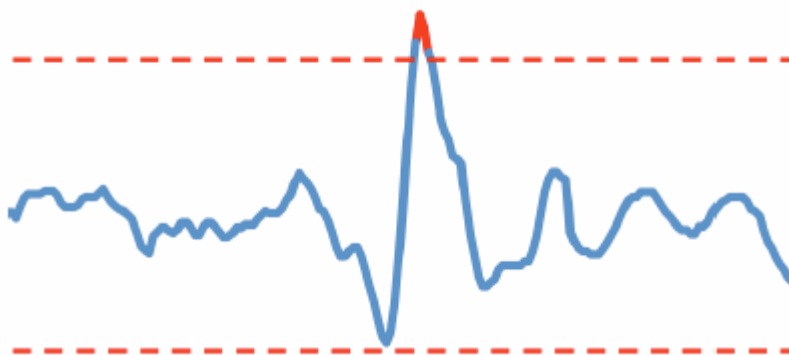
1. Sistēmai ir jāspēj detektēt notikumus (šajā gadījumā – ceļa seguma bojājumus) reālajā laikā. Datu uzkrāšana to vēlākai apstrādei klasificējama kā papildus funkcionalitāte.
2. Sistēmai ir jāizmanto kā aparatūras un programmatūras platforma viedtālrunis ar Android operētājsistēmu un iebūvētiem akselerometriem. Portējamība uz citām platformām klasificējama kā papildus funkcionalitāte.
3. Sistēmai ir jāspēj darboties uz atšķirīgiem viedtālruniem ar atšķirīgiem parametriem. Sistēmas implementācijas laikā ir nepieciešams noteikt un aprakstīt minimāli nepieciešamo parametru kopumu.
4. Sistēmai, kas darbojas uz viedtālruna, ir jāspēj veikt tās dabiskos, ar komunikāciju saistītos uzdevumus adekvātā kvalitātes līmenī. Visu viedtālruna resursu mobilizācija tikai ceļa seguma monitoringam nav pieļaujama.
5. Sistēmai jāspēj veikt ceļa seguma bojājumu detektēšana, braucot dažādos četru riteņu transporta līdzekļos, piemēram, vieglajos auto, minivenos un autobusus. Divu riteņu transporta līdzekļi, piemēram, motocikli un motorrolleri, neietilpst sākotnēji plānotajā sistēmas pielietojuma sfērā.
6. Sistēmai nepieciešama kalibrācijas vai paškalibrācijas funkcionalitāte, jo dažādos transporta līdzekļos tiks iegūti dažādi ceļa seguma bojājumus raksturojošie dati. Šai funkcionalitātei jābūt balstītai uz signālu šabloniem, kas raksturo attiecīgo transporta līdzekļa tipu.

Sākotnējā datu ieguve koncepcijas pārbaudei tika veikta, veicot testa braucienus pa pilsētas ielām, kur bija iespējams sastapt dažāda veida ceļa seguma bojājumus. Datu ieguvei tika izmantota iegulta iekārta ar akselerometriem – modificēts LynxNet kaklasiksnas prototips [51]. Šīs iekārtas pamatā ir bezvadu sensoru tīklu mezgls Tmote Mini ar Texas Instruments mikrokontrolieri MSP430F1611 un Analog Devices 3-dimensiju akselerometru ADXL335. Lai veiktu akselerometru datu ieguvi 100 reizes sekundē, kā arī iegūto datu pārsūtīšanu uz datoru caur USB saskarni, tika izmantota MansOS operētājsistēmas [77] bāzēta programmatūra. Lai iegūtu datus salīdzināšanas vajadzībām, paralēli tika veikta arī datu ieguve, izmantojot iepriekš izstrādāto RoadMic metodiku

[49]. Arī testa braucieniem izmantotais ceļu tīkla fragments bija identisks RoadMic metodikas izstrādes laikā izmantotajam.

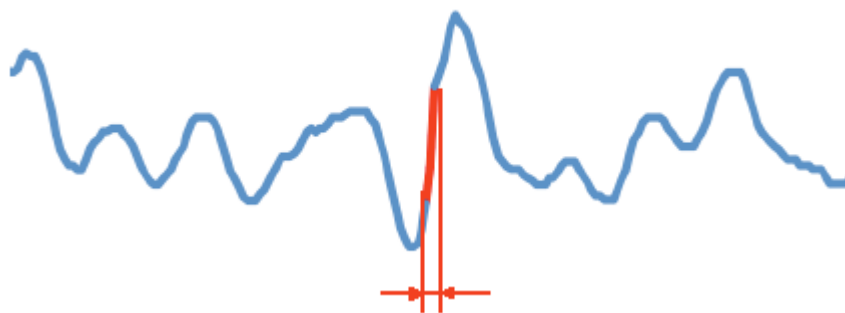
Pēc pirmo testa datu ieguves tika veikta to analīze ar mērķi identificēt pazīmes, kas būtu saistītas ar noteikta veida notikumiem (šajā gadījumā – ceļa seguma bojājumiem). Īpaša uzmanība tika pievērsta pazīmēm, kuras būtu iespējams atrast bez komplicētas signālu apstrādes, un līdz ar to – piemērotas detektēšanai, izmantojot iekārtas ar ierobežotiem aparatūras un programmatūras resursiem.

Pirmais un vienkāršākais algoritms, kas tika testēts uz iegūtās datu kopas, ir algoritms Z-THRESH (skat. attēlu 5.1.). Tas ir līdzīgs *z-peak* algoritmam, kurš tiek izmantots Pothole Patrol, kā arī Nericell un TrafficSense sistēmās. Algoritma būtība ir Z ass paātrinājuma mērījumu sliekšņošana. Pazīmes, kas norāda uz ceļa seguma bojājumu esamību, ir paātrinājuma vērtības, kuras pārsniedz noteiktus sliekšņa līmeņus, turklāt dažādiem ceļa seguma bojājumu tipiem (piemēram, lielām bedrēm un bedru klāsteriem) šīs sliekšņa vērtības būs atšķirīgas. Izmantojot šo algoritmu, ir nepieciešama arī informācija par akselerometra Z ass pozīciju. Protams, ir iespējams izmantot papildus algoritmu Z ass pozīcijas noteikšanai, kā tas ir Nericell sistēmā [65]. Šajos eksperimentos tika izmantota vienkāršota pieeja, respektīvi, akselerometrs tika novietots zināmā pozīcijā attiecībā pret transporta līdzekļa asīm.



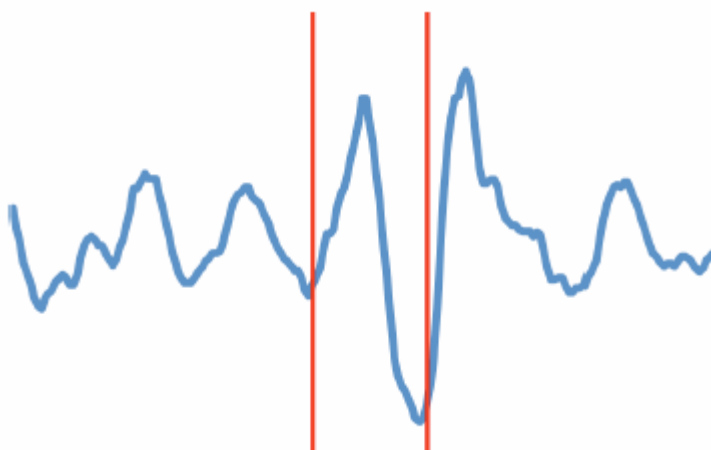
5.1. att. Algoritms Z-THRESH. Meklējamie notikumi atbilst mērījumiem, kuru vērtības pārsniedz noteiktus specifiskus sliekšņa līmeņus

Nākošais, nedaudz sarežģītākais algoritms, kas tika testēts uz iegūtās datu kopas, ir algoritms Z-DIFF (skat. attēlu 5.2.). Atšķirībā no algoritma Z-THRESH, šajā gadījumā tiek meklēti divi secīgi mērījumi, kuru vērtības atšķiras par lielumu, kas ir virs noteiktas specifiskas sliekšņa vērtības. Līdz ar to šis algoritms ir paredzēts strauju Z ass paātrinājuma izmaiņu detektēšanai. Līdzīgi kā iepriekšējā algoritma gadījumā, ir nepieciešama informācija par akselerometra Z ass pozīciju.



5.2. att. Algoritms Z-DIFF. Meklējamie notikumi atbilst secīgiem mērījumiem, kuru starpības vērtības pārsniedz noteiktus specifiskus sliekšņa līmeņus

Izanalizējot literatūras pārskatā apskatītos risinājumus, tika pieņemts lēmums izmantot datu apstrādei reālajā laikā arī kādu metodi, kura līdz šim tika izmantota datu vēlākai apstrādei. Viena no šādām metodēm, kura varētu būt potenciāli piemērota implementācijai uz iekārtas ar ierobežotiem aparatūras un programmatūras resursiem, ir Z ass paātrinājuma standartnoviržu analīze, kura tad arī tika implementēta algoritmā STDEV(Z) (skat. attēlu 5.3.). Protams, algoritma skaņošanas laikā ir nepieciešams noteikt ne vien optimālus sliekšņa līmeņus, bet arī slīdošā loga izmēru, kas vislabāk raksturo tādus notikumus kā ceļa seguma bojājumus.

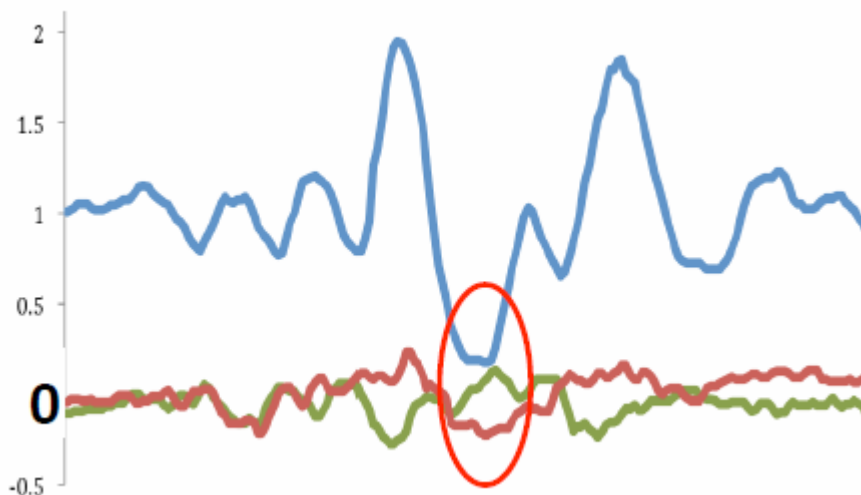


5.3. att. Algoritms STDEV(Z). Meklējamie notikumi atbilst mērījumiem, kuru standartnovirzes vērtības pārsniedz noteiktus specifiskus sliekšņa līmeņus

Caurskatot iegūto datu kopu ar vizuālās analīzes rīkiem un meklējot specifiskus datu šablonus, tika konstatēts, ka eksistē notikumi, kurus raksturo specifiski mērījumu korteži. Visu trīs akselerometra asu dati šajos kortežos bija ar vērtībām, kas ir tuvas 0 g paātrinājumam. Veicot šādu kortežu empīrisko analīzi, tika izdarīti sekojoši secinājumi:

1. Šādi datu korteži var tikt iegūti brīžos, kad auto uz īsu brīdi ir atradies brīvajā kritienā jeb bezsvara stāvoklī, piemēram, iebraucot bedrē, vai arī izbraucot no tās.
2. Šādus datu kortežus ir iespējams analizēt arī tādā gadījumā, ja informācija par akcelerometra Z ass pozīciju nav pieejama.

Atbilstoši detektējamo notikumu specifikai, algoritmam tika piešķirts nosaukums G-ZERO (skat. attēlu 5.4.).



5.4. att. Algoritms G-ZERO. Meklējamie notikumi atbilst mērījumu kortežiem, kuru visu 3 asu vērtības atrodas zem noteiktiem specifiskiem sliekšņa līmeņiem

5.4. Rezultāti

Lai novērtētu iepriekš aprakstītos algoritmus, tika veiktas sekojošas aktivitātes:

1. testiem izvēlētā ceļu tīkla fragmenta apsekošana un eksistējošo ceļa seguma bojājumu marķēšana, izmantojot *Walking GPS* metodiku [78];
2. testa braucieni izvēlētajā ceļu tīkla fragmentā, izmantojot kā datu ieguves iekārtas 4 atšķirīgus viedtālruņus;
3. iegūto datu apstrāde, izmantojot izvēlētos ceļa seguma bojājumu detektēšanas algoritmus;
4. algoritmu statistiskā analīze, izmantojot salīdzinājumam datus, kas iegūti, apsekojot izvēlēto ceļu tīkla fragmentu pēc *Walking GPS* metodikas, kā arī datus, kas iegūti, izmantojot iepriekš izstrādāto *RoadMic* metodiku.

Testiem izvēlētais ceļu tīkla fragments ir 4,4 km garš. Tas atrodas Latvijā, Rīgā un iekļauj gan galvenās ielas ar vairākām kustības joslām katrā braukšanas virzienā, gan arī mazākas ielas ar vienu braukšanas joslu katrā virzienā, līdz ar to ceļa seguma stāvoklis šajā fragmentā mainās visnotaļ

plašā diapazonā. Veicot fragmentā eksistējošo ceļa seguma bojājumu apsekošanu un marķēšanu, tika izmantots GPS uztvērējs Magellan eXplorist XL ar EGNOS atbalstu, kā arī RoadMic metodikas izstrādes laikā izmantotā ceļa seguma bojājumu klasifikācijas sistēma ar 5 bojājumu klasēm – lielas bedres, mazas bedres, bedru klāsteri, plaisas un kanalizācijas aku vāki. Aktuālais (24.03.2011) un vēsturiskais (19.03.2010) izvēlētā ceļu tīkla fragmenta bojājumu uzskaitījums ir redzams tabulā 5.1. Ievēribas cienīgs varētu būt apstāklis, ka kopējais fiksēto ceļa seguma bojājumu skaits, kā arī sadalījums starp atsevišķām ceļa seguma bojājumu klasēm gada laikā ir mainījies pavisam nedaudz, lai arī lokālo klimata īpatnību rezultātā katru gadu rodas jauni ceļa seguma bojājumi. Kanalizācijas aku vāku skaita samazināšanās aktuālajā uzskaitījumā savukārt ir skaidrojama ar uzlabotu ceļa apsekošanas un bojājumu marķēšanas metodi attiecībā uz ielām ar vairākām braukšanas joslām vienā virzienā – aktuālā marķēšanas metodika nosaka, ka tiek fiksēti tikai tie kanalizācijas aku vāki, kuri atrodas joslā, pa kuru tiek veikti testa braucieni.

5.1. tabula

Testu braucieniem izmantotā ceļu tīkla fragmenta parametri

<i>Klase</i>	<i>24.03.2011</i>	<i>19.03.2010</i>
<i>Lielas bedres</i>	<i>3</i>	<i>3</i>
<i>Mazas bedres</i>	<i>18</i>	<i>18</i>
<i>Bedru klāsteri</i>	<i>30</i>	<i>30</i>
<i>Plaisas</i>	<i>40</i>	<i>25</i>
<i>Kanalizācijas aku vāki</i>	<i>17</i>	<i>29</i>
<i>Kopā</i>	<i>108</i>	<i>105</i>

Testa braucieni, kas sastāvēja no 10 secīgiem apļiem pa izvēlēto ceļu tīkla fragmentu, tika veikti 24.03.2011 – tajā pat dienā, kad ceļa seguma apsekošana un bojājumu marķēšana. Šāda pieeja nodrošināja pēc iespējas minimālas atšķirības ceļa segumā abu minēto aktivitāšu veikšanas laikos. Testa braucienā laikā izmantotajā tehniskajā aprīkojumā ietilpa vieglais auto BMW 323 Touring, kā arī četri atšķirīgi viedtālruņi, kuri sīkāk aprakstīti tabulā 5.2. Analizējot pieredzi no agrākiem koncepcijas pārbaudes testa braucieniem, kā arī datus no aktuālajiem testa braucieniem, tika izdarīts secinājums, ka trīs no izmantotajiem viedtālruņiem uzskatāmi par tipiskiem šādas klases iekārtu pārstāvjiem, bet viens (Samsung i5700) – par netipisku šādas klases iekārtu pārstāvi. Būtiskās

atšķirības tika konstatētas tieši izmantotā akcelerometra parametros (skat. 3.pielikumu). Vadoties no šī secinājuma, turpmākā statistiskā analīze tika veikta, izmantojot datus no viena par tipisku šādas klases iekārtas pārstāvi atzītā viedtālruņa HTC Desire.

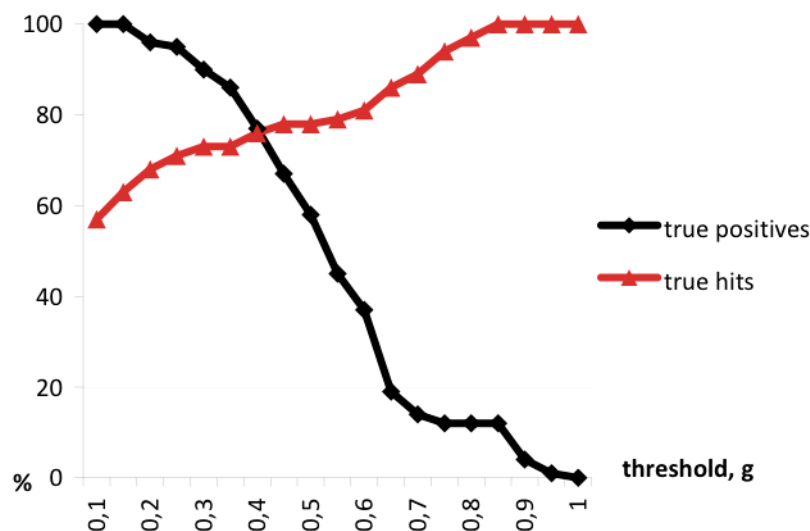
5.2. tabula

Android bāzētu viedtālruņu akcelerometru atšķirības (vidējās vērtības 10 minūšu testa braucienam)

<i>Viedtālrunis</i>	<i>Datu ieguves biežums (Hz)</i>	<i>Z ass standartnovirze (g)</i>
<i>Samsung i5700</i>	26	0,3076
<i>Samsung Galaxy S</i>	98	0,1171
<i>HTC Desire</i>	52	0,1215
<i>HTC HD2</i>	47	0,1242

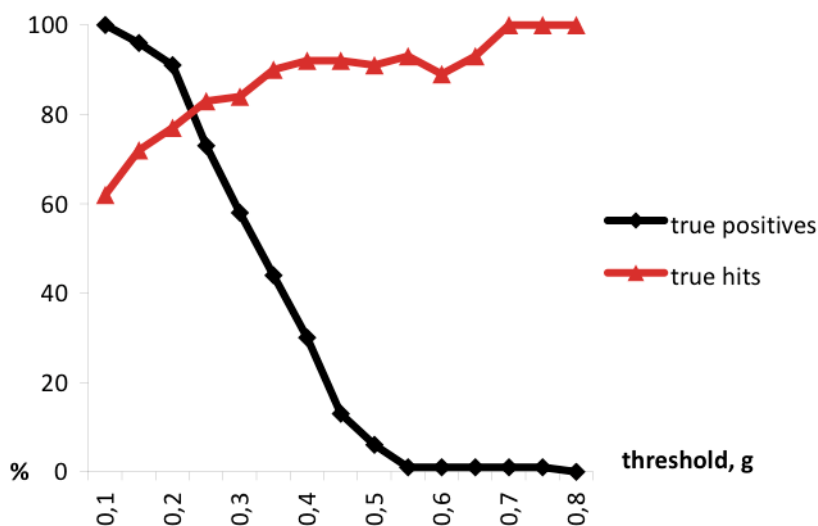
Lai apstrādātu iegūtos datus, izmantojot izvēlētos algoritmus, bija nepieciešams noteikt optimālās sliekšņa vērtības visiem minētajiem algoritmiem, kā arī optimālo slīdošā loga izmēru algoritmam STDEV(Z). Lai veiktu šo uzdevumu, tika izmantota pieeja, identiska RoadMic metodikas izstrādes laikā izmantotajai. Šī pieeja paredz, ka notikumi, kas tiek detektēti 15 m rādiusā ap jebkuru manuāli marķētu ceļa seguma bojājumu, klasificējas kā *true hits* jeb notikumi, kas ir saistīti ar šo ceļa seguma bojājumu. Savukārt marķēts ceļa seguma bojājums klasificējas kā *true positive* jeb bojājums, kas ir detektēts, tādā gadījumā, ja 10 testa brauciena apļu laikā vismaz 4 notikumi atšķirīgos apļos ir fiksēti 15 m rādiusā ap šo ceļa seguma bojājumu. Līdz ar to visi notikumi, kas neklasificējas kā *true hits*, automātiski klasificējas kā *false positives* jeb notikumi, kuru tiešā tuvumā nav neviena marķēta ceļa seguma bojājuma. Lai uzlabotu tālāk sniegto grafiku uzskatāmību, *false positive* līknes tajos nav iekļautas.

Veicot algoritma Z-THRESH optimizāciju, tas tika pārbaudīts ar sliekšņa vērtībām diapazonā no 0,1 līdz 1,0 g. Kā optimālā vērtība tika izvēlēta vērtība 0,4 g (skat. attēlu 5.5.). Izmantojot šo sliekšņa vērtību, tika detektēti 78% no visiem manuāli marķētajiem ceļa seguma bojājumiem, kā arī 76% visu fiksēto notikumu atradās tiešā manuāli marķēto ceļa seguma bojājumu tuvumā.



5.5. att. Algoritma Z-THRESH veikspēja, izmantojot dažādus sliekšņa līmeņus

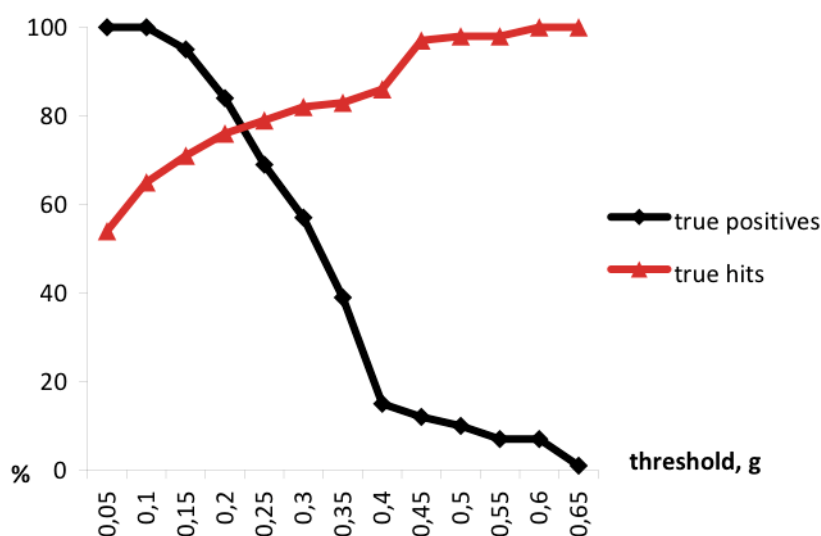
Sliekšņa vērtības diapazonā no 0,1 līdz 0,8 g tika izmantotas, lai veiktu algoritma Z-DIFF optimizāciju. Kā optimālā vērtība tika izvēlēta vērtība 0,2 g (skat. attēlu 5.6.). Izmantojot šo sliekšņa vērtību, tika detektēti 92% no visiem manuāli marķētajiem ceļa seguma bojājumiem, kā arī 77% visu fiksēto notikumu atradās tiešā manuāli marķēto ceļa seguma bojājumu tuvumā.



5.6. att. Algoritma Z-DIFF veikspēja, izmantojot dažādus sliekšņa līmeņus

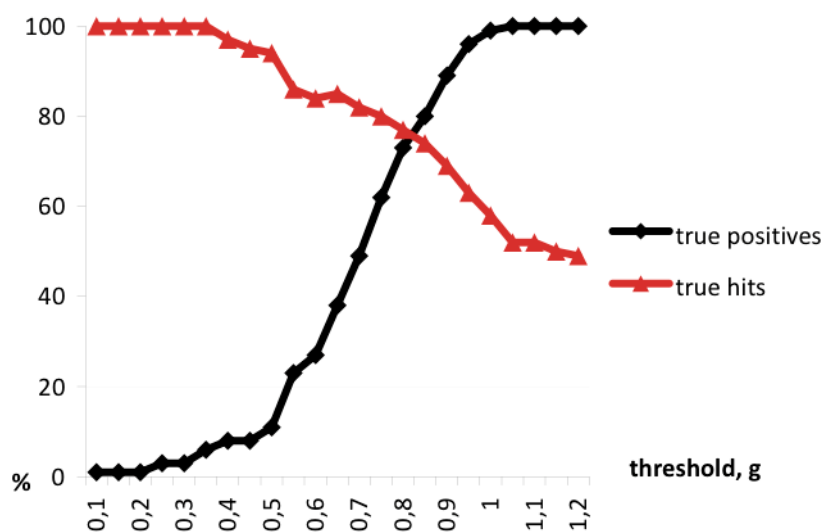
Veicot algoritma STDEV(Z) optimizāciju, tika izmantots slīdošais logs ar vērtībām diapazonā no 4 līdz 80 mērījumiem, kā arī sliekšņa vērtības diapazonā no 0,05 līdz 0,65 g. Par optimāliem tika atzīti slīdošais logs ar 20 mērījumiem un sliekšņa vērtība 0,2 g (skat. attēlu 5.7.). Izmantojot šīs

vērtības, tika detektēti 81% no visiem manuāli marķētajiem ceļa seguma bojājumiem, kā arī 76% visu fiksēto notikumu atradās tiešā manuāli marķēto ceļa seguma bojājumu tuvumā.



5.7. att. Algoritma STDEV(Z) veikspēja, izmantojot dažādus sliekšņa līmeņus un slīdošā loga izmēru 20 mērijumi

Optimālā sliekšņa vērtība algoritmam G-ZERO tika meklēta diapazonā no 0,1 līdz 1,2 g. Par optimālo tika atzīta vērtība 0,8 g (skat. attēlu 5.8.). Izmantojot šo sliekšņa vērtību, tika detektēti 73% no visiem manuāli marķētajiem ceļa seguma bojājumiem, kā arī 76% visu fiksēto notikumu atradās tiešā manuāli marķēto ceļa seguma bojājumu tuvumā.



5.8. att. Algoritma G-ZERO veikspēja, izmantojot dažādus sliekšņa līmeņus

5.5. Diskusija

Izvēlēto algoritmu veikspēja atsevišķu ceļa seguma bojājumu klašu kontekstā ir aprakstīta tabulā 5.3. Testa braucienu rezultāti ir apstiprinājuši šādas metodikas piemērotību ceļa seguma bojājumu detektēšanai, par ko liecina 100% atrastās lielās bedres un 83-90% atrastie bedru klāsteri.

5.3. tabula

Izvēlēto algoritmu *true positive* statistika ceļa seguma bojājumu klašu kontekstā

<i>Klase</i>	<i>Z-THRESH</i>	<i>Z-DIFF</i>	<i>STDEV(Z)</i>	<i>G-ZERO</i>
<i>Lielas bedres</i>	3 (100%)	3 (100%)	3 (100%)	3 (100%)
<i>Mazas bedres</i>	15 (83%)	16 (89%)	16 (89%)	14 (78%)
<i>Bedru klāsteri</i>	25 (83%)	27 (90%)	27 (90%)	27 (90%)
<i>Plaisas</i>	31 (78%)	36 (90%)	30 (75%)	27 (68%)
<i>Kanalizācijas aku vāki</i>	10 (59%)	17 (100%)	11 (65%)	8 (47%)
<i>Kopā</i>	84 (78%)	99 (92%)	87 (81%)	79 (73%)

Analizējot testa braucienu laikā iegūtos datus, tika konstatēts, ka 2 marķētie bedru klāsteri (jeb 7% no visiem šā tipa ceļa seguma bojājumiem) palika nepamanīti, izmantojot detektēšanai jebkuru no 4 algoritmiem. Pārbaudot šo bedru klāsteru atrašanās vietas, tika konstatēts, ka tie atrodas ceļu krustojumos, kur transporta līdzeklis ir veicis kustības virziena maiņu un līdz ar to pārvietojies ar salīdzinoši nelielu ātrumu. Šis aspekts liecina par ierobežojumu, kas ir jāņem vērā, veidojot ceļa seguma monitoringa sistēmu, izmantojot izstrādāto metodiku.

Atkarībā no izmantotā algoritma, tika detektēti no 78 līdz 89% visu marķēto mazo bedru. Jāatzīmē, ka 9 no tām (jeb 50% visiem šā tipa ceļa seguma bojājumiem) tika detektētas, izmantojot jebkuru no 4 izvēlētajiem algoritmiem, turklāt visu 10 testa brauciena aplū laikā. Šis aspekts liecina par viedtālrunu akselerometru piemērotību ceļa seguma monitoringam.

Dažādas plaisas (t.sk. atsevišķu ceļa seguma segmentu salaiduma vietas) atkarībā no izmantotā algoritma tika detektētas no 68 līdz 90% apjomā. Tikai 3 no tām palika nepamanītas, izmantojot detektēšanai jebkuru no 4 algoritmiem. Minēto ceļa seguma bojājumu atrašanās vietas atrodas uz galvenās ielas ar vairākām kustības joslām katrā virzienā, kur ceļa seguma stāvoklis ir

salīdzinoši labāks nekā visā pārējā testa braucieni maršrutā, līdz ar to šādu bojājumu ietekme uz testa braucieni laikā izmantotā transporta līdzekļa ritošo daļu ir salīdzinoši niecīga.

Piektās un beidzamās klases objekti – kanalizācijas aku vāki atkarībā no izmantotā algoritma tika detektēti visnotaļ plašā vērtību diapazonā - no 47 līdz pat 100% apjomā. Šis aspekts ir jāņem vērā, turpinot ceļu seguma monitoringa sistēmas izstrādi, jo paver iespēju ne tikai detektēt atsevišķu ceļa seguma bojājumu, bet arī ar zināmu ticamību spriest par tā tipu. Atkarībā no uzstādītajiem mērķiem, noteiktas bojājumu klases var tikt iekļautas vai izslēgtas no meklējamo objektu klašu kopas.

Tālākas plānotās aktivitātes izstrādājamās ceļa seguma monitoringa sistēmas kontekstā iekļaus eksperimentus ar atsevišķu algoritmu kombinācijām, kā arī paškalibrēšanās funkcionalitātes izveidi.

Promocijas darba 5. nodaļā aprakstītā pētījuma rezultāti ir prezentēti konferencē „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), kā arī publicēti IEEE izdotajā konferences zinātnisko rakstu krājumā (skat. tabulu 9.1.), kas indeksēts SciVerse Scopus, ISI Web of Knowledge / Web of Science un IEEE Xplore Digital Library datubāzēs.

6. TRANSPORTA LĪDZEKĻA STĀVOKĻA MONITORINGS, IZMANTOJOT IEGULTAS IEKĀRTAS AR AKSELEROMETRIEM

Šajā nodaļā autors sniegs pārskatu par izstrādāto transporta līdzekļa stāvokļa monitoringa metodiku, kas bāzēta uz iegultām iekārtām ar akcelerometriem. Vispirms tiks aplūkoti atsevišķi eksistējošie transporta līdzekļa stāvokļa monitoringa risinājumi, pēc tam iztirzātas metodikas implementācijai noteiktās tehniskās prasības un izvēlētais datu ieguves un apstrādes algoritms. Nodaļas nobeigumā atrodams metodikas novērtējums, kas balstīts uz reāli veiktiem datu ieguves un apstrādes eksperimentiem.

6.1. Ievads

Pasažieru un kravu pārvadāšana tiek veikta, izmantojot dažādu tipu transporta līdzekļus. Lai nodrošinātu efektīvu transporta pārvadājumu veikšanu, tiek izmantotas aparatūras un programmatūras sistēmas, kuru uzdevums ir pārvadāšanas procesa uzraudzība un noteiktu raksturlielumu monitorēšana. Kā tipiskus monitorējamus raksturlielumus var minēt izvēlēto maršrutu, transporta līdzekļa ātrumu, degvielas patēriņu, transporta līdzekļa vadītāja darba laiku, pārvadājamās kravas drošību [79] utt.

Minētās sistēmas tiek projektētas un būvētas tā, lai transporta līdzekļa vadītājam būtu minimālas iespējas ietekmēt sistēmas darbību. Viena no paradigmām mērķa sasniegšanai ir sistēmas maksimāla neatkarība no monitorējamā transporta līdzekļa. Piemēram, dati par transporta līdzekļa ātrumu tiek iegūti nevis no paša transporta līdzekļa elektroniskajām sistēmām, bet gan no atsevišķa GNSS uztvērēja ([80], 2.lpp.), kurš ietilpst autonomās monitoringa sistēmas sastāvā. Diemžēl eksistē iespējas apiet vai sabotēt monitoringa sistēmu, piemēram, izmantojot GNSS traucējumsignālu ģeneratorus. Līdz ar to datu ieguves risinājumi papildus jānodrošina pret iespējamajiem apiešanas vai sabotāžas gadījumiem.

Izstrādātā metodika, kas paredzēta transporta līdzekļa stāvokļa monitoringam, ir domāta kā atsevišķs adaptīvs aģents lielākas multiaģentu sistēmas sastāvā. Tā ir bāzēta uz adaptīvu algoritmu un kā ieejas datus izmanto tikai paātrinājuma mērījumus no 3-asu akcelerometra. Metodika tika izstrādāta, veicot plašāka apjoma rūpnieciska pētījuma priekšizpētes darbus. Minētā pētījuma globālais mērķis bija izveidot multiaģentu sistēmu, kas ļautu ierobežot degvielas piesavināšanos, bet lokālais mērķis - izveidot iekārtu, kas reālā laikā spēj noteikt, vai transporta līdzeklis atrodas kustībā, vai arī stāv uz vietas, t.sk. ar ieslēgtu dzinēju.

6.2. Literatūras pārskats

Eksistē dažādi uz akselerometriem bāzēti adaptīvi multiaģentu sistēmu risinājumi, kas paredzēti dažādu objektu monitoringam, piemēram, vecāku cilvēku monitorēšanai to dzīves vietās [81] [82] [83] un jaudas transformatoru monitorēšanai elektropārvades apakšstacijās [84]. Visās šajās sistēmās tiek izmantota kopēja paradigma - sarežģīts liela apjoma uzdevums tiek sadalīts daudzos mazos vienkāršos apakšuzdevumos, kuru izpilde tiek deleģēta atsevišķiem aģentiem. Noteiktu apakšuzdevumu izpildei aģentiem var būt nepieciešama adaptīva funkcionalitāte.

Eksistē arī atsevišķas uz akselerometriem bāzētas sistēmas, kuras ir paredzētas transporta līdzekļa stāvokļa monitoringam. Vienkāršākajā gadījumā šādas sistēmas uzdevums ir detektēt, vai transporta līdzeklis atrodas uz vietas, vai arī atrodas kustībā. Sarežģītākas transporta līdzekļa stāvokļa noteikšanas sistēmas spēj ne tikai detektēt šādus pamata stāvokļus, bet arī sniegt atbalstu vai pat īslaicīgi aizstāt tradicionālas uz GNSS signāliem bāzētas transporta līdzekļa pozīcijas noteikšanas sistēmas. Īsumā apskatīsim atsevišķus šādu sistēmu risinājumus.

Sistēma, kura aprakstīta *Roy Schwartz* patentā US 2010/0204877 [85], ir veidota kā portatīva iekārta ar iebūvētiem sensoriem. Iekārta veic no sensoriem iegūto datu analīzi un nosaka transporta līdzekļa stāvokli, vadoties pēc iepriekš definētiem nosacījumiem. Savukārt noteiktais transporta līdzekļa stāvoklis var tikt izmantots, lai veiktu iepriekš definētu darbību. Viens no izmantotajiem sensoriem ir akselerometrs, kas paredzēts vibrāciju detektēšanai – ja vibrāciju skaits sekundē pārsniedz noteiktu sliekšņa līmeni, tiek izdarīts secinājums, ka transporta līdzekļa dzinējs ir iedarbināts. Lai noteiktu atsevišķus specifiskus transporta līdzekļa stāvokļus, tiek izveidoti un pēc tam izmantoti šiem stāvokļiem atbilstoši raksturīgu vibrāciju šabloni. Noteiktais transporta līdzekļa stāvoklis ļauj atļaut vai aizliegt iepriekš definētu darbību veikšanu (piemēram, noteikta veida multimēdiju izmantošanu transporta līdzekļa kustības laikā), kā arī izpildīt iepriekš definētu darbību, ja notikusi pāreja starp noteiktiem stāvokļiem (piemēram, saglabājot vēlākai izmantošanai transporta līdzekļa pozīciju pēc tā apstāšanās un dzinēja izslēgšanas, uzsākot un pārtraucot stāvvietas apmaksas uzskaiti, kā arī atjaunojot informāciju par izmantotās stāvvietas pieejamību). Pastāv arī iespēja ar noteiktu ticamību noteikt transporta līdzekļa tipu (piemēram, salīdzinot tā pārvietošanās augstumu ar Zemes virsmas augstumu virs jūras līmeņa, vai arī veikto maršrutu – ar dzelzceļa līniju tīklu). Pozīcijas noteikšanai var tikt izmantots GPS vai arī kāds cits serviss ar atbilstošu funkcionalitāti.

Sistēma, kura aprakstīta *Mahesh Chowdhary, Qiyue Zhang, Mangesh Chansarkar* un *Gensheng Zhang* patentā US 2008/0234933 [86], ir veidota kā iegulta iekārta ar 3 asu akselerometriem un vertikālās Z ass žiroskopu. No sensoriem iegūtajiem datiem tiek veikts dispersijas aprēķins, kā arī noteiktas minimālās un maksimālās paātrinājuma un rotācijas vērtības.

Kā transporta līdzekļa stāvokļa noteikšanas pamata kritērijs tiek izmantotas specifiskas sliekšņa vērtības, bet kā papildus kritērijs – transporta līdzekļa kustības ātrums, kurš tiek iegūts, izmantojot GPS servisu. Sensoru dati tiek analizēti, izmantojot 2 sekundes ilgu slīdošo logu, līdz ar to transporta līdzekļa stāvokļa izmaiņu gadījumā jaunais transporta līdzekļa stāvoklis tiek noteikts ar 2 sekunžu aizturi. Šāds salīdzinoši neliels slīdošā loga izmērs ļauj ne vien operatīvi noteikt transporta līdzekļa stāvokļa izmaiņas, bet arī samazināt izmantoto sensoru ilglaicīgā dreifa ietekmi uz sistēmas darbību.

Sistēma, kas izstrādāta Kalgari universitātē [87], ir veidota kā inerciālās navigācijas iekārta ar dažādiem salīdzinoši lētiem MEMS sensoriem – akselerometriem, žiroskopiem un magnetometriem. Lai minimizētu izmantoto sensoru ilglaicīgā dreifa, kā arī miera stāvokļa paštrokšņu ietekmi uz sistēmas darbību, ir izveidota funkcionalitāte, kas paredzēta transporta līdzekļa stāvokļa noteikšanai. Atkarībā no noteiktā transporta līdzekļa stāvokļa, pozīcijas noteikšanai tiek izmantota noteikta piemērotu sensoru datu apakškopa, bet pārējie, attiecīgajā stāvoklī nepiemērotie dati pozīcijas noteikšanai netiek izmantoti. Transporta līdzekļa apstāšanās gadījumā tiek veikta sensoru dreifa kompensācija, kā arī aprēķinātās pozīcijas saglabāšana līdz nākošajai transporta līdzekļa kustības uzsākšanai. Sistēma ļauj nodrošināt transporta līdzekļa pozīcijas noteikšanu ar GPS servisu salīdzināmā kvalitātē līdz pat vienai minūtei ilgas transporta līdzekļa kustības laikā, ja vien kustības laikā tiek veiktas regulāras apstāšanās.

Abos gadījumos – gan vienkārši detektējot transporta līdzekļa pamata stāvokļus, gan sniedzot atbalstu tradicionālajām uz GNSS signāliem bāzētajām transporta līdzekļa pozīcijas noteikšanas sistēmām, ir nepieciešama sistēmas kalibrācija konkrētajam transporta līdzeklim. Izstrādātajā metodikā ietilpst ne vien transporta līdzekļa stāvokļa detektēšana, bet arī adaptīvā funkcionalitāte, kura ļauj sistēmai pielāgoties dažādu tipu transporta līdzekļu, t.sk. vieglo automašīnu un autobusu, īpatnībām.

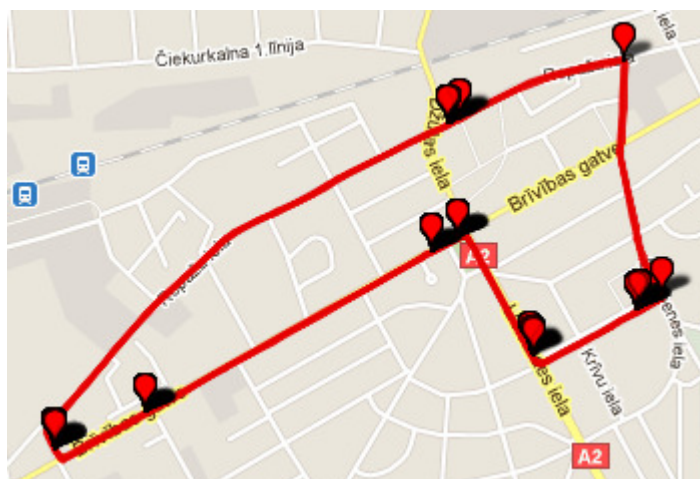
6.3. Eksperimentu apraksts

Kā pirmais darbs pirms eksperimentu uzsākšanas tika formulētas tehniskās prasības, kas būtu par pamatu transporta līdzekļa stāvokļa noteikšanas sistēmas izstrādei:

1. Sistēmai ir jāspēj noteikt, vai transporta līdzeklis atrodas kustībā, vai arī atrodas nekustīgi vienā pozīcijā, t.sk. ar darbojošos dzinēju.
2. Sistēmai ir jāspēj darboties transporta līdzekļos, kas pārvietojas pa ceļiem ar asfalta segumu – gan pilsētu ielām, gan starppilsētu šosejām.

3. Sistēmai ir jāspēj noteikt transporta līdzekļa stāvokli reālā laikā ar granularitāti, kas nepārsniedz 10 sekundes (optimālā gadījumā – nepārsniedz 1 sekundi).
4. Sistēmai ir jāspēj darboties iegultas iekārtas sastāvā, kuru raksturo mikrokontrolieris ar sekojošiem parametriem, kā arī izmantojot ne vairāk kā 30% no tā resursiem:
 - a. takts frekvence 16 MHz;
 - b. pastāvīgās atmiņas apjoms 1024 B;
 - c. operatīvās atmiņas apjoms 3862 B;
 - d. programmas atmiņas apjoms 128 KB.
5. Sistēmai ir jāspēj darboties, izmantojot kā ieejas datus signālus no 3 asu akselerometra ar dinamisko diapazonu, kas maināms robežās no ± 2 g līdz ± 8 g. Pieslēgšanās transporta līdzekļa elektroniskajām sistēmām, kā arī GNSS uztvērēju izmantošana nav paredzēta.

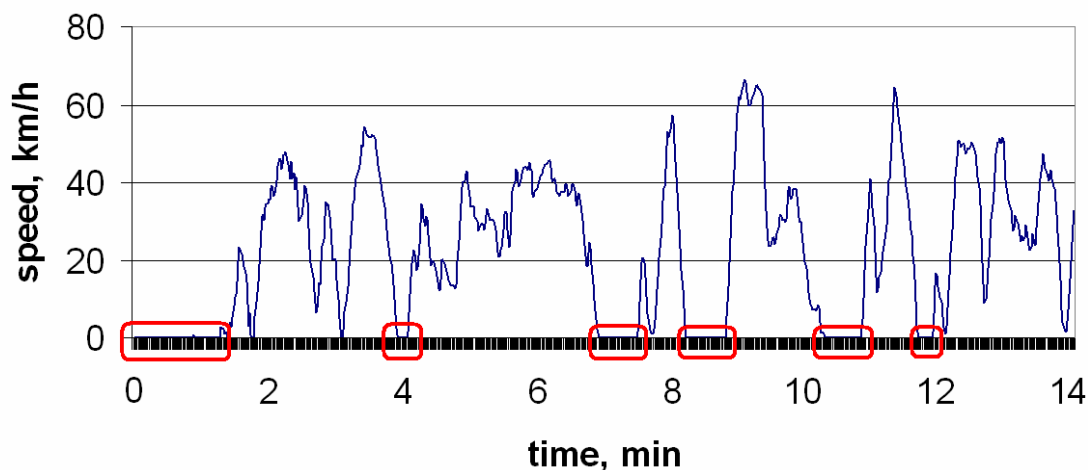
Lai pārbaudītu 3 asu akselerometra piemēroftību, izmantojot to kā vienīgo sensoru transporta līdzekļa stāvokļa noteikšanā, tika veikts eksperiments, kura laikā transporta līdzeklis BMW 323 Touring 34 minūšu laikā veica attēlā 6.1. redzamo 13,5 km garo distanci (3 apļi x 4,5 km).



6.1. att. Eksperimentā izmantotais 4,5 km garais ceļu tīkla fragments. Marķētajās vietās GNSS uztvērējs fiksējis transporta līdzekļa ātrumu 0 km/h.

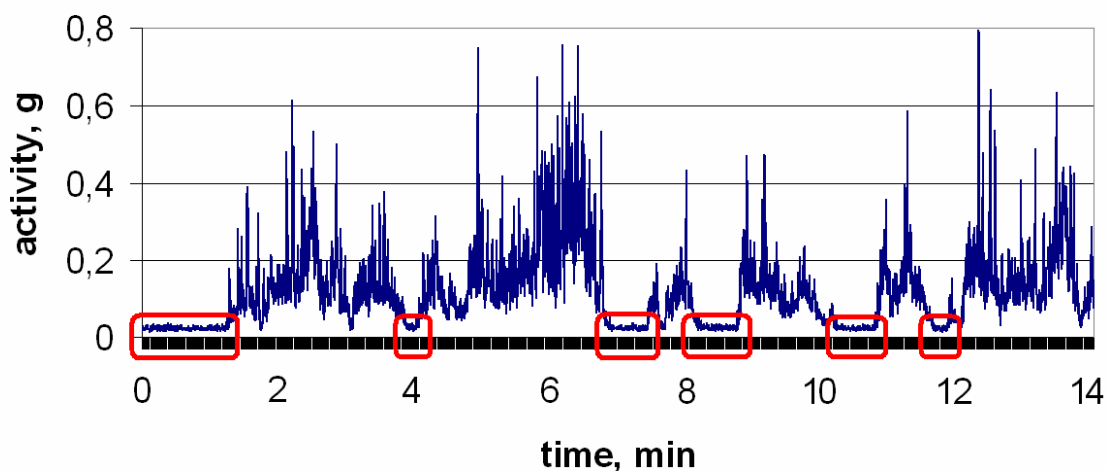
Datu ieguvei tika izmantota iegulta iekārta – modificēts LynxNet [51] kaklasiksnas prototips, kura sastāvā ietilpa arī Analog Devices 3 asu akselerometrs ADXL335. Akselerometra datu ieguve tika veikta 37x sekundē. Paralēli akselerometra datu ieguvei tika veikta arī transporta līdzekļa pozīcijas un attēlā 6.2. redzamā ātruma profila noteikšana 1x sekundē, izmantojot šim nolūkam GNSS uztvērēju ar SBAS funkcionalitāti Magellan eXplorist XL.

Akselerometru datu analīzei tika izmantots nedaudz modificēts STDEV algoritms no aktivitātēm, kas saistītas ar 5. nodaļā aprakstīto ceļa seguma monitoringa metodikas [50] izstrādi.



6.2. att. Eksperimentā fiksētais transporta līdzekļa BMW 323 Touring ātruma profils (fragments). Transporta līdzekļa apstāšanos reprezentē vietas, kur fiksēts ātrums 0 km/h.

Oriģinālā STDEV algoritma versija ietver akcelerometra vertikālās Z ass datu standartnovirzes aprēķināšanu, kā arī aprēķinātās vērtības sliekšņošanu – šajā gadījumā ceļā seguma bojājumi tiek detektēti, konstatējot vērtības, kuras pārsniedz noteiktu sliekšni. STDEV algoritma modificētais variants ietver visu trīs akcelerometra asu datu standartnoviržu summēšanu un iegūtās summas sliekšņošanu – šajā gadījumā transporta līdzekļa stāvēšana tiek detektēta, konstatējot vērtības, kuras nesasniedz noteiktu sliekšni. Konceptijas pārbaudes stadijā standartnovirzes tika aprēķinātas, izmantojot slīdošo logu ar izmēru 10 mērījumi, bet sliekšņošana tika veikta, izmantojot kā robežas vērtību 0,04 g. Datu apstrādes rezultātā izveidotais transporta līdzekļa aktivitātes profils (fragments) redzams attēlā 6.3., bet algoritma veikspēja ir aprakstīta tabulā 6.1.



6.3. att. Eksperimentā fiksētais transporta līdzekļa BMW 323 Touring aktivitātes profils (fragments). Transporta līdzekļa apstāšanos reprezentē vietas, kur fiksēta 3 asu paātrinājumu standartnoviržu summa, mazāka par 0,04 g.

Modificētā STDEV algoritma veiktspēja transporta līdzekļa stāvokļa noteikšanā

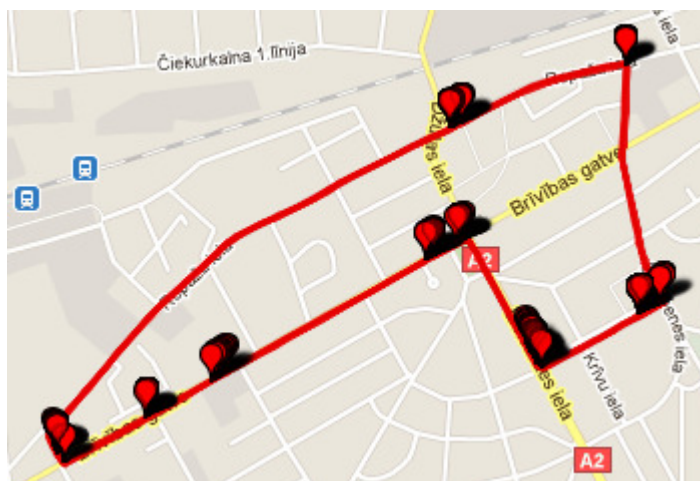
<i>Parametrs</i>	<i>Vērtība</i>
<i>Visas (stāvēšana un braukšana) fiksētās transportlīdzekļa pozīcijas</i>	2043
<i>Stāvēšanas pozīcijas (GNSS uztvērēja dati)</i>	514
<i>Stāvēšanas pozīcijas (akselerometra dati)</i>	634
<i>Stāvēšanas pozīcijas (GNSS uztvērēja un akselerometra dati)</i>	500

Izmantojot datu ieguvei 3 asu akselerometru un datu apstrādei modificēto STDEV algoritmu, tika detektētas 500 no 514 no tām stāvēšanas pozīcijām, kuras tika noteiktas, vadoties pēc GNSS uztvērēja sniegtajiem transporta līdzekļa ātruma datiem. Aprēķinot algoritma spēju atšķirt derīgo signālu no trokšņa, tika iegūti sekojoši rezultāti:

1. *true positive* (TP) = $500 / 514 = 97,28\%$
2. *false positive* (FP) = $(634 - 514) / (2043 - 514) = 120 / 1529 = 7,85\%$
3. *true negative* (TN) = $(2043 - 634) / (2043 - 514) = 1409 / 1529 = 92,15\%$
4. *false negative* (FN) = $(514 - 500) / 514 = 14 / 514 = 2,72\%$
5. *accuracy* (AC) = $1409 + 500 / 1409 + 120 + 14 + 500 = 1909 / 2043 = 93,44\%$
6. *precision* (P) = $500 / 120 + 500 = 500 / 620 = 80,65\%$

Pievēršot uzmanību salīdzinoši augstajam (7,85%) FP rādījumam, tika veikta papildus izpēte, lai noskaidrotu, kādās pozīcijās modificētais STDEV algoritms kļūdaini detektējis stāvēšanu braukšanas vietā. Tika konstatēts, ka 123 no 134 no kļūdaini detektētajām stāvēšanas pozīcijām transporta līdzekļa ātrums nebija lielāks par 25 km/h, kā arī tās atradās tiešā tādu pozīciju tuvumā (skat. attēlu 6.4.), kam ar GNSS uztvērēju bija noteikts transporta līdzekļa ātrums 0 km/h. Tas nozīmē, ka stabili braukšanas un stāvēšanas stāvokļu noteikšanu modificētais STDEV algoritms veic ar praktiskajam pielietojumam adekvātu veiktspēju, bet ir nepieciešami uzlabojumi, lai samazinātu kļūdas, kuras rada transporta līdzekļa stāvokļa maiņu, uzsākot vai pārtraucot kustību. Lai gūtu priekšstatu, cik lielā mērā modificētā STDEV algoritma spēju atšķirt derīgo signālu no trokšņa ietekmētu šādi uzlabojumi, tika veikti aprēķini, ņemot par pamatu pieņēmumu, ka transporta līdzekļa apstāšanās reprezentē vietas, kur ar GNSS uztvērēju bija noteikts ātrums zemāks par 25 km/h. Jāpiebilst, ka šāds pieņēmums nav pretrunā ar sākotnējo pētījuma mērķi, jo transporta līdzekļa kustība ar šādiem nelieliem ātrumiem raksturīga tieši kustības uzsākšanas un pārtraukšanas gadījumos, nevis pastāvīgā ilgtermiņa režīmā. Veicot aprēķinus, tikai iegūti sekojoši rezultāti:

1. *true positive* (TP) = $623 / 637 = 97,80\%$
2. *false positive* (FP) = $(634 - 623) / (2043 - 637) = 11 / 1406 = 0,78\%$
3. *true negative* (TN) = $(2043 - 648) / (2043 - 637) = 1395 / 1406 = 99,22\%$
4. *false negative* (FN) = $(637 - 623) / 637 = 14 / 637 = 2,20\%$
5. *accuracy* (AC) = $(1395 + 623) / (1395 + 11 + 14 + 623) = 2018 / 2043 = 98,78\%$
6. *precision* (P) = $623 / (11 + 623) = 623 / 634 = 98,27\%$



6.4. att. Eksperimentā izmantotais 4,5 km garais ceļu tīkla fragments. Marķētajās vietās modificētais STDEV algoritms fiksējis transporta līdzekļa aktivitātes profilu, mazāku par 0,04 g.

Analizējot izveidoto transporta līdzekļa aktivitātes profilu, tika konstatēts, ka algoritmā ir nepieciešams iekļaut mehānismu, kas novērstu noteiktā transporta līdzekļa stāvokļa nestabilitāti situācijās, kad aktivitātes profila vērtības svārstās nelielā diapazonā tieši robežas vērtības tuvumā. Šādu mehānismu ir iespējams izveidot, izmantojot nevis vienu, bet divas robežas sliekšņa vērtības – T_{low} un T_{high} . Citi algoritma uzlabojumi ietvēra akcelerometra datu ieguves biežuma palielināšanu no 37x līdz 100x sekundē, kā arī slidošā loga izmēra palielināšanu no 10 mērījumiem/0,25 sekundēm līdz 100 mērījumiem/1 sekunde. Šīs izmaiņas bija saistītas ar tehniskajās prasībās minētā akcelerometra parametru maksimāli efektīvu izmantošanu.

Nākošo eksperimentu mērķis bija pārbaudīt šo risinājumu, izmantojot dažādus transporta līdzekļus (vieglie auto Volvo V70 un VW Passat Variant, kā arī satiksmes autobuss Setra S415 HDH), dažādus ceļa seguma tipus (maršruts Cēsis – Rīga, kas ietver gan pilsētu ielas, gan starppilsētu šoseju), kā arī dažādas transporta līdzekļu apstāšanās (luksofori un sabiedriskā transporta pieturas). Ņemot vērā tehnisko prasību par mikrokontroliera resursu ekonomisku izmantošanu, tika izvirzīts pieņēmums, ka sākotnējā algoritma optimizācija veicama, izmantojot kā mērvienības paātrinājuma g vērtības, bet reālā implementācija gala variantā veicama, izmantojot kā

mērvienības konkrētā akcelerometra neapstrādātās vērtības. Līdz ar to nākošajiem eksperimentiem tika izmantots sekojošs algoritma variants:

1. 3 asu akcelerometra datu ieguve tiek veikta 100x sekundē.
2. Izmantojot atbilstošu datu struktūru, tiek uzkrāti visi pēdējās sekundes laikā iegūtie dati:

$$X[] = \{X_{n-99}, \dots, X_n\}; \quad Y[] = \{Y_{n-99}, \dots, Y_n\}; \quad Z[] = \{Z_{n-99}, \dots, Z_n\}$$

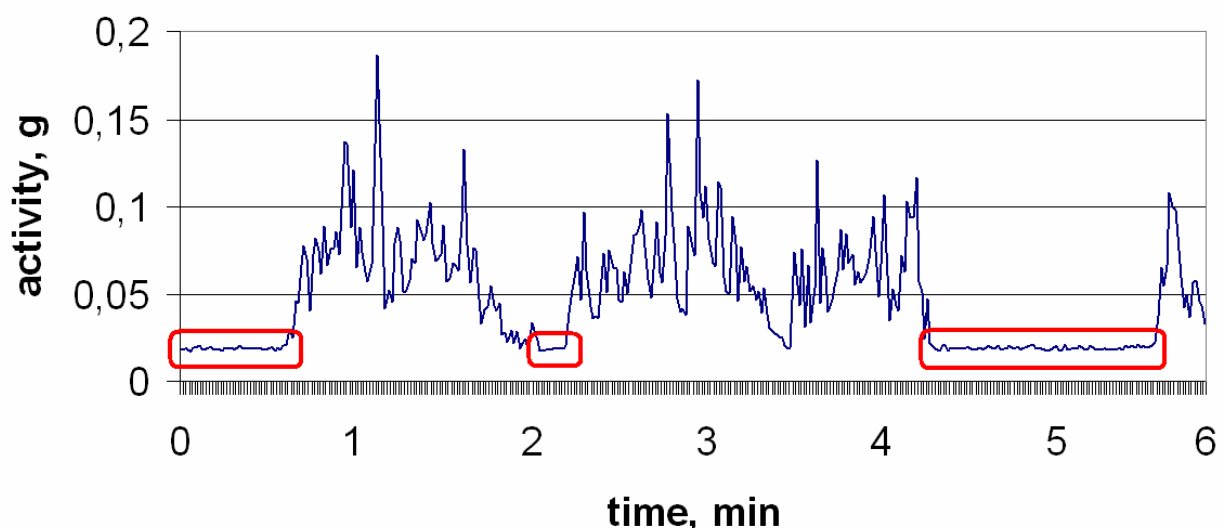
3. 1x sekundē tiek aprēķinātas visu 3 asu datu standartnovirzes, kā arī to summa:

$$STDEV(X[]) + STDEV(Y[]) + STDEV(Z[])$$

4. Ja standartnoviržu summa:

- a. $> 0,1$ g (virs T_{high}) – tiek fiksēta transporta līdzekļa braukšana;
- b. $< 0,05$ g (zem T_{low}) – tiek fiksēta transporta līdzekļa stāvēšana;
- c. $\geq 0,05$ un $\leq 0,1$ g (starp T_{low} un T_{high}) – tiek saglabāts pēdējais iepriekš fiksētais transporta līdzekļa stāvoklis.

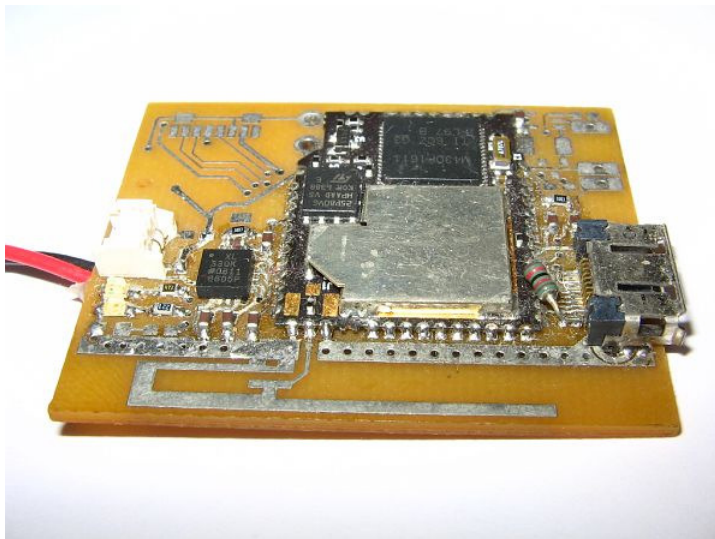
Veicot testa braucienu ar satiksmes autobusu Setra S415 HDH, tika konstatēts, ka šāda tipa transporta līdzekli raksturo aktivitātes profils ar salīdzinoši zemākām paātrinājuma vērtībām (skat. attēlu 6.5.). Atšķirībā no vieglā auto, šajā gadījumā tipiska g vērtība transporta līdzekļa apstāšanās laikā bija $\sim 0,02$ g, līdz ar to iepriekš aprakstītajam algoritmam piemērotas robežas vērtības apstāšanās konstatēšanai (T_{low}) būtu 0,03 g, bet braukšanas uzsākšanas konstatēšanai (T_{high}) – 0,06 g. Atšķirības aktivitātes profilā var tikt skaidrotas ar atšķirīgajām transporta līdzekļu masām, kā arī atšķirīgo attālumu starp izmantoto datu ieguves aparāturu un transporta līdzekļa dzinēju kā būtiskāko vibrāciju avotu transporta līdzekļa apstāšanās stāvoklī.



6.5. att. Eksperimentā fiksētais transporta līdzekļa Setra S415 HDH aktivitātes profils (fragments).

Transporta līdzekļa apstāšanos reprezentē vietas, kur fiksēta 3 asu paātrinājumu standartnoviržu summa, mazāka par 0,03 g.

Turpmākajiem eksperimentiem datu ieguvei un apstrādei tika izmantota cita aparatūras platforma – komponents POGA v.1b (skat. attēlu 6.6.). Minētajā komponentā ietilpst bezvadu sensoru tīklu mezgls Tmote Mini un akcelerometrs ADXL330, kā arī divas gaismas diodes, kuras tika izmantotas, lai testa braucienu laikā attēlotu noteikto transporta līdzekļa stāvokli vizuālā veidā.



6.6. att. Eksperimentos izmantotais komponents POGA v. 1b uz bezvadu sensoru tīklu mezgla Tmote Mini bāzes.

Pēc šo eksperimentu rezultātu analīzes (skat. tabulu 6.2.) tika izdarīti secinājumi par izvēlēta algoritma potenciālo piemērotību atšķirīgu transporta līdzekļu tipu stāvokļa noteikšanai, kā arī par nākotnes nepieciešamību algoritmā iekļaut funkcionalitāti, kas ļautu veikt sistēmas paškalibrāciju konkrētajam transporta līdzeklim. Minētās funkcionalitātes izveidei tika plānots izmantot piesaisti katra konkrētā transporta līdzekļa standartnovirzes līmenim apstāšanās stāvoklī.

6.2. tabula

Transporta līdzekļa stāvokļa noteikšanas algoritma veikspēja dažādiem transporta līdzekļiem, izmantojot kā robežas vērtības $T_{low}=0,05$ g un $T_{high}=0,1$ g.

	<i>Volvo V70</i>	<i>VW Passat Variant</i>	<i>Setra S415 HDH</i>
<i>Stāvēšana</i>	<i>OK</i>	<i>OK</i>	<i>OK</i>
<i>Braukšana</i>	<i>OK</i>	<i>OK</i>	<i>NOK (*3)</i>
<i>Apstāšanās</i>	<i>OK (*1)</i>	<i>OK (*1)</i>	<i>OK (*4)</i>
<i>Uzsākšana</i>	<i>OK (*2)</i>	<i>OK (*2)</i>	<i>NOK (*5)</i>

**1 - var pārslēgties apsteidzoši, ja kustība tiek nobeigta, izriņinoties pa līdzenu virsmu*

**2 - var pārslēgties aizturēti, ja kustība tiek uzsākta izteikti plūdeni*

**3 - ir tendence patvaļīgi pārslēgties uz stāvēšanu, ripinoties pa līdzenu virsmu*

**4 - var pārslēgties izteikti apsteidzoši, ja kustība tiek nobeigta, izriņinoties pa līdzenu virsmu*

**5 - var pārslēgties izteikti aizturēti, pat ja kustība tiek uzsākta tipiski autobusam*

Balstoties uz līdz šim iegūtajiem datiem, tika definēti divi pieņēmumi, kas tālāk kalpoja par pamatu transporta līdzekļa stāvokļa noteikšanas algoritma adaptīvās funkcionalitātes izstrādei:

1. Eksistē noteiktas standartnoviržu summas vērtības, kuras pārsniedzot, transporta līdzeklis noteikti atrodas kustībā, bet zem kurām – transporta līdzeklis noteikti stāv uz vietas. Pirmajā tuvinājumā šīs vērtības tiek pieņemtas kā $T_{high}=0,1$ g un $T_{low}=0,03$ g.
2. Transporta līdzekļa stāvēšanu uz vietas raksturo vismaz 5 sekunžu garš periods, kurā fiksētas relatīvi tuvas aktivitātes vērtības.

Izmantojot standartnoviržu summēšanu, katrai transporta līdzekļa stāvokļa mērījumu sekundei tika aprēķināta tās aktivitātes vērtība. Šo pieeju ir nepieciešams saglabāt, ja nepieciešams noteikt transporta līdzekļa stāvokli ar 1 sekundes granularitāti. Savukārt stāvēšanas periodu būtu iespējams atpazīt un izmantot algoritma kalibrēšanas vajadzībām, piemērojot standartnoviržu analīzi iepriekš iegūtajām aktivitātes vērtībām:

1. Paralēli jau esošajiem procesiem tiek izveidota atmiņas struktūra, kur glabājas dati par pēdējo 5 sekunžu standartnoviržu summu vērtībām:

$$ACTIVITY [] = \{ ACTIVITY_{n-4}, \dots, ACTIVITY_n \}$$

2. Pēc katras jaunas vērtības pievienošanas tiek aprēķināta standartnovirzes vērtība pēdējo 5 sekunžu laikam:

$$STDEV(ACTIVITY [])$$

3. Ja šī standartnovirzes vērtība ir zem noteikta sliekšņa (vadoties no līdz šim iegūtajiem datiem, pirmajā tuvinājumā izmantojama vērtība 0,005g), tiek uzsākta vai turpināta skaitīšana, cik reizes/sekundes pēc kārtas nosacījums izpildās.

4. Ja skaitīšana sasniedz rezultātu 5 (respektīvi, ir atpazīta stāvēšana uz vietas), tiek aprēķināta vidējā ACTIVITY vērtība šajā laikā un nomainītas algoritmā izmantotās sliekšņu vērtības:

$$T_{low} = AVERAGE(ACTIVITY []) * 1,25; T_{high} = T_{low} * 1,5$$

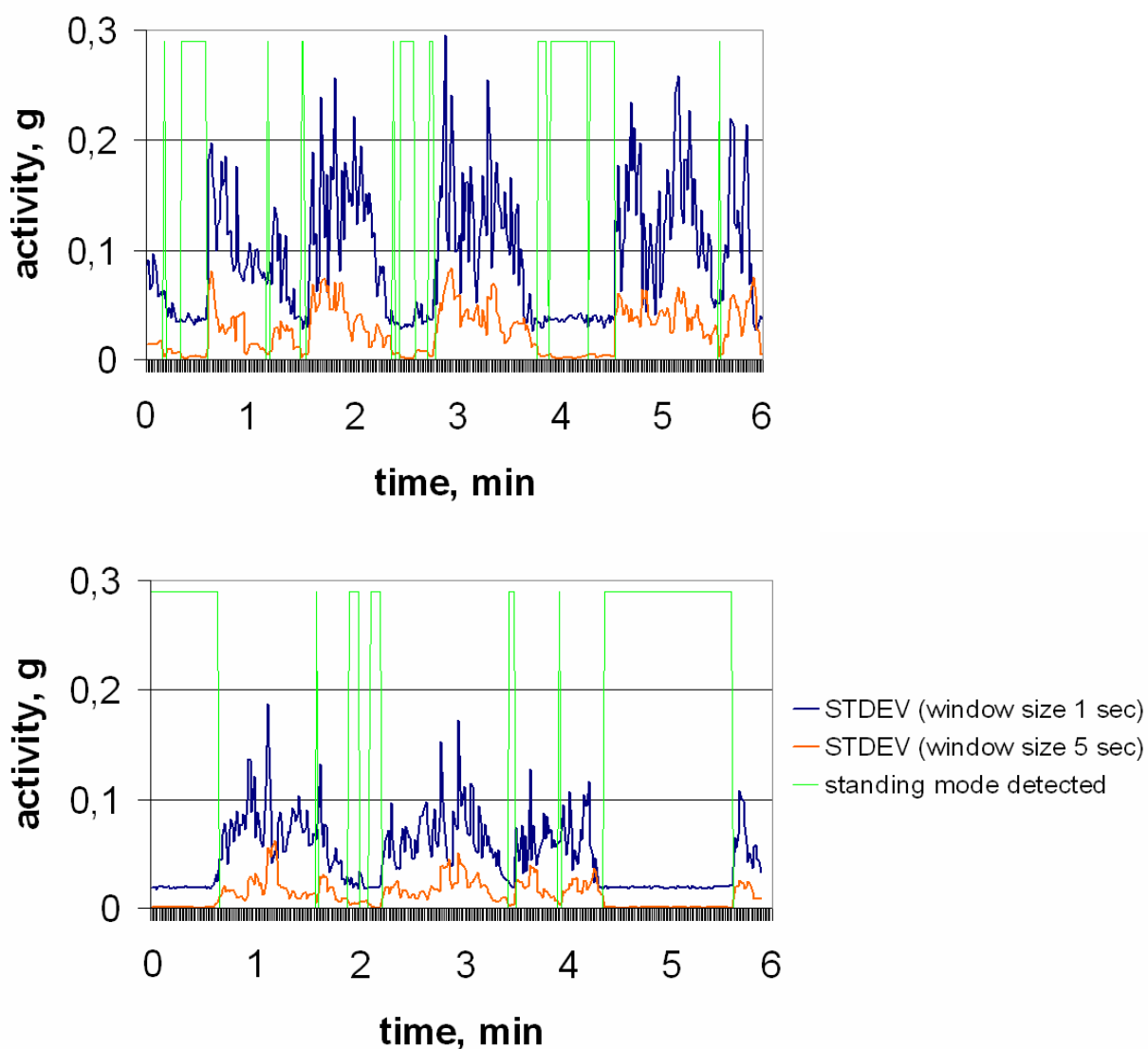
5. Lai novērstu algoritma piesaisti transporta līdzekļa stāvēšanai uz vietas ar izslēgtu dzinēju, kā arī kustībai ar salīdzinoši vienmērīgu paātrinājumu, nepieciešams iekļaut arī papildus ierobežojumus:

$$T_{Low} \neq 0 \text{ g}; T_{High} \leq 0,11 \text{ g}$$

Beidzamie eksperimenti tika veikti algoritma adaptīvā varianta pārbaudei. Šo eksperimentu veikšanai tika izmantots vieglais auto Volvo V70 un satiksmes autobuss Setra S415 HDH.

6.4. Rezultāti

Izstrādātā transporta līdzekļa stāvokļa monitoringa metodika, kuras pamatā ir adaptīvais standartnoviržu summas algoritma variants, ir piemērota izmantošanai dažāda tipa transporta līdzekļu kontekstā, piemēram, vieglajiem auto un satiksmes autobusiem, par ko liecina attēlā 6.7. redzamā algoritma darbība, izmantojot reālu testa braucienu datus.



6.7. att. Transporta līdzekļa aktivitātes profils (fragments). Augšā - dati no vieglā auto Volvo V70, apakšā - dati no satiksmes autobusa Setra S415 HDH. Aktivitāte(0) raksturo algoritma noteikto transporta līdzekļa stāvēšanu uz vietas.

6.5. Diskusija

Eksperimentu rezultāti ļauj secināt, ka izstrādātā transporta līdzekļa stāvokļa noteikšanas metodika, kuras pamatā ir akselerometru datu izmantošana, ir piemērota transporta līdzekļiem, kas pārvietojas pa ceļiem ar asfalta segumu. Eksperimentu laikā izmantotajiem ceļu tīkla fragmentiem bija raksturīga plaša diapazona ceļa seguma kvalitāte – no salīdzinoši nesen uzklāta asfalta seguma līdz pat asfalta segumam, kuru raksturoja ievērojams bojājumu apjoms. Metodikas testēšana uz ceļiem ar grants segumu pagaidām netika veikta, bet tā kā šā tipa ceļa segumu raksturo salīdzinoši lielākas vertikālā profila izmaiņas, ir pamats pieņēmumam, ka metodika būtu spējīga darboties arī uz ceļiem ar šāda veida segumu.

Veicot datu ieguves un apstrādes testus ar dažādu izmantoto aparātūru, autoram bija iespēja to notestēt arī cita veida transporta līdzeklī – pasažieru vilcienā. Tā kā šajā gadījumā transporta līdzekļa izmantotais ceļa segums atšķiras ar ļoti gludu virsmu, kā arī attālums līdz transporta līdzekļa dzinējam ir būtiski lielāks nekā vieglā auto vai satiksmes autobusa gadījumā, metodika tikai daļēji spēja veikt transporta līdzekļa stāvokļa noteikšanu – problemātiski bija atpazīt pārvietošanos starp stacijām pilsētas ietvaros, kur vilciena gaita tiek uzņemta un samazināta ļoti plūdeni, kā arī maksimālais ātrums ir salīdzinoši neliels. Līdz ar to var izteikt pieņemumu, ka izstrādātā metodika nav tiešā veidā izmantojama sliežu tipa transporta līdzekļiem.

Tālākas plānotās aktivitātes izstrādājamās transporta līdzekļa stāvokļa noteikšanas sistēmas kontekstā iekļaus eksperimentus ar plašāku transporta līdzekļu kopu, kā arī stāvokļu izmaiņas noteikšanas optimizāciju, balstoties uz konkrētā transporta līdzekļa un tā vadītāja īpatnībām.

Promocijas darba 6. nodaļā aprakstītā pētījuma rezultāti ir prezentēti konferencēs „PAAMS 2012: The 10th International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems” (Salamanka, Spānija, 28-30.03.2012) un „II LU un LMT Datorzinātņu dienas” (Ratnieki, Latvija, 06-08.08.2012), kā arī publicēti Springer izdotajā konferences zinātnisko rakstu krājumā (skat. tabulu 9.1.), kas indeksēts SciVerse Scopus un ISI Web of Knowledge / Web of Science datubāzēs. Paplašināta publikācijas versija ir sagatavota, iesniegta un pieņemta publicēšanai žurnālā „International Journal of Imaging and Robotics (IJIR)”.

7. TRANSPORTA LĪDZEKĻA POZĪCIJAS NOTEIKŠANA, IZMANTOJOT VAIRĀKUS SBAS UZTVĒRĒJUS UN DATUS NO LOKĀLĀM BĀZES STACIJĀM

Šajā nodaļā autors sniegs pārskatu par izstrādāto transporta līdzekļa pozīcijas noteikšanas metodiku, kas bāzēta uz vairākiem SBAS uztvērējiem un datiem no lokālajām bāzes stacijām. Vispirms tiks aplūkoti atsevišķi eksistējošie uz specifiskām salīdzinoši dārgām RTK un IMU iekārtām bāzētie transporta līdzekļa pozīcijas noteikšanas risinājumi, pēc tam iztirzāta metodikas implementācija, kuras pamatā ir vairāku vienkāršu salīdzinoši lētu SBAS uztvērēju, kā arī reālā laika datu no lokālajām bāzes stacijām izmantošana. Nodaļas nobeigumā atrodams metodikas novērtējums, kas balstīts uz reāli veiktiem datu ieguves un apstrādes eksperimentiem.

7.1. Ievads

Viena no jomām, kuru raksturo liels cilvēkam vienpersoniski pieņemamo lēmumu apjoms, ir transporta līdzekļa vadīšanas process. Šeit adekvāta lēmuma pieņemšana ir sevišķi būtiska, jo no tā var būt atkarīga ne vien vadāmā transporta līdzekļa un tā pasažieru, bet arī citu apkārt esošo transporta līdzekļu un cilvēku drošība.

Palielinoties dažādu transporta veidu kustības intensitātei, arvien lielāku nozīmi iegūst šo transporta plūsmu optimizācija. To iespējams panākt, gan uzlabojot transporta plūsmu vadību, gan arī nodrošinot transporta informācijas koplietošanu atsevišķu transporta līdzekļu vadītāju un/vai transporta līdzekļu starpā. Abās minētajās jomās problēmas iespējams risināt, veidojot atbilstošas aparatūras un programmatūras sistēmas, kuras var tikt iedalītas divās grupās:

1. Transporta līdzekļa manuālas vadīšanas atbalsta sistēmas, kuru funkcionalitāte iekļauj daļu no transporta līdzekļa vadīšanas aktivitātēm, kā arī iepriekš apstrādātas un apkopotas informācijas piegādi transporta līdzekļa vadītājam.
2. Transporta līdzekļa automātiskas vadīšanas sistēmas, kuru funkcionalitāte iekļauj visas transporta līdzekļa vadīšanas aktivitātes un nodrošina transporta līdzekļa kustību bez cilvēka kā transporta līdzekļa vadītāja līdzdalības.

Atkarībā no konkrētās sistēmas arhitektūras un funkcionalitātes, transporta līdzekļa manuālas vadīšanas atbalsta sistēmām un automātiskas vadīšanas sistēmām var tikt izvirzīti atsevišķi specifiski uzdevumi. Viens no būtiskākajiem šādu sistēmu uzdevumiem ir spēja noteikt transporta līdzekļa pozīciju ar sistēmas kopējās darbības nodrošināšanai pieņemamu precizitāti. Šī informācija tiek izmantota kā kustības plānošanas ievades dati transporta līdzekļa automātiskās vadīšanas sistēmās, kā arī kā koplietošanas dati transporta līdzekļa manuālas vadīšanas atbalsta sistēmās. Izmantojot transporta līdzekļa pozīcijas noteikšanai tipisku GNSS uztvērēju ([80], 2.lpp.), pozīcijas

datu precizitāti ietekmē daudzi faktori, piemēram, ēkas urbānā apvidū, koki mežainā apvidū, laika apstākļi utt. Šādā veidā iegūtu pozīcijas datu precizitāte ir pieņemama pielietošanai tradicionālai cilvēka vai transporta līdzekļa navigācijai, kur datus izmanto cilvēks, bet nav pieņemama pielietošanai iepriekšminētajās sistēmās, kur datus izmanto dators.

Izstrādātā transporta līdzekļa pozīcijas noteikšanas metodika ir paredzēta izmantošanai specifiska transporta līdzekļa manuālas vadīšanas atbalsta sistēmas risinājuma sastāvā. Tās pamatā ir vairāki GNSS uztvērēji ar iekļautu SBAS funkcionalitāti ([88], 157.lpp.). Kā papildus dati tiek izmantoti dati no stacionārām bāzes stacijām. Datu saņemšana tiek veikta, izmantojot bezvadu Tīmekļa pieslēgumu.

7.2.Literatūras pārskats

Eksistē sistēmas, kuras ir paredzētas precīzai transporta līdzekļa pozīcijas noteikšanai. Liela daļa šādu sistēmu ietilpst lielākās sistēmās, kuras ir izstrādātas, lai ar tām aprīkotu speciālu transporta līdzekli un piedalītos kādās automātiskās braukšanas vai daļēji automātiskās braukšanas sacensībās. Tipiski automātiskās braukšanas sacensību piemēri ir Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) organizētās sacensības DARPA Grand Challenge 2004. un 2005. gadā [89], DARPA Urban Challenge 2007. gadā [90] [91], bet daļēji automātiskās braukšanas sacensību piemērs – Grand Cooperative Driving Challenge (GCDC) 2011. gadā [92]. Katrā sacensību veidā tiek izmantoti atšķirīgi transporta līdzekļu kustības scenāriji, līdz ar to arī atšķiras prasības veidojamajām sistēmām, t.sk. prasības transporta līdzekļa pozīcijas noteikšanas precizitātei. Īsumā apskatīsim abu augstāk minēto sacensību uzvarētāju komandu risinājumus.

DARPA Urban Challenge 2007. gada sacensību uzvarētāji – komanda *Tartan Racing* [93], kura pārstāvēja *Carnegie Mellon University* sadarbībā ar *General Motors*, *Caterpillar* un *Continental AG*, izmantoja kombinētu transporta līdzekļa pozīcijas noteikšanas risinājumu, kas bāzēts uz Applanix POS-LV [94] komponentu. Minētajā komponentā ietilpst gan GNSS uztvērējs, gan arī IMU iekārta. Lai nodrošinātu pieņemamu drošības līmeni urbānā sacensību vidē, tika izmantoti arī papildus sensori, piemēram, lidari, radari un kameras.

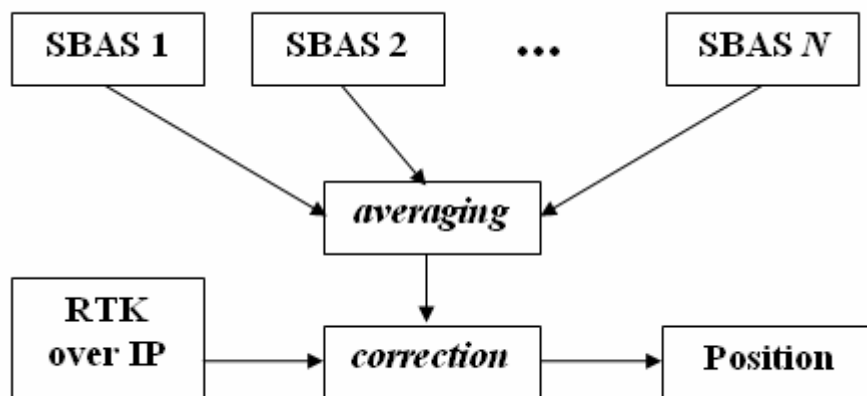
Grand Cooperative Driving Challenge sacensību uzvarētāji – komanda *AnnieWAY* [95], kura pārstāvēja *Karlsruhe Institute of Technology*, arī izmantoja līdzīgu kombinētu transporta līdzekļa pozīcijas noteikšanas risinājumu, kas bāzēts uz OXTS RT 3003 [96] komponentu. Arī šajā komponentā ietilpst gan GNSS uztvērējs, gan arī IMU iekārta. Lai nodrošinātu drošu distanci līdz priekšā braucošajam transporta līdzeklim, papildus tika izmantots arī augstas izšķirtspējas lāzera skaneris un vairākas kameras.

7.3. Eksperimentu apraksts

Pozīcijas noteikšanu, izmantojot GNSS signālus, ietekmē vairāki datu kļūdu rašanās avoti – radio signālu izplatīšanās jonosfērā un troposfērā, tiešo un atstaroto radio signālu uzveršana GNSS uztvērēja antenā, GNSS pavadoņu orbītu parametri, kā arī raidītājos un uztvērējos esošie precīzie pulksteņi. Visi šie kļūdu rašanās avoti var tikt iedalīti divās grupās:

1. Lokālie kļūdu rašanās avoti, kuriem raksturīga līdzīga ietekme salīdzinoši nelielā ģeogrāfiskajā apvidū.
2. Globālie kļūdu rašanās avoti, kuriem raksturīga līdzīga ietekme salīdzinoši lielā ģeogrāfiskajā apvidū ([97], 144.-198. lpp.).

Vienkārša metode, ar kuras palīdzību ir iespējams samazināt kļūdu, kas radusies no lokāliem kļūdu rašanās avotiem, iekļauj vairākus secīgi veiktus pozīcijas mērījumus un vidējo pozīcijas vērtību aprēķinu. Šī metode ir piemērota gadījumos, kad nepieciešams veikt pozīcijas noteikšanu stacionāram objektam, bet nav piemērota gadījumos, kad nepieciešams veikt pozīcijas noteikšanu mobilam objektam – kustībā esošam transporta līdzeklim. Vairāku secīgi veiktu pozīcijas mērījumu vietā metodika paredz izmantot vairākus vienlaicīgi (vai gandrīz vienlaicīgi) veiktus mērījumus, kas veikti, izmantojot vairākus GNSS uztvērējus ar iekļautu SBAS funkcionalitāti, pēc tam veicot tūlītēju vidējo pozīcijas vērtību aprēķinu (skat. attēlu 7.1.).



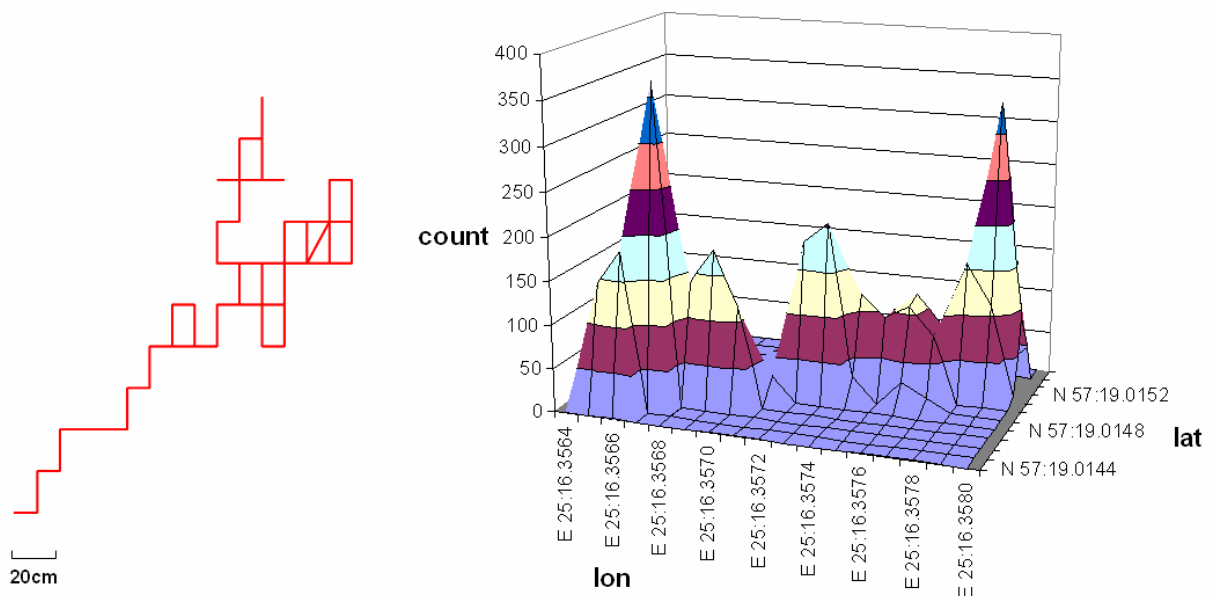
7.1. att. Transporta līdzekļa pozīcijas noteikšanas metodikas arhitektūra. Datim, kuri tiek saņemti no vairākiem SBAS uztvērējiem, tiek aprēķinātas vidējās vērtības. Pēc tam pozīcija tiek koriģēta, izmantojot datus no publiska bāzes staciju tīkla, kuri tiek saņemti, izmantojot bezvadu Tīmekļa pieslēgumu.

Vienkārša metode, ar kuras palīdzību ir iespējams samazināt kļūdu, kas radusies no globāliem kļūdu rašanās avotiem, iekļauj specifisku daudzfrekvenču (L1/L2) GNSS uztvērēju izmantošanu, kā

arī datu saņemšanu no netālām zināmās pozīcijās esošām stacionārām bāzes stacijām. Šī metode paredz specifiskas relatīvi dārgas RTK ([98], 15. lpp.) aparatūras izmantošanu, līdz ar to nav piemērota reāliem automātiskās vai daļēji automātiskās braukšanas eksperimentiem. Šādas relatīvi dārgas aparatūras vietā metodika paredz jau esošu publiski pieejamu stacionāru bāzes staciju izmantošanu, kā arī korekcijas datu saņemšanu, izmantojot bezvadu Tīmekļa pieslēgumu (skat. attēlu 7.1.).

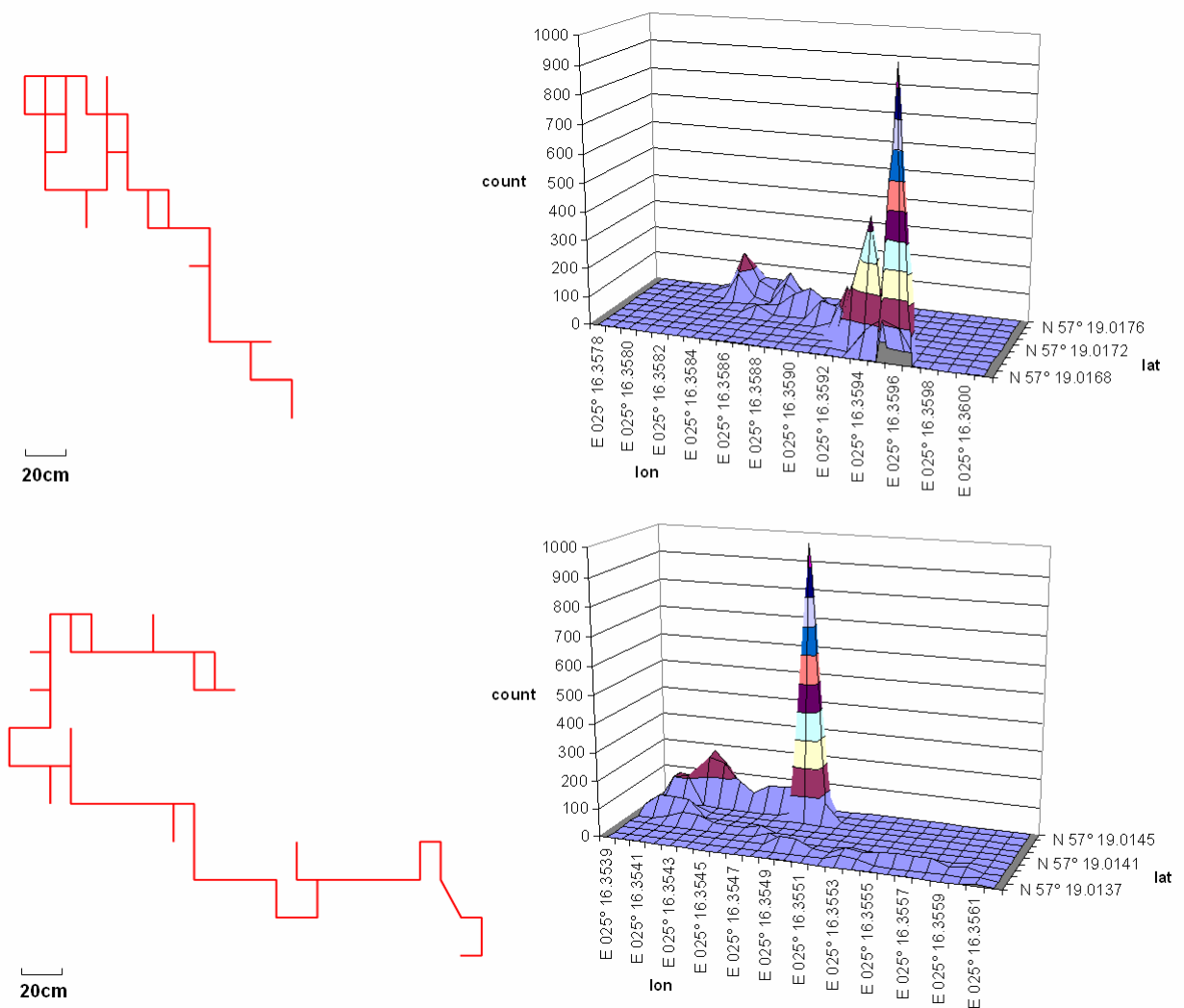
Pēc literatūras studijām, kuru laikā tika apskatītas dažādas jau eksistējošas transporta līdzekļa pozīcijas noteikšanas sistēmas, tika pieņemts lēmums veidot GCDC sacensību transporta līdzekļa pozīcijas noteikšanas sistēmu kā multimodālu risinājumu. Datus pozīcijas aprēķināšanai tika plānots iegūt no vairākiem SBAS uztvērējiem, kā arī no IMU iekārtas. Šāds risinājums tika izvēlēts, jo to bija iespējams realizēt ar salīdzinoši nelielām izmaksām, tajā pat laikā nodrošinot precizitāti, kādu reglamentēja publicētās GCDC sacensību tehniskās prasības [99]. Izvēlētie SBAS uztvērēji tika testēti reālu datu ieguves apstākļos dažādos režīmos, t.sk. statistiskā datu ieguves režīmā, dinamiskā datu ieguves režīmā un korekcijas datu pielietošanas režīmā.

Pirmais eksperiments tika veikts, lai noteiktu tipisku pozīcijas nobīdi vienam SBAS uztvērējam statistiskā datu ieguves režīmā. Šā eksperimenta laikā uztvērējs Magellan eXplorist XL [100] tika novietots fiksētā pozīcijā uz stāvoša transporta līdzekļa jumta. Pozīcijas datu ieguves sesijas ilgums bija 1 stunda, un pozīcijas dati tika fiksēti 1x sekundē. SBAS uztvērējs bija DGPS režīmā 100% no visa sesijas laika un katra pozīcija tika aprēķināta, izmantojot datus no vismaz 9 pavadoņiem.



7.2. att. Statiskās datu ieguves režīma tests, izmantojot vienu SBAS uztvērēju. Pa kreisi – pozīcijas nobīdes ceļš, pa labi pozīcijas nobīdes sadalījums.

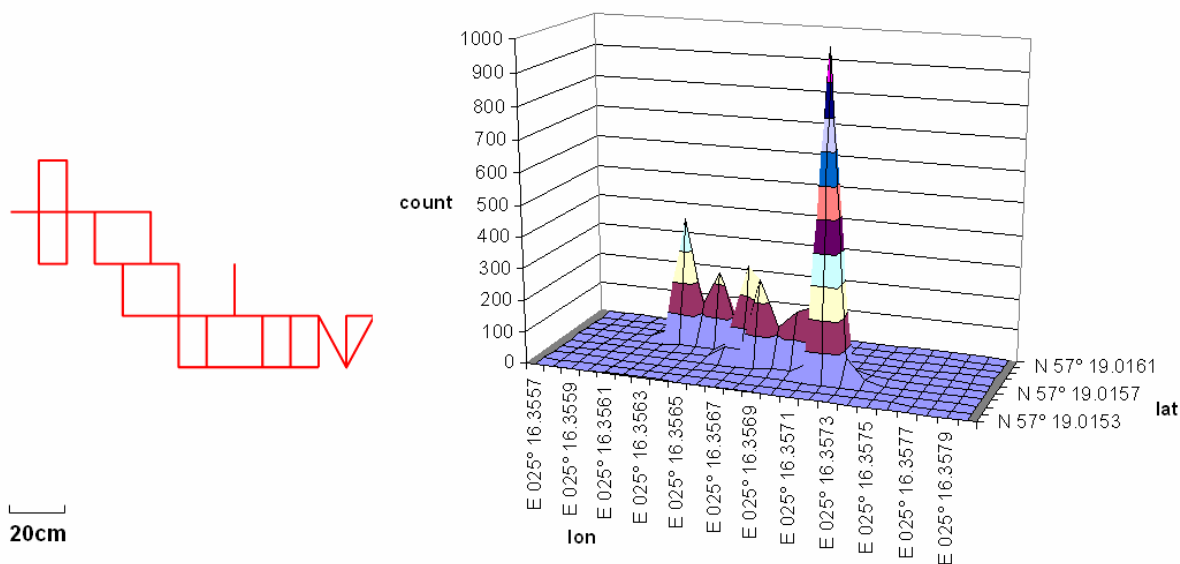
Fiksēto pozīciju statistiskā analīze parādīja, ka maksimālā uztvērēja pozīcijas nobīde rietumu-austrumu virzienā (lon) ir 1,51 m un ziemeļu-dienvidu virzienā (lat) 1,81 m (skat. attēlu 7.2. – pa kreisi). Savukārt 2DRMS diapazons jeb 98,2% ([101], 153. lpp.) no fiksētajām uztvērēja pozīcijas nobīdēm rietumu-austrumu virzienā (lon) ir 1,51 m un ziemeļu-dienvidu virzienā (lat) 1,48 m. Fiksēto pozīciju koordinātu un to sadalījuma visā nobīdes zonā grafiskā analīze parādīja, ka eksistē vismaz divi apgabali ar augstu fiksēto pozīciju koncentrāciju, kuri atrodas pretējos fiksēto pozīciju nobīdes zonas stūros (skat. attēlu 7.2. – pa labi). Šāds sadalījums neatbilst Gausa sadalījumam un rosina formulēt pieņēmumu, ka to ir ietekmējuši globālie datu kļūdu rašanās avoti un šo ietekmi varētu samazināt, izmantojot papildus korekcijas datus.



7.3. att. Statiskās datu ieguves režīma tests, izmantojot divus SBAS uztvērējus. Pa kreisi – pozīcijas nobīdes ceļi, pa labi pozīcijas nobīdes sadalījumi. Augšā – dati no Magellan eXplorist XL, apakšā – dati no Magellan eXplorist 210.

Nākošais eksperiments tika veikts, lai noteiktu tipisku pozīcijas nobīdi divu SBAS uztvērēju sistēmai statistiskā datu ieguves režīmā. Pirms šā eksperimenta veikšanas tika formulēts pieņēmums, ka divu neatkarīgu mērījumu iekārtu un vienlaicīgi iegūtu datu kombinēšanas rezultātā potenciāli ir iespējams panākt sistēmas fiksēto pozīciju nobīdes zonas samazināšanos. Šā eksperimenta laikā tika izmantots papildus SBAS uztvērējs Magellan eXplorist 210 [102], kurš arī tika novietots fiksētā pozīcijā uz stāvoša transporta līdzekļa jumta, bet pretējā tā stūrī. SBAS uztvērēji bija DGPS režīmā 100% (XL) un 99,97% (210) no visa sesijas laika un katra pozīcija tika aprēķināta, izmantojot datus no vismaz 7 (XL) un 8 (210) pavadoņiem.

Fiksēto pozīciju statistiskā analīze parādīja, ka maksimālā uztvērēja pozīcijas nobīde rietumu-austrumu virzienā (lon) ir 1,31 m (XL) un 2,31 m (210) un ziemeļu-dienvidu virzienā (lat) 1,67 m (gan XL, gan 210) (skat. attēlu 7.3. – pa kreisi). Savukārt 2DRMS diapazons jeb 98,2% no fiksētajām uztvērēja pozīcijas nobīdēm rietumu-austrumu virzienā (lon) ir 1,21 m (XL) un 1,91 m (210) un ziemeļu-dienvidu virzienā (lat) 1,67 m (XL) un 1,48 m (210). Fiksēto pozīciju koordinātu un to sadalījuma visā nobīdes zonā grafiskā analīze parādīja, ka katram uztvērējam eksistē viens apgabals ar augstu fiksēto pozīciju koncentrāciju, bet šie apgabali atrodas pretējos fiksēto pozīciju nobīdes zonas stūros (skat. attēlu 7.3. – pa labi). Šāds sadalījums atbilst arī reālajam SBAS uztvērēju izvietojumam uz stāvoša transporta līdzekļa jumta.



7.4. att. Statiskās datu ieguves režīma tests, izmantojot divu SBAS uztvērēju sistēmu. Pa kreisi – pozīcijas nobīdes ceļš, pa labi pozīcijas nobīdes sadalījums.

Vienlaicīgi iegūtu pozīcijas datu pāru apvienošana tika veikta, aprēķinot vidējās ģeogrāfiskā platuma un garuma koordinātu vērtības. Aprēķināto pozīciju statistiskā analīze parādīja, ka maksimālā divu SBAS uztvērēju sistēmas pozīcijas nobīde rietumu-austrumu virzienā (lon) ir 1,31

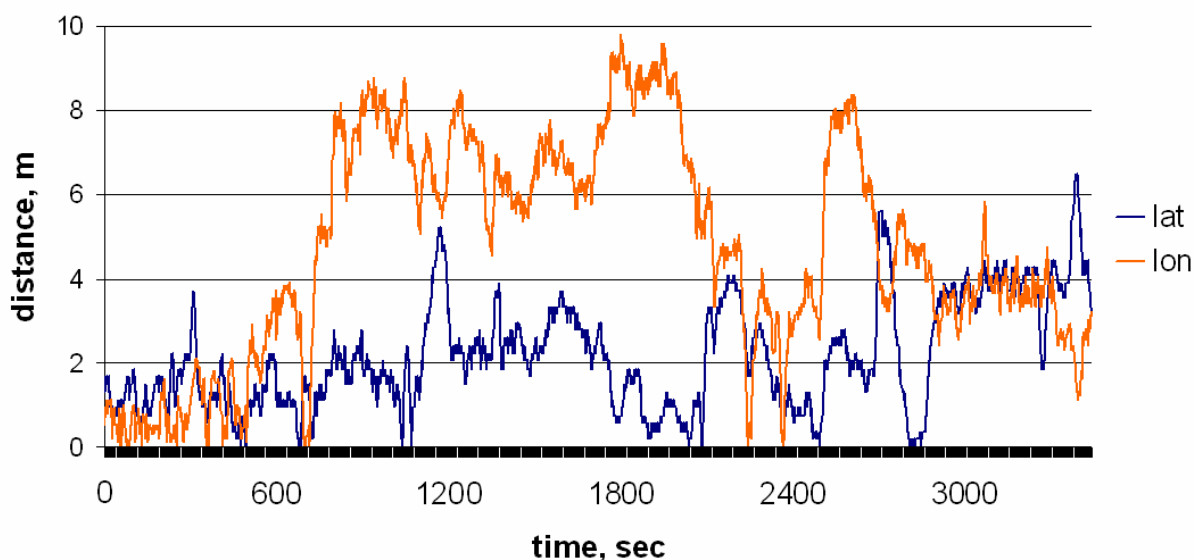
m un ziemeļu-dienvidu virzienā (lat) 0,74 m (skat. attēlu 7.4. – pa kreisi). Savukārt 2DRMS diapazons jeb 98,2% no aprēķinātās pozīcijas nobīdēm rietumu-austrumu virzienā (lon) ir 1,11 m un ziemeļu-dienvidu virzienā (lat) 0,55 m. Aprēķināto pozīciju koordinātu un to sadalījuma visā nobīdes zonā grafiskā analīze parādīja, ka eksistē viens apgabals ar augstu aprēķināto pozīciju koncentrāciju, kas atbilst Gausa sadalījumam. Pozīcijas nobīdes zonas samazināšanās rosina formulēt pieņēmumu, ka pozīcijas noteikšanas precizitāte ir uzlabojusies salīdzinājumā ar viena SBAS uztvērēja izmantošanu.

Nākošais eksperiments tika veikts, lai noteiktu tipisku pozīcijas nobīdi divu SBAS uztvērēju sistēmai dinamiskā datu ieguves režīmā, kā arī veiktu datu iegūvi no IMU iekārtas. Pirms šā eksperimenta veikšanas divi Magellan eXplorist uztvērēji - XL un 210 tika novietoti fiksētās pozīcijās uz transporta līdzekļa priekšējā paneļa. Eksperimenta laikā transporta līdzeklis vienas stundas laikā veica 67 km garu ceļu. Izvēlētajā maršrutā ietilpa 58 km starppilsētu šosejas ar atļauto kustības ātrumu 90 km/h, kā arī 9 km pilsētas ielu ar atļauto kustības ātrumu 50 km/h (atsevišķos fragmentos – 70 km/h) (skat. attēlu 7.5.). Reālais transporta līdzekļa sasniegtais maksimālais ātrums bija 63 km/h, braucot pa pilsētas ielām, un 103 km/h, braucot pa starppilsētu šoseju. Pozīcijas dati tika fiksēti 1x sekundē, bet dati no IMU iekārtas (3-asu akcelerometrs un 2-asu žiroskops) 10x sekundē. SBAS uztvērēji bija DGPS režīmā 54,47% (XL) un 88,57% (210) no visa sesijas laika un katra pozīcija tika aprēķināta, izmantojot datus no vismaz 6 (XL) un 5 (210) pavadoņiem. Salīdzinot DGPS režīma laiku un pieejamo pavadoņu skaitu ar attiecīgajiem raksturlielumiem statistiskā datu ieguves režīma eksperimenta laikā, tika konstatēts, ka dinamiskajā datu ieguves režīmā jāērķinās ar grūtākiem datu ieguves apstākļiem.



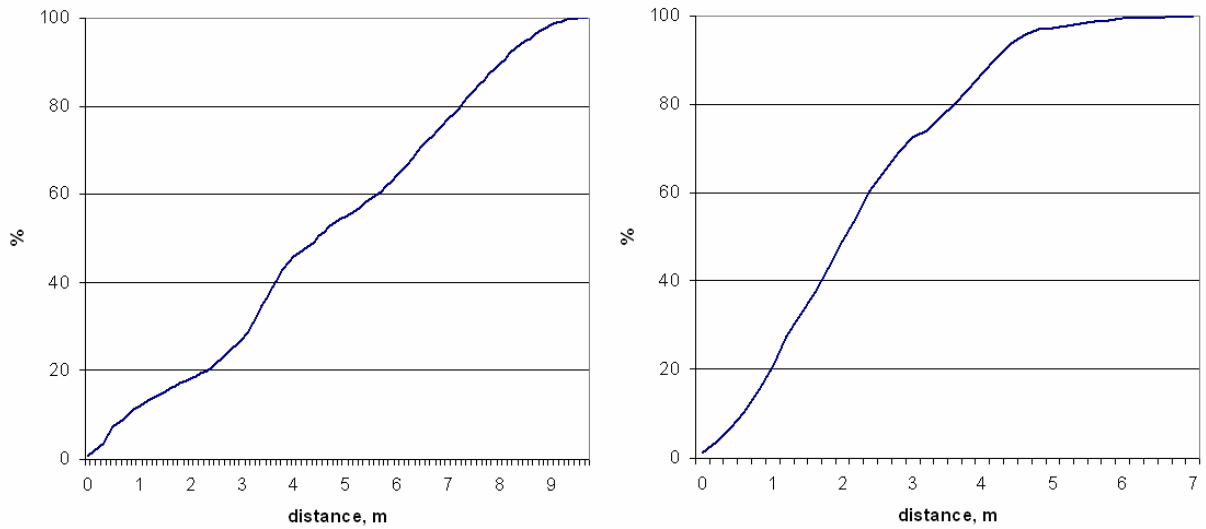
7.5. att. Dinamiskās datu ieguves režīma testa laikā izmantotais 67 km garais ceļa fragments.

Pirmā abu SBAS uztvērēju pozīcijas datu apvienošana tika veikta, izmantojot granularitāti, kas identiska datu fiksēšanai – 1 sekunde. Aprēķināto pozīciju statistiskā analīze parādīja, ka maksimālā divu SBAS uztvērēju sistēmas pozīcijas nobīde rietumu-austrumu virzienā (lon) ir 9,79 m un ziemeļu-dienvidu virzienā (lat) 6,50 m (skat. attēlu 7.6.). Savukārt 2DRMS diapazons jeb 98,2% no aprēķinātās pozīcijas nobīdēm rietumu-austrumu virzienā (lon) ir 9,08 m un ziemeļu-dienvidu virzienā (lat) 5,01 m. Vidējās pozīcijas nobīdes distances rietumu-austrumu virzienā (lon) ir 4,71 m un ziemeļu-dienvidu virzienā (lat) 2,16 m. Pozīcijas nobīdes distances sadalījuma funkcija ir redzama attēlā 7.7. Dinamiskā datu ieguves režīmā pozīcijas nobīdi ietekmē ne tikai uztvērēja pozīcijas aprēķinu kļūdas, bet arī kustībā esošā transporta līdzekļa ātrums. Šajā gadījumā transporta līdzekļa ātrums var radīt pozīcijas nobīdi līdz pat 25 metriem. Reālās pozīcijas nobīdes vērtības nepārsniedza 10 metrus.

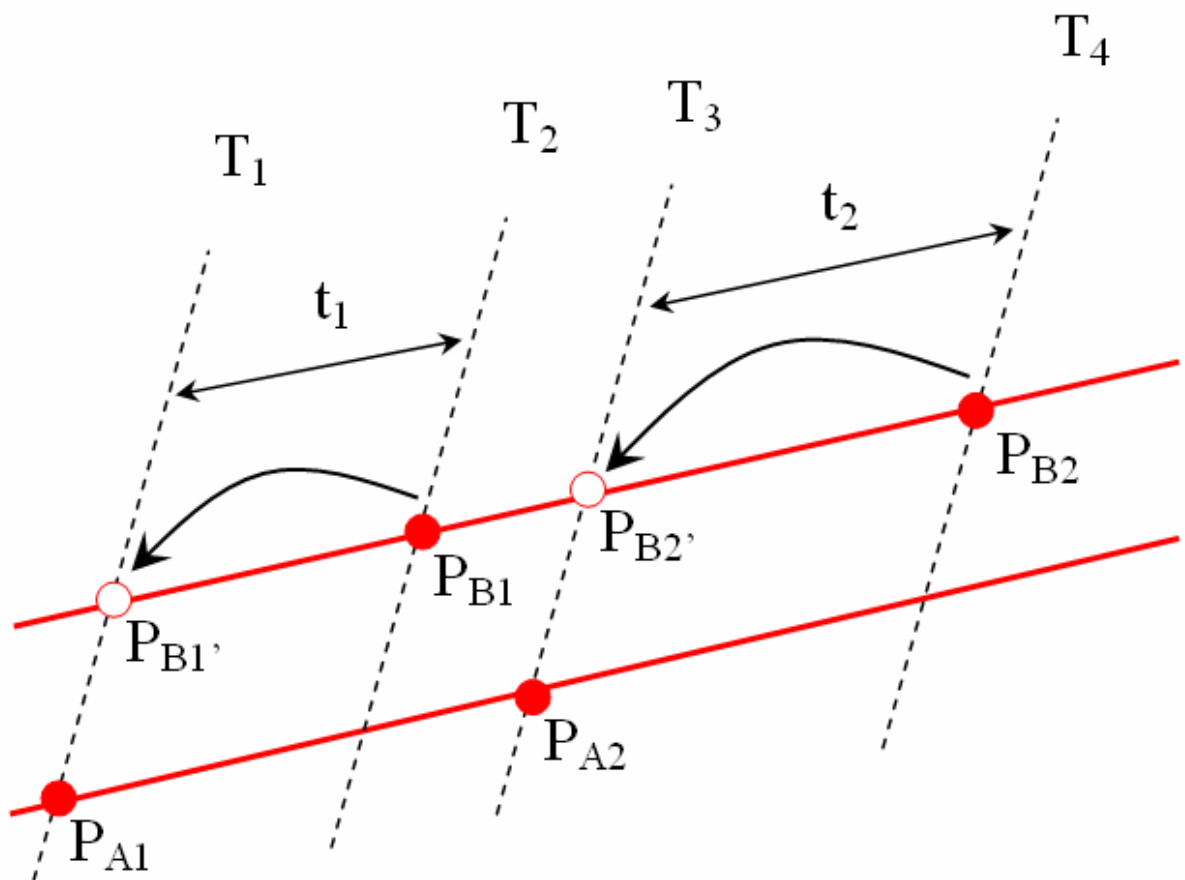


7.6. att. Dinamiskās datu ieguves režīma tests izmantojot divu SBAS uztvērēju sistēmu. Sistēmas pozīcijas datu nobīde, izmantojot datu apvienošanu ar 1 sekundes granularitāti.

GCDC sacensību specifikācija iekļāva prasību, kurā bija noteikts, ka transporta līdzekļa pozīcijas dati ir jāatjauno 10x sekundē. Lai nodrošinātu atbilstību šai prasībai, tika veikta abu SBAS uztvērēju pozīcijas datu apvienošana, izmantojot granularitāti 1/10 sekundes. Lai to paveiktu, viena SBAS uztvērēja dati tika izmantoti tiešā veidā, bet otra SBAS uztvērēja dati tika pakļauti transformācijas procesam ar mērķi iegūt pozīcijas datus vienam un tam pašam laika momentam (skat. attēlu 7.8.).

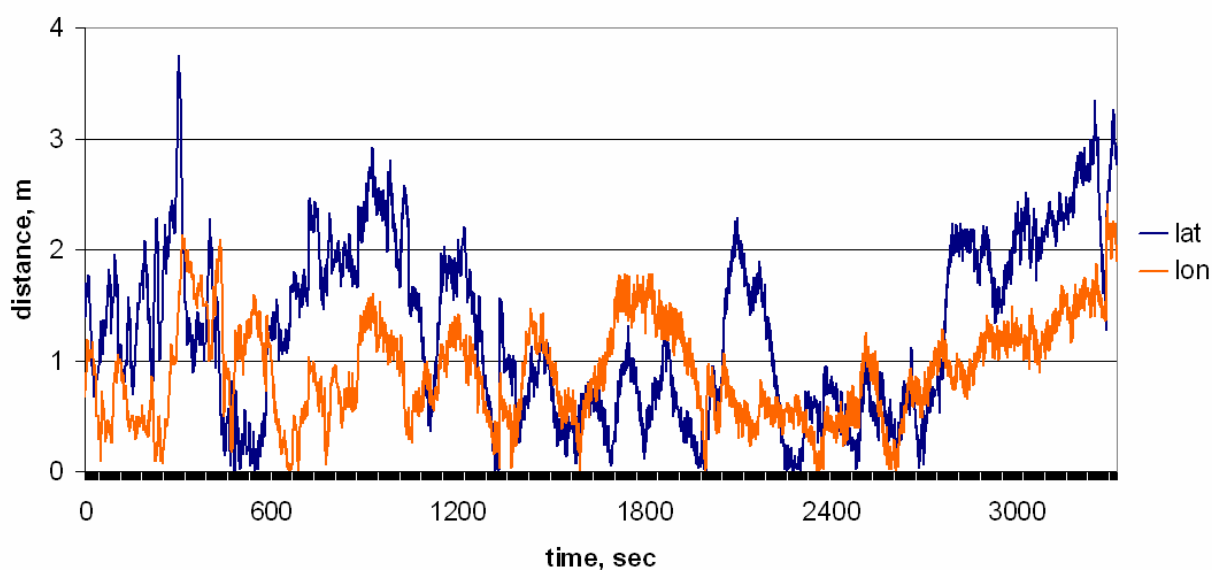


7.7. att. Dinamiskās datu ieguves režīma tests izmantojot divu SBAS uztvērēju sistēmu. Sistēmas pozīcijas datu nobīdes sadalījuma funkcija, izmantojot datu apvienošanu ar 1 sekundes granularitāti – pa kreisi rietumu-austrumu virzienā (lon), pa labi ziemeļu-dienvidu virzienā (lat).



7.8. att. Transporta līdzekļa pozīcijas datu apvienošana izmantojot granularitāti 1/10 sekundes. Pozīcijas no SBAS uztvērēja B tiek pārreķinātas, izmantojot laika zīmogus no SBAS uztvērēja A.

Izmantojot 1/10 sekundes granularitāti, aprēķināto pozīciju statistiskā analīze parādīja, ka maksimālā divu SBAS uztvērēju sistēmas pozīcijas nobīde rietumu-austrumu virzienā (lon) ir 2,42 m un ziemeļu-dienvidu virzienā (lat) 3,71 m (skat. attēlu 7.9.). Savukārt 2DRMS diapazons jeb 98,2% no aprēķinātās pozīcijas nobīdēm rietumu-austrumu virzienā (lon) ir 1,90 m un ziemeļu-dienvidu virzienā (lat) 2,86 m. Vidējās pozīcijas nobīdes distances rietumu-austrumu virzienā (lon) ir 0,90 m un ziemeļu-dienvidu virzienā (lat) 1,26 m. Pozīcijas nobīdes distances sadalījuma funkcija ir redzama attēlā 7.10. Maksimālā pozīcijas nobīde, kuru varēja radīt transporta līdzekļa ātrums, šajā gadījumā bija līdz pat 2,5 metriem. Reālās pozīcijas nobīdes vērtības 94% gadījumu nepārsniedza šo vērtību.

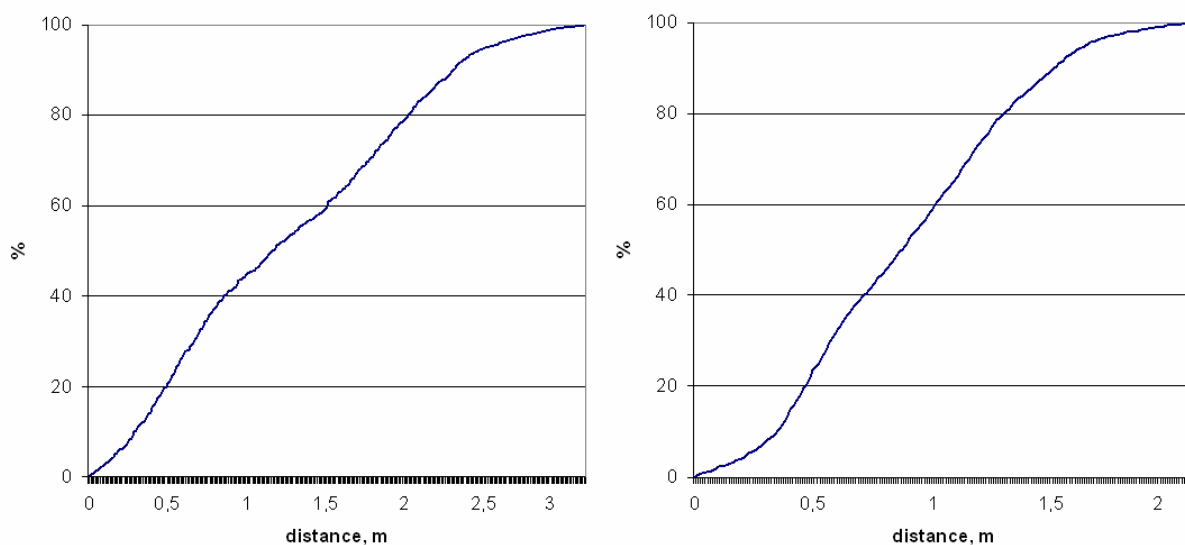


7.9. att. Dinamiskās datu ieguves režīma tests izmantojot divu SBAS uztvērēju sistēmu. Sistēmas pozīcijas datu nobīde, izmantojot datu apvienošanu ar 1 sekundes granularitāti.

Turpmākus uzlabojumus divu SBAS uztvērēju sistēmas darbībā dinamiskā datu ieguves režīmā būtu iespējams sasniegt pēc nākošā soļa, kura laikā kā papildus informācijas avots tiktu izmantoti IMU iekārtas dati. Šis solis, savukārt ir ārpus promocijas darbā aprakstīto pētījumu ietvara.

Piedaloties GCDC Technology Workshop (19.-21.01.2011, Helmonda, Nīderlande) autora kolēģis ieguva informāciju par potenciāli noderīgu metodiku transporta līdzekļa pozīcijas noteikšanas precizitātes uzlabošanai – RTK over IP. Metodikas pamatā ir pozīcijas korekcijas dati, kuru tiek saņemti reālā laikā, izmantojot bezvadu Tīmekļa pieslēgumu. Lai pārbaudītu šīs metodikas piemērotību GCDC sacensību transporta līdzekļa pozīcijas noteikšanas sistēmas risinājumam, tika identificētas potenciāli noderīgas stacionārās bāzes stacijas TORA0 (Tartu, Igaunija) un TITZ1

(Titz, Vācija), kā arī izveidoti konti RTK datu izplatīšanas tīklos www.euref-ip.net [103] un www.igs-ip.net [104].

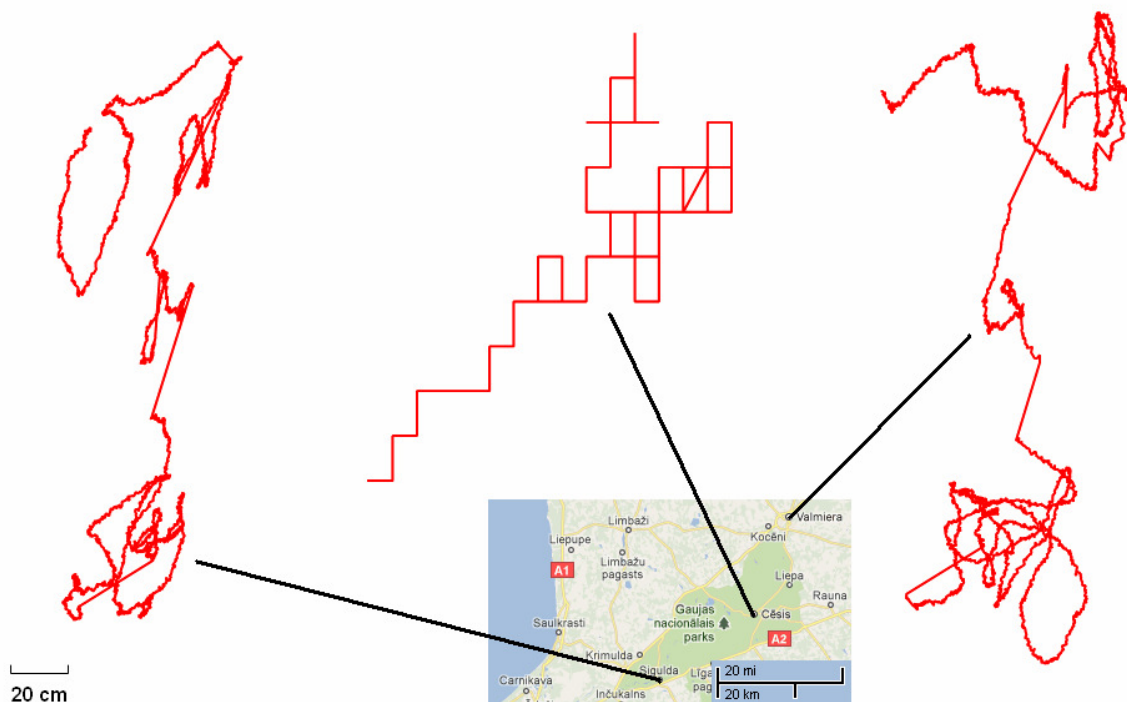


7.10. att. Dinamiskās datu ieguves režīma tests izmantojot divu SBAS uztvērēju sistēmu. Sistēmas pozīcijas datu nobīdes sadalījuma funkcija, izmantojot datu apvienošanu ar 1/10 sekundes granularitāti – pa kreisi rietumu-austrumu virzienā (lon), pa labi ziemeļu-dienvidu virzienā (lat).

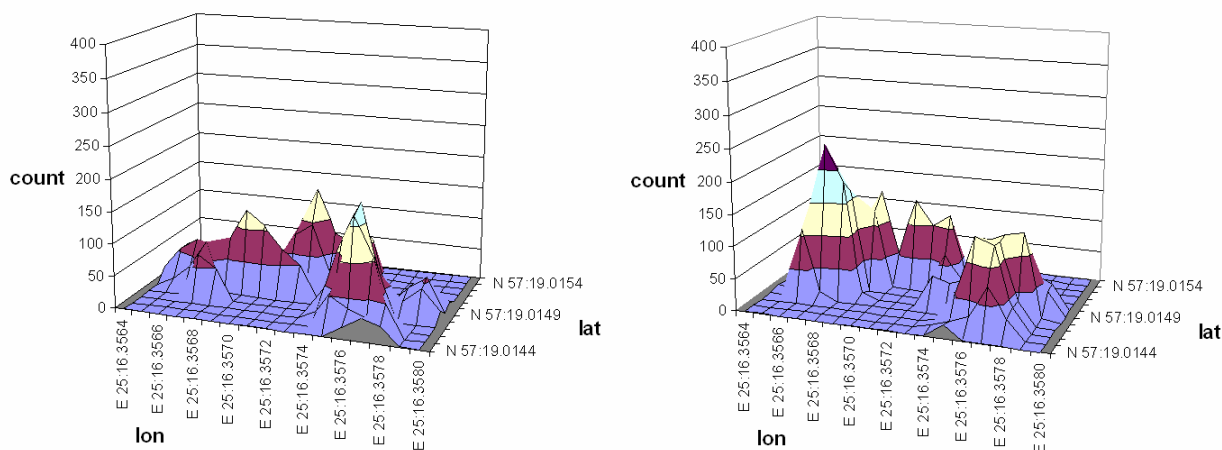
Nākošais eksperiments tika veikts, lai noteiktu, kā vienas vai vairāku RTK bāzes staciju datu izmantošana ietekmē pozīcijas noteikšanas precizitāti, ja lokālo pozīcijas mērījumu veikšanai tiek izmantots nevis specifisks daudzfrekvenču (L1/L2) uztvērējs, bet gan vienkāršs vienas frekvences (L1) uztvērējs. Lokālās pozīcijas mērījumi tika veikti, izmantojot stacionāri (Cēsīs) novietotu Magellan eXplorer XL SBAS uztvērēju. Kā korekcijas dati tika izmantoti dati no stacionārām LatPos sistēmas [105] RTK bāzes stacijām Siguldā un Valmierā. Abas eksperimentā izmantotās RTK bāzes stacijas atradās ~30 km no stacionāri novietotā SBAS uztvērēja (skat. attēlu 7.11.).

Vispirms tika veikta lokālo pozīcijas mērījumu koriģēšana, izmantojot vienas (Siguldas vai Valmieras) RTK bāzes stacijas korekcijas datus. Koriģēto pozīciju statistiskā analīze parādīja, ka maksimālā koriģētās pozīcijas nobīde rietumu-austrumu virzienā (lon) ir diapazonā 1,53 – 1,65 m un ziemeļu-dienvidu virzienā (lat) diapazonā 1,59 – 1,72 m. Savukārt 2DRMS diapazons jeb 98,2% no koriģētās pozīcijas nobīdēm rietumu-austrumu virzienā (lon) ir diapazonā 1,31 – 1,41 m un ziemeļu-dienvidu virzienā (lat) diapazonā 1,48 – 1,67 m. Koriģēto pozīciju koordinātu un to sadalījuma visā nobīdes zonā (skat. attēlu 7.12.) grafiskā analīze parādīja, ka eksistē tendence veidot vienu apgabalu ar augstu koriģēto pozīciju koncentrāciju fiksēto pozīciju nobīdes zonas centrā, ko

var uzskatīt par uzlabojumu salīdzinājumā ar viena SBAS uztvērēja nekoriģētu pozīcijas datu izmantošanu (skat. attēlu 7.2.).



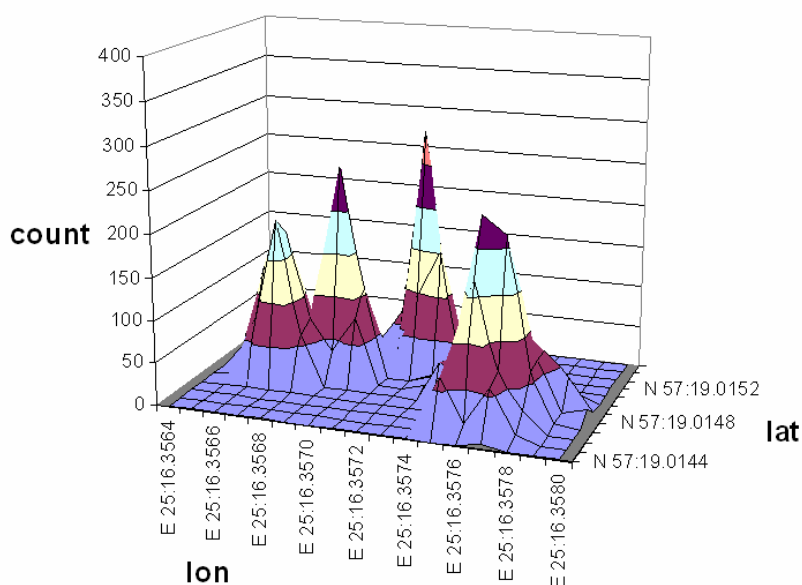
7.11. att. Korekcijas dati no RTK bāzes stacijām. Pa kreisi – dati no stacijas Siguldā, pa labi – dati no stacijas Valmierā. Vidū – lokālo pozīcijas mērījumu dati no stacionāri novietota SBAS uztvērēja Cēsis.



7.12. att. Koriģēto pozīciju nobīdes sadalījums. Pa kreisi – izmantoti korekcijas dati no RTK stacijas Valmierā, pa labi - izmantoti korekcijas dati no RTK stacijas Siguldā.

Visbeidzot, tika veikta lokālo pozīcijas mērījumu koriģēšana, izmantojot abu (Siguldas un Valmieras) RTK bāzes staciju korekcijas datus. Koriģēto pozīciju statistiskā analīze parādīja, ka

maksimālā koriģētās pozīcijas nobīde rietumu-austumu virzienā (lon) ir 1,46 m un ziemeļu-dienvidu virzienā (lat) 1,52 m. Savukārt 2DRMS diapazons jeb 98,2% no koriģētās pozīcijas nobīdēm rietumu-austumu virzienā (lon) ir 1,31 m un ziemeļu-dienvidu virzienā (lat) 1,30 m. Koriģēto pozīciju koordinātu un to sadalījuma visā nobīdes zonā (skat. attēlu 7.13.) grafiskā analīze parādīja, ka eksistē izteikta tendence veidot vienu apgabalu ar augstu koriģēto pozīciju koncentrāciju fiksēto pozīciju nobīdes zonas centrā. Savukārt koriģēto pozīciju nobīdes zonas samazināšanās salīdzinājumā ar fiksēto pozīciju nobīdes zonu rosina formulēt secinājumu, ka pozīcijas noteikšanas precizitāte ir uzlabojusies salīdzinājumā ar viena SBAS uztvērēja nekoriģētu pozīcijas datu izmantošanu.



7.13. att. Koriģētās pozīcijas nobīdes sadalījums. Izmantoti korekcijas dati no divām RTK stacijām Valmierā un Siguldā.

7.4. Rezultāti un diskusija

Ekspertimentu rezultātā tika izstrādāta transporta līdzekļa pozīcijas noteikšanas metodika, kas bāzēta uz vairākiem SBAS uztvērējiem un datiem no lokālajām bāzes stacijām. Metodika tika novērtēta, ņemot par pamatu tās piemērotību izstrādājamajai GCDC sacensību transporta līdzekļa pozīcijas noteikšanas sistēmai. Transporta līdzekļa pozīcijas noteikšana tika veikta, izmantojot multimodālus datu avotus un to datu apvienošanu. Tika veikti reālu datu ieguves un apstrādes eksperimenti, izmantojot izvēlētas pozīcijas datu ieguves iekārtas. Ekspertimentu rezultāti tika izvērtēti, izmantojot pozīcijas nobīdes zonas statistisko un grafisko analīzi. Rezultāti parāda, ka piedāvātās metodikas izmantošana ļauj samazināt pozīcijas nobīdi ziemeļu-dienvidu virzienā (lat) no 1,48 m uz 0,55 m 2DRMS, izmantojot divus SBAS uztvērējus, kā arī no 1,48 m uz 1,30 m

2DRMS, izmantojot korekcijas datus no divām RTK bāzes stacijām. Izmaiņas pozīcijas nobīdē rietumu-austrumu virzienā (lon) ir mazāk būtiskas – no 1,21 m uz 1,11 m 2DRMS, izmantojot divus SBAS uztvērējus, kā arī no 1,51 m uz 1,31 m 2DRMS, izmantojot korekcijas datus no divām RTK bāzes stacijām. Līdz ar to izstrādātā metodika ir potenciāli piemērota GCDC sacensību transporta līdzeklim [106], kura pozīciju nepieciešams noteikt ar precizitāti 1 m 2DRMS vai labāku.

Tālākas plānotās aktivitātes precīzas transporta līdzekļa pozīcijas noteikšanas kontekstā iekļaus eksperimentus ar lielāka SBAS uztvērēju skaita izmantošanu un to ietekmes uz pozīcijas aprēķina precizitāti noteikšanu, kā arī pozīcijas aprēķināšanas procesa uzlabošanu, izmantojot datus no IMU iekārtas.

Promocijas darba 7. nodaļā aprakstītā pētījuma rezultāti ir prezentēti konferencē „UOII 2011: The 1st International Workshop on User Oriented Information Integration at the 10th International Conference on Perspectives in Business Informatics Research (BIR 2011)” (Rīga, Latvija, 06.10.2011), kā arī publicēti Rīgas Tehniskās Universitātes izdotajā konferences zinātnisko rakstu krājumā un Springer izdotajā konferences zinātnisko rakstu krājumā (skat. tabulu 9.1.), kas indeksēts ISI Web of Knowledge / Web of Science datubāzē.

8. KOMERCIĀLAS RFID SISTĒMAS DROŠĪBAS PĀRBAUDE, IZMANTOJOT REVERSĀS INŽENIERIJAS PIEEJU UN PLAŠA PIELIETOJUMA APARATŪRU UN PROGRAMMATŪRU

Šajā nodaļā autors sniegs pārskatu par izstrādāto komerciālas RFID sistēmas reversās inženierijas metodiku, kas bāzēta uz plaša pielietojuma aparatūru un programmatūru. Vispirms tiks aplūkoti eksistējošie RFID sistēmu risinājumi un to iedalījums atkarībā no pielietojuma un drošības pakāpes, tipiski veidi, kā tiek veikti uzbrukumi RFID sistēmām, kā arī tipiski veidi, kā tiek veidota RFID sistēmu aizsardzība pret noteiktu veidu uzbrukumiem. Tālāk seko metodikas implementācijai noteiktās tehniskās prasības, konkrētā RFID komunikācijas protokola fiziskā un loģiskā līmeņa izpēte, kā arī aparatūras un programmatūras izstrāde ar mērķi simulēt neeksistējošu RFID birku ar brīvi izvēlētu ID numuru. Nodaļas nobeigumā atrodams metodikas novērtējums, kas balstīts uz reāli veiktiem eksperimentiem datu apmaiņā starp reālu RFID lasītāju un simulētu RFID birku.

8.1. Ievads

Tipiska RFID sistēma sastāv no viena vai vairākām RFID birkām, viena vai vairākiem RFID lasītājiem, kā arī datu apstrādes apakšsistēmas. RFID lasītāji raida izsaukuma signālus, kuru mērķis ir aktivizēt tuvumā esošas RFID birkas. RFID birkas, kuras ir aktivizējies tuvumā esošs RFID lasītājs, raida atbildes signālus, kuru mērķis ir deklarēt savu klātesamību RFID lasītājam. RFID birkas atbildes signāla saturs var būt gan vienkāršs ID numurs, gan kompleksa informācija, kura ir glabāta RFID birkas pastāvīgajā atmiņā vai arī tiek operatīvi sagatavota, izmantojot RFID birkas sastāvā ietilpstošo aparatūru un programmatūru. Savukārt datu apstrādes apakšsistēma nodrošina iegūto datu izmantošanu kādā noderīgā veidā [107].

Tipiskie RFID birku pielietojumi ir dažādu objektu un subjektu identifikācija un izsekošana, piemēram, dzīvnieki brīvdabas apstākļos un bagāžas vienumi lidostās, piekļuves tiesību pārvalde, piemēram, uzņēmuma darbinieku iekļūšana ierobežotas pieejas zonās, kā arī papildus funkcionalitāte klasiskiem personas identitāti apliecinošiem dokumentiem, piemēram, pases ar RFID funkcionalitāti. Šīs birkas var būt pasīvas – ja to darbību nodrošina enerģija no RFID lasītāja pārraidēm, vai arī aktīvas – ja to darbību nodrošina iekšējs enerģijas avots. Savukārt iespēja nolasīt informāciju no RFID birkas arī tad, ja nav pieejams tiešs vizuālais kontakts, piemēram, ja birka ir iekļauta pašā novērojamajā objektā, ir iemesls noteiktām drošības un privātuma problēmām.

Būtisks ikvienas RFID sistēmas parametrs ir tās drošība. Sistēmām, kuras tiek uzskatītas par drošām, ir jābūt noteiktai aizsardzībai pret fiziskiem neinvazīviem un invazīviem uzbrukumiem, t.sk. tādu uzbrukuma veidu kā reversā inženierija [108].

Eksistē vairāk kā 500 komerciāli pieejamu RFID birku veidi [109], kurus var iedalīt trīs dažādās kategorijās:

1. birkas loģistikas pielietojumiem ar salīdzinoši minimālu drošības pakāpi, piemēram, pasta sūtījumu piegādes izsekošanai;
2. birkas patērētāju (*consumer*) pielietojumiem ar salīdzinoši augstu drošības pakāpi, piemēram, viedkartes finansu tranzakciju veikšanai;
3. birkas vertikālajiem (*vertical*) pielietojumiem ar drošības pakāpi, kas pielāgota konkrētajam specifiskajam biznesa procesam, piemēram, RFID čipi pokera spēlei kazino.

RFID sistēma, kura tika pētīta tālāk aprakstīto aktivitāšu ietvaros, pieder pie trešās no augstāk minētajām kategorijām. Tās izvēle pētījuma aktivitāšu veikšanai tika motivēta ar komerciālo pieejamību, kā arī salīdzinoši plašo pielietojumu sporta sacensībās (t.sk. autosporta sacensībās) precīzu laika mērījumu veikšanai.

8.2. Literatūras pārskats

Droša komunikācija starp atsevišķiem RFID sistēmas komponentiem ir salīdzinoši izaicinošs uzdevums, jo pieejamie aparatūras un programmatūras resursi vienkāršās salīdzinoši lētās RFID birkās ir ierobežoti, un līdz ar to nav piemēroti spēcīgu kriptogrāfijas risinājumu izmantošanai. Eksistē risinājumi, kuros tiek piedāvāts veikt šo uzdevumu, izmantojot speciāli šim nolūkam izstrādātus resursu mazprasīgus protokolus [110] [111]. Salīdzinoši lētās RFID birkās izmantota autentikācijas protokola vājuma iemesla var būt vājš pseidogadījumskaitļu ģenerators, kurš tiek izmantots šajā protokolā [112]. Diemžēl šādi resursu mazprasīgi protokoli var kļūt par uzbrukuma upuri, ja uzbrucējam ir pietiekami resursi. Līdz ar to katram konkrētajam pielietojumam ir jāatrod balanss starp drošību un tehniskā risinājuma veiktspēju.

Uzbrukumi RFID sistēmām var tikt veikti dažādos veidos. Pirmais no tiem ir slepena abu komunikācijas kanālu (no lasītāja uz birku un no birkas uz lasītāju) noklausīšanās (*eavesdropping*, *skimming*). Citi veidi ir fiziska birku izpēte, birku klonēšana, kā arī ziņojumu pārķeršana un atskaņošana (*relay and replay*) ([113], 40.lpp.). Tipiska metode cīņai ar birku klonēšanu ir simetriskās atslēgas kriptogrāfijas izmantošana [114], bet fiziskā birku izpēte var tikt apgrūtināta, veidojot pašas birkas drošākas pret nesankcionētām manipulācijām. Kā līdzekļi pret atskaņošanas tipa uzbrukumiem tiek izmantoti ziņojumu kārtas numuri un sinhronizācija pēc pulksteņlaika. Specifisks uzbrukuma veids ir birkas deaktivēšana, izmantojot attiecīgu komandu. Lai novērstu

neautorizētu šādas komandas izmantošanu, tās pielietošanas gadījumā ir nepieciešams arī konkrētās birkas PIN kods [115], kas savukārt rada atsevišķas tipiskas paroļu menedžmenta un mērogojamības problēmas

Viens no praktiskajā ziņā bīstamākajiem uzbrukuma veidiem ir RFID birku klonēšana. Šo uzbrukuma veidu var ierobežot, izmantojot drošības protokolus, kas bāzēti uz Fiziski Neklonējamu Funkciju (*Physical Unclonable Function*) [116]. RFID birkas ar šāda veida aizsardzību ir piemērotas gadījumos, kad potenciālais uzbrucējs var iegūt savā īpašumā īstu RFID birku un veikt tās detalizētu izpēti.

Eksistē gan risinājumi RFID sistēmu reversajā inženierijā [117] [118], gan risinājumi tehnisku vai netehnisku metožu izveidē, lai ierobežotu reverso inženieriju [119]. Abos aprakstītajos reversās inženierijas risinājumos tika veikta aparatūras analīze ar mērķi izpētīt sistēmas implementāciju. Savukārt izstrādātā metodika ir balstīta uz melnās kastes (*black box*) pieeju un RFID lasītāja un RFID birkas raidīto signālu analīzi.

8.3. Eksperimentu apraksts

Kā pirmais darbs pirms eksperimentu uzsākšanas tika formulētas tehniskās prasības, kas būtu par pamatu komerciālas RFID sistēmas reversās inženierijas metodikai:

1. RFID sistēmas reversā inženierija veicama, izmantojot salīdzinoši vienkāršas reversās inženierijas aktivitātes. Specifiskas programmatūras un daudzu paralēlu skaitļošanas iekārtu izmantošana nav paredzēta.
2. RFID sistēmas komunikācijas protokola fiziskā un loģiskā līmeņa izpēte veicama, izmantojot melnās kastes pieeju. Aparatūras vienumu demontāža vai fiziska sabojāšana, kā arī klasificētas informācijas ieguve ar sociālās inženierijas metodēm nav paredzēta.
3. Papildus aparatūrai un programmatūrai, kas nepieciešamas reversās inženierijas aktivitāšu veikšanai, jābūt brīvi pieejamai, salīdzinoši lētai un salīdzinoši ātri apgūstamai.
4. RFID sistēmas komunikācijas protokols ir uzskatāms par nedrošu attiecībā pret reversās inženierijas mēģinājumu, ja ir iespējams simulēt neeksistējošu RFID birku ar brīvi izvēlētu ID numuru, izmantojot augstāk aprakstītos relatīvi vienkāršos rīkus un metodes.

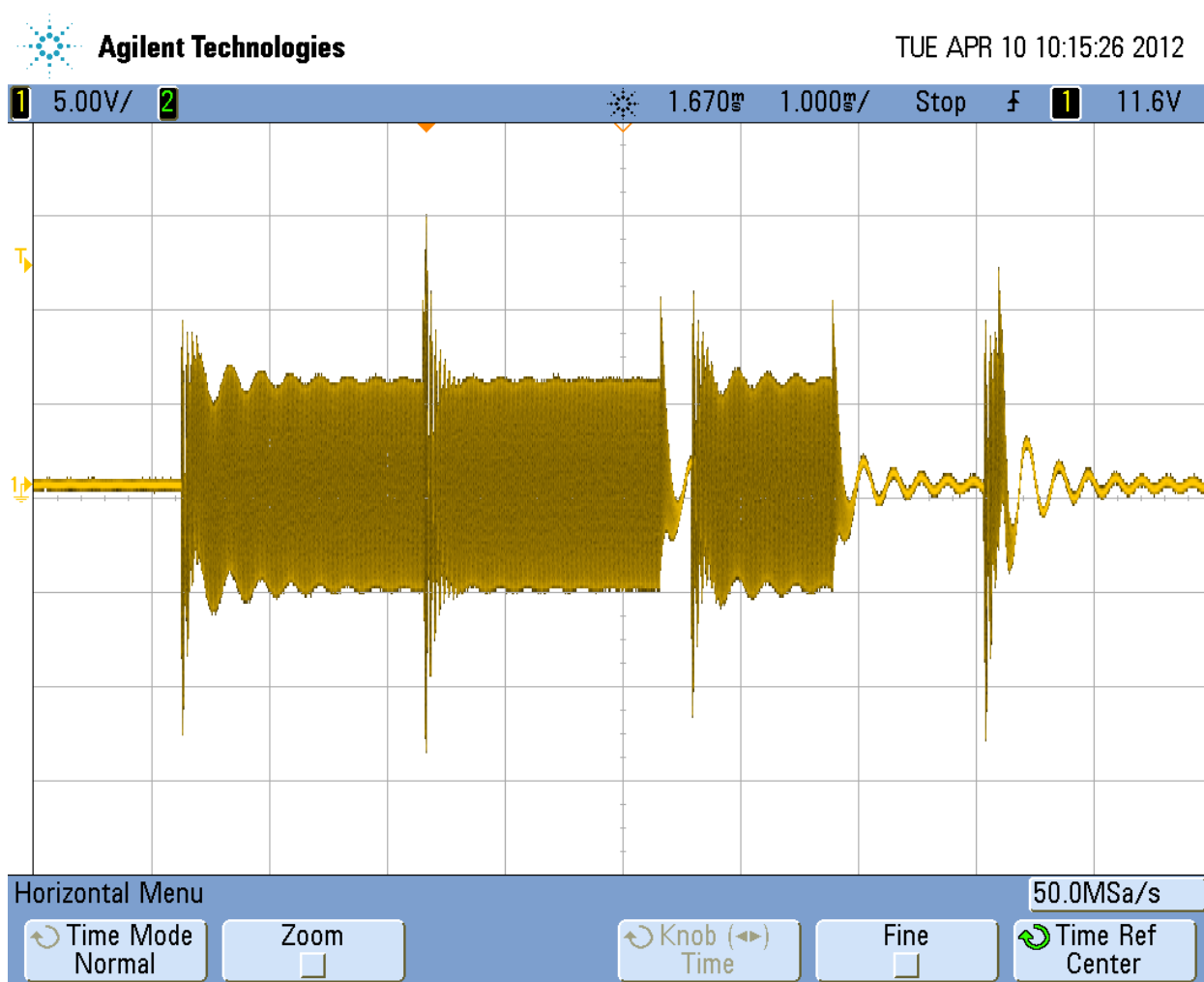
Visas aktivitātes, kuras tika veiktas komerciālas RFID sistēmas reversās inženierijas metodikas izstrādes laikā, var iedalīt četros secīgos soļos:

1. RFID sistēmas komunikācijas protokola fiziskā līmeņa izpēte;
2. aparatūras un programmatūras rīku izstrāde ar mērķi simulēt attiecīgos RFID sistēmas komponentus;

3. RFID sistēmas komunikācijas protokola loģiskā līmeņa izpēte;
4. neeksistējošas RFID birkas ar brīvi izvēlētu ID numuru simulēšanas metodes izstrāde.

RFID sistēmas komunikācijas protokola fiziskā līmeņa izpēte tika veikta, izmantojot RFID lasītāju, divas RFID birkas ar zināmiem ID numuriem, kā arī digitālo osciloskopu ar iespēju saglabāt mērījumu datus vēlākai to analīzei.

Pirmais eksperiments tika veikts, lai izpētītu RFID lasītāja izsaukuma ziņojumu, analizējot signālus uz RFID lasītāja antenas spoles izvadiem. Izsaukuma ziņojums sastāv no sekvences ar OOK modulētām svārstībām ar 125 kHz frekvenci (skat. attēlu 8.1.):



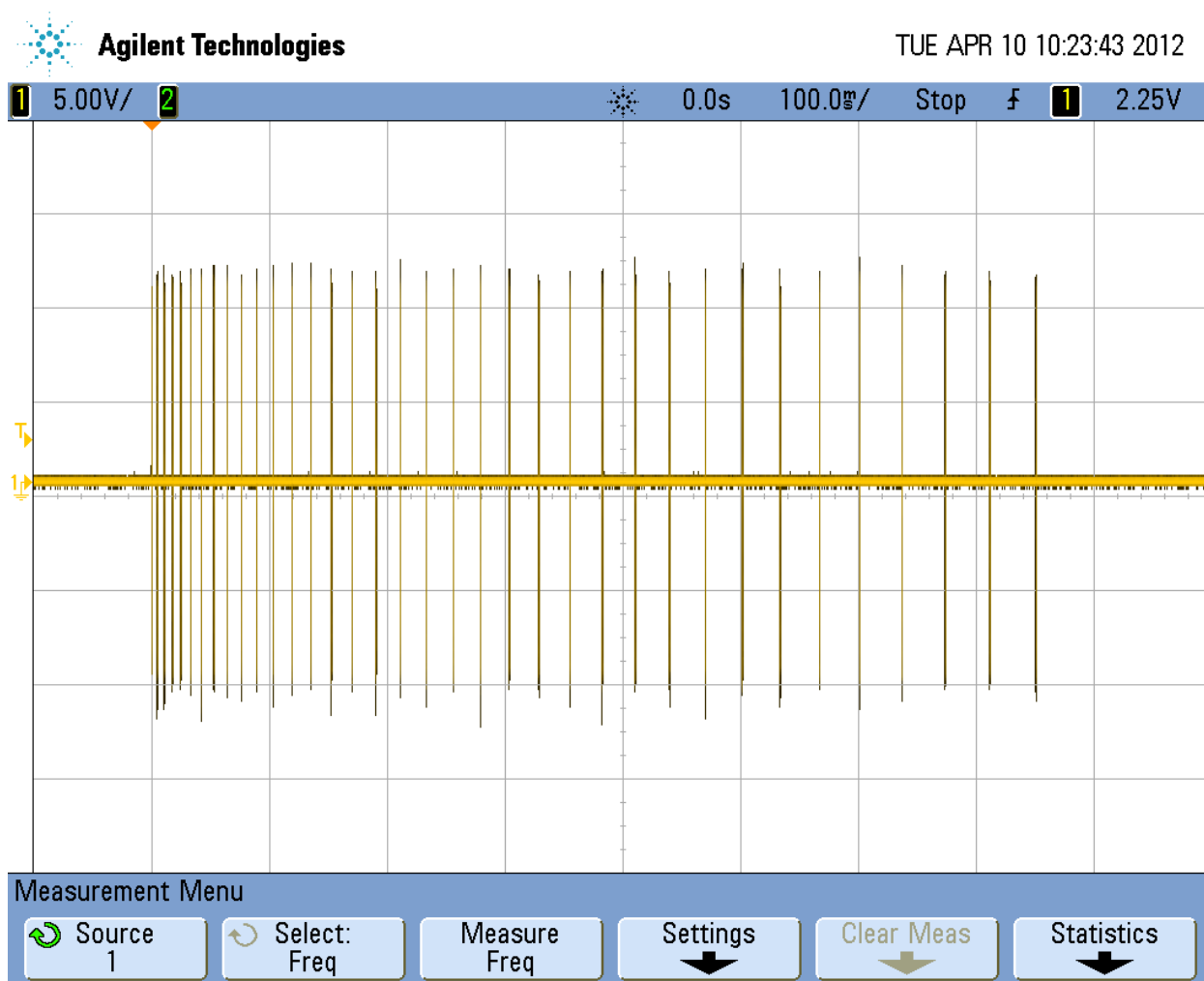
8.1. att. RFID lasītāja izsaukuma ziņojums – sekvence ar ar OOK modulētām svārstībām ar 125 kHz frekvenci.

1. ON – ilgums 2,05 ms;
2. OFF – ilgums 0,02 ms;
3. ON – ilgums 2,00 ms;
4. OFF – ilgums 0,25 ms;

5. ON – ilgums 1,20 ms;
6. OFF – ilgums 1,30 ms;
7. ON – ilgums 0,15 ms.

Šis RFID izsaukuma ziņojums tiek raidīts 80x sekundē.

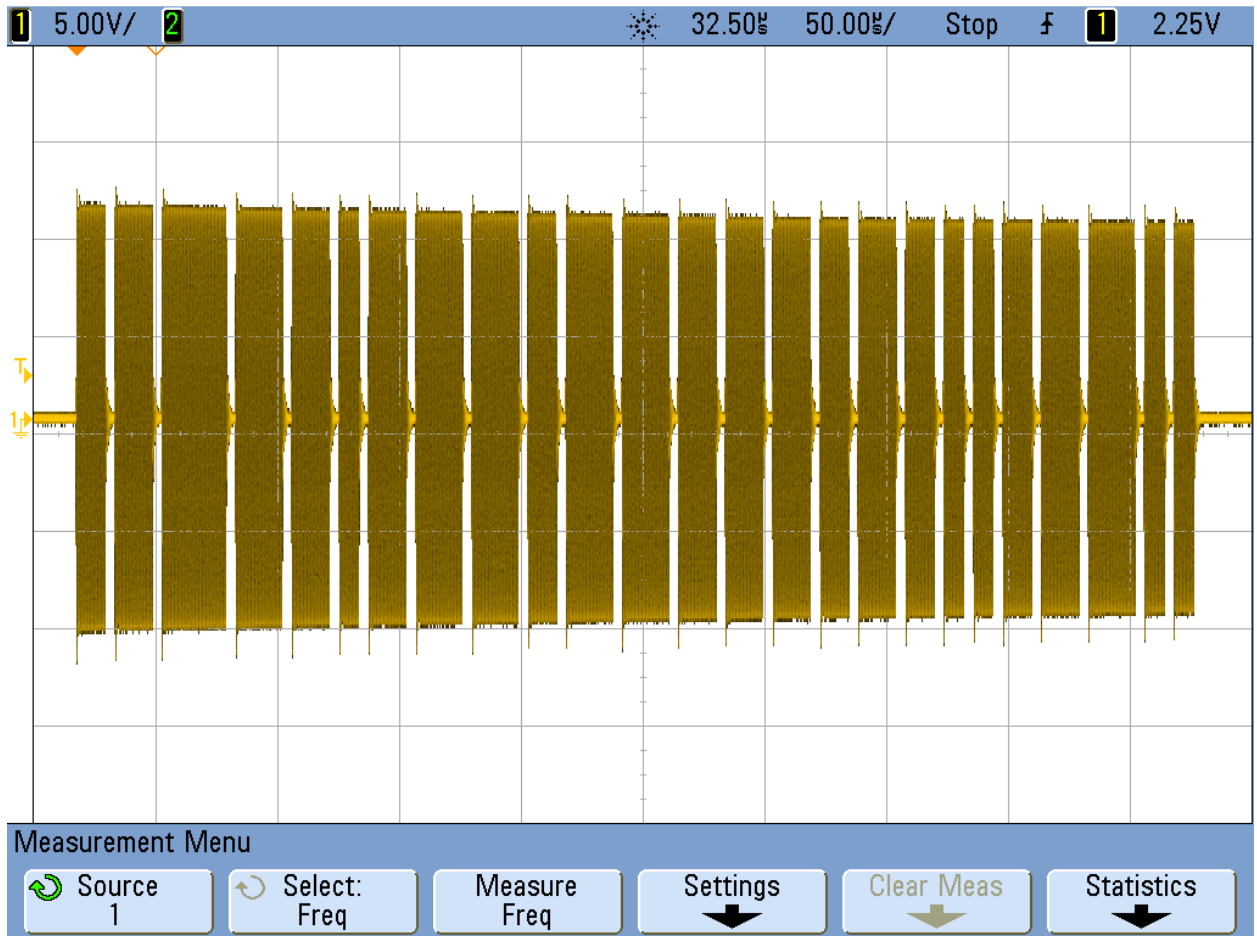
Nākošais eksperiments tika veikts, lai izpētītu RFID birkas atbildes ziņojumu, analizējot signālus uz RFID birkas korpusam uztītas spoles izvadiem. Saliktais atbildes ziņojums sastāv no 36 secīgiem vienkāršajiem atbildes ziņojumiem, kuri tiek pārraidīti ar laika intervālu, kas pieaug no 4 ms līdz 39 ms (skat. attēlu 8.2.).



8.2. att. RFID birkas saliktais atbildes ziņojums – sekvenca no 36 vienkāršajiem atbildes ziņojumiem ar pieaugošu laika intervālu starp tiem.

Katrs vienkāršais atbildes ziņojums sastāv no sekvences ar OOK modulētām svārstībām ar 3 MHz frekvenci (skat. attēlu 8.3.):

1. 25 ON vienumi ar ilgumu 9 – 29 μ s;
2. 24 OFF vienumi ar ilgumu 3 μ s.



8.3. att. RFID birkas vienkāršais atbildes ziņojums – sekvenca no 25 mainīga ilguma ON vienumiem ar 24 fiksēta ilguma OFF vienumiem starp tiem.

Saliktā RFID atbildes ziņojuma pārraides laiks ir ~0,8 sekundes.

Aparatūras un programmatūras rīku izstrāde ar mērķi simulēt attiecīgos RFID sistēmas komponentus tika veikta, izmantojot brīvpieejas atklātā koda elektronikas prototipēšanas platformu Arduino [120] un tās komponentu Arduino Duemilanove [121].

Lai nodrošinātu Arduino komponenta funkcionalitāti – darbību kā simulētam RFID lasītājam, raidot izsaukuma ziņojumu, komponents tika papildināts ar moduli, kurā ietilpa magnētiskā antena virknē ar rezistoru maksimālās strāvas ierobežošanai (skat. attēlu 8.4.). Salīdzinoši zemā (125 kHz) izstarojamo svārstību frekvence ļāva izmantot programmatūru ne tikai OOK modulācijai, bet arī pamatsvārstību ģenerēšanai. Izstrādātā aparatūra un programmatūra tika testēta ar abām pieejamajām RFID birkām un abas birkas spēja veikt uzticamu pārraidītā izsaukuma ziņojuma detektēšanu.



8.4. att. Komponents Arduino Duemilanove, papildināts ar RFID lasītāja simulēšanas moduli.

Lai nodrošinātu Arduino komponenta funkcionalitāti – darbību kā simulētai RFID birkai, raidot salikto atbildes ziņojumu, komponents tika papildināts ar moduli, kurā ietilpa 3 MHz oscilators (skat. attēlu 8.5.). Salīdzinoši augstā (3 MHz) izstarojamo svārstību frekvence ļāva izmantot programmatūru tikai OOK modulācijai. Izstrādātā aparatūra un programmatūra tika testēta ar pieejamo RFID lasītāju, kurš spēja veikt uzticamu pārraidītā saliktā atbildes ziņojuma detektēšanu un atšifrēšanu.

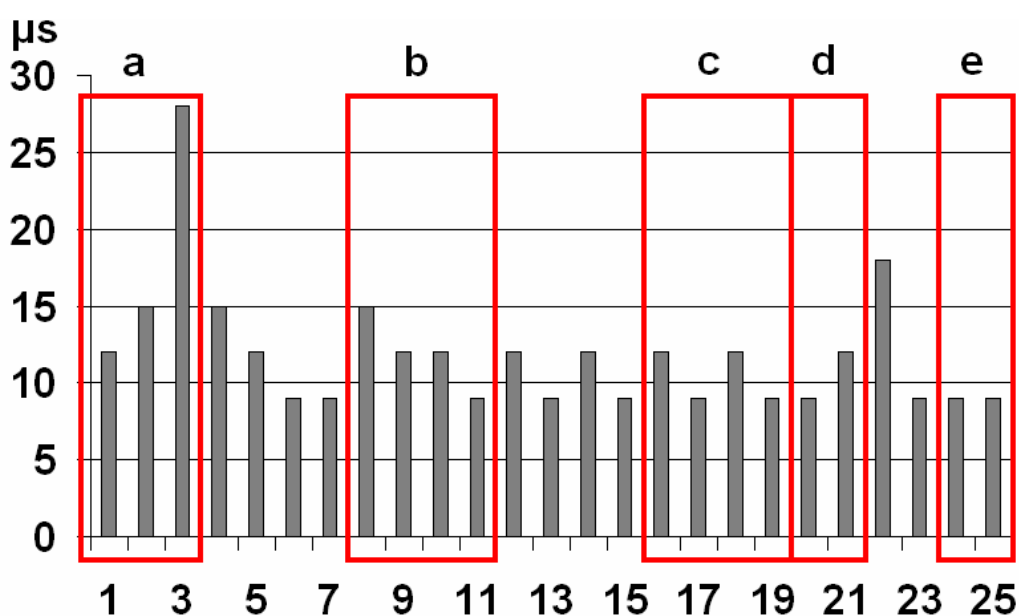


8.5. att. Komponents Arduino Duemilanove, papildināts ar RFID birkas simulēšanas moduli.

RFID sistēmas komunikācijas protokola loģiskā līmeņa izpēte tika veikta, izmantojot divas RFID birkas ar zināmiem ID numuriem, kā arī papildus informāciju par ziņojuma potenciālo saturu.

Saliktais atbildes ziņojums no RFID birkas uz RFID lasītāju tiek pārraidīts uzreiz, tiklīdz RFID birka detektē derīgu izsaukuma ziņojumu. Pēc katra aptuveni 7 ms ilga izsaukuma ziņojuma seko aptuveni 5 ms ilga pauze. Realitātē ir iespējama situācija, kad RFID lasītāja tuvumā atrodas vairākas RFID birkas, kuras detektē izsaukuma ziņojumus un atbild uz tiem, turklāt katra saliktā atbildes ziņojuma ilgums ir aptuveni 0,8 sekundes, un katrs no tiem ietver 36 vienkāršos atbildes ziņojumus. Ņemot vērā visus augstākminētos apstākļus, tika izvirzīta hipotēze, ka visi 36 vienu salikto atbildes ziņojumu veidojošie vienkāršie atbildes ziņojumi ir vienādi, un no tā seko, ka visa noraidāmā informācija ir iekļauta katrā vienkāršajā atbildes ziņojumā. Šī hipotēze tika pārbaudīta un apstiprināta, izmantojot simulētu RFID birku, un noraidot vienu vienkāršo atbildes ziņojumu.

Iepriekšējo aktivitāšu laikā, pētot RFID sistēmas komunikācijas protokola fizisko līmeni, tika iegūti dati, kas raksturo divu RFID birku ar zināmiem ID numuriem vienkāršos atbildes ziņojumus. Šie ziņojumi tika analizēti un salīdzināti savā starpā ar mērķi noteikt atsevišķu ziņojuma daļu potenciālo nozīmi. Pirmie 3 un pēdējie 2 ON vienumi abos ziņojumos bija pilnīgi identiski. Šis apstākļis ļāva formulēt pieņēmumu, ka minētie vienumi veido vienkāršā atbildes ziņojuma preambulu (*preamble*) un postambulu (*postamble*) (skat. attēlu 8.6. – a un e). Drošāku pieņēmuma apstiprinājumu būtu iespējams iegūt, analizējot lielāku daudzumu RFID birku, taču turpmākas aktivitātes RFID sistēmas komunikācijas protokola loģiskā līmeņa izpētē iespējams veikt, balstoties uz šo pieņēmumu.



8.6. att. Detalizēts RFID birkas vienkāršais atbildes ziņojums: a – preambula, b – kvaternārie ID cipari #6-#9, c - kvaternārie ID cipari #2-#5, d - kvaternārais ID cipars #1 ar nezīmīgo nulli, e - postambula.

Detalizētākā vienkāršā atbildes ziņojuma analizē tika konstatēts, ka visu ON vienumu ilgums, izņemot #3, kura ilgums bija 28 μ s, ir kāds no zemāk esošajā sarakstā minētajiem:

1. 9 μ s;
2. 12 μ s;
3. 15 μ s;
4. 18 μ s.

Šis sadalījums ļāva formulēt pieņēmumu, ka sistēmā ir izmantota kvaternārā skaitīšanas sistēma. Lai pārbaudītu šo pieņēmumu, tika veiktas sekojošas aktivitātes:

1. abi oriģinālie ID numuri, kuri sastāvēja no 5 decimālās skaitīšanas sistēmas cipariem, tika pārveidoti kvaternārajā skaitīšanas sistēmā;
2. abi iegūtie ID numuri, kas sastāvēja no 9 kvaternārās skaitīšanas sistēmas cipariem, tika salīdzināti ar attiecīgajiem vienkāršajiem atbildes ziņojumiem.

Salīdzināšanas rezultātā tika noskaidrots, ka ON vienums, kura ilgums ir 9 μ s, atbilst kvaternārajam ciparam 0, un citi ON vienumi ar ilgumu 12, 15 un 18 μ s atbilst kvaternārajiem cipariem 1, 2 un 3. Vienkāršā atbildes ziņojuma ON vienumi #8-#11 atbilst kvaternārajiem ID cipariem #6-#9, ON vienumi #16-#19 atbilst kvaternārajiem ID cipariem #2-#5, bet ON vienumi #20-#21 ar noteiktu ticamību atbilst kvaternārajam ID ciparam #1 ar nezīmīgo nulli (skat. attēlu 8.6. – b, c un d). Pilnīga sakritība vismaz 8 ciparu gadījumā ļauj veidot pieņēmumu, ka ID numurs tiek pārraidīts tieši šādā veidā.

Informācija, kas pieejama par analizējamās RFID sistēmas darbību, liecina, ka RFID birka pārraida ne tikai savu ID numuru, bet arī iekšējās baterijas enerģijas daudzuma mērījumu, kas izteikts veselos procentos. Šo informāciju iespējams pārraidīt, izmantojot 4 papildus kvaternāros ciparus. Īstermiņa darbības kontekstā informācija par iekšējās baterijas enerģijas daudzumu var tikt uzskatīta par statistiskiem datiem. Tā kā aprakstītās reversās inženierijas aktivitātes ir vērstas uz neeksistējošas RFID birkas ar brīvi izvēlētu ID numuru simulēšanu, pārējo ziņojuma sadaļu nozīmes noteikšana ir atstāta tālāk plānotu aktivitāšu ietvarā, savukārt pašreizējā mērķa sasniegšanas kontekstā pārējie 10 ON vienumi tiek uzskatīti par kontrolsummu.

Neeksistējošas RFID birkas ar brīvi izvēlētu ID numuru simulēšanas metodes izstrāde tika veikta, izmantojot *brute force* uzbrukuma principus. Šāda pieeja atbilst prasībai par salīdzinoši vienkāršām reversās inženierijas aktivitātēm, un veiksmīga uzbrukuma gadījumā var tikt uzskatīta par sistēmas nepietiekamas aizsardzības pret reverso inženieriju demonstrāciju.

Kā jau bija minēts iepriekš, vienkāršā atbildes ziņojuma sastāvā ietilpst 10 ON vienumi, kurus var uzskatīt par kontrolsummu. Katrs no šiem ON vienumiem atbilst vienam kvaternārajam ciparam, līdz ar to pastāv 1 048 576 iespējamās kombinācijas. Papildus aspekti, kas jāņem vērā,

plānojot *brute force* tipa uzbrukumu, ir minimālais laiks starp secīgiem vienkāršajiem atbildes ziņojumiem – 4 ms, ka arī RFID lasītāja darbības režīms – aptuveni 7 ms izsaukuma ziņojumam un aptuveni 5 ms atbildes ziņojumu uzklausišanai. Ņemot vērā šos aspektus, *brute force* tipa uzbrukumam tika izvēlēts sekojošs algoritms:

1. visi 1 048 576 iespējamie vienkāršā atbildes ziņojuma veidi, kas atbilst konkrētajam ID numuram, tiek secīgi noraidīti RFID lasītājam;
2. katrs vienkāršā atbildes ziņojuma veids tiek atkārtots 12 reizes;
3. laika intervāli starp secīgi noraidītiem vienkāršajiem atbildes ziņojumiem ir 4 ms ilgi.

Veicot vienkāršus aprēķinus, var konstatēt, ka viena no 1 048 576 iespējamajiem vienkāršā atbildes ziņojuma variantiem pārraide 12 reizes ilgs aptuveni 54 ms un līdz ar to atbildīs RFID lasītāja darbības režīma 4,5 cikliem. Tas nozīmē, ka RFID lasītājam būs vismaz 4 iespējas detektēt derīgu vienkāršo atbildes ziņojumu. Kopējā visu 1 048 576 iespējamo vienkāršā atbildes ziņojuma variantu pārraidīšana 12 reizes ilgs aptuveni 15,6 stundas un līdz ar to nevar tikt uzskatīta par salīdzinoši vienkāršu reversās inženierijas aktivitāti. Līdz ar to tika veikta papildus analīze, lai izveidotu papildus pieņēmumus par atsevišķām ziņojuma daļām.

Kvaternārie cipari, kas reprezentē ID numura ciparus, ir sagrupēti 3 sekvencēs – 2 sekvences ar 4 cipariem katrā, un viena sekvence ar 2 cipariem. Kvaternārie cipari, kas reprezentē kontrolsummu (un iekšējās baterijas enerģijas daudzuma vērtību), ir sagrupēti identiski - 2 sekvences ar 4 cipariem katrā, un viena sekvence ar 2 cipariem. Zīmīgākie ID numura cipari tiek glabāti īsākajā sekvencē, un ir acīmredzami, ka šī īsākā sekvence lielākajā daļā gadījumu nemainās un līdz ar to ir potenciāli ne tik būtiska kontrolsummas aprēķina procesā. Kontrolsummas (un iekšējās baterijas enerģijas daudzuma vērtības) īsākā sekvence ļauj pārraidīt 16 atšķirīgas iekšējās baterijas enerģijas daudzuma vērtības, kuras, līdzīgi kā īsākā ID numura ciparu sekvence, būs relatīvi nemainīgas. Balstoties uz minēto aspektu analīzi, tika pieņemts lēmums pārbaudīt vienkāršotu iepriekš aprakstītā algoritma versiju, kurā tikai 8 ON vienumi tiek uzskatīti par potenciālo kontrolsummu, veidojot tikai 65 536 vienkāršā atbildes ziņojuma variantus, kuru pārraide 12 reizes aizņemtu tikai 1 stundu.

8.4. Rezultāti un diskusija

Lai novērtētu izstrādāto reversās inženierijas metodiku, tika veiktas sekojošas aktivitātes:

1. izvēlēts neeksistējošas birkas ID numurs, kurš atšķiras no eksistējošas birkas ID numura ar diviem kvaternārajiem cipariem;
2. izstrādāta Arduino komponenta programmatūra, kas ļauj secīgi noraidīt 65 536 iespējamus vienkāršā atbildes ziņojuma variantus 12 reizes;

3. veikts tests ar izstrādāto aparatūru un programmatūru ar mērķi atrast tādu derīgu vienkāršo atbildes ziņojumu, kas atbilst izvēlētajam ID numuram.

Tā kā augstāk minētā testa mērķis bija iepriekš aprakstītās metodikas konceptuālā pārbaude, atsevišķi apakšuzdevumi, piemēram, automātiska derīga vienkāršā atbildes ziņojuma detektēšana un attiecīgās kontrolsummas ekstrakcija, netika iekļauti testā izmantojamajā programmatūrā, bet gan veikti manuālā veidā ar testu operatora līdzdalību. Neskatoties uz to, viss tests, kura laikā tika noteikta derīga kontrolsumma konkrētajam izvēlētajam ID numuram, aizņēma tikai aptuveni 1,2 stundas, kas var tikt uzskatīts par minētās RFID sistēmas nepietiekamas aizsardzības pret reverso inženieriju demonstrāciju. Aprakstīto metodiku raksturo veikspēja līdz pat 20 derīgām kontrolsummām 24 stundu laikā, ja tiek izmantots viens RFID lasītājs un viena simulēta RFID birka. Turpmāki metodikas veikspējas uzlabojumi iespējami, automatizējot manuāli veiktos apakšuzdevumus, kā arī optimizējot 65 536 iespējamo vienkāršo atbildes ziņojumu noraidīšanas sekvenci. Protams, eksistē arī iespēja izmantot vairāk kā vienu simulētu RFID birku un sadalīt 65 536 iespējamo vienkāršo atbildes ziņojumu noraidīšanas sekvenci starp tām.

Tālākas plānotās aktivitātes RFID sistēmas reversās inženierijas kontekstā iekļaus eksperimentus RFID komunikācijas ziņojumu ģenerēšanā ar mērķi samazināt derīga atbildes ziņojuma iegūšanas laiku, kā arī tālāku komunikācijas protokola loģiskā līmeņa izpēti.

Promocijas darba 8. nodaļā aprakstītā pētījuma rezultāti ir prezentēti konferencē „ICDIPC 2012: The 2nd International Conference on Digital Information Processing and Communications” (Klaipēda, Lietuva, 10-12.07.2012), kā arī publicēti IEEE izdotajā konferences zinātnisko rakstu krājumā (skat. tabulu 9.1.), kas indeksēts SciVerse Scopus un IEEE Xplore Digital Library datubāzēs.

REZULTĀTI

Promocijas darba izstrādes laikā veiktās pētnieciskās aktivitātes, kuru mērķis bija pārbaudīt hipotēzi par kolektīvo mērījumu pieejas implementācijas iespējamību mobilos, uz transporta līdzekļiem bāzētos sensoru tīklos, ir novedušas pie sekojošiem rezultātiem:

1. Pārbaudīta bezvadu sensoru tīklu piemērotība mobilu sensoru tīklu izveidē. Rezultātā izstrādāta metodiku piedzīvojumu sacīkšu norises kontrolei, izmantojot bezvadu sensoru tīklus.
2. Pārbaudīts, kādu informāciju par ceļa segumu un tā bojājumiem iespējams iegūt, izmantojot plaša pielietojuma mobilu datortehniku un akustiskos sensorus. Rezultātā izstrādāta metodika ceļa seguma monitoringam, izmantojot mobilus sensoru tīklus ar mikrofoniem.
3. Pārbaudīts, kādu informāciju par ceļa segumu un tā bojājumiem iespējams iegūt, izmantojot plaša pielietojuma iekārtas ar iebūvētiem sensoriem. Rezultātā izstrādāta metodika ceļa seguma monitoringam, izmantojot viedtālrunus ar akselerometriem.
4. Pārbaudīts, vai transporta līdzekļa pamatstāvokļu (braukšanas un stāvēšanas) noteikšana iespējama, izmantojot tikai datus no 3-asu akselerometra, kā arī to apstrādi iegultā iekārtā ar ierobežotiem aparatūras un programmatūras resursiem. Rezultātā izstrādāta metodika transporta līdzekļa stāvokļa monitoringam, izmantojot iegultas iekārtas ar akselerometriem.
5. Pārbaudīta vienlaicīgas vairāku salīdzinoši lētu GNSS) uztvērēju ar iekļautu SBAS funkcionalitāti izmantošanas, kā arī papildus datu izmantošanas no lokālajām bāzes stacijām ietekme uz transporta līdzekļa pozīcijas noteikšanas precizitāti. Rezultātā izstrādāta metodika transporta līdzekļa pozīcijas noteikšanai, izmantojot vairākus SBAS uztvērējus un datus no lokālām bāzes stacijām.
6. Izvērtēta konkrētu komerciālu RFID komponentu piemērotība izmantošanai uz transporta līdzekļiem bāzētos sensoru tīklos, analizējot to aizsardzību pret reverso inženieriju. Rezultātā izstrādāta komerciālas RFID sistēmas reversās inženierijas metodika, kas bāzēta uz plaša pielietojuma aparatūru un programmatūru.
7. Balstoties uz izstrādātajām metodikām, veikta to implementācija prototipu veidā.
8. Izmantojot izveidotos prototipus, veikti praktiski eksperimenti datu ieguvē un apstrādē.
9. Balstoties uz praktisko eksperimentu laikā iegūto datu statistisko analīzi, veikts izstrādāto metodiku novērtējums.

Pētījumu rezultāti atspoguļoti 8 zinātniskajās publikācijās (t.sk. 7 anonīmi recenzētas starptautiski pieejamas, skat. tabulu 9.1.), kā arī prezentēti 13 zinātniskajās konferencēs un semināros (t.sk. 7 starptautiskās, skat. tabulu 9.2.).

Pētnieciskās aktivitātes ir veidojušas konvergenci ar atsevišķiem autora kolēģu veiktajiem zinātniskajiem pētījumiem. Rezultātā ar promocijas darba autora līdzdalību promocijas darba

pamata tēmai radniecīgās jomās ir tapušas vēl 7 zinātniskās publikācijas (t.sk. 5 anonīmi recenzētas starptautiski pieejamas, skat. tabulu 9.3.). Šie pētījumi ir prezentēti 5 starptautiskās zinātniskajās konferencēs (skat. tabulu 9.4.).

9.1. tabula

Zinātniskās publikācijas, kas saistītas ar promocijas darba izpildi

<i>Nr.p.k.</i>	<i>Atsauce</i>	<i>Atbilstošā promocijas darba sadaļa</i>	<i>Autora ieguldījums</i>
1.	[122]	2. nodaļas 3.1-3.5. apakšnodaļas	70%
2.	[123]	3. nodaļa	100%
3.	[49]	4. nodaļa	50%
4.	[50]	5. nodaļa	70%
5.	[124]	6. nodaļa	70%
6.	[125]	7. nodaļa	100%
7.	[126]	7. nodaļa	100%
8.	[127]	8. nodaļa	70%

9.2. tabula

Zinātniskās konferences un semināri, kur prezentēti promocijas darba izpildes rezultāti

<i>Nr.p.k.</i>	<i>Konference vai seminārs</i>
1.	<i>Daugavpils Universitātes 50. starptautiskā zinātniskā konference (Daugavpils, Latvija, 16.05.2008). <u>Artis Mednis</u>. Bezvadu sensoru tīklu izmantošana piedzīvojumu sacīkšu norises kontrolē.</i>
2.	<i>Latvijas Universitātes 67. konference (Rīga, Latvija, 06.02.2009). <u>Artis Mednis</u>. Informācijas ieguve no attālinātiem bezvadu sensoru tīkliem.</i>
3.	<i>Scientific summer camp "Idēju kalvē / Smithy of Ideas 2010" (Trakai, Lietuva, 17-20.06.2010). <u>Artis Mednis</u>. Road Rough Detection Using Microphones.</i>
4.	<i>NDT 2010: The 2nd International Conference on 'Networked Digital Technologies' (Prague, Czech Republic, 07-09.07.2010). <u>Artis Mednis</u>, Ģirts Strazdins, Martins Liepins, Andris Gordjusins, and Leo Selavo. RoadMic: Road Surface Monitoring Using Vehicular Sensor Networks with Microphones.</i>
5.	<i>Viedo sensoru un biofotonikas seminārs (Rīga, Latvija, 20.10.2010). <u>Artis Mednis</u>, Mārtiņš Liepiņš, Ģirts Strazdiņš, Andris Gordjušins, Leo Selāvo. Automobilis kā mobils bezvadu sensoru tīkla mezgls datu ieguvei.</i>
6.	<i>Viedo sensoru un kvantu skaitļošanas seminārs (Rīga, Latvija, 27.05.2011). <u>Artis Mednis</u>, Reinholds Zviedris, Andris Gordjušins, Georgijs Kanonirs, Leo Selāvo. Latvijas komandas pieredze viedo auto izaicinājumā GCDC.</i>

7.	<i>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) (Barcelona, Spain, 29.06.2011). Artis Mednis, Girts Strazdins, Reinholds Zviedris, Georgijs Kanonirs, and Leo Selavo. Real Time Pothole Detection using Android Smartphones with Accelerometers.</i>
8.	<i>LU un LMT Datorzinātņu dienas (Ratnieki, Latvija, 08-10.08.2011). Artis Mednis. Datu ieguve, izmantojot auto kā mobilus bezvadu sensoru tīklu mezglus.</i>
9.	<i>UOII 2011: The 1st International Workshop on User Oriented Information Integration at the 10th International Conference on Perspectives in Business Informatics Research (BIR 2011) (Riga, Latvia, 06.10.2011). Artis Mednis. Vehicle Position Determination Using Several SBAS Receivers and Data from Local Reference Stations.</i>
10.	<i>PAAMS 2012: The 10th International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems (Salamanca, Spain, 28-30.03.2012). Artis Mednis, Georgijs Kanonirs, and Leo Selavo. Adaptive Vehicle Mode Monitoring using Embedded Devices with Accelerometers.</i>
11.	<i>ICDIPC 2012: The 2nd International Conference on Digital Information Processing and Communications (Klaipeda, Lithuania, 10-12.07.2012). Artis Mednis, and Reinholds Zviedris. RFID Communication: How Well Protected Against Reverse Engineering?</i>
12.	<i>II LU un LMT Datorzinātņu dienas (Ratnieki, Latvija, 06-08.08.2012). Artis Mednis. Transporta līdzekļa aktivitātes režīma detektēšana, izmantojot iegultas iekārtas ar akselerometriem.</i>
13.	<i>AICT 2012: The 6th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (Tbilisi, Georgia, 17-19.10.2012). Artis Mednis, Atis Elsts, and Leo Selavo. Embedded Solution for Road Condition Monitoring Using Vehicular Sensor Networks.</i>

9.3. tabula

Pārējās zinātniskās publikācijas, kas tapušas ar promocijas darba autora līdzdalību

<i>Nr.p.k.</i>	<i>Atsauce</i>	<i>Autora ieguldījums</i>
1.	[51]	20%
2.	[128]	10%
3.	[72]	20%
4.	[106]	10%
5.	[38]	20%
6.	[129]	10%
7.	[130]	30%

Zinātniskās konferences un semināri, kur prezentēti saistīto pētījumu rezultāti

Nr.p.k.	Konference
1.	<i>REALWSN 2010: The 4th Workshop on Real-World Wireless Sensor Networks (Colombo, Sri Lanka, 16-17.12.2010). Reinholds Zviedris, Atis Elsts, Girts Strazdins, Artis Mednis and Leo Selavo. LynxNet: Wild Animal Monitoring Using Sensor Networks.</i>
2.	<i>CONET 2011: The 2nd International Workshop on Networks of Cooperating Objects (Chicago, USA, 11.04.2011). Girts Strazdins, Artis Mednis, Georgijs Kanonirs, Reinholds Zviedris, and Leo Selavo. Towards Vehicular Sensor Networks with Android Smartphones for Road Surface Monitoring.</i>
3.	<i>SENSORCOMM 2011: The 5th International Conference on Sensor Technologies and Applications (Nice/Saint Laurent du Var, France, 21-27.08.2011). Girts Strazdins, Artis Mednis, Reinholds Zviedris, Georgijs Kanonirs, and Leo Selavo. Virtual Ground Truth in Vehicular Sensing Experiments: How to Mark it Accurately.</i>
4.	<i>ARCS 2012: International Conference on Architecture of Computing Systems (München, Germany, 28.02-02.03.2012). Atis Elsts, Rihards Balass, Janis Judvaitis, Reinholds Zviedris, Girts Strazdins, Artis Mednis, and Leo Selavo. SADmote: A Robust and Cost-Effective Device for Environmental Monitoring.</i>
5.	<i>AICT 2012: The 5th International Scientific Conference on Applied Information and Communication Technologies (Jelgava, Latvia, 26-27.04.2012). Reinholds Zviedris, Artis Mednis, and Gatis Mednis. Heterogeneous Tool Kit for Real-Time Edutainment.</i>

SECINĀJUMI

Promocijas darba izstrādes laikā veikto pētniecisko aktivitāšu rezultāti ļauj secināt, ka sākotnēji izvirzītā hipotēze par kolektīvo mērījumu pieejas implementācijas iespējamību mobilos, uz transporta līdzekļiem bāzētos sensoru tīklos, uzskatāma par apstiprinātu.

Sākotnējais hipotēzes uzstādījums ietvēra divus subjektus – mobilus, uz transporta līdzekļiem bāzētos sensoru tīklos, kā arī kolektīvo mērījumu pieejas izmantošanu datu ieguvei, sākotnējai apstrādei, apkopošanai un uzkrāšanai. Pirmā subjekta kontekstā promocijas darba izstrādes uzsākšanas laikā tika konstatēts, ka eksistē atsevišķas metodikas, kurām ir atsevišķas pazīmes, piemēram, mobilu sensoru izmantošana datu ieguvei, kas ļauj klasificēt minētās metodikas kā piederīgas izmantošanai mobilos, uz transporta līdzekļiem bāzētos sensoru tīklos. Tajā pat laikā šo metodiku implementācijā bija atsevišķi aspekti, kas būtiski ierobežoja vai pat padarīja neiespējamu to izmantošanu kolektīvo mērījumu pieejas kontekstā, piemēram, specifiskas aparatūras platformas, ārēju sensoru izmantošana un visu iegūto datu pārsūtīšana bez to sākotnējas apstrādes.

Promocijas darbā aprakstītās metodikas (RoadMic un Potroid) ir balstītas uz **plaša pielietojuma aparatūras platformām** (PC un viedtālruniem ar AndroidOS), līdz ar to ir novērsta citu pētnieku iepriekš veidotām metodikām BikeNet, BusNet, Pothole Patrol raksturīgā nepieciešamība pēc specifiskas aparatūras platformas. Tajā pat laikā minētās metodikas iespējams realizēt arī uz speciāla šim nolūkam paredzēta sensoru mezgla. Vienkāršu **iekšēju** sensoru (mikrofons un akselerometrs) lietošana ļauj samazināt metodikas implementācijai nepieciešamo komponentu skaitu, salīdzinājumā ar BikeNet, BusNet, Pothole Patrol, Nericell un TrafficSense metodikām, kur tiek izmantoti ārēji sensori. Metodikas ir orientētas uz praktiska, ar transporta līdzekļu infrastruktūru saistīta uzdevuma – ceļa seguma monitoringa automatizētu veikšanu, kas ir ārpus metodiku BikeNet un SoundSense veicamo uzdevumu loka. Savukārt **lokāli** veiktā iegūto datu priekšapstrāde ļauj samazināt pārsūtāmās informācijas daudzumu, salīdzinājumā ar BikeNet, BusNet un NTU metodikām. Līdz ar to promocijas darbā aprakstītās metodikas (RoadMic un Potroid) atbilst sākotnējam promocijas darba ievadā minētajam uzstādījumam par pazīmēm, kādas raksturo kolektīvo mērījumu pieejas implementāciju mobilos, uz transporta līdzekļiem bāzētos sensoru tīklos. Detalizēts metodiku salīdzinājums pēc minētajiem raksturlielumiem ir dots tabulā 10.1.

Eksistējošo un izstrādāto mobilu monitoringa metodiku salīdzinājums, vērtējot to atbilstību pielietojumam ceļa seguma monitoringam mobilos, uz transporta līdzekļiem balstītos sensoru tīklos

<i>Metodika (publicēšanas gads)</i>	<i>Aparatūras platforma</i>	<i>Izmantotais sensors</i>	<i>Sensora novietojums</i>	<i>Datu apstrādes veikšanas vieta</i>	<i>Pielietojums ceļa seguma monitoringā</i>
<i>BikeNet (2007)</i>	<i>sensoru mezgls (Tmote Invent) + viedtālrunis (Nokia N80)</i>	<i>mikrofons</i>	<i>ārējs</i>	<i>attālināti</i>	-
<i>SoundSense (2009)</i>	<i>viedtālrunis (Apple iPhone)</i>	<i>mikrofons</i>	<i>iekšējs</i>	<i>lokāli</i>	-
<i>BusNet (2007)</i>	<i>sensoru mezgls (Crossbow MICAz)</i>	<i>akselerometrs</i>	<i>ārējs</i>	<i>attālināti</i>	+
<i>Pothole Patrol (2008)</i>	<i>iegults dators (Soekris 4801)</i>	<i>akselerometrs</i>	<i>ārējs</i>	<i>lokāli</i>	+
<i>Nericell (2008)</i>	<i>viedtālrunis (ar Windows Mobile OS)</i>	<i>akselerometrs</i>	<i>ārējs</i>	<i>lokāli</i>	+
<i>TrafficSense (2008)</i>	<i>viedtālrunis (ar Windows Mobile OS)</i>	<i>akselerometrs</i>	<i>ārējs</i>	<i>lokāli</i>	+
<i>NTU (2010)</i>	<i>viedtālrunis (HTC Diamond)</i>	<i>akselerometrs</i>	<i>iekšējs</i>	<i>lokāli+attālināti</i>	+
<i>RoadMic (2010)</i>	<i>PC / speciāls sensoru mezgls</i>	<i>mikrofons</i>	<i>iekšējs</i>	<i>lokāli</i>	+
<i>Potroid (2011)</i>	<i>viedtālrunis (ar Android OS) / speciāls sensoru mezgls</i>	<i>akselerometrs</i>	<i>iekšējs</i>	<i>lokāli</i>	+

PATEICĪBAS

Autors izsaka pateicību promocijas darba zinātniskajam vadītājam Dr. sc. comp. Guntim Arnicānam par palīdzību promocijas darba tematikas izvēlē, kā arī sniegto atbalstu izvēlētā mērķa sasniegšanā.

Promocijas darba 2. nodaļas 3.1-3.5. apakšnodaļās aprakstītās pētnieciskās aktivitātes veiktas Elektronikas un datorzinātņu institūtā (direktors Dr. sc. comp. Modris Greitāns) valsts pētījumu programmas „Inovātīvo daudzfunkcionālo materiālu, signālapstrādes un informātikas tehnoloģiju izstrāde konkurētspējīgiem zinātņu ietilpīgiem produktiem” (vadītājs Dr. habil. phys. A. Šternbergs) projekta Nr. 2 „Inovatīvas signālapstrādes tehnoloģijas viedu un efektīvu elektronisko sistēmu radīšanai” (vadītājs Dr. sc. comp. Modris Greitāns) ietvaros.

Promocijas darba 3. nodaļā aprakstītās pētnieciskās aktivitātes veiktas Latvijas Universitātes Datorikas fakultātes Datoru inženierijas, iegulto sistēmu un sensoru laboratorijā (vadītājs Dr. sc. comp. Leo Seļāvo) sadarbībā ar biedrību Autoliste (valdes priekšsēdētāja Māra Niedra).

Promocijas darba 4.-7. nodaļā aprakstītās pētnieciskās aktivitātes veiktas Elektronikas un datorzinātņu institūtā (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 2. nodaļas 3.1-3.5. apakšnodaļās un 8. nodaļā aprakstītās pētnieciskās aktivitātes veiktas ar Eiropas Sociālā fonda projekta Nr. 2011/0054/1DP/1.1.2.1.2/11/IPIA/VIAA/002 „Atbalsts doktora studijām Latvijas Universitātē - 2” atbalstu.

Autors izsaka pateicību Elektronikas un datorzinātņu institūta kolēģiem – pētniecisko aktivitāšu līdzdalībniekiem un zinātnisko publikāciju līdzautoriem:

- asistentam Atim Elstam;
- asistentam Andrim Gordjušinam,
- asistentam Georgijam Kanoniram;
- asistentam Mārtaņam Liepiņam;
- vadošajam pētniekam Dr. sc. comp. Leo Seļāvo;
- pētniekam Ģirtam Strazdiņam;
- asistentam Reinholdam Zviedrim.

Autors izsaka pateicību savai ģimenei un saviem vecākiem par sapratni un sniegto atbalstu izvēlētā mērķa sasniegšanā.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA UN AVOTI

1. **De Zoysa, K., Keppitiyagama, C., Seneviratne, G.P., et. al.** A Public Transport System Based Sensor Network for Road Surface Condition Monitoring. *In: NSDR '07. The 2007 workshop on Networked systems for developing regions at the ACM SIGCOMM 2007 Data Communications Festival*, Kyoto, Japan, August 27-31, 2007. Proceedings. ACM, 2007, p. 9:1-9:6.
2. **Eriksson, J., Girod, L., Hull, B., et.al.** The Pothole Patrol: Using a Mobile Sensor Network for Road Surface Monitoring. *In: MobiSys '08. The 6th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications and Services*, Breckenridge, Colorado, June 17-20, 2008. Proceedings. ACM, 2008, p. 29-39.
3. **Burke, J., Estrin, D., Hansen, M., et. al.** Participatory sensing. *In: WSW 2006. The 1st Workshop on World-Sensor-Web at the 4th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, Boulder, Colorado, October 31, 2006 [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: www.escholarship.org/uc/item/19h777qd.pdf
4. **Ghosh, S.** *Distributed Systems: An Algorithmic Approach*. London : Taylor & Francis, 2007, 402 p.
5. **Lynch, N.A.** *Distributed Algorithms*. San Francisko : Morgan Kaufmann, 1996, 872 p.
6. **Andrews, G.R.** *Foundations of Multithreaded, Parallel, and Distributed Programming*. Boston et.al. : Addison-Wesley, 2000, 664 p.
7. **Elmasri, R., Navathe, S.B.** *Fundamentals of Database Systems (6th ed.)*. Boston et.al. : Addison-Wesley, 2010, 1172 p.
8. **Tilak, S., Abu-Ghazaleh, N.B., Heinzelman, W.** A Taxonomy of Wireless Micro-Sensor Network Models. *ACM Mobile Computing and Communications Review*, 2002, N 2, vol. 6, p. 28-36.
9. **Du, X., Lin, F.** Improving Sensor Network Performance by Deploying Mobile Sensors. *In: IPCCC 2005. The 24th IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference*, Phoenix, Arizona, April 7-9, 2005. Proceedings. IEEE, 2005, p. 67-71.
10. **Wang, D., Liu, J., Zhang, Q.** Probabilistic Field Coverage Using a Hybrid Network of Static and Mobile Sensors. *In: 2007 Fifteenth IEEE International Workshop on Quality of Service (IWQoS)*, IEEE, 2007, p. 56-64.
11. **Dang, T., Bulusu, N., Feng, W., et. al.** CoTrack: A Framework for Tracking Dynamic Features with Static and Mobile Sensors. *In: 2010 Proceedings IEEE INFOCOM*, IEEE, 2010, p. 1-5.

12. **Howard, A., Mataric, M.J., Sukhatme, G.S.** Mobile Sensor Network Deployment Using Potential Fields: A Distributed, Scalable Solution to the Area Coverage Problem. *In: DARS '02. The 6th International Symposium on Distributed Autonomous Robotics Systems*, Fukuoka, Japan, June 25-27, 2002. Proceedings, Kyushu University, 2002, p. 299-308 [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: http://www-robotics.usc.edu/~ahoward/pubs/howard_dars02a.pdf
13. **Sessler, G.M., West, J.E.** Self-Biased Condenser Microphone with High Capacitance. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1962, N 11, vol. 34, p. 1787-1788.
14. **Paritsky, A., Kots, A.** *Small Optical Microphone/Sensor*. US Pat. 6462808, 2002; United States Patent and Trademark Office, 2002.
15. **Schwartz, D.M.** *Particulate Flow Detection Microphone*. US Pat. 7580533, 2009; United States Patent and Trademark Office, 2009.
16. **Rombach, P., Müllenborn, M., Hansen, O., et. al.** *Solid State Silicon-Based Condenser Microphone*. US Pat. RE42346, 2011; United States Patent and Trademark Office, 2011.
17. **Levi, A., Silverman, H.** A Robust Method to Extract Talker Azimuth Orientation Using a Large-Aperture Microphone Array. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 2010, N 2, vol. 18, p. 277-285.
18. **Guarato, F., Jakobsen, L., Vanderelst, D., et. al.** A Method for Estimating the Orientation of a Directional Sound Source from Source Directivity and Multi-Microphone Recordings: Principles and Application. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2011, N 2, vol. 129, p. 1046-1058.
19. **Ward, J.A., Lukowicz, P., Tröster, G., et. al.** Activity Recognition of Assembly Tasks Using Body-Worn Microphones and Accelerometers. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, N 10, vol. 28, p. 1553-1567.
20. **Can, A., Van Renterghem, T., Rademaker, M., et. al.** Sampling Approaches to Predict Urban Street Noise Levels Using Fixed and Temporary Microphones. *In: Journal of Environmental Monitoring* [tiešsaiste]. London (UK) : The Royal Society of Chemistry, 30.08.2011 [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: <http://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2011/EM/C1EM10292C>.
21. Practical Guide to Accelerometers. Elkader (Iowa) : SENSR, 19.05.2008 [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: <http://www.sensr.com/pdf/practical-guide-to-accelerometers.pdf>.
22. **Zhao, J., Jia, J., Wang, H., et. al.** A Novel Threshold Accelerometer with Postbuckling Structures for Airbag Restraint Systems. *IEEE Sensors Journal*, 2007, N 8, vol. 7, p. 1102-1109.

23. **Zollo, A., Amoroso, O., Lancieri, M., et. al.** A Threshold-Based Earthquake Early Warning Using Dense Accelerometer Networks. *Geophysical Journal International*, 2010, N 2, vol. 183, p. 963-974.
24. **Sun, D., Petovello, M.G., Cannon, M.E.** Use of a Reduced IMU to Aid a GPS Receiver with Adaptive Tracking Loops for Land Vehicle Navigation. *GSM Solutions*, 2010, N 4, vol. 14, p. 319-329.
25. **Torniai, C., Battle, S., Cayzer, S.** Sharing, Discovering and Browsing Geotagged Pictures on the Web. Technical Report HPL-2007-73. Bristol (UK) : Hewlett-Packard Laboratories, 15.05.2007 [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: <http://www.hpl.hp.com/techreports/2007/HPL-2007-73.pdf>.
26. **Friedland, G., Sommer, R.** Cybercasing the Joint: On the Privacy Implications of Geo-Tagging. *In: HotSec '10. The 5th USENIX Workshop on Hot Topics in Security at the 19th USENIX Security Symposium*, Washington, D.C., August 10, 2010 [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: http://www.usenix.org/events/hotsec10/tech/full_papers/Friedland.pdf.
27. **Deffree, S.** Notebook PC Shipments Exceeded Desktops for First Time in Q3, iSuppli Reports. *In: Electronics Design, Strategy, News* [tiešsaiste]. Lexington (Massachusetts) : UBM Electronics, 23.12.2008 [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: http://www.edn.com/article/458578-Notebook_PC_shipments_exceeded_desktops_for_first_time_in_Q3_iSuppli_reports.php.
28. Acer Support: Extensa 5230 Series Specifications. San Jose (California) : Acer Inc. [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: <http://support.acer.com/acerpanam/notebook/0000/Acer/Extensa5230/Extensa5230sp2.shtml>.
29. Audacity: Free Audio Editor and Recorder [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: <http://audacity.sourceforge.net/>.
30. Sox – Sound eXchange [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: <http://sox.sourceforge.net/>.
31. gpsd – a GPS Service Daemon [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: <http://catb.org/gpsd/>.
32. EasyGPS - FREE GPS Software for Your Garmin, Magellan or Lowrance GPS [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: <http://www.easygps.com/>.
33. SerAccel v5. A Self Contained Triple-Axis Accelerometer. Boulder (Colorado) : SparkFun Electronics, 26.06.2005 [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: <http://www.sparkfun.com/datasheets/Accelerometers/SerAccel-v5.pdf>.
34. USB Weather Board v2 Data Sheet. Boulder (Colorado) : SparkFun Electronics, 18.09.2008 [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: <http://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Pressure/USBWeatherBoard-v2.pdf>.

35. APC Smart-UPS 420VA 230V. West Kingston (Rhode Island) : Schneider Electric [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: http://www.apc.com/products/resource/include/techspec_index.cfm?base_sku=SU420INET.
36. 300/400/500/700 Watts DC To AC Inverter. Hong Kong : Minwa Electronics Co., Ltd. [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: http://minwa.com/e/product/e_566.html.
37. **Cross, J.** Laptop vs. Netbook vs. Smartphone. *In: PCWorld* [tiešsaiste]. Boston (Massachusetts) : International Data Group, 08.06.2010 [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: http://www.pcworld.com/article/198305/laptop_vs_netbook_vs_smartphone.html.
38. **Strazdins, G., Mednis, A., Zviedris, R., et. al.** Virtual Ground Truth in Vehicular Sensing Experiments: How to Mark it Accurately. *In: SENSORCOMM 2011. The 5th International Conference on Sensor Technologies and Applications*, Nice, France, August 21–27, 2011. Proceedings. IARIA, 2011, p. 295-300.
39. **Lee, U., Magistretti, E., Zhou, B., et.al.** Efficient Data Harvesting in Mobile Sensor Platforms. *In: Fourth IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops*, IEEE, 2006, p. 352-356.
40. **Lee, U., Zhou, B., Gerla, M., et.al.** MobEyes: Smart Mobs for Urban Monitoring with a Vehicular Sensor Network. *IEEE Wireless Communications*, 2006, N 5, vol. 13, p. 52-57.
41. **Mathur, S., Kaul, S., Gruteser, M., et.al.** ParkNet: a Mobile Sensor Network for Harvesting Real Time Vehicular Parking Information. *In: MobiHoc 2009. The 10th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing S³ Workshop*, New Orleans, Louisiana, May 18-21, 2009. Proceedings. ACM, 2009, p. 25-28.
42. **Hu, S.C., Wang, Y.C., Huang, C.Y., et. al.** Measuring Air Quality in City Areas by Vehicular Wireless Sensor Networks. *Journal of Systems and Software*, 2011, N 11, vol. 84, p. 2005-2012.
43. **Lan, K.C., Chou, C.M., Wang, H.Y.** Using Vehicular Sensor Networks for Mobile Surveillance. *In: VTC2012-Fall. The 67th IEEE Vehicular Technology Conference*, Quebec City, Canada, September 3-6, 2012 [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: http://www.csie.ncku.edu.tw/~klan/data/paper/pdf/2012_VTC_USING.pdf
44. **Piran, M.J., Murthy, G.R., Babu, G.P.** Vehicular Ad Hoc and Sensor Networks; Principles and Challenges. *International Journal of Ad hoc, Sensor & Ubiquitous Computing*, 2011, N 2, vol. 2, p. 38-49.
45. **Reddy, P.R.K., Joshna, P., Sireesha, G., et. al.** Data Collection through Vehicular Sensor Networks by Using TCDGP. *Computer Science Chronicle*, 2012, N 1, vol. 1, p. 1-7.

46. **Zhang, C., Lu, R., Lin, X., et al.** An Efficient Identity-Based Batch Verification Scheme for Vehicular Sensor Networks. **In:** *27th IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, IEEE, 2008, p. 246-250.
47. **Conceição, H., Ferreira, M., Barros, J.** On the Urban Connectivity of Vehicular Sensor Networks. *Distributed Computing in Sensor Systems*, LNCS 5067, Nikolettseas S.E. et al., eds., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008, p. 112-125.
48. **Palazzi, C.E., Pezzoni, F., Ruiz, P.M.** Delay-Bounded Data Gathering in Urban Vehicular Sensor Networks. *Pervasive and Mobile Computing*, 2012, N 2, vol. 5, p. 180-193.
49. **Mednis, A., Strazdins, G., Liepins, M., et al.** RoadMic: Road Surface Monitoring Using Vehicular Sensor Networks with Microphones. *Networked Digital Technologies*, CCIS 88, Part II, Zavoral F. et al., eds., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010, p. 417-429.
50. **Mednis, A., Strazdins, G., Zviedris, R., et al.** Real Time Pothole Detection using Android Smartphones with Accelerometers. **In:** *2011 International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems and Workshops (DCOSS 2011)*, IEEE, 2011, p. 1-6.
51. **Zviedris, R., Elsts, A., Strazdins, G., et al.** LynxNet: Wild Animal Monitoring Using Sensor Networks. *Real-World Wireless Sensor Networks*, LNCS 6511, Marron P.J. et al., eds., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010, p. 170-173.
52. **Dutta, P., Culler, D.** Epic: An Open Mote Platform for Application-Driven Design. **In:** *2008 International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN 2008)*, IEEE, 2011, p. 547-548.
53. 3Mate! - Wireless Sensor Module. Trento (Italy) : TRETTEC S.r.l., 12.07.2007 [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: http://www.tretec.it/public/webroot/media/3mate/071207_3MATE_DS.pdf
54. **Lewis, F.L.** Wireless Sensor Networks. **In:** *Smart Environments: Technology, Protocols and Applications*. Wiley-Interscience, New Jersey, 2004, p. 13-46.
55. **Römer, K., Mattern, F.** The Design Space of Wireless Sensor Networks. *IEEE Wireless Communications*, 2004, N 6, vol. 11, p. 54-61.
56. **Farrington, A.** Emit – a Competitors’ Guide. Winchester (UK) : Emit UK, 04.12.2004 [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: <http://www.emituk.com/faq/A%20Competitors%20Guide%20in%20PDF.pdf>.
57. SPORTident Event Timing Solutions. Cumbria (UK) : SPORTident UK Ltd. [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: <http://www.sportident.co.uk/>.
58. Tmote Sky Low Power Wireless Sensor Module. San Francisco (California) : Moteiv Corporation, 13.11.2006 [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: http://www.snm.ethz.ch/snmwiki/pub/uploads/Projects/tmote_sky_datasheet.pdf.

59. **Levis, P., Gay, D.** *TinyOS Programming*. Cambridge *et.al.* : Cambridge University Press, 2009, 282 p.
60. **Gay, D., Levis, P., von Behren, R.** *et. al.* The nesC language: A Holistic Approach to Networked Embedded Systems. *ACM SIGPLAN Notices*, 2003, N 5, vol. 38, p. 1-11.
61. **The European Parliament And Council of EU.** Directive 2002/49/EC of the European Parliament and the Council of 25 June 2002 Relating to the Assessment and Management of Environmental Noise. *Official Journal of the European Communities*, 2002, N L189, vol. 45, p. 12-25.
62. Potholes. Reading (UK) : Warranty Direct [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: <http://potholes.co.uk/>.
63. **Lu, H., Pan, W., Lane, N.D., et. al.** SoundSense: Scalable Sound Sensing for People-Centric Applications on Mobile Phones. *In: MobiSys '09. The 7th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications and Services*, Krakow, Poland, June 22–25, 2009. Proceedings. ACM, 2009, p. 165-178.
64. **Eisenman, S.B., Miluzzo, E., Lane, N.D., et.al.** The BikeNet Mobile Sensing System for Cyclist Experience Mapping. *In: SenSys '07. The 5th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, Sidney, Australia, November 6-9, 2007. Proceedings. ACM, 2007, p. 87-101.
65. **Mohan, P., Padmanabhan, V.N., Ramjee, R.** Nericell: Rich Monitoring of Road and Traffic Conditions Using Mobile Smartphones. *In: SenSys '08. The 6th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, Raleigh, North Carolina, November 5-7, 2008. Proceedings. ACM, 2008, p. 323-336.
66. **Bychkovsky, V., Hull, B., Miu, A., et.al.** A Measurement Study of Vehicular Internet Access Using In Situ Wi-Fi Networks. *In: MobiCom '06. The 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, Los Angeles, California, September 24-29, 2006. Proceedings. ACM, 2006, p. 50-61.
67. **Strazdins, G.** Location Based Information Storage and Dissemination in Vehicular Ad Hoc Networks. *Advances in Databases and Information Systems*, LNCS 5968, Grundspenkis J., *et. al.*, eds., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009, p. 211-219.
68. **Bajwa, R., Rajagopal, R., Varaiya, P., et. al.** In-Pavement Wireless Sensor Network for Vehicle Classification. *In: 2011 10th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN 2011)*, IEEE, 2011, p. 85-96.
69. **Jol, H.M.** *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Amsterdam : Elsevier Science, 2008, 544 p.

70. Roadscanners. Rovaniemi (Finland) : Roadscanners Oy [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: <http://www.roadscanners.com/>.
71. Real-Time Maps and Traffic Information Based on the Wisdom of the Crowd [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: <http://world.waze.com/>.
72. **Strazdins, G., Mednis, A., Kanonirs, G., et. al.** Towards Vehicular Sensor Networks with Android Smartphones for Road Surface Monitoring. *In: CONET 2011. The 2nd International Workshop on Networks of Cooperating Objects*, Chicago, Illinois, April 11, 2011. Electronic Proceedings of CPSWeek'11, 2011.
73. Android OS. [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: <http://www.android.com/>.
74. **Mohan, P., Padmanabhan, V.N., Ramjee, R.** Trafficsense: Rich Monitoring of Road and Traffic Conditions Using Mobile Smartphones. Technical Report MSR-TR-2008-59. Bangalore (India) : Microsoft Research India, 21.04.2008 [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: <http://research.microsoft.com/pubs/70573/tr-2008-59.pdf>.
75. **Tai, Y., Chan, C., Hsu, J.Y.** Automatic Road Anomaly Detection Using Smart Mobile Device. *In: TAAI 2010. The 2010 Conference on Technologies and Applications of Artificial Intelligence*, Hsinchu, Taiwan, November 18-20, 2010 [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: http://w.csie.org/~yctai/papers/taai2010_paper.pdf.
76. **Hautakangas, H., Nieminen, J.** Data Mining for Pothole Detection. *In: Pro gradu seminar*, Jyväskylä, Finland, February 10, 2011 [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: http://users.jyu.fi/~tka/opetus/kevat11/data_mining_for_pothole_detection.ppt.
77. **Strazdins, G., Elsts, A., Selavo, L.** MansOS: Easy to Use, Portable and Resource Efficient Operating System for Networked Embedded Devices. *In: SenSys '10. The 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, Zurich, Switzerland, November 3-5, 2010. Proceedings. ACM, 2010, p. 427-428.
78. **Stoleru, R., He, T., Stankovic, J.A.** Walking GPS: a Practical Solution for Localization in Manually Deployed Wireless Sensor Networks. *In: 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks*, IEEE, 2004, p. 480-489.
79. **Fokum, D.T., Frost, V.S., DePardo, D., et.al.** Experiences from a Transportation Security Sensor Network Field Trial. *In: 2009 IEEE Globecom Workshops (Gc Workshops 2009)*, IEEE, 2009, p. 1-6.
80. **Gleason, S., Gebre-Egziabher, D.** *GNSS applications and methods*. Norwood et.al. : Artech House, 2009, 508 p.
81. **Martín, P., Sánchez, M., Álvarez, L., et.al.** Multi-Agent System for Detecting Elderly People Falls through Mobile Devices. *Ambient Intelligence - Software and Applications*, AISC 92, Novais P. et. al., eds., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, p. 93-99.

82. **Rammal, A., Trouilhet, S., Singer, N., et.al.** An Adaptive System for Home Monitoring Using a Multiagent Classification of Patterns. *International Journal of Telemedicine and Applications*, 2008, vol. 2008, p. 3:1-3:8.
83. **Sánchez, M., Martín, P., Álvarez, L., et.al.** A New Adaptive Algorithm for Detecting Falls through Mobile Devices. *Trends in Practical Applications of Agents and Multiagent Systems*, AISC 90, Corchado J.M. et. al., eds., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, p. 17-24.
84. **Baker, P., Catterson, V., McArthur, S.** Integrating an Agent-Based Wireless Sensor Network within an Existing Multi-Agent Condition Monitoring System. **In:** *2009 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems (ISAP 2009)*. IEEE, 2009, p. 1-6.
85. **Schwartz, R.** *Vehicle State Detection*. US Pat. 0204877, 2010; United States Patent and Trademark Office, 2010.
86. **Chowdhary, M., Zhang, Q., Chansarkar, M., et.al.** *Systems and Methods for Detecting a Vehicle Static Condition*. US Pat. 0234933, 2008; United States Patent and Trademark Office, 2008.
87. **Wang, J.-H., Gao, Y.** Multi-Sensor Data Fusion for Land Vehicle Attitude Estimation using a Fuzzy Expert System. *Data Science Journal*, 2005, vol. 4, p. 127-139.
88. **Samama, N.** *Global Positioning: Technologies and Performance*. *Wiley Survival Guides in Engineering and Science*. New Jersey : Wiley-Interscience, 2008, 376 p.
89. **Buehler, M., Iagnemma, K., Singh, S.** *The 2005 DARPA Grand Challenge: The Great Robot Race*. *Springer Tracts in Advanced Robotics*. Berlin et.al. : Springer, 2007, 520 p.
90. DARPA Urban Challenge. Arlington (Virginia) : Defense Advanced Research Projects Agency [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: <http://archive.darpa.mil/grandchallenge/index.asp>.
91. **Buehler, M., Iagnemma, K., Singh, S.** *The DARPA Urban Challenge: Autonomous Vehicles in City Traffic*. *Springer Tracts in Advanced Robotics*. Berlin et.al. : Springer, 2010, 626 p.
92. Grand Cooperative Driving Challenge. Helmond (Netherlands): GCDC Project organization [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: <http://www.gcdc.net/>.
93. **Urmson, C., Anhalt, J., Bagnell, D., et. al.** Tartan Racing: A Multi-Modal Approach to the DARPA Urban Challenge [tiešsaiste]. Arlington (Virginia) : Defense Advanced Research Projects Agency, 13.04.2007 [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: http://archive.darpa.mil/grandchallenge/TechPapers/Tartan_Racing.pdf.
94. POS LV Specifications. Richmond Hill (Ontario) : Applanix Corp., 28.01.2011 [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: http://www.coudere.be/downloads/producten/POSLV_Specifications%201010.pdf.

95. Geiger, A., Moosmann, F., Lauer, M., *et. al.* Team AnnieWAY's Entry to GCDC 2011 [tiešsaiste]. Helmond (Netherlands): GCDC Project organization, 26.04.2011 [atsauce 30.11.2012]. Pieejams: http://www.gcdc.net/mainmenu/Home/news/News_-_current/GCDC_Final%3A_teams_videos_and_final_papers/Annieway.
96. RT Inertial and GPS Measurement Systems. User Manual. Oxfordshire (UK) : Oxford Technical Solutions, 12.08.2011 [atsauce 30.11.2012]. Pieejams: <http://www.oxts.com/downloads/rtman.pdf>.
97. Grewal, M.S., Weill, L.R., Andrews, A.P. *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration*. New Jersey : Wiley-Interscience, 2007, 552 p.
98. LaMarca, A., Lara, E. *Location Systems: An Introduction to the Technology Behind Location Awareness. Synthesis Lectures on Mobile and Pervasive Computing*. San Rafael : Morgan & Claypool Publishers, 2008, 121 p.
99. GCDC 2011 Rules & Technology Document Final Version. Helmond (Netherlands): GCDC Project Organization, 12.04.2011 [atsauce 30.11.2012]. Pieejams: http://www.gcdc.net/mainmenu/Home/technology/Rules_and_Technology/Rules_%26_Technology_Document_v2_12042011.
100. Magellan eXplorist XL Reference Manual. Santa Clara (California) : Thales Navigation, Inc., 20.10.2005 [atsauce 30.11.2012]. Pieejams: http://www.gps-info.com.ua/wp-content/downloads/manuals/portable/magellan/me_XL_manual_en.pdf
101. Farrell, J. *Aided Navigation: GPS with High Rate Sensors. McGraw-Hill Professional Engineering: Electronic Engineering*. New York : McGraw-Hill, 2008, 530 p.
102. Magellan eXplorist 210 Reference Manual. Santa Clara (California) : Thales Navigation, Inc., 27.06.2005 [atsauce 30.11.2012]. Pieejams: <http://www.highspeedsat.com/pdf/satellite-gps/magellan/explorist-210-manual.pdf>.
103. EUREF-IP Ntrip Broadcaster. Frankfurt am Main, Germany : Federal Agency for Cartography and Geodesy [atsauce 30.11.2012]. Pieejams: <http://www.euref-ip.net/home>.
104. IGS-IP Ntrip Broadcaster. Frankfurt am Main, Germany : Federal Agency for Cartography and Geodesy [atsauce 30.11.2012]. Pieejams: <http://www.igs-ip.net/home>.
105. LatPos. Riga (Latvia) : Latvian Geospatial Information Agency [atsauce 30.11.2012]. Pieejams: http://map.lgia.gov.lv/index.php?lang=2&cPath=2&txt_id=13.

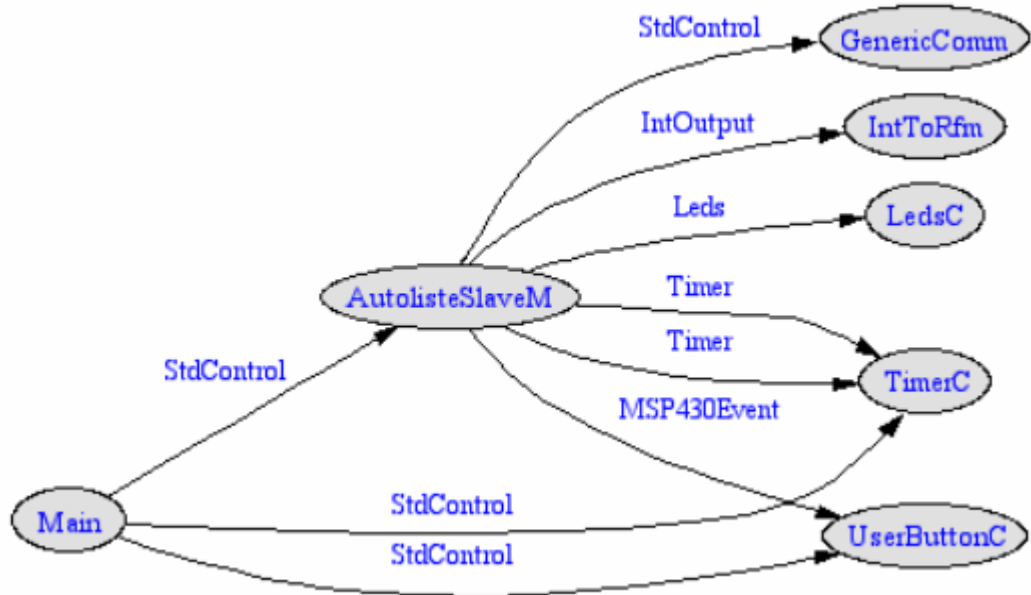
106. **Strazdins, G., Gordjusins, A., Kanonirs, G., et. al.** Team “Latvia” GCDC 2011 Technical Paper [tiešsaiste]. Helmond (Netherlands) : GCDC Project Organization, 21.04.2011 [atsauce 30.11.2012]. Pieejams: http://www.gcdc.net/mainmenu/Home/news/News_-_current/GCDC_Final%3A_teams_videos_and_final_papers/Latvia
107. **Sarma, S.E., Weis, S.A., Engels, D.W.** RFID Systems and Security and Privacy Implications. *Cryptographic Hardware and Embedded Systems - CHES 2002*, LNCS 2523, Kaliski B.S. et. al., eds., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003, p. 454-469.
108. **Cole, P.H., Ranasinghe, D.C.** *Networked RFID Systems and Lightweight Cryptography: Raising Barriers to Product Counterfeiting*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2008, 355 p.
109. **Phillips, T., Karygiannis, T., Huhn, R.** Security Standards for the RFID Market. *IEEE Security and Privacy*, 2005, N 6, vol. 3, p.85-89.
110. **Vajda, I., Buttny, L.** Lightweight Authentication Protocols for Lowcost RFID Tags. *In: UBICOMP 2003. The 2nd Workshop on Security in Ubiquitous Computing*, Seattle, Washington, October 12, 2003 [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: http://vs.inf.ethz.ch/events/ubicomp2003sec/papers/secubi03_p01.pdf.
111. **Juels, A.** Minimalist Cryptography for Low-Cost RFID Tags (extended abstract). *Security in Communication Networks*, LNCS 3352, Blundo C. et. al., eds., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005, p. 149-164.
112. **Merhi, M., Hernandez-Castro, J.C., Peris-Lopez, P.** Studying the Pseudo Random Number Generator of a Low-Cost RFID Tag. *In: 2011 IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications (RFID-TA 2011)*. IEEE, 2011, p. 381–385.
113. **Zhang, Y., Kitsos, P.** *Security in RFID and Sensor Networks*. London : Taylor & Francis, 2009, 560 p.
114. **Juels, A.** RFID Security and Privacy: A Research Survey. *Journal of Selected Areas in Communication*, 2006, N 2, vol. 24, p. 381-395.
115. **Peris-Lopez, P., Hernandez-Castro, J.C., Estevez-Tapiador, J.M., et. al.** RFID Systems: A Survey on Security Threats and Proposed Solutions. *Personal Wireless Communications*, LNCS 4217, Cuenca P. et. al., eds., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006, p. 159-170.
116. **Tuyls, P., Batina, L.** RFID-Tags for Anti-Counterfeiting. *Topics in Cryptology – CT-RSA 2006*, LNCS 3860, Pointcheval D., ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006, p. 115-131.

117. **Plötz, H., Nohl, K.** Peeling Away Layers of an RFID Security System. *Financial Cryptography and Data Security*, LNCS 7035, Danezis G., ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012, p. 205-219.
118. **Nohl, K., Evans, D., Starbug, S., et. al.** Reverse-Engineering a Cryptographic RFID Tag. *In: SS '08. The 17th USENIX Security Symposium*, San Jose, California, July 28 – August 1, 2008. Proceedings. USENIX Association Berkeley, 2008, p. 185-193.
119. **Guilley, S., Danger, J.L., Nguyen, R., et.al.** Systemlevel Methods to Prevent Reverse-Engineering, Cloning, and Trojan Insertion. *Information Systems, Technology and Management*, CCIS 285, Dua S. et. al., eds., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012, p. 433-438.
120. Arduino – HomePage [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: <http://arduino.cc/en/>.
121. Arduino – ArduinoBoardDuemilanove [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardDuemilanove>.
122. **Mednis, A., Elsts, A., Selavo, L.** Embedded Solution for Road Condition Monitoring Using Vehicular Sensor Networks. *In: 2012 Sixth International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT 2012)*. IEEE, 2012, p. 248-252.
123. **Mednis, A.** Bezvadu sensoru tīklu izmantošana piedzīvojumu sacīkšu norises kontrolē. *No: Daugavpils Universitātes 50. starptautiskās zinātniskās konferences materiāli / Proceedings of the 50th International Scientific Conference of Daugavpils University. Nature*. Daugavpils: Daugavpils Universitātes Akadēmiskais apgāds „Saule”, 2009, 111.-116. lpp. ISBN 978-9984-14-422-2.
124. **Mednis, A., Kanonirs, G., Selavo, L.** Adaptive Vehicle Mode Monitoring Using Embedded Devices with Accelerometers. *Highlights on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems*, AISC 156, Pérez J.B. et. al., eds., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012, p. 231-238.
125. **Mednis, A.** Vehicle Position Determination Using Several SBAS Receivers and Data from Local Reference Stations. *In: UOII 2011. The 1st International Workshop on User Oriented Information Integration at the 10th International Conference on Perspectives in Business Informatics Research*, Riga, Latvia, October 6, 2011. Proceedings. Riga Technical University, 2011, p. 379-386.
126. **Mednis, A.** A Multimodal Approach for Determination of Vehicle Position. *Workshops on Business Informatics Research*, LNBIP 106, Niedrite L. et. al., eds., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012, p. 223-235.

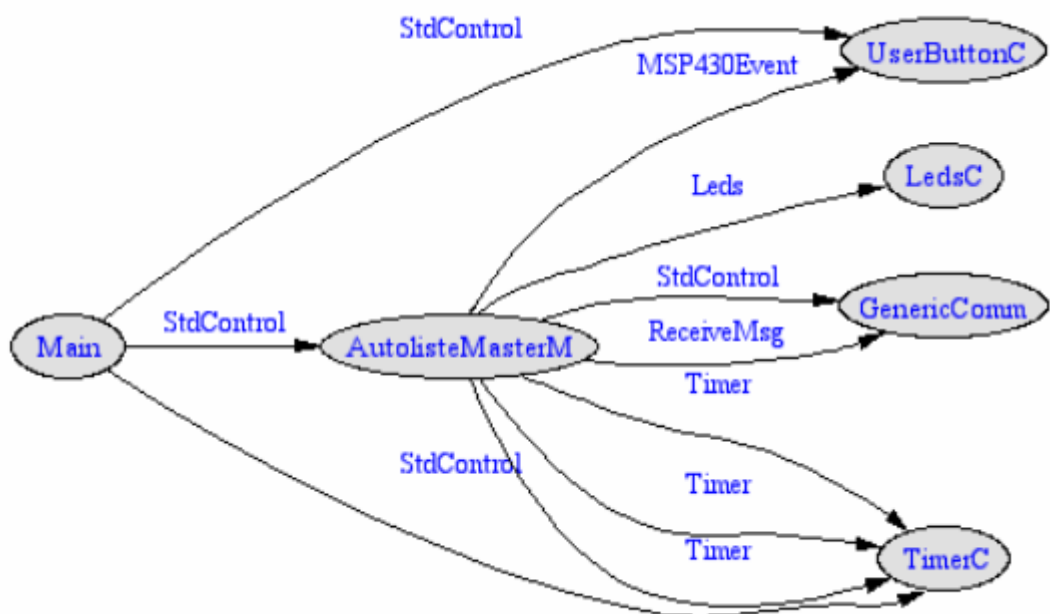
127. **Mednis, A., Zviedris, R.** RFID Communication: How Well Protected Against Reverse Engineering? **In:** *2012 Second International Conference on Digital Information Processing and Communications (ICDIPC 2012)*. IEEE, 2012, p. 56-61.
128. **Strazdins, G., Gordjusins, A., Kanonirs, G., et. al.** Latvia GCDC 2011 Paper Abstract. Helmond (Netherlands): GCDC Project organization, 14.12.2010 [atsauce 30.11.2012.]. Pieejams: [www.gcdc.net/mainmenu/Home/news/News_-_current/What%27s the competition up to%3F Paper abstracts online now%21/Latvia GCDC2011 abstract](http://www.gcdc.net/mainmenu/Home/news/News_-_current/What%27s%20the%20competition%20up%3F%20Paper%20abstracts%20online%20now%21/Latvia%20GCDC2011%20abstract)
129. **Elsts, A., Balass, R., Judvaitis, J., et. al.** SADmote: A Robust and Cost-Effective Device for Environmental Monitoring. *Architecture of Computing Systems – ARCS 2012*, LNCS 7179, Herkersdorf A. et. al., eds., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012, p. 225-237.
130. **Zviedris, R., Mednis, A., Mednis, G.** Heterogeneous Tool Kit for Real-Time Edutainment. **In:** *AICT 2012. The 5th International Scientific Conference on Applied Information and Communication Technologies*, Jelgava, Latvia, April 26-27, 2012. Proceedings. Latvia University of Agriculture, 2012, p. 201-208.

PIELIKUMI

1. PIELIKUMS. PROGRAMMU AUTOLISTESLAVE UN AUTOLISTEMASTER STRUKTŪRA



P1.1. att. Programmas AutolisteSlave v.1.1 struktūra



P1.2. att. Programmas AutolisteMaster v.1.1 struktūra

2. PIELIKUMS. CEĻA SEGUMA BOJĀJUMU KLASES



*P2.1. att. Ceļa bojājumu klases liela bedre paraugs. Laiks 24.03.2011 14:20, koordinātes N 56:58.900
E 024:11.529*



*P2.2. att. Ceļa bojājumu klases maza bedre paraugs. Laiks 24.03.2011 14:20, koordinātes N
56:58.902 E 024:11.525*



*P2.3. att. Ceļa bojājumu klases **bedru klāsteris** paraugs. Laiks 24.03.2011 14:19, koordinātes N 56:58.880 E 024:11.527*

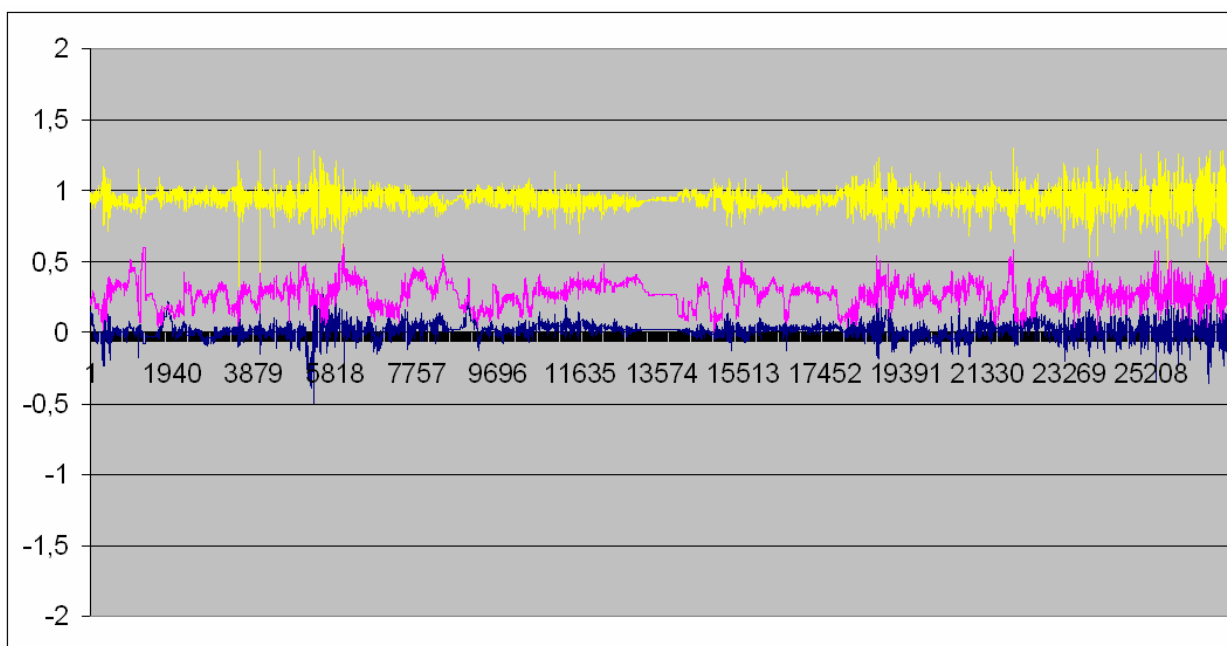


*P2.4. att. Ceļa bojājumu klases **plaisa** paraugs. Laiks 24.03.2011 14:18, koordinātes N 56:58.871 E 024:11.526*

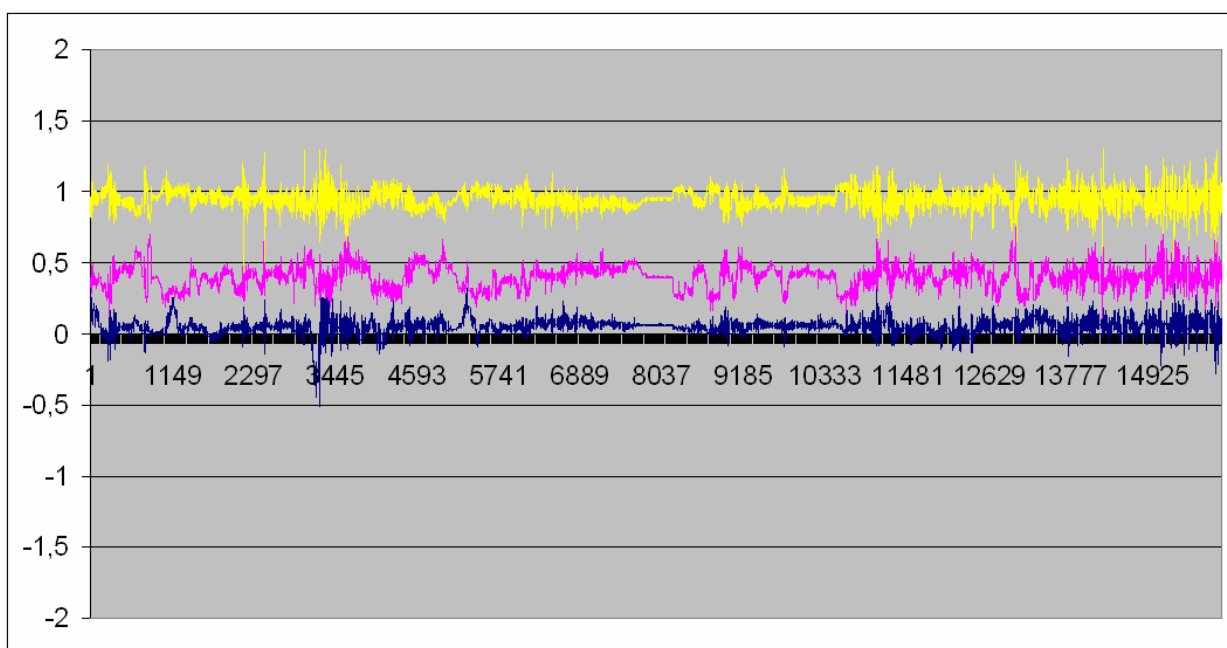


P2.5. att. Ceļa bojājumu klases *kanalizācijas akas vāks* paraugs. Laiks 24.03.2011 14:41, koordinātes N 56:58.730 E 024:10.559

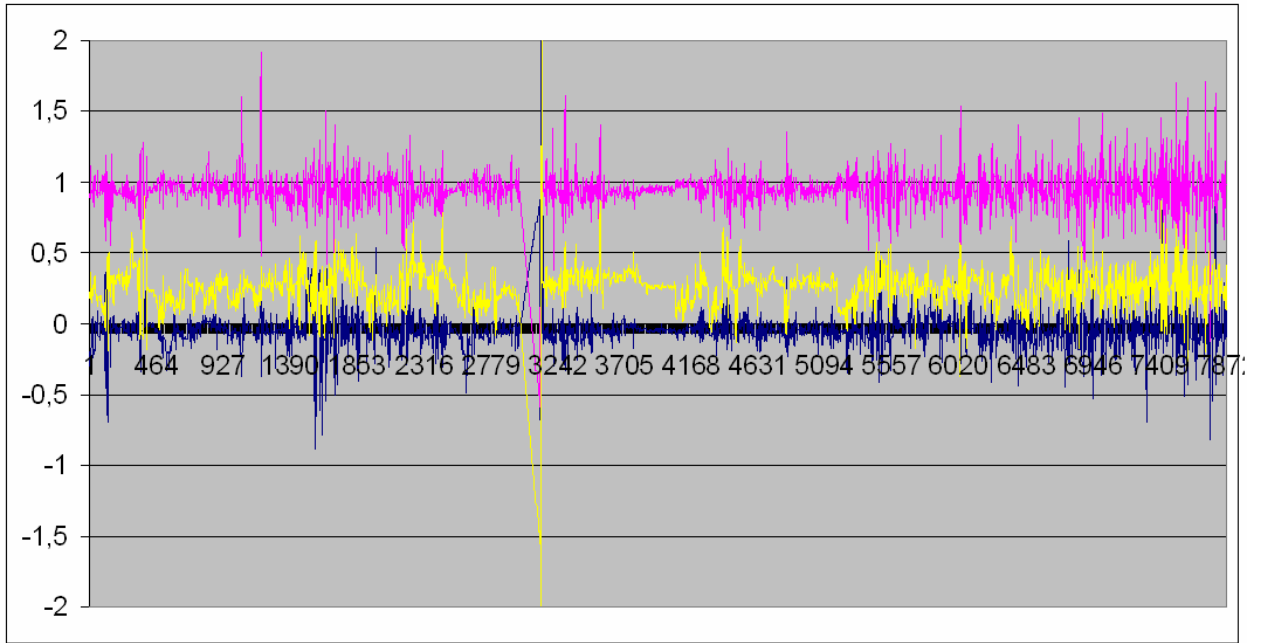
3. PIELIKUMS. IZMANTOTO AKSELEROMETRU PARAMETRU ATŠĶIRĪBAS



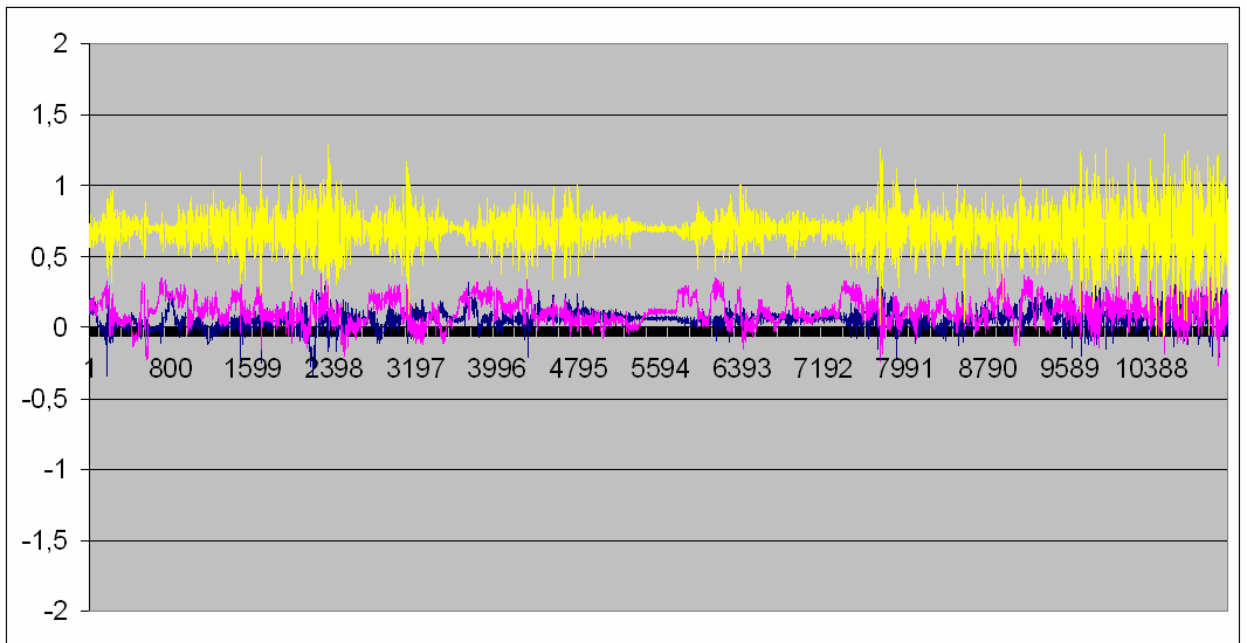
P3.1. att. 3 asu akselerometra dati no viedtālruņa Samsung Galaxy S (fragments).



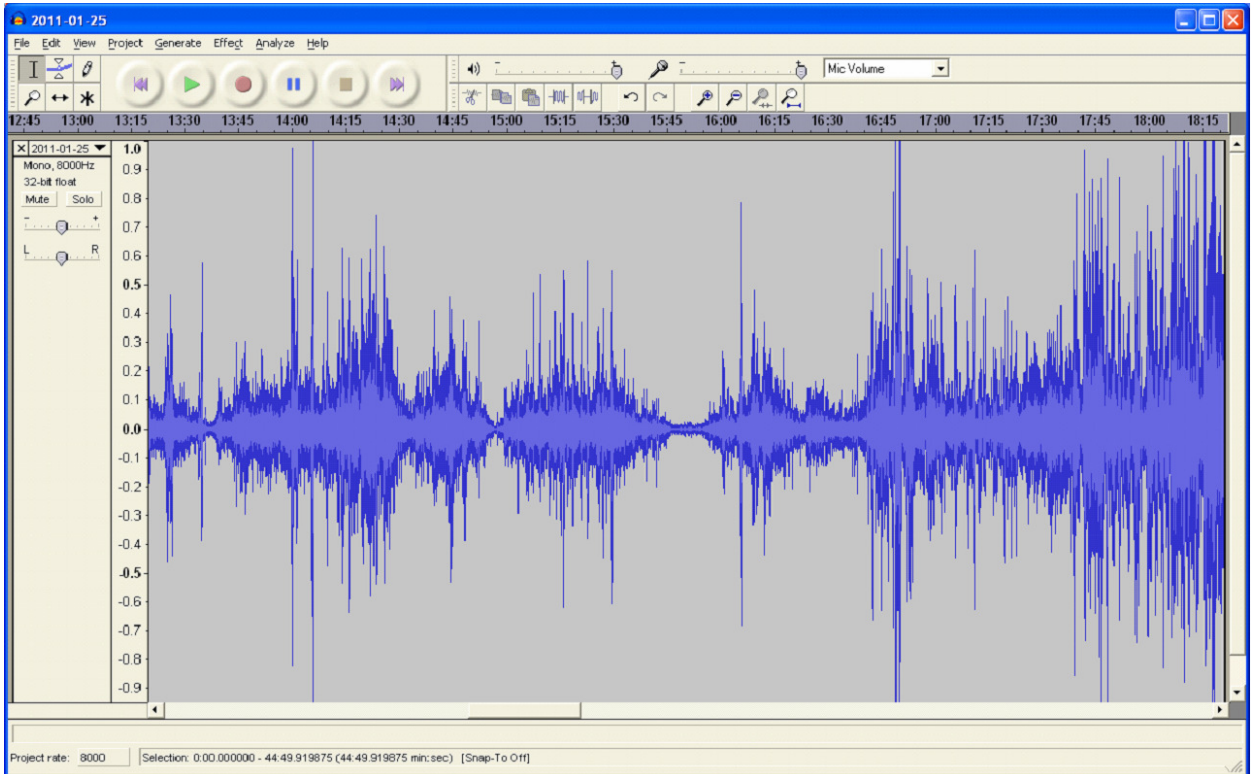
P3.2. att. 3 asu akselerometra dati no viedtālruņa HTC Desire (fragments).



P3.3. att. 3 asu akselerometra dati no viedtālruņa Samsung i5700 (fragments).



P3.4. att. 3 asu akselerometra dati no modificēta LynxNet kaklasiklasikas prototipa (fragments).



P3.4. att. References dati (RoadMic) no datoram pieslēgta ārēja elektreta mikroфона (fragments).