

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Datorzinātnes un informācijas tehnoloģijas fakultāte
Datorvadības, automātikas un datortehnikas institūts

Dmitrijs BĻIZŅUKS

Doktora studiju programmas «Attēlu apstrāde un datorgrafika, datortehnika un tīkli»
doktorants

**SENSORU TĪKLU TEHNOLOĢIJU PIELIETOŠANA LAIKA
KRITISKOS UZDEVUMOS**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
profesors *Dr. habil. sc. comp.*
V. ZAGURSKIS

RTU Izdevniecība

Rīga 2015

Bļizņuks D. Sensoru tīklu tehnoloģiju
pielietošana laika kritiskos uzdevumos.
Promocijas darba kopsavilkums. — R.: RTU
Izdevniecība, 2015. — 57 lpp.

Iespiests saskaņā ar DAD institūta 2013. gada
21. jūnija lēmumu, protokols Nr. 110.

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda
atbalstu nacionālās programmas «Atbalsts
doktorantūras programmu īstenošanai un
pēcdoktorantūras pētījumiem» projektā
«Atbalsts RTU doktorantūras attīstībai».

PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI
RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2015. gada 2. novembrī Rīgas Tehniskās universitātes Datorzinātnes un informācijas tehnoloģijas fakultātē, Sētas iela 1, 202. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. habil. sc. ing.* Jānis Osis
Rīgas Tehniskā universitāte

Asoc. profesors *Dr. sc. ing.* Egils Stalidzāns
Latvijas Lauksaimniecības universitāte

Profesors *Dr. Žilvinas Bazaras*
Kauņas Tehnoloģiju universitāte

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu (vai cita) doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Dmitrijs Bļizņuks(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, piecas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, divi pielikumi, 65 ilustrācijas, kopā 130 lappuses. Literatūras sarakstā ir 130 nosaukumu.

SATURS

Darba aktualitāte.....	5
Promocijas darba mērķis un uzdevumi.....	6
Pētījuma priekšmets un objekts	6
Aizstāvējamās tēzes	6
Izmantotās pētījumu metodes	7
Zinātniskā novitāte	7
Darba praktiskā vērtība un aprobācija.....	7
1. BEZVADU DATU PĀRRAIDES SPECIFIKA SENSORU TĪKLOS.....	13
1.1. Bezvadu sensoru tīklu apraksts un to īpatnības	13
1.2. Laika kritisko sistēmu un datu pārraides izpēte.....	15
1.3. Laika kritisko uzdevumu īpašības un datu pārraides problēmas	17
1.4. Laika kritisko sistēmu un datu pārraides apskats un klasifikācija	19
1.5. Secinājumi	21
2. LAIKA KRITISKO UN BEZVADU DATU PĀRRAIDES SISTĒMU VEIDOŠANAS PRINCIPI.....	22
2.1. Esošo formalizācijas metožu apskats.....	22
2.2. Piedāvātā sistēmu dinamikas novērtēšanas metode.....	23
2.3. Secinājumi	27
3. BEZVADU SENSORU TĪKLA PIEKĻUVE LAIKA KRITISKĀS SISTĒMĀS	28
3.1. Esošo tīklu testēšana un kritisko punktu izdalīšana.....	28
3.2. Kombinēts tīkla piekļuves veids	30
3.3. Mezglu sinhronizācijas un pašorganizācijas problēmas un risinājumi	34
3.4. Secinājumi	34
4. METOŽU UN ALGORITMU PRAKTISKĀ LIETOŠANA	36
4.1. Esošo laika kritisko bezvadu tīklu lietojumu apskats	36
4.2. Bezvadu tīkla piekļuves protokola realizācija laika kritiskā lietojumā	38
4.3. Bezvadu tīkla modelēšana lietojot laika kritisku piekļuves algoritmu	41
4.4. Vadības sistēmas novērtēšana eksistējošā industriālajā objektā.....	42
4.5. Secinājumi	45
5. BEZVADU TĪKLU IZVEIDOŠANAS UN LIETOŠANAS PROBLĒMAS UN RISINĀJUMI.....	46
5.1. Bezvadu tīklu darbības analīze industriālajā vidē.....	46
5.2. Bezvadu tīklu drošuma un drošības problēmas un to risinājumi	48
DARBA REZULTĀTI UN SECINĀJUMI	52
LITERATŪRA	54

Darba aktualitāte

Bezvadu tīkli ar katru gadu arvien vairāk iekaro savu vietu cilvēkā ikdienā un atrod aizvien jaunus lietojuma veidus [2, 25]. Bezvadu komunikācijas dod iespēju veidot autonomas un mobilas sistēmas, kuru izmantošanas brīvību neierobežo vada garums un tā lokanība. Neskatoties uz bezvadu tīklu izmantošanu ikdienā, vēl pastāv grūtības [24, 55] to lietojumā laika kritiskos uzdevumos, kur savienojuma kvalitātes parametriem jābūt determinētiem un stabiliem. Plaši lietotiem bezvadu tīkliem piemīt gan liels datu pārraides ātrums, gan augsta mobilitāte, tomēr šie parametri nav tik būtiski laika kritiskos lietojumos. Šāda tipa lietojumos svarīgākais ir sistēmu laika parametru stabilitāte un to prognozējamība. Informāciju jāpārraida noteiktā laikā posmā un ar definētu laika aizturi, jo šādu sistēmu darbība ir atkarīga ne tikai no iegūtām datu vērtībām, bet arī no laika, kad šie dati ir iegūti. Atrisinot šo uzdevumu, paveras iespējas lietot bezvadu datu pārraides priekšrocības arī laika kritiskās vadības sistēmās.

Lietojot bezvadu autonomu sensoru reālā vidē, tam ir jāspēj reaģēt laikā, kas atbilst apkārtējās vides prasībām. Tas padara bezvada sensoru tīklu par reālā laika jeb laika kritisku sistēmu. Ārējās vides procesiem parasti piemīt nelineārs un dinamisks raksturs. Tādējādi šādu procesu vadības sistēmu formalizācija nav triviāls uzdevums, jo pastāv grūtības, aprakstot sistēmas, kas vienlaikus ir nelineārās un dinamiskās. Esošās formalizācijas pieejas un uz tām bāzētie tīkli galvenokārt vadās pēc datu plūsmas statistiskiem parametriem: ieejošo datu intervāla minimālā vērtība, datu maksimālais apjoms un pieļaujamā pārraides aizture. Tomēr šāda pieeja būs lietojama šaurā uzdevumu klasē, pretējā gadījumā precizitāte nav pietiekama. Lai novērstu šo trūkumu, darbā ir izveidota metode datu plūsmu apstrādei, saglabājot to dinamiskos parametrus. Darbā izveidotā formalizācijas pieeja ļauj apvienot sistēmas ieejā gan diskrētos (loģiskos), gan analogos signālus.

Viena no jomām, kur ir nepieciešams veidot autonomas un mobilas vadības sistēmas, ir industriālā vide. Šī vide ir konservatīva, prasības pret izmantoto sistēmu stabilitāti ir striktas un mainīt esošo arhitektūru un infrastruktūru ir dārgi. Pēdējo gadu pētījumi un jaunu tehnoloģiju izveide dod iespēju izpildīt augstās industriālo sistēmu prasības, līdz ar to rodas iespēja dot arī savu ieguldījumu bezvadu tehnoloģiju lietojumu sfēras paplašināšanā. Promocijas darbs risina minētās problēmas, un pētījumu rezultātā izstrādātais programmtehniskais risinājums ļauj veikt datu pārraidi ar nepieciešamajiem laika parametriem. Promocijas darba aktualitāti pierāda arī fakts, ka šobrīd ir novērojama

tendence aizvietot aparatūras risinājumus ar reālā laika sistēmām, kuru apjoms pēdējos gados stabili aug [58]. To var skaidrot ar nepieciešamību samazināt vadībai izmantoto mikroshēmu skaitu, kas savukārt palielina efektivitāti, kā arī bezvadu sensoru ienākšanu sadzīvē.

Promocijas darba mērķis un uzdevumi

Darba mērķis ir izveidot tehnoloģiju bezvadu sensoru tīklu lietošanai laika kritiskos vadības uzdevumos objektiem ar nelineāru un dinamisku raksturu.

Mērķa sasniegšanai tika izpildīti šādi uzdevumi:

1. izvirzīt kvantitatīvus kritērijus pētāmo objektu definēšanai;
2. definēt bezvadu datu pārraides problēmas laika kritiskos lietojumos;
3. izveidot laika kritisko sistēmu dinamikas novērtēšanas metodi;
4. izveidot bezvadu tīkla vides piekļuves algoritmu, kas spējīgs strādāt definētā uzdevumu klasē;
5. novērtēt piedāvātos risinājumus praksē;
6. izpētīt bezvadu sensoru tīklu drošības un drošuma aspektus praktiskos scenārijos.

Pētījuma priekšmets un objekts

Promocijas darba pētījuma objekts ir laika kritiskie bezvadu sensoru tīkli.

Pētījuma priekšmets ir tīkla piekļuves un sistēmas dinamikas novērtēšanas algoritmi bezvadu sensoru tīklos laika kritiskos lietojumos ar nelineāri dinamiskām īpašībām.

Aizstāvāmās tēzes

1. Sistēmās ar nelineārām un dinamiskām īpašībām ir iespējams izmantot bezvadu datu pārraidi laika kritiskas informācijas apmaiņai.
2. Ir iespējams izveidot laika kritisku datu bezvadu pārraidi ar aizkavi, kas pietiekama autonomi kustīgu objektu vadībai.

3. Ir iespējams izveidot bezvadu sensoru tīklu piekļuves protokolu, kas nodrošinās gan laikā kritisko datu pārraidi, gan datu sūtīšanu bez centrālā mezgla izveidošanas.
4. Ir iespējams nodrošināt stabilu datu pārraidi sensoru tīklā vidē ar paaugstinātu temperatūru, mitrumu un elektromagnētisko trokšņu līmeni.

Izmantotās pētījumu metodes

Promocijas darba pētījumu veikšanai ir izmantotas nelineāro vienādojumu sistēmas, dekompozīcija uz Hameršteina modeļa bāzes, simulēšana, izmantojot reālas aparātūras parametrus, un laika kritisku sistēmu datplūsmas pārveidošana ciparu formā.

Zinātniskā novitāte

Izstrādātajā darbā ir šādi jaunieguvumi:

1. sistematizētas datu pārraides problēmas laika kritiskos lietojumos;
2. izveidota nelineāru, dinamisku un laika kritisku datu pārraides sistēmu dinamikas novērtēšanas pieeja;
3. izveidots bezvadu tīkla piekļuves algoritms, kas, salīdzinot ar esošajiem, piedāvā lielāku datu pārraides frekvenci un intervāla stabilitāti, izmantojot piedāvāto programmatūras un aparātūras risinājumu;
4. tika paaugstināta bezvadu sensoru tīklu simulācijas precizitāte pie īsiem (<5 ms) sūtīšanas intervāliem;
5. eksperimentālo datu apstrādei tika izveidots atvērtā koda rīks, kas ļauj eksperimentu gaitā analizēt un vizualizēt saņemtos datus, kā arī veikt šo uzdevumu automātiskā režīmā lielam eksperimentu skaitam.

Darba praktiskā vērtība un aprobācija

Promocijas darbā izstrādātā jaunā bezvadu tīkla piekļuves metode kopā ar piedāvāto sistēmu modeļu izveides pieeju dod iespēju veidot vadības sistēmas specifiskā vidē (bīstamo ķīmisko/fizisko vielu vidē, kustībā, lielā platībā), kur nav iespējams izvietot

vadus. Industriālā vide ir konservatīva attiecībā pret arhitektūras un infrastruktūras izmaiņām, tāpēc tajā joprojām pastāv liels uzdevumu kopums, kurā bezvadu sakaru ieviešana var sniegt ievērojamu efektivitātes pieaugumu. Izmantojot piedāvāto hibrīdo tīkla piekļuves metodi, parādās arī ekonomiskais ieguvums, kas izpaužas kā samazinātas izmaksas tīklu izveidošanai un uzturēšanai. Labums tiek iegūts arī no palielinātās sistēmas stabilitātes. Izmantojot pastiprinošo antenu, bezvadu savienojuma attālums var sasniegt vairākus desmitus kilometru. Neskatoties uz bezvadu iekārtu augstāku cenu, vadu un to uzstādīšanas izmaksas ir daudz lielākas. Industriālā vidē vienreiz samaksājamā cena nav tik svarīga, kā uzturēšanas izmaksas un sistēmas drošums. Daudzos ražošanas objektos dīkstāve nav pieļaujama, un pētījumi liecina, ka ievērojama daļa problēmu rodas sliktu vadu savienojumu dēļ. Izmantojot bezvadu komunikāciju, izmaksas sistēmas apkalpošanai un dīkstāvei samazinās, un tas liecina par piedāvāto metožu praktisko vērtību.

Izveidojot sistēmu, kas spēj stabili uzturēt definētos pārraides laika uzstādījumus, to var lietot ne tikai laika kritiskos uzdevumos, bet arī lietojumos, kur ir nepieciešams mazs enerģijas patēriņš. Tradicionālajās metodēs bezvadu sensoram ir jābūt ieslēgtam tik ilgi, kamēr nav pārliecības, ka ēters ir brīvs. Izmantojot piedāvāto metodi, sensors var ieslēgties tikai noteiktajā laika brīdī, uzreiz sākt raidīšanu un pēc tam atkal aiziet «miega» režīmā. Tādējādi vairākas reizes samazinās kopējais laiks, kad mezglam jābūt ieslēgtam. Tas tiešā veidā ietekmē bezvadu sensora spēju ilglaicīgi strādāt ar vienu baterijas uzlādi.

Darbā piedāvātās metodikas var izmantot arī cita tipa bezvadu tīklos, kur ir nepieciešama garantēta datu piegāde ar noteiktu aizkavi, piemēram, balss un video konferencēs.

Piedāvātais tīkla piekļuves algoritms tika eksperimentāli pārbaudīts starptautiskā Eiropas FP7 «STRATOS» [52] projektā. Iegūtie rezultāti demonstrē algoritma pārākumu pār esošiem risinājumiem datu pārraides frekvences un pārraides intervāla stabilitātes ziņā.

Šajā darbā izstrādātā laika kritisku sistēmu modeļu izveides pieeja ir lietota reāla industriālā objekta — vēja tuneļa — vadības sistēmā, kur tā pierādīja, ka spēj aizvietot vadu līnijas ar bezvadu sakariem.

Atsevišķi pētījumu rezultāti ir izmantoti šādos projektos: Vācijas valsts zinātniskās pētniecības projekts «ZESAN» [67], FP7 projekts «ProSense» [43] un LZP grants 2010. g.–2012. g. «Imitācijas modelēšanas un skaitļošanas intelekta metodes loģistikas un elektronisko pakalpojumu optimizācijai». Darba rezultāti tika aprobēti 13 konferencēs un 13 zinātniskās publikācijās.

Zinātniskās publikācijas

1. Taranovs, R., Jesilevskis, V., Miežītis, G., Bļizņuks, D., Kļaviņš, Ē., Kalniņš, A., Zagurskis, V. An Approach for Meeting Room Activity Monitoring and Analysis. Technologies of Computer Control. Vol. 15, 2014, pp. 63–68. ISSN 2256-0343. e-ISSN 2256-0351 (*Atrodams rakstu datubāzēs: EBSCO, Google Scholar, autora ieguldījums ir raksta ievads un tīkla sensormezlga prototipa veidošana, kas kopā veido 15 %*)
2. Bliznuks D., Zagurskis V., Fantuzzi C. Time Critical Wireless Data Transmission in Autonomous Control Applications // Telecommunications Forum (TELFOR) 21st. – 2013. 196.–199. lpp. ISBN: 978-1-4799-1419-7 (*Atrodams rakstu datubāzēs: Scopus, Google Scholar, autora ieguldījums ir raksta pamatnodaļu veidošana un eksperimentu realizācija, kas kopā veido 70 %*)
3. Bļizņuks D., Zagurskis V. Wireless Time Critical System's Architecture Development Based on Dynamics of Data // Datorvadības tehnoloģijas. Nr. 14, 2013, 81.–85. lpp. ISSN 22559108. (*Atrodams rakstu datubāzēs: EBSCO, Google Scholar, autora ieguldījums ir raksta pamatnodaļu veidošana un eksperimentu realizācija, kas kopā veido 80 %*)
4. Bliznuks D., Zagurskis V. Techniques and Architecture Improvements for Fast Data Acquisition in Wireless Networks // RTU zinātniskie raksti, Datorvadības tehnoloģijas. – 13. sēj., 2012, 32.–37. lpp. (*Atrodams rakstu datubāzē Google Scholar, autora ieguldījums ir raksta pamatnodaļu veidošana un eksperimentu realizācija, kas kopā veido 80 %*)
5. Zagurskis V., Bļizņuks D., Taranovs R. Pilot Signal Detection in Wireless Sensor Networks // RTU zinātniskie raksti. 5. sēr., Datorzinātne. – 48. sēj. 2011, 36.–40. lpp. (*Atrodams rakstu datubāzēs: EBSCO, Google Scholar, autora ieguldījums ir raksta ievadnodaļa un dalība algoritmu un metožu veidošanā, kas kopā veido 15 %*)
6. Zagurskis V., Bļizņuks D., Taranovs R. Self-Organizational Paradigm in the Time Critical Systems // RTU zinātniskie raksti. 5. sēr., Datorzinātne. – 48. sēj., 2011, 40.–44. lpp. (*Atrodams rakstu datubāzē EBSCO, autora ieguldījums ir raksta ievadnodaļa un dalība algoritmu un metožu veidošanā, kas kopā veido 15 %*)

7. Bļiņņuks D., Zagurskis V. Bezvadu sensoru tīkla organizācija ātrai datu savākšanai // RTU zinātniskie raksti. 5. sēr., Datorzinātne. – 48. sēj., 2011, 45.–50. lpp. (*Atrodams rakstu datubāzē Google Scholar, autora ieguldījums ir raksta pamatnodaļu veidošana un eksperimentu realizācija, kas kopā veido 80 %*)
8. Bliznyk D. Fast Results Analysis and Display // The R User Conference Book of Contributed Abstracts, University of Warwick, 2011, 27. lpp.
9. Bliznyk D. IEEE 802.15.4 tīklu pētīšana industriālā vidē // RTU zinātniskie raksti. 5. sēr., Datorzinātne. – 42. sēj., 2010, 68.–73. lpp. (*Atrodams rakstu datubāzē Google Scholar*)
10. Bliznyk D. Security Issues in Wireless Sensor Networks for Environmental Monitoring // RTU zinātniskie raksti. 5. sēr., Datorzinātne. – 39. sēj., 2009, 80.–86. lpp. (*Atrodams rakstu datubāzē Google Scholar*)
11. Zagursky D., Bliznyk D. Approach to Verification of Mixed signal Non-linear Objects // Proceedings of the VIII International Conference SICPRO, 2009, 813.–821. lpp. ISBN 978-5-91450-024-2 (*Autora ieguldījums ir raksta ievadnodaļa un dalība algoritmu un metožu veidošanā, kas kopā veido 20 %*)
12. Bliznyk D., Zagursky V. Approach for Wireless Resources Access Control // Proceedings of the 2008 International Computer Symposium, Volume 1, 2008, 141.–145. lpp. (*Atrodams rakstu datubāzē Google Scholar, autora ieguldījums ir raksta pamatnodaļu veidošana un eksperimentu realizācija, kas kopā veido 80 %*)
13. Bliznyk D., Ozols A. Industrial Networks in Time Critical Applications // RTU zinātniskie raksti. 5. sēr., Datorzinātne. – 32. sēj., 2007, 51.–59. lpp. (*Atrodams rakstu datubāzē Google Scholar, autora ieguldījums ir raksta pamatnodaļu veidošana un eksperimentu realizācija, kas kopā veido 80 %*)

Zinātniskās konferences

1. Starptautiskā konference *IEEE Biophotonics Conference 2015*, Florence, Itālija, 20.–22. maijā, 2015. g.
2. Starptautiskā konference *21st Telecommunications Forum TELFOR 2013*, Belgrada, Serbija, 26.–28. novembrī, 2013. g.

3. RTU 54. starptautiskā zinātniskā konference, apakšsekcija *Datorvadības tehnoloģijas*, Rīga, Latvija, 14.–16. oktobrī, 2013. g.
4. STRATOS projekta partneru konference, Haifa, Izraēla, 25.–29. novembrī, 2012. g.
5. RTU 53. starptautiskā zinātniskā konference, apakšsekcija *Datorvadības tehnoloģijas*, Rīga, Latvija, 10.–12. oktobrī, 2012. g.
6. STRATOS projekta partneru konference, Lugano, Šveice, 19.–22. februārī, 2012. g.
7. RTU 52. starptautiskā zinātniskā konference, apakšsekcija *Datorvadības tehnoloģijas*, Rīga, Latvija, 14.–16. oktobrī, 2011. g.
8. Starptautiskā konference *The R User Conference 2011*, Coventry, Lielbritānija, 16.–18. augustā, 2011. g.
9. RTU 51. starptautiskā zinātniskā konference, apakšsekcija *Datorvadības tehnoloģijas*, Rīga, Latvija, 13.–17. oktobrī, 2010. g.
10. RTU 50. starptautiskā zinātniskā konference, apakšsekcija *Datorvadības tehnoloģijas*, Rīga, Latvija, 12.–16. oktobrī, 2009. g.
11. Starptautiskā konference *International Computer Symposium ICS 2008*, Taipeja, Taivāna, 13.–15. novembrī, 2008. g.
12. RTU 49. starptautiskā zinātniskā konference, apakšsekcija *Datorvadības tehnoloģijas*, Rīga, Latvija, 13.–15. oktobrī, 2008. g.
13. RTU 48. starptautiskā zinātniskā konference, apakšsekcija *Datorvadības tehnoloģijas*, Rīga, Latvija, 11.–13. oktobrī, 2007. g.

Promocijas darba struktūra

Darbā ir piecas nodaļas. Pirmajā nodaļā ir aprakstīta bezvadu sensoru mezglu uzbūve, to veidoto tīklu arhitektūra un īpatnības, kā arī laika kritiskās sistēmas un to atšķirības no citām vadības sistēmām. Šajā nodaļā ir definētas arī bezvadu datu pārraides problēmas, kas rodas laika kritiskās sistēmās. Otrajā nodaļā tiek novērtētas esošās laika kritisko sistēmu formalizācijas metodes, un, balstoties uz esošo sistēmu novērtējumu un definētajiem uzdevumiem, ir aprakstīta izstrādātā sistēmu dinamikas novērtēšanas metode.

Tīklu piekļuves protokols ir pamatā jebkurai bezvadu datu pārraides sistēmai. Tāpēc, ņemot vērā apskatāmās pētījumu sfēras specifiku un esošo algoritmu novērtējumu, trešajā sadaļā ir aprakstīts darbā izstrādātais kombinētais bezvadu tīklu piekļuves

algoritms. Izmantojot šo algoritmu, tiek aprakstīts praktiski realizēts datu savākšanas bezvadu tīkls, kas pārspēj esošās realizācijas gan tīkla mezglu skaita ziņā, gan arī datu pārraides frekvencē. Kopā ar tīkla piekļuves algoritmu tiek novērtēti mezglu pašorganizācijas un sinhronizācijas veidi, kā arī piedāvāti esošo problēmu risinājumi.

Darba ceturtajā nodaļā aprakstīti darba praktiskie rezultāti: piedāvātās formalizācijas metodes lietojamību reālā objekta — vēju tuneļa — automatizācijas sistēmā. Nodaļā tiek aprakstītas problēmas, kas var rasties, realizējot bezvadu datu pārraidi, un piedāvāti šo problēmu risinājumi. Bezvadu sensoru tīkla piekļuves algoritma padziļināti pētījumi notika saistībā ar Eiropas projektu «*STRATOS*» [52]. Nodaļā tiek arī aprakstīts izveidotais pilnā tīkla simulācijas modelis, ar kura palīdzību atrastas un atrisinātas esošās problēmas.

Darba nobeigumā, piektajā nodaļā, tiek apskatīti bezvadu sensoru tīklu papildu drošības un drošuma risinājumi. Bezvadu tīklu darbības specifika ir testēta reālā industriālā vidē un citos praktiskos lietojumos, ir apkopoti vairāku testu rezultāti gan tīklu drošuma, gan drošības aspektos. Analīzes rezultātā izveidota nosacījumu kopa, kas apraksta tīkla uzvedību tipiskos industriālos apstākļos.

1. BEZVADU DATU PĀRRAIDES SPECIFIKA SENSORU TĪKLOS

1.1. Bezvadu sensoru tīklu apraksts un to īpatnības

Ar pētījuma objektu — bezvadu sensoru tīkliem — turpmāk tiek saprast «telpā izvietotu autonomu sensoru kopa, kas paredzēta vides īpašību (piemēram, temperatūras, skaņas, spiediena un citu) pārraudzībai un to pārraidei uz definētu datu apkopošanas punktu» [62]. Turklāt būtiski ir tas, ka sensora mezglam jābūt pietiekami mazam, lai tas nesarežģītu ar to saistītu iekārtu un vides lietošanu, kā arī tā cenai jābūt pietiekami zelai, lai sensoru tīklus būtu iespējams izmantot plašam lietotāju lokam.

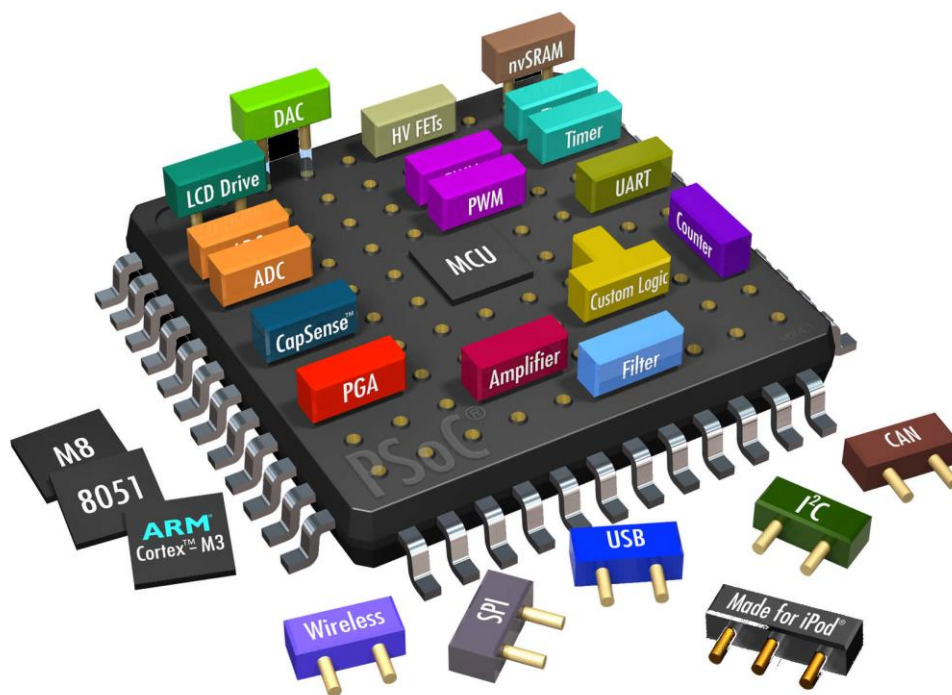
Tātad bezvadu sensoru tīkli apvieno iespēju mērīt fiziskās parādības un apmainīties ar datiem, neizmantojot vadus. Neskatoties uz to, ka katra atsevišķi šīs īpašības (mērīšana un bezvadu pārraide) eksistē jau sen, autonoma mezgla izveidošanu ilgu laiku kavēja vairāki faktori, no kuriem galvenie ir izmērs un cena, kuri savukārt ierobežo skaitļošanas jaudu un enerģijas avota (parasti baterijas) apjomu. Novērtējot minētos ierobežojumus, ir svarīgi ņemt vērā, ka neliels sensoru tīkla mezglu skaits ir mērāms desmitos, bet — jo lielāks ir šis skaits, jo labāk var novērtēt sensoru tīkla darbu. Šobrīd sensori ir apmēram sērskociņu kastītes izmērā. Turklāt tilpuma lielāko daļu aizņem enerģijas avots — baterija, bet pašas sensora spiedplates izmērs ir mazāks par 1 cm².

Pēdējā gada laikā var novērot ievērojamu pieaugumu mazā izmēra skaitļotāj-iekārtu ražošanā un lietošanā. Pateicoties elektronikas izmēru samazināšanai un masu ražošanai, tādas iekārtas kā «*Raspberry Pi*», «*LinkitOne*», «*Intel Curie*», «*esp8266*», «*BlackSwift*» un citas [42], atver lietotājiem jaunas lietojumu sfēras. Jo vienlaikus apvieno samēra nelielo cenu (no 5 līdz 50 USD), pietiekamas skaitļošanas iespējas, lai veiktu intelligentus skaitļošanas uzdevumus (piemēram, tēlu atpazīšanu, datu un situāciju analīzi) ar mazu fizisko izmēru, kas ļauj nemanāmi integrēt tos sadzīvē. Tos vēl nevar saukt par pilnvērtīgiem sensoru mezgliem, bet var redzēt, ka šobrīd sabiedrība atrodas ļoti tuvu sensormezglu ienākšanai sadzīvē.

Neskatoties uz plašo bezvadu tīklu lietojumu, bezvadu sensoru tīklu prasību dēļ tajos nav iespējams izmantot klasiskos tīklu vadības mehānismus tādēļ, ka datortīklu un to standartu tapšanas stadijā netika plānots, ka tīkla mezgli būs autonomi un mobili, pie tam ierobežoti enerģijas un skaitļošanas resursu ziņā. Plaši lietojamo bezvadu tīklu (piemēram, IEEE 802.11 b/g) uzdevums ir nodrošināt universālu risinājumu, tomēr šā uzdevuma realizācija sniedz zināmus ierobežojumus. Kā vienu no būtiskākajiem ierobežojumiem ir

jāmin mezgla energoresursu vadība. Izmantojot energoresursu vadību, bet nemainot mezgla elektronisko daļu, ir iespēja palielināt sensormezgla darbu par vienu vai pat divām kārtām. Tas tiek panākts ar mezgla aktīvo un «miega» fāžu kombinācijām. Taču šāds risinājums prasa speciālus tīkla vadības mehānismus, kuri nav iekļauti plaši lietojamās standartos. Nodaļā 1.2. tiks apskatītas konkrētas problēmas, kas prasa izveidot bezvadu sensoru tīkliem īpašus datu pārraides mehānismus.

Bezvadu sensoru mezgls pēc būtības ir miniatūrs dators. Lai būtu pilnīgi autonomš, tam ir gan skaitļošanas mezgls, gan bezvadu pārraides modulis, gan mērierīces, gan barošanas avots. Kā tika minēts iepriekš, būtiska nozīme bezvadu sensoru tīklos ir mezgla fiziskajam izmēram. Diez vai būtu iespējams plaši izmantot mezglus, kuru izmērs ir tikpat liels kā objektiem, pie kuriem tas tiek piesaistīts. Turklāt sensormezgla fiziskais izmērs ir tiešā veidā saistīts ar tā cenu un enerģijas patēriņu. Tas kopumā liecina par nepieciešamību rast risinājumu mezgla izmēru samazināšanai. Par šādu risinājumu ir kļuvušas SoC («sistēmu vienā kristālā») tipa mikroshēmas. Līdzīgi kā agrāk ir notikusi pāreja no atsevišķiem elektroniskiem komponentiem uz mikroshēmām, tā arī šobrīd atsevišķās mikroshēmas tiek nomainītas uz tā saucamo «sistēmu kristālā». Šāda pieeja ļauj visas



1.1. att. Vairāku moduļu apvienošana vienā kristālā (SoC) [54]

komponentes, kas ir nepieciešamas datu apstrādei un pārraidei (att. 1.1.), apvienot neliela izmēra mikroshēmā. Šādai mikroshēmai atliek pievienot vien barošanu un mērierīci. Izveidojot minēto «sistēmu vienā kristālā», ir uzlaboti vairāki aspekti — samazinājies kopējais izmērs un cena, palielinājusies efektivitāte un skaitļošanas spēja, kas ir pietuvinājis sensormezglus plašai lietošanai.

Šobrīd bezvadu sensoru mezglu veidošanā izmērs vairs nav šķērslis, tomēr neatrisināta ir palikusi energoresursu problēma. Bateriju un akumulatoru attīstība nav tik strauja kā elektronikas attīstība, un tas rada būtisku šķērslī sensormezglu lietošanā. Piemēram, *WiFi* (IEEE 802.11b/g/n) vidējais enerģijas patēriņš aktīvā fāzē ir ap 1000 mW, savukārt mazā izmēra bateriju (piemēram, pulksteņa baterijas) enerģijas kapacitāte ir līdz 50 mWh [21]. Līdz ar to enerģijas no šādas baterijas pietiks tikai dažām minūtēm. Litija tipa baterijām ir lielāka enerģijas kapacitāte, tomēr tā tāpat nepārsniedz 800 mWh uz 1 cm³ [21], kas arī ir pārāk maz, lai šādas baterijas praktiski izmantotu sensormezglos.

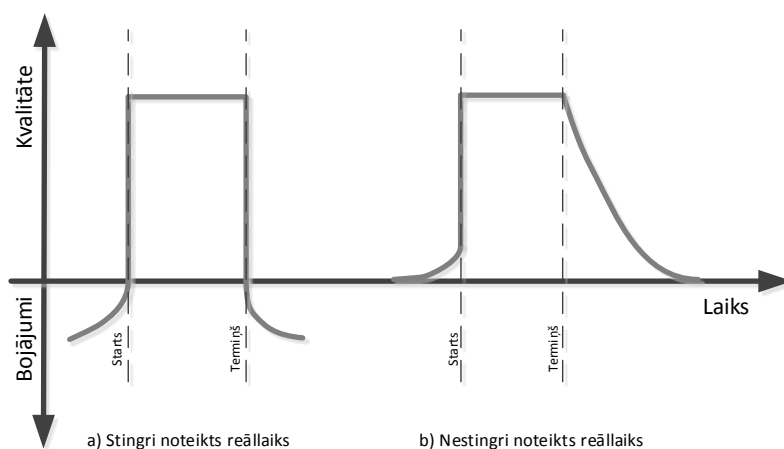
Risinājumu enerģijas problēmai ir jāmeklē tehnoloģijās ar mazāku enerģijas patēriņu un enerģiju vadības algoritmos. Viens no galvenajiem mērķiem plaši lietotos bezvadu tīklos (IEEE 802.11b/g) ir lielāka ātruma nodrošināšana, kas nav nepieciešams sensoru tīklos. Sensormezglu datu apjoms ir mērojams vien dažos baitos. Tāpēc ir jāmeklē kompromiss starp pieņemamu datu pārraides aizkavi un enerģijas patēriņu.

Par šādu risinājumu ir kļuvusi specializētā protokolu saime IEEE802.15.4. Tā ir mērķēta uz neliela datu apjoma pārraidi sistēmās ar ierobežotiem resursiem. Lai arī vidējais enerģijas patēriņš šādā sistēmā ir mazāks (50–100 mW), bezvadu sensoriem tas vienalga ļauj strādāt tikai dažas stundas. Stabīlākais risinājums enerģijas ierobežojumiem ir energoresursu vadība, kas ļauj paildzināt sensormezgla darbību vairākas reizes. Šajā gadījumā praktiskie lietojumi kļūst iespējami, jo darba laiks ir mērāms gados. Darbības ilguma kāpums tiek panākts, pārslēdzot mezglu «miega režīmā» un iedarbinot to tikai datu pārraides laikā. Sadaļā 3.2. tiks apskatīts izstrādātais kombinētais režīms, kas, saglabājot plaši lietoto metožu (CSMA — IEEE 802.11) priekšrocības, ļauj lietot energovadību un samazināt mezgla vidējo enerģijas patēriņu.

1.2. Laika kritisko sistēmu un datu pārraides izpēte

Par reālā laika jeb laika kritisko sistēmu turpmāk tiks uzskatīta tāda sistēma, kuras darbības pareizība ir atkarīga ne tikai no iegūtās vērtības, bet arī no laika momenta, kurā šī vērtība ir saņemta [51]. Laika kritiskums sistēmā nenozīmē, ka tā ir ātra, bet gan to, kā

sistēmas reakcijas ātrums atbilst apkārtējās vides un vadītā objekta prasībām. Svarīgi ir nodrošināt, ka sistēmas reakcijas laiks nepārsniegs definēto sliekšni jebkurā situācijā un pie jebkādiem ieejas parametriem. Tā ir nozīmīga atšķirība starp reālā laika vadības sistēmām un citu tipu sistēmām, kurās pietiek nodrošināt, ka sistēmas vidējā aizkave ir zem iepriekš definētas sliekšņa vērtības. Par laika kritisko sistēmu piemēriem var uzskatīt automašīnas drošības sistēmas (drošības spilvens, pretslīdēss sistēma u. c.), jo tām ir jānodrošina atbilstoša reakcija uz ārējo iedarbību strikti definētā laika posmā, pretējā gadījumā to darbības rezultāts var būt katastrofāls. Piemērā minētās sistēmas ir uzskatāmas par «stingrajām» reālā laika sistēmām («*hard real time*»), kurām visos gadījumos ir jāiekļaujas definētajā laika termiņā. Eksistē arī sistēmas, kur termiņa pārsniegšana ir iespējama, bet nav vēlama, jo tādējādi samazināsies sistēmas kvalitāte. Piemēram, par šādu sistēmu var uzskatīt grafisko lietotāja interfeisu, kur aizkaves ir pieļaujamas, bet, kad tās pārsniedz noteikto robežu, strādāt ar šādu interfeisu kļūst neērti (att. 1.2.). Turpmāk, ja vien nav speciāli atrunāts, visas piedāvātās sistēmas tiks uzskatītas par «stingra» tipa laika kritiskajām sistēmām.



1.2. att. «Stingri noteiktu» un «Nestingri noteiktu» (*hard&soft realtime*) reālā laika sistēmu īpatnības

Lai uzsvērtu vadības sistēmas nozīmi, strādājot laika kritiskos lietojumos, apskatīsim dažus piemērus, kur vadības sistēmas reakcija nav spējusi iekļauties striktās laika robežās. STS-1 kosmiskā kuģa starts tika atlikts sinhronitātes problēmu dēļ [32], *Ariane 5* kosmiskā kuģa avārija notika vairāku laika termiņu neievērošanas dēļ [33], ir notikušas arī vairākas *Airbus 320* lidmašīnu avārijas, ko izraisīja komunikāciju sistēmas «*Fly by wire*» kļūdas. Šie incidenti parāda, ka laika kritiskai sistēmai jāspēj arī atbilstoši reaģēt uz kļūdām, nepārtraucot darbību. Gadījumā, ja notiek kļūda, sistēmai ir jāspēj

zināmā laikā reaģēt un atgriezt darbību stabilā stāvoklī. Problēmu, kas attiecas uz sistēmas kļūdām, risinājumi ir apskatīti apakšnodaļā, kas ir veltīta bezvadu mezglu pašorganizācijai.

Sistēmas nedeterminētu uzvedību var izraisīt vairāki faktori: arhitektūras īpatnības (datu kešatmiņas izmantošana, vadības komandu konveijerizācija, pārtraukumi u. c.), algoritmiskās īpatnības (uzdevumu plānotāji, komunikācijas aizkaves u. c.) [12]. Mazajās iebūvētajās sistēmās, kurās nelieto kešatmiņu un konveijerizāciju, galvenais iemesls, kāpēc sistēma ir nedeterminēta, ir komunikācija. Gadījumos, kad tiek lietoti sadalīti vadības algoritmi, determinācijas trūkums rada kritiskas sekas.

1.3. Laika kritisko uzdevumu īpašības un datu pārraides problēmas

Iepriekš tika aprakstīta būtiskā komunikāciju stabilitātes loma laika kritiskās vadības sistēmās. Viena no galvenajām komunikācijas kvalitātes īpašībām ir aizkaves un to stabilitāte. Ir nepieciešams definēt robežas, kurās var atrasties šīs aizkaves. Piemēram, aizkaves, kuras cilvēkam ir visvieglāk sajust, ir saistītas ar cilvēka maņu orgāniem (dzirde, redze). Skaņas un video sinhronitātes trūkums var būt līdz 80 ms, kas šobrīd ir sasniedzams ar eksistējošām bezvadu tehnoloģijām bez speciālo algoritmu lietošanas.

Citāda situācija ir ražošanas automatizācijas vadības sistēmu jomā. Kā var redzēt tabulā 1.1., vairākos lietojumos maksimālā pieļaujamā aizkave ir tikai 10 milisekundes. Atsevišķos lietojumos (piemēram, kustības kontrolē) šī aizkave nedrīkst pārsniegt 3–4 ms. Vēlāk tiks demonstrēts, ka autora veidotā bezvadu sensoru sistēma spēj apstrādāt virs simt bezvadu sensoriem ar 3,3 ms aizkavi, turklāt datu saņemšanas stabilitāte ir 12 mikrosekunžu robežā, un sistēma ir viegli mērogojama. Sistēmas parametru darbības ātrums ir pierādīts, to izmantojot «STRATOS» projekta realizācijā.

Laika kritiskos lietojumos par vienu no galvenajiem parametriem tiek uzskatīta pārraides aizkave, tāpēc apskatīsim, kā veidojas aizkave bezvadu datu pārraides sistēmās. Attēlā 1.3. var redzēt, ka pirmā datu aizkave veidojas fiziskā sensora mērījumu apstrādāšanas posmā. Tālāk seko datu apstrāde un sagatavošana sūtīšanai. Dati tiek ievietoti radio moduļa atmiņā un sāka raidīšanas procedūra. Atkarībā no vides piekļuves metodes raidītājs var sākt translāciju uzreiz, vai arī pēc kāda laika posma. Raidot datus, radioviļņu izplatības ātruma, kas ir vienāds ar gaismas ātrumu, dēļ veidojas vides aizkave. Uztverot signālu, saņēmējs pārvieto informāciju no radio moduļa atmiņas uz galveno atmiņu, kur dati ir pieejami apstrādei. No minētajām aizkavēm visas, izņemot vides piekļuvi, ir statiskās un laikā nemainās. Eksistē vairāki vides piekļuves algoritmi, lielākā

daļa no tiem paredz pauzes ieturēšanu pirms raidīšanas. Pauzes ilgumu nosaka gadījuma skaitļu ģenerators, kas tādējādi tiešā veidā ietekmē kopējo pārraides aizkavi.

1.1. tabula

Industriālo lietojumu prasības pret aizkavi [23]

Lietojuma sfēra	Lietojums	Maksimālā aizkave (ms)	Cikla laiks (ms)
Ražošanas automātika	Lokālā iekārtu kontrole	10..20	20..30
	Globālā kontrole	20..30	30..100
	Diagnostika un pārraudzība	>100	>500
	Mobilo operatoru drošība	10..20	10..30

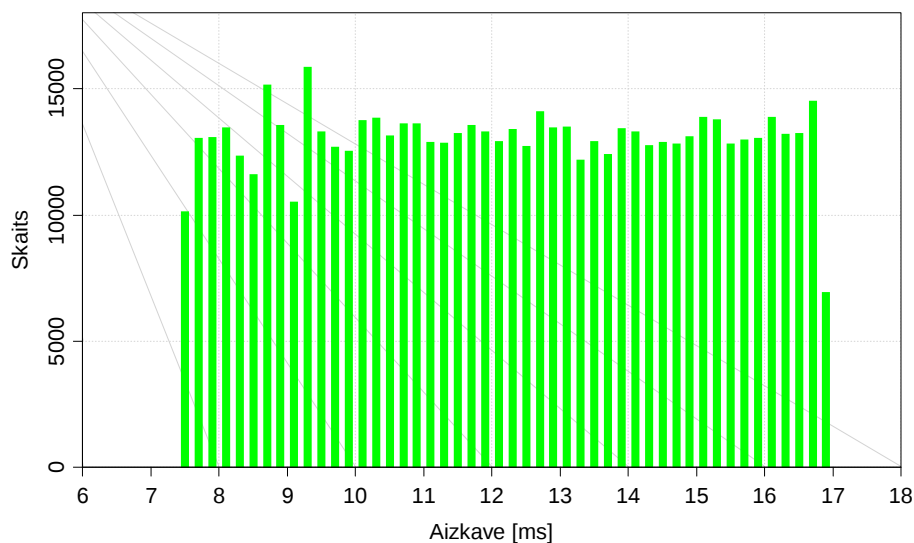
Attēlā 1.4. var redzēt, ka aizkave ir vienmērīgi izplatīta robežās no 7,5 līdz 17 ms, kas liecina, ka aizkavē noteicošā loma ir gadījuma skaitļiem. Tas liecina, ka ir jāmeklē



1.3. att. Mērījumu pārraides aizkaves

vides piekļuves protokoli, kas būtu piemēroti laika kritiskiem uzdevumiem un kuros nebūtu gadījuma skaitļu komponentes. Nākamajās nodaļās tiks apskatīti eksistējošie protokoli un aprakstīts jauns vides piekļuves protokols.

Protams, ne mazāk svarīgas datu pārraides prasības ir drošums un drošība. Darba pēdējā nodaļā ir iekļauts drošuma un drošības uzdevumu un problēmu apskats, kā arī doti iespējamie risinājumu veidi.



1.4. att. IEEE 802.15.4 CSMA tīkla pārraides aizkaves tipiskā histogramma

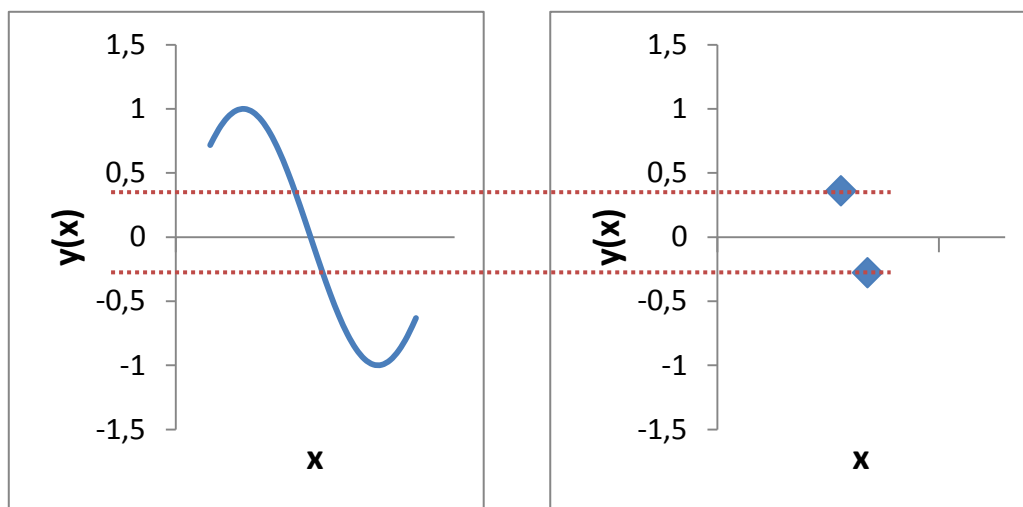
1.4. Laika kritisko sistēmu un datu pārraides apskats un klasifikācija

Apskatot laika kritiskās sistēmas, ir iespējams klasificēt gan pašas sistēmas, gan to ģenerēto datu plūsmu. Datu plūsmu iedalīšanu klasēs bieži vien izmanto arī plaši sastopamos lietojumos gan ofisā, gan mājās. Šādos lietojumos parasti atdala balss vai video straumi no citu tipu paketēm (*HTTP*, *e-mail*), kurām nav tik kritiskas aizkaves. Viena no galvenajām problēmām klasifikācijā ir automātiski identificēt pārsūtāmo pakešu tipu un piešķirt tiem attiecīgu prioritāti, nesamazinot datu pārraides ātrumu. Šāda tipa lietojumos parasti ir pietiekams joslas platums, un pieļaujamā aizkaves robeža ir lielāka nekā industriālā tipa lietojumos (tabula 1.1.), tāpēc, lai izpildītu laika kritisko lietojumu prasības, ir pietiekami izveidot pakešu rindu un ievietot prioritāro paketi sūtīšanas rindas sākumā.

Industriālos lietojumos pārraides joslas platums ir ierobežots, un arī aizkaves pieļaujamā vērtība ir daudz mazāka. Tomēr, datu paketes var tikt marķētas uzreiz pie to ģenerēšanas, tāpēc galvenā problēma ir nodrošināt pietiekamu datu apmaiņas ātrumu, nepārsniedzot pieļaujamo aizkavi. Lai turpmāk būtu iespēja kopumā formalizēt pārraides sistēmu, nepieciešams formalizēt un klasificēt aizkaves un to rašanās veidus.

Lai varētu definēt maksimāli pieļaujamo aizkaves laiku, ir jāzina konkrēta uzdevuma vai tā klases prasības. Apskatot reāli eksistējošas industriālās vadības sistēmas, var secināt, ka to projektēšanas laikā netiek veikti vadāmās sistēmas pētījumi un pieļaujamās aizkaves vērtība tiek noteikta heuristiski. Tas ir atbilstošs risinājums lielākajā lietojumu daļā, jo praksē izvēlas vadības sistēmas ar lielu reakcijas laika rezervi.

Lai, izvēloties minimāli pietiekamo sistēmas ātrdarbību, lieki netērētu vadības sistēmu resursus, darbā izstrādātā metode pieļaujamo aizkaves laiku nosaka, apkopojot vadības sistēmas un vadāmā objekta stāvokļu izmaiņu frekvenci. Lai skaitliski novērtētu vadāmā objekta stāvokļa izmaiņas frekvenci ar diskreto sensoru palīdzību, ir pietiekami iegūt to aktīvā stāvokļa izmaiņu skaitu vienā laikā vienībā. Noteikt šādu izmaiņu skaitu analogajiem devējiem šķiet neiespējami, jo to vērtības ir nepārtrauktas, t. i., var definēt bezgalīgi lielu stāvokļu skaitu, tomēr, operējot ar reālām vadības sistēmām, ir vairākas lietas, kas būtiski ierobežo novērtējamo stāvokļu skaitu. Veicot pētījumu un izanalizējot vairāku desmitus praksē lietotos laika kritisko sistēmu vadības algoritmus, tika secināts, ka tos var sadalīt vairākās klasēs. Lielākajā daļā vadības algoritmu izmanto analogo vērtību slietņņus, kas samazina lielo analogo vērtību stāvokļu kopu līdz diviem punktiem, parasti tās ir min/max vērtības (sk. att. 1.5.) vai konkrēts punkts ar histerēzi. Šajā gadījumā tas ļauj neņemt vērā ieejas signāla izmaiņas, ja tās neskar definētos punktus. Otrajā lielajā kopā ietilpst gadījumi, kad vadības algoritms izmanto analogās ieejas vērtību kā atgriezenisko saiti. Šajā gadījumā ir daži varianti, kā definēt minimāli nepieciešamo analogā signāla apstrādes frekvenci. Pirmkārt, dažiem vadības algoritmiem (piemēram, *PID* kontrolei [15]) piemīt savs iekšējais cikla laiks (*PID* algoritmā — minimums (īsākais) no integrālās/diferenciālās laika konstantes), līdz ar to nepieciešamā frekvence atbilst algoritma cikla laikam. Citos gadījumos var ieviest ierobežojumus analogajam signālam lietderīgajām frekvencēm. Vienkāršākais veids ir ignorēt signāla augstās frekvences, kas attēlo nenoīmīgas signāla fluktuācijas. Praksē to realizē, uzstādot histerēzes vērtību.



1.5. att. Analoga signāla pārveidošana divpunktu kopā

1.5. Secinājumi

Pirmā nodaļa pamato un pierāda izvirzītās problēmas aktualitāti. Tiek definētas bezvadu sensoru tīklu uzbūves un arhitektūras īpašības, kā arī to atšķirības no plaši lietotajiem bezvadu tīkliem (piemēram, IEEE 802.11). Tiek definēts laika kritisko sistēmu pētīšanas apgabals, izmantojot sistēmas aizkaves laiku kā galveno raksturojošo parametru. Tiek definēti konkrēti piemēri un konkrētas aizkaves vērtības, lai pierādītu esošo tīklu nespēju strādāt definēto parametru ietvaros. Nodaļā tiek aprakstīts esošo tīklu aizkaves veidošanas problēmas avots, kā arī definēta pieeja konkrēta vadības algoritma aizkaves laika noteikšanai un to apstrādes frekvences samazināšanas iespējai.

2. LAIKA KRITISKO UN BEZVADU DATU PĀRRAIDES SISTĒMU VEIDOŠANAS PRINCIPI

Projektējot laika kritisko sistēmu, kā arī uzlabojot esošo, ir jāzina to funkcionālie un uzbūves principi. Zinot sistēmas parametrus un funkcijas, ir iespējams precīzi noskaņot datu pārraidi, izpildot definētās prasības. Iegūstot sistēmas formālo aprakstu, var ne tikai uzstādīt tiešos pārraides parametrus (piemēram, raidīšanas fāze, tās ilgums, intervāls un citi), bet arī klasificēt šo sistēmu. Sadalot sistēmas klasēs, var izvēlēties ne tikai atsevišķus pārraides parametrus, bet arī pārraides pamatprincipus (radio signāla frekvence, joslas platums, modulācija, tīkla piekļuves metode, maršrutēšanas metode).

2.1. Esošo formalizācijas metožu apskats

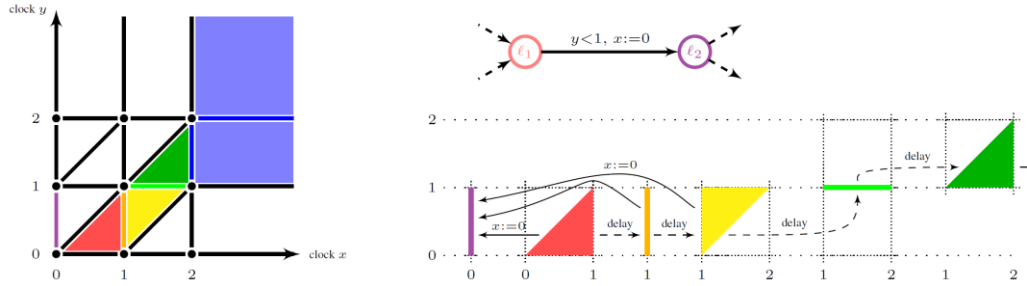
Eksistē vairākas metodes, kas ļauj formalizēt laika kritiskās vadības un arī datu pārraides sistēmas. Lielākajai metožu daļai piemīt īpašība, izmantojot definētos nosacījumus, iziet caur katru no iespējamiem sistēmas stāvokļiem. Tas, protams, garantē augstu iegūstamo rezultātu ticamības pakāpi, tomēr šāda rezultāta ieguvei ir nepieciešami lieli skaitļošanas resursi. Šā iemesla dēļ daudzus sistēmu veidus nav iespējams formalizēt. Šādu sistēmu veidotāji parasti apskata vienkāršu vadības sistēmu ar nelielu stāvokļu skaitu, tomēr arī šādos gadījumos esošās metodes ne vienmēr spēj gūt rezultātus.

Pirmo apskatīsim laika kritisko vadības sistēmu modelēšanas metodi un rīku *UPPAAL* [57]. Šī metode ir bieži pieminēta zinātniskajos rakstos [60] un atzīta par vienu no piemērotākajām pārraides sistēmu testēšanai. Metodes darbības pamatā ir laika automātu teorija. Popularitāti *UPPAAL* ir ieguvusi galvenokārt speciāli sagatavota rīka dēļ, kas ļauj grafiskā vidē veidot sistēmas modeli. Šis rīks ir viens no nedaudziem, kas tiek lietots un attīstīts jau ilgāku laika periodu (*UPPAAL* no 1995. gada).

Lai arī *UPPAAL* un citu rīku efektivitāti pierāda to ilglaicīgā un plašā lietošana, tomēr tie nav ideāli un var definēt vairākas problēmas, kas ir svarīgas, izmantojot rīkus promocijas darba pētījumu sfērā. Viena no šīm problēmām ir *UPPAAL* [57] rīka lielais resursu patēriņš, strādājot ar lielām sistēmām [27]. Problēmu risina pētnieks, meklējot līdzvaru starp modelējamās sistēmas precizitāti un apstrādes ātrumu, tomēr reālās sistēmās ir grūti paredzēt, kurus procesus var apvienot modeļa vienkāršošanai.

Lai apstrādātu eksponenciāli augošo stāvokļu telpu, tiek izmantotas tā sauktās laika spēļu teorijas [13] metodes. Pētot objektu laika kritisko uzvedību nenoteiktības apstākļos

(kas ir tipiski apstākļi reālā dzīvē), laika spēļu algoritmi spēj pārbaudīt gan labāko, gan sliktāko modeļa scenāriju.



2.1. att. Abstrakcijas principa vizualizācija laikā automātos [10]

Attēlā 2.1. redzami reģioni attēlo laika automāta uzvedību abstraktā galīgā veidā. Ar šādu reģionālu laika automātu ir iespējams saglabāt tādus parametrus kā sasniedzamība un drošums. Faktiski tas ir oriģināls laika automāts ar informāciju par «cenas» izmaiņām starp stāvokļu maiņām. Kopā ar šo informāciju algoritma sarežģītība ir *PSPACE*-pilns uzdevums, un šāda automāta analīze ir sarežģītāka, salīdzinot ar klasisko laika automātu.

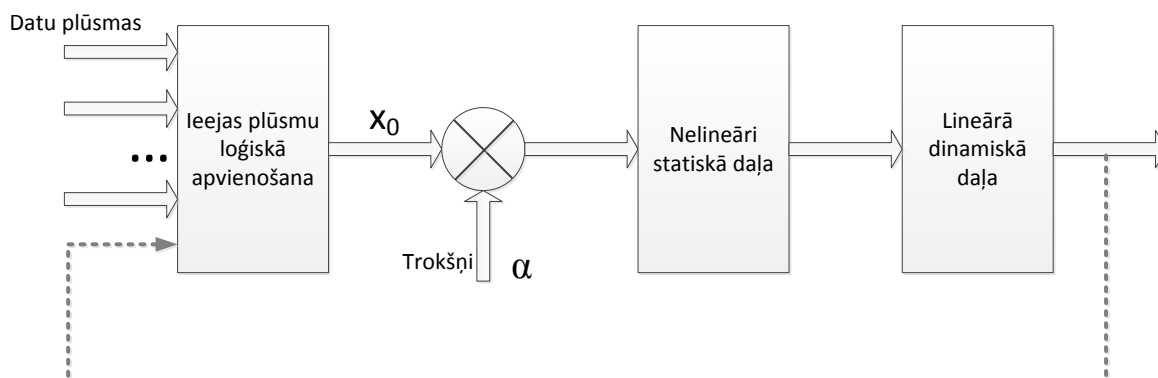
Apkopojot augstāk apskatītos algoritmus, var secināt, ka tiem piemīt vairākas problēmas, kas ir saistītas ar modelējamo algoritmu veidu trūkumu, to modelēšanas precizitāti un modelēšanas iespējamību vispār. Vairākiem verifikāciju un modelēšanas rīkiem piemīt stāvokļu kopas «eksplodijas» problēma, kad stāvokļu kopa aug eksponenciāli kopā ar modeļa komponentu lineāru pieaugumu.

Lai risinātu minētās problēmas, pēdējo gadu laikā ir parādījušies atsevišķi darbi, kas citās sfērās eksistējošo zinātnisko bāzi izmanto jaunā sfērā, piemēram, tīklā esošā datu plūsma tiek saistīta ar šķidruma dinamisko modeli. Šī pieeja izceļas ar iespēju aprakstīt tīkla stāvokli jebkurā momentā atšķirībā no citiem modeļiem, kur laiks ir diskrets un solis ir liels (it īpaši — lielās sistēmas). Lielo sistēmu modelēšanas problēma tiek risināta, izmantojot šķidruma dinamiskā modeļa risināšanu ar skaitliskām metodēm [19]. Var secināt, ka, aizejot no diskretas telpas un tajā lietotām teorijām, ir iespēja vienkāršot modeli un darbu ar to. Nākamajā nodaļā tiek parādīts, kā izmantot nelineāro dinamisko sistēmu teoriju laika kritiskās bezvadu datu pārraides sistēmas veidošanai.

2.2. Piedāvātā sistēmu dinamikas novērtēšanas metode

Kā redzams no iepriekšējās nodaļas, esošās metodes galvenokārt ir diskretas un laikā nemainīgas. Nelielās modelējamās sistēmās, kur iespējamo stāvokļu un ieeju skaits nav liels, tādas modelēšanas pieejas kā *UPPAAL* [57], ļauj pārbaudīt pilnīgi visus

iespējamos stāvokļus. Tomēr ir secināts, ka visu iespējamo stāvokļu pārbaude prasa ilgu



2.2. att. Darbā izstrādātās sistēmas blokshēma

laiku un bieži vien šis uzdevums nav izpildāms vispār, jo nē pietiek skaitļošanas resursu. Šo problēmu novēršanai pieejās ierobežo apskatāmo datu apjomu, atstājot tikai ieejas datu plūsmas raksturojošos parametrus un sistēmas kopējo stāvokli. Viens no piemēriem ir rindu teorija, kuras izmantošanai pietiek aprakstīt ieejas datu plūsmas statistiskos parametrus, sistēmas apkalpošanas laiku un rindas ietilpību (ja tā ir izmantota). Tas viennozīmīgi atvieglo sistēmas pārbaudi, bet ar to nepietiek, lai garantēti pārbaudītu, vai pārraides darbība ir stabila jebkādā stāvoklī, un aprakstītu sistēmas uzvedību ar pietiekamu precizitāti pie mainīgas ieejas plūsmas. Turpretim darbā izstrādātā metode ļaus ne tikai analizēt pārraides sistēmas dinamiskās īpašības un noteikt kritiskās situācijas, bet arī brīvi operēt ar sistēmas sastāvdaļām, meklējot iespējamus problēmu risinājumus.

Lai novērstu iepriekš aprakstīto metožu problēmas, ir piedāvāts izmantot dinamisko formalizācijas metodi. Šajā situācijā ieejas datu plūsma tiek uzskatīta par nepārtrauktu signālu ar mainīgu amplitūdu un frekvenci. Lai pārietu no diskrētām vērtībām (datu paketes garums un tās saņemšanas moments), dati tiek pārveidoti tā, ka paketes garums tiek mainīts uz signāla amplitūdu, un intervāls starp paketēm tiek mainīts uz otru parametru — nepārtrauktu laiku. Aprakstīto metožu lietojumu apgabala robeža ir lietojumi, kuru datu plūsma atbilst nepārtrauktības kritērijam. Citos gadījumos sistēmu ir vieglāk izpētīt, izmantojot klasiskās rindu teorijas metodes. Datu plūsmas nepārtrauktība ir izsakāma ar diviem kritērijiem: intervāls starp paketēm un to garums (laiks, kas ir nepieciešams, lai saņemtu paketi). Lai datu plūsma būtu nepārtraukta, intervālam jābūt mazākam par paketes garumu. Vēl viens lietojamības kritērijs ir pētāmo objektu līdzība ar Hameršteina modeli. Tālāk aprakstīts, kā var formalizēt reālu un sarežģītu sistēmu. No pieredzes ir zināms, ka lielākajai daļai no dabā eksistējošajiem objektiem piemīt nelineārs un dinamisks raksturs. Tiešā veidā formalizēt šāda tipa objektu ir grūti, jo tādā gadījumā ir jāizmanto nelineāro

sistēmu teorija, tādēļ, lai atvieglotu formalizācijas uzdevumu, ir piedāvāts izmantot Hameršteina modeli [22, 64]. Izmantojot statisko parametru dekompozīciju, ir iespējams izrēķināt izejas signālu no jebkura ieejas signāla. Dinamikas apstrādei tiek izmantoti diferenciālvienādojumi. Modeļa identifikācija notiek frekvenču telpā. Rezultātā objekta īpašības var aprakstīt ar nelielu parametru kopu, pie tam katru no parametriem ir iespējams novērtēt eksperimentāli.

Saskaņā ar Hameršteina modeli, sadalīsim nelineāro-dinamisko objektu (att. 2.2.), turpmāk NDO, divās daļās: nelineārā statiskā (NS) un lineārā dinamiskā (LD). Sistēmas ieejā tiek padotas loģiski apvienotas datu plūsmas x_0 analogā signāla formā (2.1.).

Kopā ar troksni α uz Hameršteina modeļa pirmo posmu tiek padots signāls:

$$X(t) = x_0 + \alpha \quad (2.1.)$$

Hameršteina modeļa NS daļa maina ieejas signāla spektru, tāpēc sistēmas izejas reakcija faktiski ir LD daļas reakcija uz nelineāri deformēto signālu. Deformācijas ir atkarīgas no izvēlētajās darbības zonas, t. i., signāla amplitūdas un novirzes. Tādējādi ir jāatbild uz šādiem jautājumiem.

- 1) Kādi ir LD daļas ieejas signāla parametri?
- 2) Kā atdalīt LD reakciju tikai uz testa signāliem?
- 3) Kā izvēlēties signāla darbības zonas?

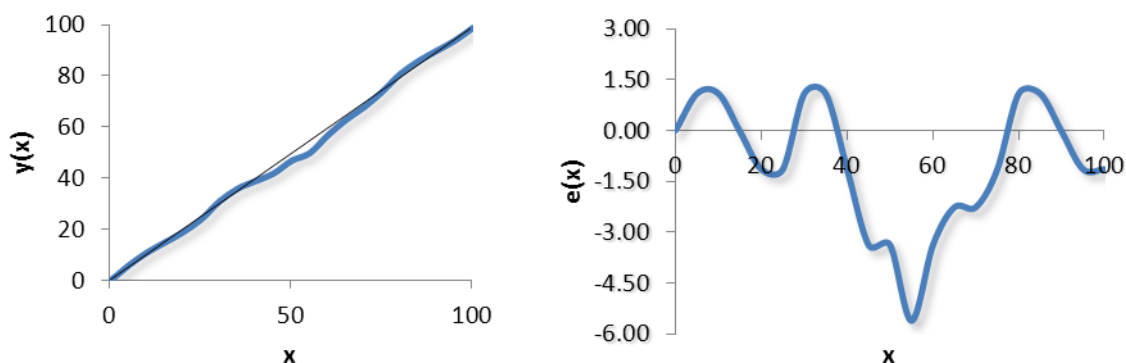
Mēģināsim izdalīt sistēmas nelinearitāti, izmantojot lineāro regresiju uz sistēmas ieejas-izejas signāliem (2.2.). Līkni var sadalīt divās daļās: ideālā līkne un nelinearitāte.

Grafikā 2.3. pa kreisi var redzēt taisni — ideālo līkni un tai pievienoto nelinearitāti. Analītiskā veidā to var izteikt kā:

$$y(x_i) = ax_i + b + e(x_i), \quad (2.2.)$$

kur $e(x)$ — starpības funkcija un satur sevī visas nelinearitātes (att. 2.3. pa labi).

Lai iegūtu universālu NS daļas specifikāciju, $e(x)$ funkcijai tiek lietota Furje transformācija (pie nosacījuma, ka tā ir integrējama). Rezultātā iegūtā sinusoīdu summa ir sadalīta divos saskaitāmajos: nozīmīgajā daļā $\sum_{i=1}^k A_i \sin(\theta_i x + \omega_i)$ un atlikumā $\varepsilon(x)$.



2.3. att. Kopējais signāls (pa kreisi) un izdalītā nelinearitāte (pa labi)

Parametri A_i , θ_i un ω_i ir i -tās komponentes amplitūda, frekvence un fāze. Nozīmīgo komponentu (sinusoīdu) skaitu k ir jāizvēlas atbilstoši vēlamai precizitātei. Rezultātā, NS daļas izejošo signālu pārveidojot sistēmā ar vienu lineāro un k sinusoidālām komponentēm, iegūst NS daļas reakciju uz ieejas signālu:

$$\begin{aligned}
 y(t) &= y_L(t) + \sum_{i=1}^k y_i(t) = \sum_{n=0}^N c_n \sin(n\omega + \gamma_n), \\
 y_L(t) &= (ax_0 + b) + (a\lambda) \sin(\omega t + \vartheta), \\
 y_i(t) &= \sum_{n=0}^{N_i} \rho_{n_i} \sin(n\omega + \gamma_n), \\
 \begin{cases} c_0 = d_0 + (ax_0 + b) \\ c_1 = d_1 - a\lambda \\ c_n = d_n, n = \overline{2, N} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{2.4.}$$

kur

$y_L(x)$ — lineārās komponentes izejas signāls,

$y_i(x)$ — i -tās sinusoidālās komponentes izejas signāls,

γ_n — n -tās harmonikas fāze,

d_n — n -tās harmonikas amplitūda, kuru ir ietekmējušas visas sinusoīdas,

c_n — NS daļas izejas signāla n -tās harmonikas amplitūda,

N_i — i -tās sinusoidālās komponentes pēdējais nozīmīgās harmonikas numurs,

N — maksimums no N_i .

Tātad, lai izrēķinātu NS daļas reakciju uz sinusoidālo ieejas signālu, nepieciešams izpildīt šādus uzdevumus:

- iegūt nelineāra objekta statisko ieejas-izejas raksturojumu. Tas nedrīkst iekļaut būtisko nelinearitāti;
- izmantojot lineāro regresiju, iegūt ideālo taisni;

- izpildīt Furje transformāciju ar nelineārā atlikuma funkcijas daļu un definēt nozīmīgo harmoniku robežu;
- atzīmējot testa signāla parametrus (novirzi x_0 un amplitūdu λ), izrēķināt izejas signāla spektru katrai sinusoīda komponentei i ;
- aprēķināt amplitūdu d_n katrai harmonikai n ;
- aprēķināt amplitūdu c_n un fāzi y_n katrai harmonikai n .

Lai formalizētu lineāri dinamiskās (LD) daļas reakciju uz ieejas signālu, autors ir sācis ar amplitūdas-fāzes frekvenču reakciju funkciju un pēc tam atdalījis reakcijas funkcijas ordinātes no LD daļas izejas signāla. Uz LD daļas ieeju nonāk kompozīts signāls, tāpēc LD reakcija būs sinusoīdu lineārā kombinācija ar atšķirīgām amplitūdām un fāzēm. Lai izrēķinātu ordinātes, katrā testu frekvencē ω_i ir nepieciešams atrisināt $M_i > N$ neatkarīgo vienādojumu pēc minimuma.

2.3. Secinājumi

Rezultātā var secināt, ka nelineāru dinamisku objektu ir iespējams aprakstīt ar nelielu parametru kopu, pie tam vienādojumus, kuros ietilpst šie parametri, ir iespējams izrēķināt ar mikroprocesora bāzes operācijām [15]. Gan no šā piemēra, gan pamatojoties uz tehnisko literatūru, var secināt, ka nozīmīgākā loma laika kritiskā bezvadu datu pārraidē ir pārraides aizkavēm. Kā tika pierādīts darba sākumā, aizkaves galvenais avots ir tīkla piekļuves protokols. Izmantojot darbā izstrādāto novērtēšanas metodi, ir iespējams pārbaudīt, vai sistēmas esošā aizkave ļaus veikt plānotos uzdevumus.

Industriālos lietojumos prasības pret aizkavi ir stingrākas nekā cilvēka ikdienas vajadzībām (tabula 1.1.), un plaši lietojamie tīkla piekļuves protokoli (piemēram, CSMA IEEE 802.11) nevar nodrošināt prasību izpildi. Tādēļ ir jāizmanto specializētie piekļuves protokoli. Viens no šādiem protokolu tipiem ir aprakstīts nākamajā nodaļā.

3. BEZVADU SENSORU TĪKLA PIEKĻUVE LAIKA KRITISKĀS SISTĒMĀS

Prasības pret aizkavi plaša lietojuma tīklos ir zemas, salīdzinot ar specifiskiem industriāliem lietojumiem. Piemēram, lietojot balss konferences, ir pieļaujama aizkave līdz pat 150 milisekundēm, turpretī industriālām vajadzībām atsevišķos uzdevumos (piemēram, lauksaimniecības tehnikas tīkls, nodaļa 4.2.) ir nepieciešama aizkave zem 3,3 ms. Tipiska ofisa tipa (IEEE 802.11) bezvadu tīkla aizkave ir ap 30 milisekundēm. Pieaugot tīkla lietotāju skaitam, aizkave palielinās līdz dažiem simtiem milisekunžu [45]. Ir acīmredzami, ka piekļuves mehānismu ar šādiem parametriem nav iespējams izmantot laika kritiskos lietojumos.

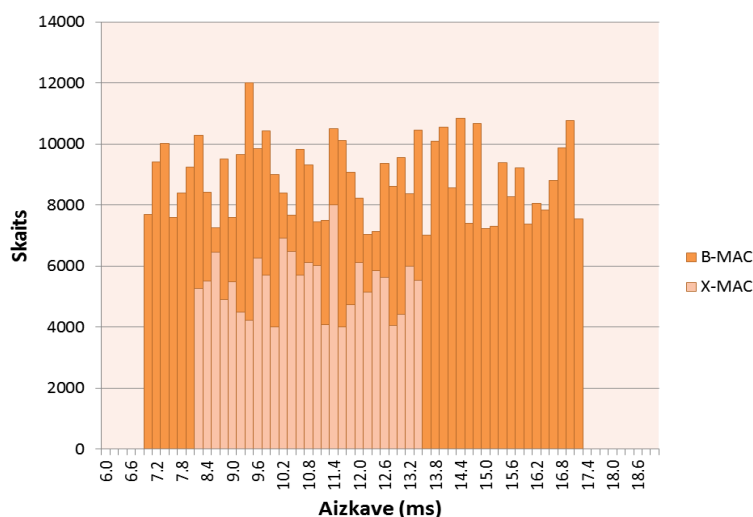
3.1. Esošo tīklu testēšana un kritisko punktu izdalīšana

Apskatot esošo stāvokli, ir noteikti eksistējošo algoritmu trūkumi. Promocijas darbs ir virzīts uz bezvadu sensoru tīkliem, tāpēc tiks apskatīti tie piekļuves algoritmi, kas ir paredzēti darbam iekārtās ar mazu enerģijas un skaitļošanas jaudu. Šobrīd tirgū ir vairāk nekā 10 dažādu bezvadu sensoru mezglu (WSN) platformu, ko izmanto dažādas operētājsistēmas un tīkla piekļuves algoritmus. Tiešā veidā statistikas dati par WSN nav pieejami, tāpēc populārākie piekļuves mehānismi ir noteikti netiešā veidā, apkopojot WSN platformu operētājsistēmas un izdalot visbiežāk sastopamos tīkla piekļuves algoritmus.

Šie algoritmi ir *B-MAC*, *X-MAC*, *SS-TDMA* [11, 18, 31, 41]. Pirmo divu protokolu piekļuve pārraides kanālam balstās uz IEEE 802.15.4 standarta, kurā tīkla piekļuves secības noteikšanai tiek izmantoti gadījuma skaitļi. Gadījuma skaitļa izvēle ir atkarīga no lietojuma veida. Darbs ir saistīts ar laika kritiskiem uzdevumiem, tāpēc parametri tika uzstādīti uz minimumu. Abi algoritmi tika notestēti *TinyOS+telosB* [17] platformā.

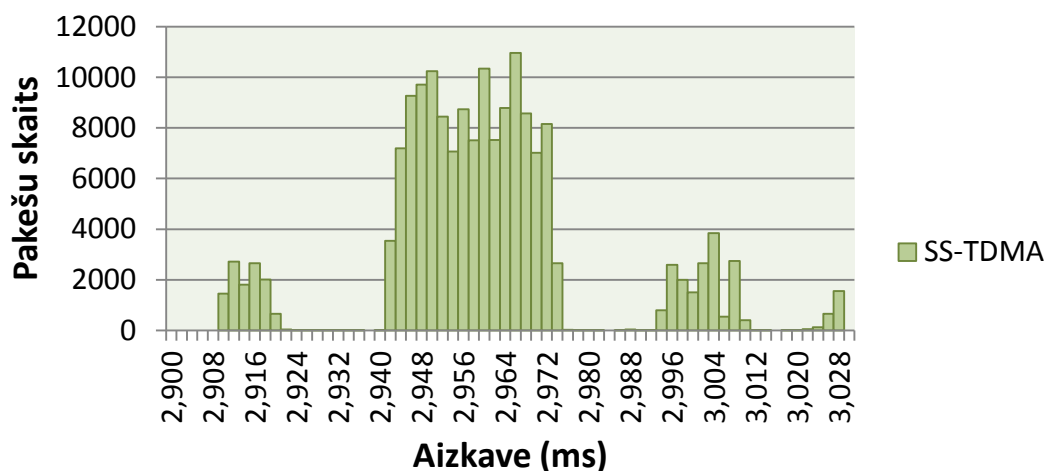
Attēlā 3.2. var redzēt abu algoritmu aizkavi, pārraidot datus starp diviem punktiem. Ir redzams, ka abos algoritmos ir noteikts aizkaves intervāls ar vienmērīgu sadali. Tas pierāda gadījuma skaitļu izmantošanu un parāda minimāli iespējamo aizkaves laiku (attiecīgi 6,8 un 8,0 ms). Ņemot vērā iepriekš definēto aizkavi 3,3 ms, var secināt, ka izmantot šos algoritmus definētajiem uzdevumiem nav iespējams, turklāt iegūtās aizkaves nav determinētas, tās mainās lielā diapazonā un ir atkarīgas no aktīvo tīkla mezglu skaita.

Labāku rezultātu, salīdzinot ar *B-MAC* un *X-MAC*, teorētiski vajadzētu sniegt *SS-TDMA* algoritmam, jo tas ir bāzēts uz laikdales principu, kas ir determinēts. Līdzīgi ar iepriekšējiem testiem algoritms tika realizēts *TinyOS+telosB* [17] platformā. Attēlā 3.1. redzamā aizkave ir vismaz trīs reizes mazāka un vairākas reizes stabilāka. Var secināt, ka aizkave ir piemērojama 4.2. nodaļā minētā uzdevuma veikšanai, tomēr tās stabilitāte neļauj izmantot šo metodi tiešā veidā, sīkāk par to tiks stāstīts 4.2. nodaļā.



3.2. att. Pakešu saņemšanas aizkave tīklā, izmantojot «*B-MAC*» un «*X-MAC*» algoritmus

Klasiskām *TDMA* ir arī vairāki trūkumi. Algoritma darbībai nepieciešama strikta sinhronizācija starp tīkla mezgliem un iepriekš izveidota, nemainīga tīkla struktūra. Lai arī *TDMA* tīkla parametri ir stabili un nav atkarīgi no lietotāju skaita, tomēr tīkla utilizācija (efektivitāte) krītas kopā ar tīkla mezglu aktivitāti. Tātad klasisko *TDMA* algoritmu ir vērts izmantot lietojumos, kur tīkla struktūra paliek nemainīga un lielākā daļa no tīkla



3.1. att. *SS-TDMA* algoritma pārraides aizkave

lietotājiem nepārtraukti sūta datus. Lietojumiem, kam ir citas prasības, ir jāmeklē citi risinājumi, lai sasniegtu pietiekami mazu pārraides aizkavi.

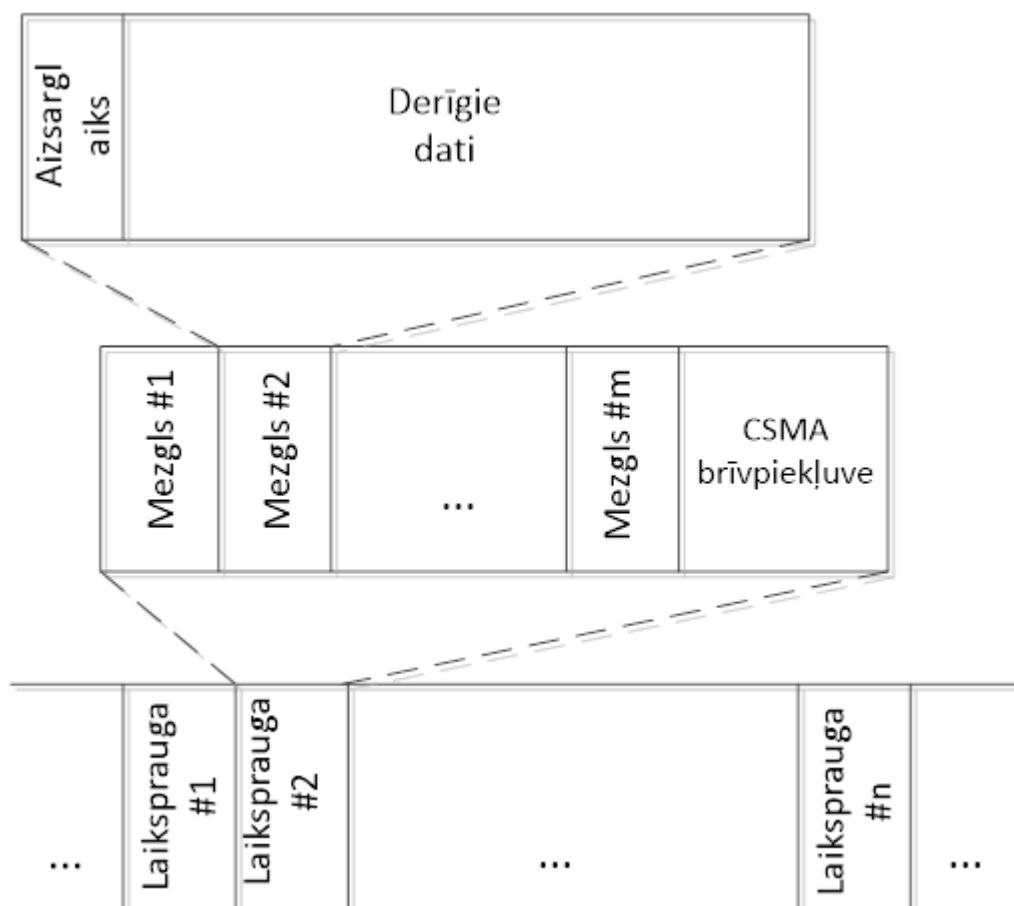
3.2. Kombinēts tīkla piekļuves veids

Lai risinātu iepriekš aprakstītās problēmas, ir izstrādāts jauns tīkla piekļuves protokols, kas ļaus nodrošināt prognozējamu pārraides aizkavi dinamiskā vidē. Izstrādātais algoritms apvieno labākās īpašības no *CSMA* un *TDMA* algoritmu kopas.

Uzdevums jaunās tīkla piekļuves metodes veidošanai ir formulēts šādi:

- algoritmam ir jāspēj nodrošināt stabilu datplūsmu ar paredzamām aizkavēm;
- jānodrošina iespēju dinamiskā veidā piesaistīt katra laikspraugas, lai palielinātu maksimālo mezglu skaitu un samazinātu aizkavi;
- jānodrošina sasaisti ar maršrutēšanas algoritmiem tā, lai samazinātu datu aizkavi, sūtot tos caur vairākiem mezgliem;
- jānodrošina iespēju brīvi mainīt sadali starp laika kritisko (*TDMA*) un vienkāršo sūtījumu tipiem (*CSMA*).

Izstrādātās tīkla piekļuves metodes datu pārraides princips ir redzams shēmā 3.3. Datplūsma ir sadalīta kados. Kadra garums (ilgums) atkarīgs no vairākiem parametriem un var tikt brīvi uzstādīts. Kadra garuma izvēlei ir jāņem vērā šādus parametrus: datu pārraides ātrums, mezglu blīvums telpā, lietojuma prasības pret aizkavi. Katrs kads ir sadalīts divās daļās: *H-TDMA* ar iepriekš definējamu pārraides secību un *CSMA/CA* ar nejaušu pārraides varbūtību. Jaunu lietotāju inicializācija notiek tikai *CSMA/CA* periodā. To uzdevums ir sinhronizēties ar *TDMA* kadra sākumu un pieprasīt laikspraugu *CSMA/CA* laika periodā. Atļauja pārraidīt *TDMA* periodā ir tikai savā saņemtajā laikspraugā.



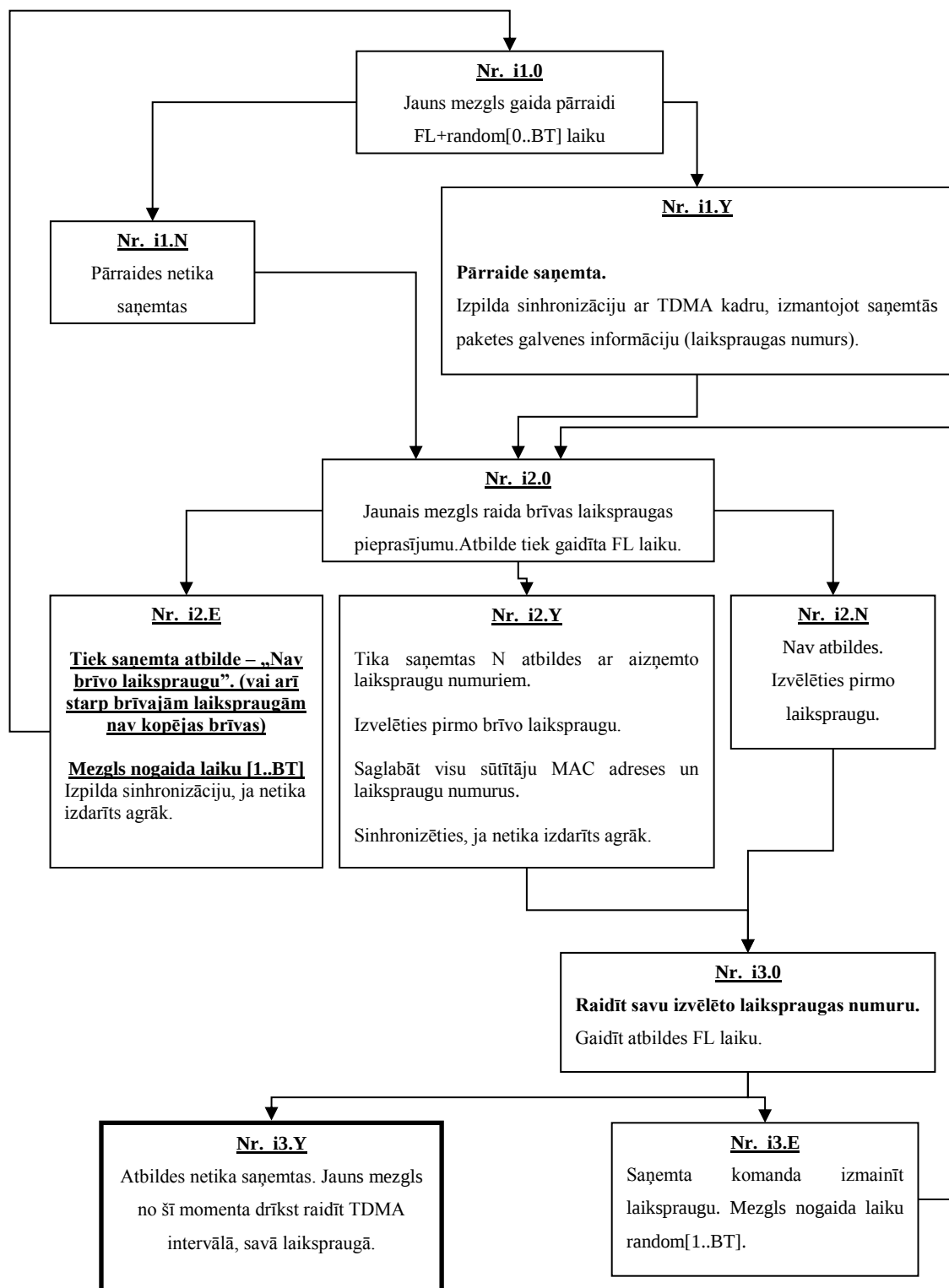
3.3. att. Kombinēta algoritma shēma

Izmantojot izstrādāto pieeju, ir iespējams izrēķināt viena mezgla vidējo caurlaidspēju:

$$\text{caurlaidspēja} = \text{pārraidē ātrums} \times \frac{\text{TDMA perioda garums}}{\text{Kadra garums}} \times \frac{1}{n}, \text{ kur } n \text{ ir TDMA}$$

laikspaugu skaits. Pieņemsim, ka datu pārraidē ātrums ir 2 Mbps un uzdevums ir straumēt balsi starp mezgliem, izmantojot G.711 [17] kodēšanas standartu. Rezultātā ir iespējams izveidot 27 vienlaicīgus balss kanālus, turklāt atstājot daļu no cikla laika jauno mezglu pieslēgšanai.

Attēlā 3.4. var redzēt jaunu mezglu inicializācijas procedūru. Tīklā esošo mezglu darbības stāvokļi ir parādīti attēlā 3.5.

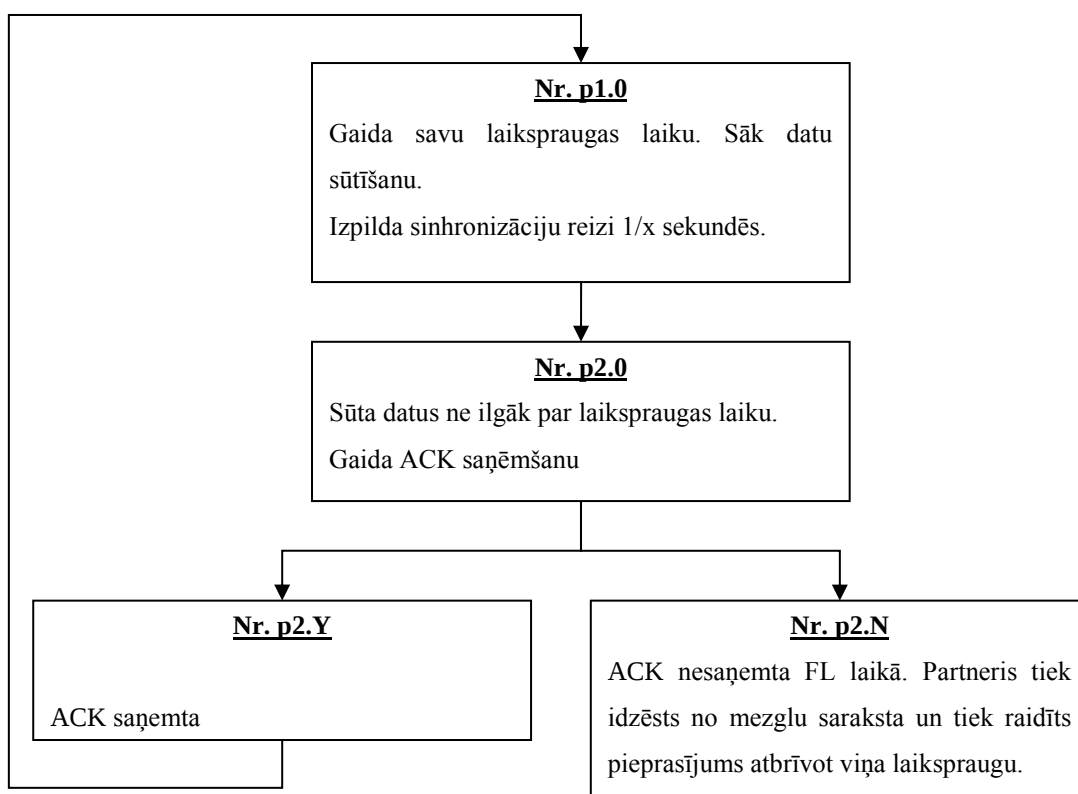


3.4. att. Jaunā mezgla inicializācija *H-TDMA* algoritmā

Shēmā visi sūtījumi, kas nāk no jaunā mezgla, notiek tikai *CSMA/CA* intervālā, lai netraucētu *TDMA* slota darbību. Tikai, ja tīklā ir brīvas laikspraugas, jaunais mezgls saņem

iespēju raidīt *TDMA* intervālā. Mezgli, kas jau ir inicializēti, turpina sūtīt savus datus un arī raida atbildes uz jaunā mezgla pieprasījumiem. Paredzēt un garantēt aizkaves ilgumu, kas būs, pirms jaunais mezgls inicializēsies, nav iespējams, jo vienlaikus var inicializēties vairāki mezgli. Tomēr aizkaves šajā posmā nav būtiskas, jo industriālos lietojumos mezglu mobilitāte nav liela. Faktiski jauna mezgla inicializācija lielākajā daļā gadījumu notiks ar vienu mezglu tad, kad tas tiks mainīts (piemēram, pēc bateriju maiņas).

Inicializēto mezglu datu sūtīšana notiek pēc attēlotās shēmas (att. 3.5.).



3.5. att. Inicializēta mezgla stāvokļi *H-TDMA* algoritmā

Inicializēta mezgla darbība gaidīšanās režīmā:

- ik pēc $1/x$ sekundēm izpildīt sinhronizāciju, lai koriģētu iespējamo lokālo taimeru nesinhronitāti;
- ik pēc $1/x$ sekundēm aptaujāt katru no tuvumā esošiem mezgļiem. Ja mezgls neatbild, izdzēst to no mezglu saraksta;
- saņemot paketi un salīdzinot tās sūtītāja *MAC* adresi un laikspraugas numuru ar savu sarakstu, konfliktu gadījumā izsūtīt laikspraugas atbrīvošanas pieprasījumu;

- saņemot paketi ar brīvas laikspraugas pieprasījumu, izsūtīt savu laikspraugu sarakstu.

Saņemot pieprasījumu izmainīt savu laikspraugu, mezgls izpilda inicializācijas procedūru no jauna.

3.3. Mezglu sinhronizācijas un pašorganizācijas problēmas un risinājumi

Kā var redzēt no iepriekšējas metodes apraksta un praktisko testu rezultātiem, izstrādātajā metodē (un arī citos *TDMA* bāzētos algoritmos) nozīmīga loma ir sinhronizācijas precizitātei. Izmantojot metodes, kur datu pārraides ātrums ir lielāks, sinhronizācija kļūst vēl svarīgāka, jo tā tiešā veidā ietekmē visu mezglu raidīšanas intervālu stabilitāti. Viens no tālāk attīstītajiem datu pārraides veidiem paredz pāreju uz īpaši-platjoslas signāla (*UWB* [46, 48]) izmantošanu. Tas ļaus vēl vairāk samazināt enerģijas patēriņu un palielināt pārraides ātrumu, kas ir īpaši svarīgs bezvadu sensoru tīkliem, jo ļaus veidot autonomas sistēmas, kuras nevajadzēs apkalpot vispār (enerģijas pietiks daudziem gadiem, un tas būs ilgāk par mezgla dzīvotspēju). Lai veiksmīgi realizētu *UWB* bezvadu sistēmu, ir nepieciešams realizēt drošu sinhronizācijas signāla (pilota signāls) noteikšanas metodi. Vēlāk šo pieeju ar nelielām izmaiņām varēs izmantot arī šaurās joslas signāla tīklos.

Ir zināms, ka uztvērējs veido kadru statistiku, integrējot visu kadru impulsu devumu, un sinhronizācija ir bāzēta uz precīzu uztvērēja signāla noteikšanas momentu. Uztvērēja izejā parādās impulsa veida signāls ar dažādiem trokšņa sadalījumiem un modulāciju veidiem. Ir aplūkota komparatora izšķirtspējas inerces un jutības sliekšnis kļūdaino pilota signālu atklāšanā. Pierādīts, ka pilota signāla atklāšanas varbūtība pieaug kopā ar signāla un trokšņa attiecību. Ir aplūkotas arī dažādas pieejas konfliktu situāciju risināšanai, detektējot pilota signālu. Pilota signālu un komparatora optimizēta sliekšņa noteikšanai ir izstrādātas analītiskas formulas.

3.4. Secinājumi

Aprakstītās sinhronizācijas metodes spēj detektēt pilota signālu *UWB* tīklos, tomēr tīkla funkcionēšanai nepietiek ar kvalitatīva pārraides kanāla izveidošanu. Tīklam jābūt ne tikai ātrdarbīgam, bet arī drošam. Nevar paredzēt un novērst visas iespējamās

funkcionēšanas problēmas, tāpēc sistēmai ir jāspēj detektēt kļūdaino stāvokli un veikt pašorganizāciju. Galvenā veiksmīgas pašorganizācijas prasība ir stabila inicializācijas procedūra. Pašorganizācijas principu funkcionālais apraksts ir atrodams rakstā [4] kā homeostata paraugs ar papildu paplašinājumiem rakstos [26, 63]. Daudzveidīgs morfoloģiskais apraksts ir atrodams rakstos [65, 66]; šis apraksts var tikt izmantots dažādu dinamisko uzvedību dizainam un simulācijai. Cita pieeja ir atrodama rakstos [3, 9], kur tika aprakstītas reāllaika sistēmas, izmantojot *PTA* («*priced timed automata*»). *PTA* un to spēļu paplašinājumi piedāvā ierobežotus sistēmas apraksta kvantitatīvos aspektus. Šajā pieejā ir ierobežotas iespējas elastīgai un vienlaicīgai apraksta izmantošanai dažādos sistēmas līmeņos.

Sadaļā tika prezentēts kombinēts tīkla piekļuves veids, kas dod iespēju apvienot laikā kritisko datu apmaiņas priekšrocības ar decentralizēto tīklu iespējām. Nākamā nodaļā ir aprakstīti praktiskie algoritma testi un pierādīta tā iespēja realizēt laikā kritisko datu pārraidi ar zemu un stabilu aizkaves laiku.

4. METOŽU UN ALGORITMU PRAKTISKĀ LIETOŠANA

Pirms bezvadu tīkla veidošanas un plānošanas ir svarīgi apskatīt esošos praktiskos risinājumus, lai novērtētu šābrīža stāvokli un izveidotu atbalsta punktu. Plānotais bezvadu sensoru tīkls tiks izmantots industriālo procesu vajadzībām. Tāpēc pirmām kārtām tiks apskatīti šīs nozares tīkli.

Kā bija minēts iepriekš, industriālās nozares (tajā skaitā, lauksaimniecība) ir diezgan konservatīvas. Neskatoties uz to, ka bezvadu tīklu priekšrocība, attālināti saņemot augsnes parametrus, ir viennozīmīga un lauksaimniecības nozare to ir pieņēmusi, pastāv grūtības tīklu ieviešanā lielo izmaksu dēļ. Bezvadu sensori ir devuši iespēju samazināt izmaksas un palielināt precizitāti, salīdzinot ar meteoroloģiskām stacijām un satelītu attēlu apstrādi, tomēr izmaksas joprojām ir lielas un sastāv no pašu sensoru mezgļu iepirkuma un apkalpošanas cenas, centrālā datorā esošas pārraidošas infrastruktūras uzstādīšanas un apkalpošanas cenām. Tālāk tiks apskatīti bezvadu sensoru tīklu realizētie projekti un esošie standarti.

4.1. Esošo laika kritisko bezvadu tīklu lietojumu apskats

«Lofar Agro» projektā [5] tika izmantoti 150 *Crossbow* bezvadu mezgli, kas tika izkliedēti pa visu lauksaimniecības zemi. To dati no mezgliem tiek maršrutēti ar pašu mezgļu palīdzību un rezultātā nodoti uz laukā esošu vārteju. Darba cikls ir 7 % no kopējā laika. Dati tiek nodoti reizi desmit minūtēs.

Industriāliem lietojumiem paredzēts protokols *PEQ* [8] (*Periodic, Event-Driven and Query-Based Protocol*) realizē datu apmaiņu ar mazāko aizkavi 20 ms, kas ir pietiekams daļā no 1.2. nodaļā definētajiem lietojumiem. Tomēr piedāvātais protokols koncentrējas uz zemu enerģijas patēriņu, un tā darbs tiek pārbaudīts tīklos ar relatīvi zemu ziņojumu sūtīšanas intensitāti (10 Hz). Līdzīgi darbojas arī *GinMAC* protokols [53]. Šo protokolu izmanto naftas pārstrādes rūpnīcā, tas operē ar datu sūtīšanas frekvencēm ap 1 Hz tīklā līdz 25 mezgliem. Var secināt, ka apskatītajos un arī daudzos citos lietojumos [20, 47] datu pārraides intensitāte un minimālā aizkave neapmierina visas izvirzītās prasības.

Labāku rezultātu demonstrē Kalifornijas un Taivānas universitāšu sadarbības rezultātā izveidotā *EcoDAQ* [14] sistēma, kuras mērķis ir savākt datus no elektrokardiogrāfiem. Izveidotās sistēmas specifikācijas ir šādas: mezglu skaits līdz 50, datu pārraides frekvence ir 200 Hz, mezgli ir izvietoti viena kvadrātmetra platībā. Autori ir izmantojuši hibrīdo laikdales daudzpiekļuves (TDMA) metodi un raidzuvēru ar 1 Mbps datu pārraides ātrumu. Tas apmierina nodaļā 1.3. definētās prasības pret aizkavi, tomēr nākamā nodaļā ir parādīts, ka eksistē plaša lietojumu sfēra, kur ir nepieciešami vēl labāki rādītāji.



4.1. att. Eksistējošie bezvadu sensoru tīklu industriālie standarti

Apskatot esošo stāvokli [38, 40, 61] industriālā tipa bezvadu tīklu standartos, var definēt trīs: *Zigbee*, *WirelessHART* un *ISA100* (att. 4.1.). Šo standartu galvenā ideja ir piedāvāt konkrētus algoritmus un protokolus bezvadu tīklu izmantošanai industriālām vajadzībām. Visi šie standarti ir bāzēti uz IEEE 802.15.4 standarta un tādējādi manto tā veikspēju un aizkaves lielumu. IEEE 802.15.4 standarta aizkaves testu rezultātus var redzēt sadaļā 3.1. Lai arī standarta lietošana neļauj izveidot bezvadu tīklu ar nepieciešamajiem aizkaves rādītājiem, tomēr ir vērts apskatīt minēto protokolu īpatnības.

WirelessHART standartā laikspraugas lielums ir fiksēts — 10 ms [40]. Vadoties pēc nodaļā 1.3. aprakstītajām specifikācijām, var redzēt, ka, kaut arī šis aizkaves laiks var būt piemērots aprakstītajiem lietojumiem, tomēr, kā tiks parādīts nodaļā 4.2., eksistē lietojumu kopa, kuros 10 ms nav pietiekams rādītājs. Pie tam praksē *WirelessHART* iekārtu ražotāji ierobežo tīkla cikla laiku līdz vienai sekunde, un *WirelessHART* datu plūsmai piemīt vienvirziena kustība no devējiem uz agregatoru. Šo iemeslu dēļ lietot to autonomās kontroles sistēmās, kur nepieciešams apmainīties ar datiem abos virzienos, ir problemātiski.

Gan *WirelessHART*, gan *ISA100* standartu grupa paredzēta ciešai integrēšanai ar eksistējošiem industriāliem standartiem un lietojumiem. *ISA100* ļauj pārsūtīt arī citu protokolu paketes, veidojot virtuālo «tuneli». Standarts iekļauj arī drošības aspektus un iespēju definēt ziņojumu prioritātes klases. Tas viss kopumā ļauj ātri ieviest bezvadu tīklu jau esošā infrastruktūrā. Neskatoties uz to, ka *ISA100* izmanto citu standarta tīkla piekļuves mehānismu nekā IEEE 802.15.4, to aizkaves lielums nav pietiekami mazs darbā izvirzītajiem mērķiem. Kā raksta *ISA100* standarta dibinātāji, «šis standarts ir paredzēts lietojumiem ar 100 ms lielu aizkavi» [28].

6LowPAN un Zigbee standarti netika pētīti sīkāk, jo tie piedāvā papildu funkcionalitāti augstākos OSI modeļa līmeņos un balstās uz IEEE 802.15.4 standartu, tādējādi mantojot tā veiktspēju un aizkaves lielumu [16]. IEEE 802.15.4 standarta aizkaves testa rezultāti izklāstīti iepriekšējā nodaļā.

Var secināt, ka neviens no esošajiem standartiem un praktiski realizētajiem sensoru tīkliem nevar risināt promocijas darbā definēto uzdevumu, jo aizkaves laiks ir pārāk liels.

4.2. Bezvadu tīkla piekļuves protokola realizācija laika kritiskā lietojumā

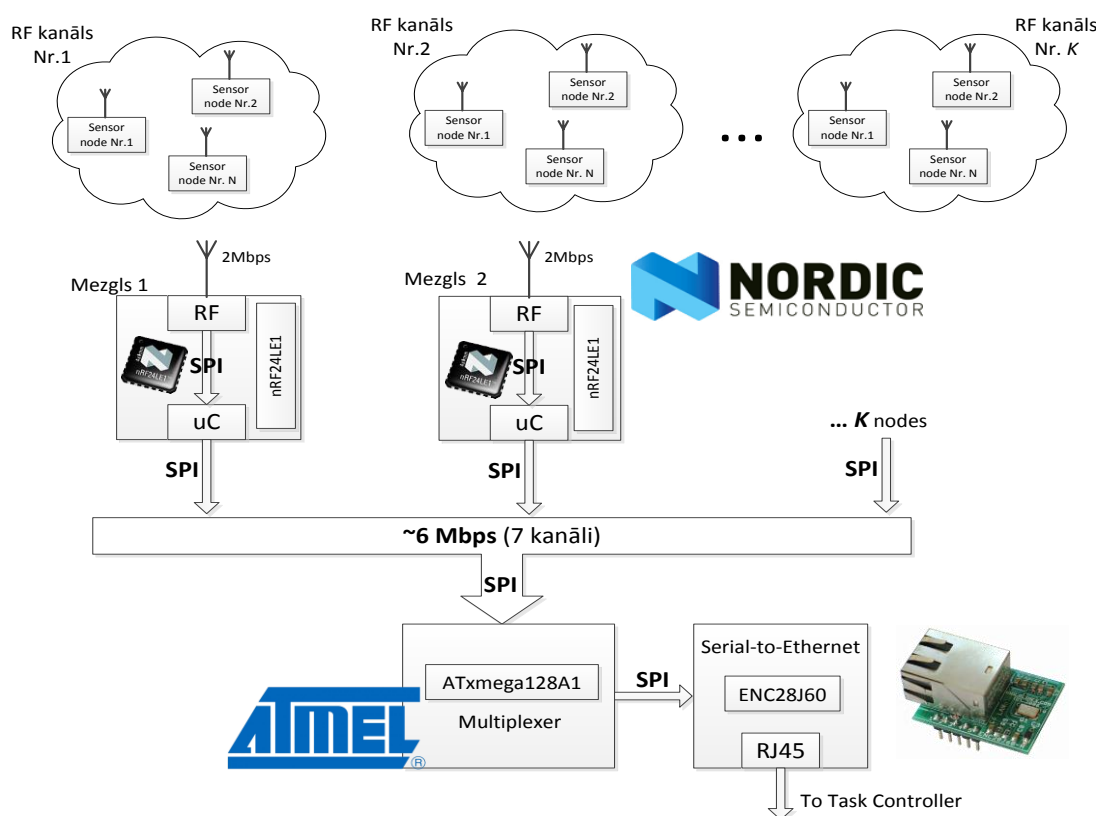
Viens no bezvadu sensoru tīklu uzdevumiem ir savākt un nodot mērījumu rezultātus centrālā mezglā. Mazas jaudas sensoru tīklos (IEEE 802.15.4) tradicionāli datu pārraides cikls ir mērāms sekundēs vai pat stundās. Ievadnodaļā tiek parādīts, ka industriālos lietojumos datu intensitāte var sasniegt 100 Hz (10 ms aizkave). Aplūkojot eksistējošos tīklus [5, 8, 53], var secināt, ka to iespējas nav pietiekamas. Promocijas darbā ir izstrādāts risinājums, kas ļauj savākt datus ar frekvenci līdz pat 300 Hz. Neskatoties uz augsto frekvenci, izstrādātais bezvadu sensoru tīkls tiecas samazināt enerģijas patēriņu, lai tā mezgli varētu strādāt pilnīgi autonomi. Piedāvātā sistēma ir notestēta arī praksē FP7 projekta ietvaros. Projekts «STRATOS» [52] ir mērķēts uz zemkopības efektivitātes palielināšanu.

Projekta rezultātā tika izveidots bezvadu sensoru tīkls ar 140 mezgliem, kas ir spējīgs vākt datus reālā laikā ar frekvenci līdz 300 Hz, kas ir izaicinājums mazas skaitļošanas jaudas bezvadu mezgliem. Tas ir sarežģīti it īpaši tādēļ, ka, tā kā šie mezli izmanto autonomo barošanu, tiem ir pēc iespējas vairāk jātaupa enerģija. Izvēlēta mērījumu frekvence ir saistīta ar lauksaimniecības iekārtas (piemēram, traktora) braukšanas ātrumu. Bezvadu sensori ir izvietoti uz traktora piekabes, un tiem jābūt spējīgiem kustības laikā savākt datus un reālā laikā nodot tos centrālajam mezglam.

Kopā ar tīkla piekļuves protokolu tiek aprakstīta bezvadu sensoru tīkla struktūra (att. 4.2.), tīkla sasaiste ar pārējām «STRATOS» projekta komponentēm, kā arī definēta un notestēta vides piekļuves metode. Kopā ar to aprakstītais tīkls var tikt izmantots arī citās jomās, kur ir nepieciešama datu pārraide kritiskās laika robežās.

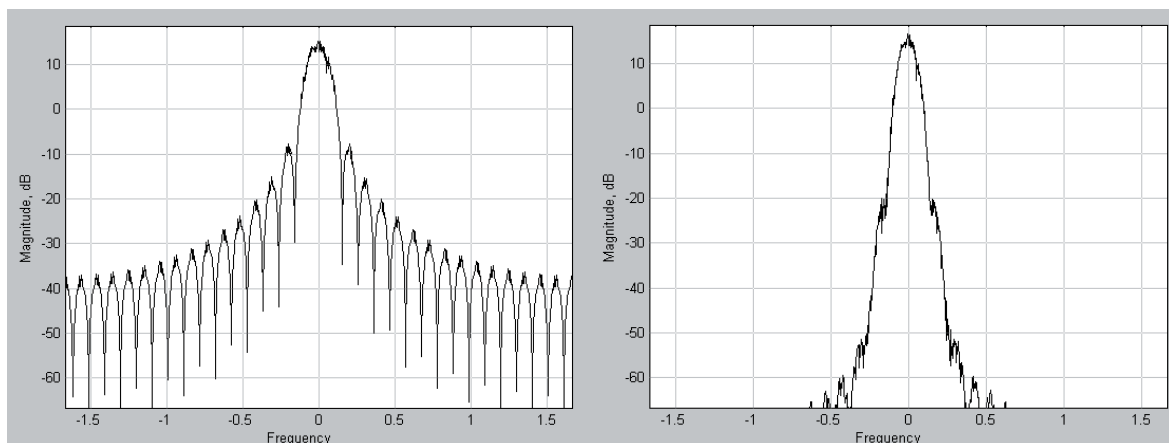
Uzdevumā definēta nepieciešamība samazināt enerģijas patēriņu, tāpēc tika apskatītas vairākas esošas pārraides tehnoloģijas un izvēlēts virziens ar vismazāko patēriņu. Iekārtas, kas ir bāzētas uz *WiFi* (IEEE 802.11) standartu kopas, neatbilst prasībām pret enerģijas patēriņu, jo, salīdzinot ar IEEE 802.15.4 standarta iekārtām, to var pārsniegt vairākās reizes, turklāt mezglu barošanas avots būs mazjaudīgs un bez papildu aprīkojuma nespēs nodrošināt vajadzīgo momentāno enerģijas patēriņu. Salīdzinot divus mazas jaudas datu pārraides protokolus IEEE 802.15.4 un IEEE 802.15.1 (*Bluetooth*), var redzēt, ka, neskatoties uz lielāku datu pārraides ātrumu (1 Mbps pret 250 Kbps), *Bluetooth* standartam vienlaikus tīklā var strādāt tikai astoņi mezgli. Salīdzinot standartus pēc normētās enerģijas patēriņa (mJ/Mbyte), ir redzams, ka *WiFi* un *UWB* (IEEE 802.15.3) tas ir vismazākais. Aprakstītajā lietojumā pārraides datu apjoms ir tikai daži baiti, tāpēc *UWB/WiFi* standarti nav pārāki. Papildus tam IEEE 802.15.4 standartam piemīt mazāka protokola sarežģītība [30], kas ļauj izmantot mikrokontrolierus ar mazāku skaitļošanas jaudu, tādējādi papildus samazinot enerģijas patēriņu. Šāda standarta izvēli apstiprina arī apskatītie raksti [30, 50].

Rezultātā uz IEEE 802.15.4 standarta bāzes tika izveidots tīkls, kuram tīkla piekļuves slānī tika izmantots izstrādātais algoritms. Veicot tīkla praktisko testēšanu, tika



4.2. att. Kopējā sistēmas shēma

secināts, ka piedāvātie risinājumi nav ideāli un ir vairākas problēmas, kas jāatrisina. Lai sasniegtu nepieciešamo mērījumu frekvenci (300 Hz) un mezglu summu (140), sākumā tika izmantota visa pieejamā bezlicenču josla (2,400-2,485 GHz). Pēc šo iestatījumu pārbaudes reālajā vidē tika atrasts traucējumu avots — esošie ofisa bezvadu tīkli (IEEE 802.11). Eksperimentos tika zaudēti apmēram 2 % no paketēm. Lai pārbaudītu kļūdu avotu, tika izmantots ārējais pārbaudes instruments. Tas ļāva saglabāt visas nosūtītās paketes, pat ja to kontrolsumma ir nepareiza. Tas liek secināt, ka esošie *WiFi* tīkli traucē sensoru tīklu. Viss pieejamais joslas platums ir aizņemts ar sensoru tīkla paralēlajiem kanāliem, tāpēc iespēja sadalīt tīklus pēc frekvenču diapazoniem nepastāv. Kopā ar radio signālu traucējumiem tika konstatētas problēmas arī ar sinhronizācijas kvalitāti. Tas noveda pie samērā ilga aizsarglaika izmantošanas un attiecīgi — palielināta enerģijas patēriņa. Tālāk ir aprakstīts šīs problēmas risinājums. Pašreizējā radio modulācijas tehnika izmanto 2 MHz kanālus ar 3 MHz aizsargjoslu starp kanāliem. Attēlā 4.3. pa kreisi var redzēt, cik neefektīvi tiek tērēta frekvenču josla. Lai uzlabotu efektivitāti, tika izvēlēta cita pārraides tehnoloģija, kas balstās uz *GSFK* signāla modulācijas metodi, un rezultātā aizsargjosla starp atsevišķiem kanāliem nav vajadzīga. Uzlabojot efektivitāti, septiņi kanāli aizņem tikai 14 MHz no kopējā 85 MHz ISM diapazona, tāpēc divi *WiFi* kanāli varētu darboties bez traucējumiem un netraucēt pašam sensoru tīklam.



4.3. att. Esošie (pa kreisi) un izstrādātie (pa labi) signālu modulācijas spektri

Attēlā 4.2. redzama pilna sistēmas shēma, sākot no fiziskiem sensoriem līdz uzdevumu kontrolleram (*Task Controller* — *TC*). Sensoru mezglu un *TC* sasaistei izmanto septiņus *nRFGo* mezglus, kas darbojas kā *TDMA* vadītāji. Katrs mezgls apkopo datus no savas lokālās grupas (viens frekvenču kanāls). Mezgli ir atdalīti pa frekvencēm, tāpēc traucējumi starp tiem nerodas. *Atmel ATxmega128A1* tiek izmantots kā multiplexors, kas apkopo caur *SPI* saņemtos datus no katra *TDMA* vadītājmezgla. Projekta partneru institūti

pārbaudīja starpniekierīces (multipleksoru un *ethernet* pārveidotāju) un ziņoja par to spēju nogādāt nepieciešamo 6 Mbps datplūsmu.

4.3. Bezvadu tīkla modelēšana lietojot laika kritisku piekļuves algoritmu

«STRATOS» projektā realizētajam tīklam ir nepieciešams ne mazāk par 140 mezgliem, un praktiski notestēt tik lielu tīklu ir samērā sarežģīti. Tāpēc tika izmantota tīklu simulācijas metode, kas tika verificēta četru mezglu scenārijā ar praktiskā tīkla palīdzību.

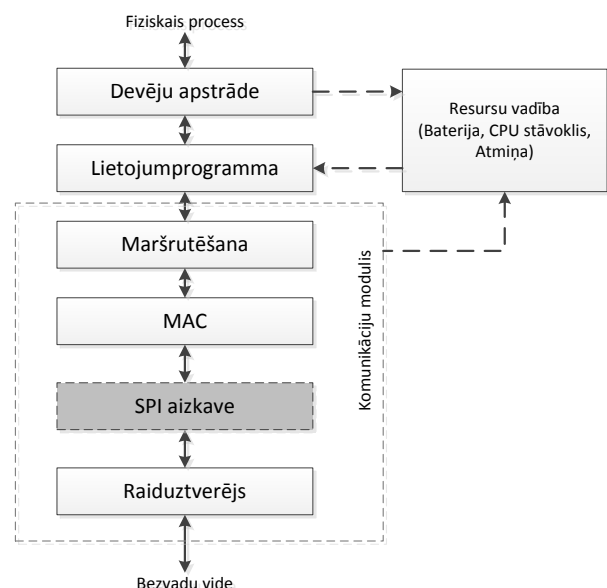
Izvēloties modelēšanas rīku, ar kuru tiktu pārbaudīta tīkla piekļuves metode, tika izskatītas trīs programmas: *ns-2/3* [35], *OPNET* [37], *OMNeT++* [36]. Rezultātā tika izvēlēts *Castalia* rīks (*OMNeT++* paplašinājums), kas ir pietiekami vienkāršs un ar kura palīdzību var ātri sākt darbu. Tam piemīt visas īpašības, kuras ir plānots pārbaudīt modelējamā tīklā. Piemēram:

- iespēja veidot radio kanāla modeli, balstoties uz reāliem izmērītiem datiem;
- radio aparātūras modeļi, kas izveidoti uz reālu mikroshēmu bāzes;
- sasaiste ar reāliem fizisko lielumu sensoriem;
- mezglu laika kristālu neprecizitātes un mezglu enerģijas patēriņa modelēšana;
- ir pieejami vairāki *MAC* un maršrutēšanas protokoli.

OMneT++ Castalia simulatora darbības shēma ir redzama attēlā 4.4.

Rezultātā tika izveidots sensoru tīkla modelis ar deviņiem kanāliem (grupām), katrā pa 17 bezvadu mezgliem. Modelis attēlo «STRATOS» projekta bezvadu tīkla uzbūvi.

Lai sasniegtu vēlamo atbilstību, esošais iekārtas modelis tika papildināts ar papildu funkciju, kas modelē aizkavi datu pārsūtīšanai starp μ CPU un radiomezglu. Aizkaves lielums tiek



4.4. att. *OMneT++ Castalia* rīka modelis

izrēķināts no pārsūtāmo datu apjoma un *SPI* kopnes definētā datu pārsūtīšanas ātruma. Verificējot šo aizkavi ar reālu iekārtu, modelim papildus tika pievienota konstanta aizkave, kas veido pārtraukuma apstrādes laiku. Visu izmaiņu rezultātā modeļa atšķirība no reāliem mērījumiem nepārsniedza 0,2 μ s, kas ir mazāk par 0,15 %. Šo testu rezultātā tika secināts, ka modelis atbilst realitātei un var veikt pilnā tīkla testus.

Veicot pilnā tīkla testus, uzreiz tika konstatētas problēmas, kuras nevarēja paredzēt, strādājot ar reāliem mezgliem nepilnā tīklā: pēdējais mezgls kadrā dažreiz nevarēja pārraidīt savus datus. Iemesls tam bija laika kristāla neprecizitāte («dreifs»). Katrs no mezgliem uztur savu laika atskaiti, lai precīzi noteiktu savas laikspraugas laiku. Kristāli, kuri tiek izmantoti laika veidošanai, nav ideāli. Viena mezgla neprecizitāte ir zema, salīdzinot to ar laikspraugas ilgumu (1 μ s salīdzinājumā ar 133 μ s). Tomēr, kad 17 mezgli pārraida viens aiz otra, kopējā kļūda var būt lielāka nekā izveidotais aizsargintervāls starp laikspraugām (12 μ s). Testu rezultāti uzskatāmi demonstrēja, ka mezglu aparātūras parametriem ir nozīmīga loma *TDMA* protokolu darbības kvalitātē. Šādi parametri ir, piemēram, kvarca kristālu precizitāte, radio mezgla raidītāja frekvences uzstādīšanas aizkave un citi. Rezultātā var secināt, ka modeļa veidošanā ir stingri jāpieturas pie konkrētas aparātūras, jo *TDMA* tipa algoritmos aparātūras ietekme ir ievērojama.

4.4. Vadības sistēmas novērtēšana eksistējošā industriālajā objektā

Nodaļā 3.2. aprakstītais tīkla piekļuves princips un sistēmu formalizācijas metode (nodaļa 2.2.) tika testēti reālā objektā — Somijas vēju plūsmas tuneļa [59] vadībā. Esošā sistēma ir izstrādāta, izmantojot tikai ar vadiem savienotus mezglus. Sistēma atradās būves stadijā, tāpēc bija iespēja notestēt piedāvāto metožu lietojamību, netraucējot sistēmas darbību.

Kopumā apskatāmajā vadības sistēmā ir 143 diskrētie un 37 analogie vadības signāli. Pie tam 84 diskrētie signāli ir atdalīti no centrālās vadības sistēmas un veido sadalītu vadības sistēmu. Līdz ar to vadība ir sasaistīta ar vizualizācijas sistēmu, kas realizē augstākā līmeņa vadības funkcijas, izmantojot 24 analogas vērtības un 260 diskrētus signālus. Sensori tika iedalīti divās klasēs: diskrētie (gala slēdži, pogas, palaidēju stāvoklis u. tml.) un analogie (temperatūra, spiediens, līmenis, plūsma utt.). Lai skaitliski novērtētu vadāmā objekta stāvokļa izmaiņas frekvenci ar diskrētu sensoru palīdzību, ir pietiekami iegūt to aktīvā stāvokļa izmaiņu skaitu vienā laikā vienībā. Noteikt šādu izmaiņu skaitu analogajiem devējiem šķiet neiespējami, jo to vērtības ir nepārtrauktas, t. i., var definēt

bezgalīgi lielu stāvokļu skaitu, tomēr, operējot ar reālām vadības sistēmām, ir vairākas lietas, kas būtiski ierobežo novērtējamo stāvokļu skaitu. Kā tika definēts sadaļā 1.2., bezgalīgas stāvokļu kopas problēmu var risināt ar analogo vērtību diskretizācijas palīdzību, turklāt šo diskretizēto vērtību skaits ir samērā neliels; vērtību skaitu praksē apraksta ar 8 līdz 16 bitiem [49]. Lai vēl vairāk samazinātu analogo vērtību stāvokļu kopu, ir jānovērtē pašu vadības algoritmu.

4.1. tabula

Industriālā objekta (vēju tunelis) signālu parametri

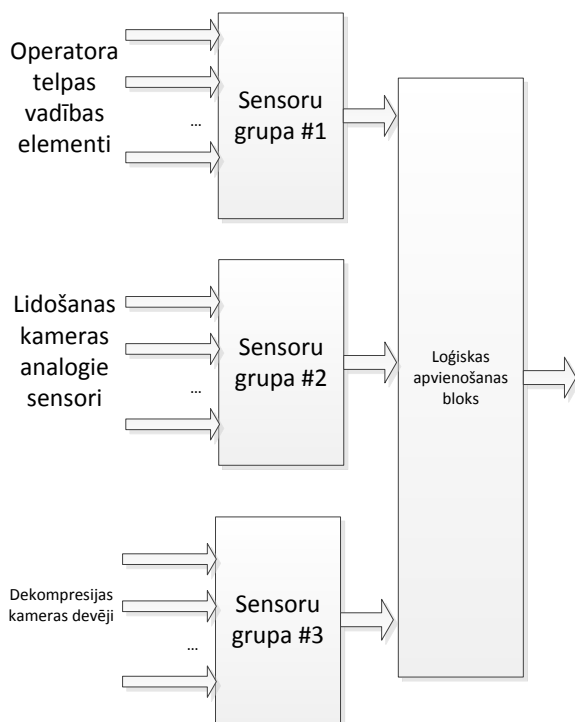
Ieejas plūsmas klase	Signālu grupas apraksts	Pielietotā frekvences iegūšanas metode	Maksimālā frekvence (Hz)
Diskrētas ieejas	Operatora vadāmās pogas	Aktīvo stāvokļu izmaiņas frekvence	2
Diskrētas ieejas	Gala pozīciju slēdži	Aktīvo stāvokļu izmaiņas frekvence	5
Diskrētas ieejas	Enkoderi	Aktīvo stāvokļu izmaiņas frekvence	50
Diskrētas izejas	Citi	Aktīvo stāvokļu izmaiņas frekvence	35
Attālinātās vadības stacijas diskrētas ieejas	Vārstu stāvokļi (atvērts/ciet)	Aktīvo stāvokļu izmaiņas frekvence	0.05
Attālinātās vadības stacijas diskrētas izejas	Vārstu stāvokļa maiņas komanda (atvērt/aizvērt)	Aktīvo stāvokļu izmaiņas frekvence	0.05
Analogas ieejas	Citi	PID algoritma laika konstante	110
Analogas izejas	Citi	Frekvenču pārveidotāju uzstādījumi	150

Lai iegūtu konkrētas skaitliskās vērtības, tika izmantots 34 kanālu «Intronix» loģiskais analizators [1]. Sistēmas darbības laikā tas tika secīgi pieslēgts pie esošās vadības sistēmas ieejām un izejām. Vadības sistēmas sprieguma salāgošanai (24 V) ar loģiskā analizatora sliekšni (15 V) tika izmantots vienkāršs rezistoru sprieguma dalītājs. Tabulā 4.1. ir attēlotas maksimālās sensoru stāvokļu maiņas frekvences, kas ir apkopotas pa grupām atbilstoši 2.1. nodaļas metodikai. Sistēmas ieejā atrodas plūsmu apvienošanas bloks. Tā struktūra ir parādīta 4.5. shēmā.

Izejot no formalizācijas shēmas, tika iegūti sistēmas kritiskie punkti. Tika nolemts izmainīt to, kā sensori ir grupēti, lai sadalītu signālus ar lielu frekvenci pa dažādām sensoru grupām (t. i., enkoderu signālmoduļus un analogās izejas uz frekvenču pārveidotājiem).

Eksperimentu gaitā tika uzkrāts daudz statistiskā materiāla, ko bija nepieciešams ātri apstrādāt, lai pārbaudītu rezultātu ticamību un koriģētu nākamo testu parametrus. Lai paātrinātu un atvieglotu šo procesu, tika izveidota «FRAD» veidne uz «R» [6, 56] valodas bāzes. *FRAD* — «Fast Result Analysis and Display» ir veidne datu automatizētai vizualizēšanai un analīzei.

Darbplūsma ir vienkāršota līdz minimumam: nokopēt datus → palaist skriptu → saņemt grafikus. Veidne sastāv no: «R» skripta datnes, parametru datnes.



Iespējamie uzdevumi, ko var veikt ar *FRAD* veidnes palīdzību:

- ātri saņemt datu kopsavilkumu,
- vizuāli salīdzināt datus (virknes dati, histogramma),
- lielu datu masīvu analīze,
- rezultātu publicēšana, ievērojot grafiku noformējumu prasības.

Izstrādātais rīks tika veiksmīgi izmantots esošo testu analīzei un arī Vācijas pētniecības institūta «ifak» ikdienas pētījumos. Rezultātā tika samazināts testa datu apstrādes laiks, un, tā kā *FRAD* ir atvērta

4.5. att. Loģiskās signālu apvienošanas princips

tipa produkts, par ko nav jāmaksā, to varēs izmantot visi institūta partneri, lai saņemtu vienotus rezultātus un veidotu vienotu darba procesu.

4.5. Secinājumi

Šajā nodaļā tika apkopoti bezvadu sensoru tīklu pētījumu un eksperimentu rezultāti, kas ietekmē tīklu praktisko realizēšanu. Nodaļas sākumā tika apskatīti reāli eksistējoši industriālā tipa tīklu protokoli, identificētas to problēmas un atšķirības no darbā izstrādātās pieejas. Piedāvātās pieejas izvēle tika pamatota un aprakstīta, ietverot gan signāla modulācijas un pārraides tehnoloģijas izvēles, gan tīkla piekļuves metodi.

Lai pierādītu izstrādātās sistēmas atbilstību prasībām, tika veikti vairāki teorētiskie un praktiskie pētījumi. Izstrādātās metodes tika pārbaudītas laboratorijas apstākļos un simulētas. Simulācijas vidē tika veikti papildu uzlabojumi, lai tā atbilstu reālo iekārtu un vides parametriem. Praktiskā algoritmu pārbaude tika veikta industriālā objektā ar reāliem sistēmas datiem. Datu apstrādes veikšanai tika izveidots speciāls testu datu priekšapstrādes un vizualizācijas rīks.

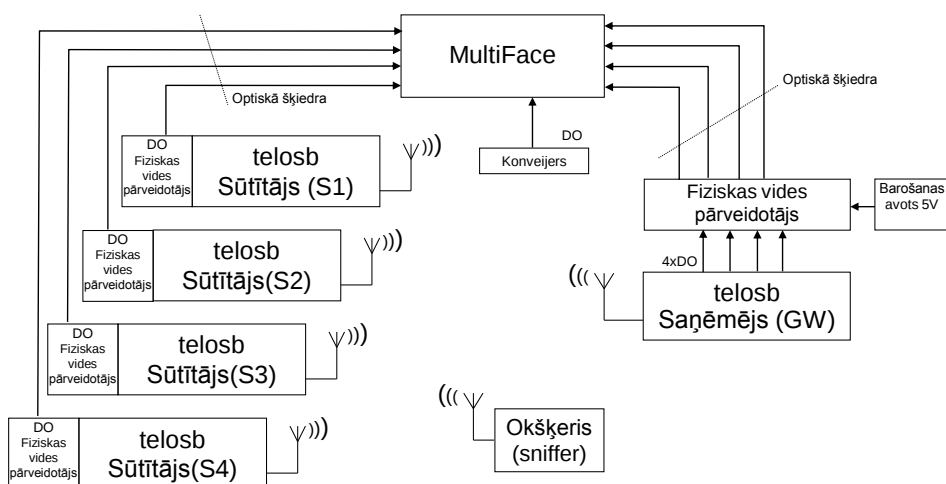
5. BEZVADU TĪKLU IZVEIDOŠANAS UN LIETOŠANAS PROBLĒMAS UN RISINĀJUMI

Atšķirībā no ikdienā lietojamiem WLAN tīkliem, IEEE 802.15.4 un citi sensoru tīklu protokoli paredz mazu datu pārraides ātrumu, ilgu autonomas darbības laiku un zemu gala iekārtas cenu. Sākotnēji industriālajos lietojumos bezvadu tīkli tika izmantoti, lai nolasītu devēju mērījumus, bet, tehnoloģijām attīstoties, bezvadu sakarus iespējams izmantot arī iekārtu vadībai. Tādējādi bezvadu tīkliem jānodrošina arī sakaru kvalitātes prasības.

5.1. Bezvadu tīklu darbības analīze industriālajā vidē

Lai būtu iespējams veikt eksperimentus un kvantitatīvi novērtēt bezvadu tīkla sakaru kvalitāti, tika izmantoti šādi kritēriji: latentums, trīce un pakešu zudumi. Šo kritēriju vērtības katram testam tika noteiktas, izmantojot speciāli šiem nolūkiem paredzētu iekārtu «MultiFace» [34] (att. 5.1.). Pakešu zudumi daļēji tika apvienoti ar latentumu. Pakete tika uzskatīta par zaudētu, ja ir pārsniegta noteikta laika robeža. Tātad saņemto pakešu skaits ir noteikts šādi (5.1.):

$$N_{RX} = \sum_{i=1}^{N_{TX}} f_{RX}(i), f_{RX} = \begin{cases} 1: \forall t_{TT_i} \leq t_{TT_{max UL}} \\ 0: \forall t_{TT_i} > t_{TT_{max UL}} \end{cases} \quad (5.1.)$$



5.1. att. Iekārtu saslēgšanas shēma

Testa saime satur divas galvenās grupas: kustīgo mezglu scenāriji, kuros tika pārbaudīta kustības ātruma ietekme, un statisko mezglu scenāriji, kuros tika pārbaudīti

dažādi vides apstākļi un pārraides režīmi. Visos testos tika pieļautas dažādas maršrutēšanas iespējas.

Attēlā 5.1. redzamā shēma parāda iekārtu saslēgšanas veidu. Ir četri sūtītāji un viens saņēmējs. Ar optisko šķiedru tie pievienoti «*MultiFace*» iekārtasi Paketes sūtīšanas un saņemšanas brīdis tiek fiksēts ar «*MultiFace*» iekārtu, vadoties pēc *telosb* mezglu ģenerētā diskrētā signāla.

Pilno testu rezultātu aprakstu var izlasīt promocijas darbā, tomēr īss apkopojums sniegts arī šeit. Balstoties uz literatūrā esošajiem rakstiem [29], tika izpētīta bāzes frekvences nestabilitāte. Tika pārbaudīti divi mezgli, datu saņēmējs bija ārpus temperatūras kameras, un sūtītājs tika ievietots kamerā. To darbība tika pārbaudīta pie 20° C un 70° C. Definēto kritēriju atšķirība bija zem viena procenta, un raidītāja centrālās frekvences nobīde netika pamanīta, tādēļ var secināt, ka pārbaudītajā temperatūras diapazonā testētie mezgli strādā stabili.

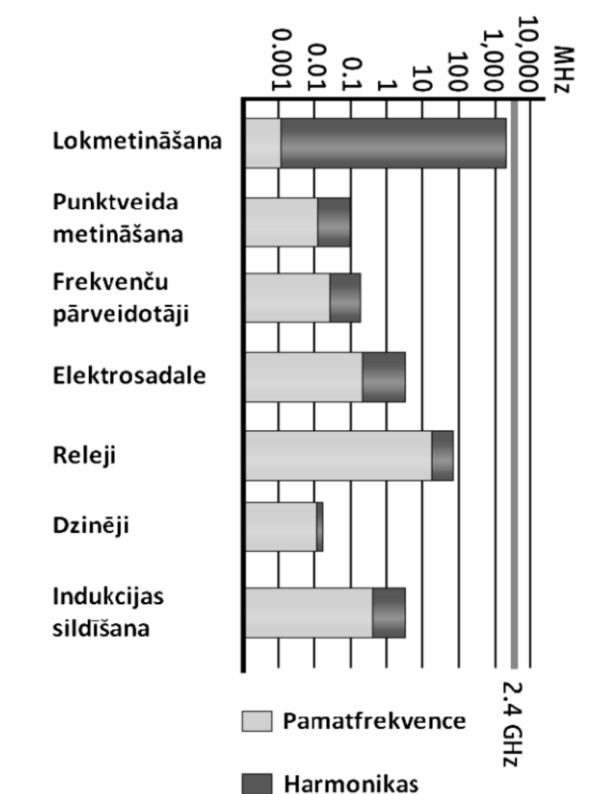
Ar vēl viena testa palīdzību tika pārbaudīta bezvadu sakaru darbība mitruma ietekmē. Bezvadu iekārtu lietotāju atsauksmēs bieži vien tiek pieminētas sakaru kvalitātes problēmas sliktu laika apstākļu dēļ [39]. Ražošanas telpās bieži tiek novēroti pastiprināta mitruma apstākļi, tāpēc ir nepieciešams pārbaudīt to ietekmi uz bezvadu sakariem. Eksperiments tika izveidots līdzīgi temperatūras testam, bet šajā gadījumā kamera tika noregulēta tā, lai uzturētu 90 % RH mitrumu bez kondensēšanas. Rezultātā netika pamanīti sakaru kvalitātes pasliktinājumi.

Interesanti rezultāti tika iegūti, pārbaudot elektromagnētiskā trokšņa iedarbību uz bezvadu datu sakaru kvalitāti. Vācijas elektrisko un elektronisko iekārtu ražotāju asociācija publicēja pētījumus par bezvadu sakaru līdzāspastāvēšanu, kuros tika minēti traucējumi, kuri var tikt novēroti industriālā vidē (att. 5.2.). Kā redzams attēlā, lielāko problēmu rada lokmetināšana, jo elektromagnētiskā izstarojuma harmonikas var sasniegt 1 GHz frekvenci. Tomēr pētījums apgalvo, ka neviens no traucējumiem nesasniedz bezvadu sakariem izmantoto 2,4 GHz frekvenci. Atoram nebija pilnīgas informācijas par apstākļiem, kuros veikts aprakstītais eksperiments, tāpēc tika nolemts veikt papildu eksperimentu. Testā tika izmantots elektromagnētiskā trokšņa avots — parastā elektroluminiscences lampa. Izmantojot spektra analizatoru, tika mērīts elektromagnētiskais troksnis, kuru luminiscences lampa rada izslēgšanas brīdī. Rezultātā tika secināts, ka elektroluminiscences lampas izslēgšanas brīdī elektromagnētiskais troksnis var sasniegt pat 5 GHz frekvenci. Trokšņu signāla jauda:

– 20 dBm pie 430 MHz

- 10 dBm pie 2,4 GHz
- 2 dBm pie 5 GHz

Troksnis ilgst mazāk par 0,25μs, tādēļ tas neiespaido IEEE802.15.4 komunikāciju, jo viena bita pārraides laiks ir 4 μs. Datu pārraidei ir izmantota redundance, jo katri četri biti tiek kodēti ar 32 simboliem, kuri jau ir pārraidīti ēterā, tādējādi, pateicoties redundancei, bits tiek pārraidīts bez kļūdām.



5.2. att. Industriālās vides trokšņu avoti

eksperimentu kopējai statistikai, kurā atspoguļojas, cik daudz atkārtoto sūtījumu ir nepieciešams, lai pakete nonāktu līdz saņēmējam. Var secināt, ka paketes piegādes varbūtība aug eksponenciāli ar katru nākamo sūtījumu, tātad pietiek ar trim atkārtojumiem, lai ar 99,8 % varbūtību [7] piegādātu datus.

No eksperimenta izriet prasība ievērot elektroluminiscences lampu veidoto troksni. Trokšņa jauda nav liela, tāpēc ir pietiekami novietot bezvadu iekārtu metra attālumā no lampas, un troksnis vairs nav jūtams. Troksnis parādās tikai lampas izslēgšanas (ieslēgšanas brīdī tas ir ievērojami vājāks) brīdī, tāpēc var secināt, ka to rada lampas palaidējs, tādējādi, izmantojot elektronisko palaidēju, ir iespējams nepieļaut trokšņa veidošanos vispār.

Lai veidotu kopīgos testu secinājumus, jāpievērš uzmanība visu

5.2. Bezvadu tīklu drošuma un drošības problēmas un to risinājumi

Bezvadu sensoru tīklu izstrādātājiem jārisina vairāki uzdevumi: jāizvēlas aparatūra, komunikāciju protokoli un hierarhija. Neskatoties uz to, ka tīkls strādā perfekti ideālos laboratorijas apstākļos, tas varētu nebūt gatavs reālajiem apstākļiem, kas ir pilni gan ar dabiskiem, gan tīša veida draudiem. Bezvadu sensoru tīkliem jābūt izturīgiem pret ārējām ietekmēm, jo īpaši, ja tīkli tiek izmantoti industriālām vajadzībām, kad iegūtie dati varētu

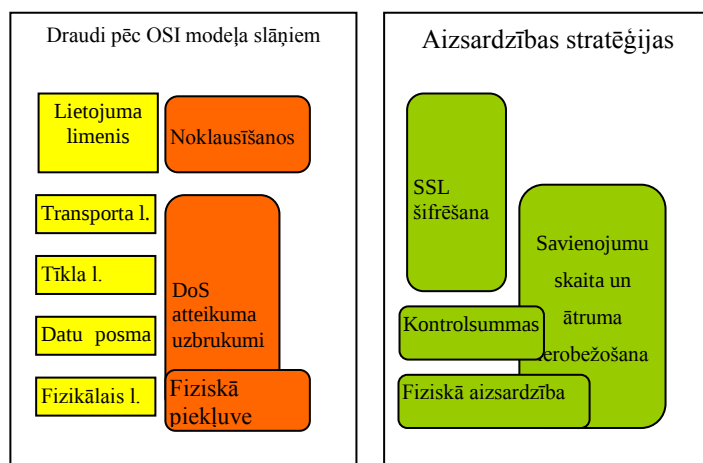
būt kritiski svarīgi. Tāpēc bezvadu sensoru tīkliem jābūt aizsargātiem, un drošības jautājumus jānovērtē uzmanīgi jau tīkla projektēšanas fāzē.

Promocijas darbā tika apskatīti primārie drošības jautājumi bezvadu sensoru tīklos. Pētījumi tika veikti saskaņā ar ES «*Seventh Framework Programme*» (FP7) projektu «*ProSense*» [44], testu rezultāti norāda uz konkrēties drošības jautājumiem katrā izmantošanas piemērā, kā arī apraksta iespējamo draudu novēršanas veidus.

Promocijas darbā tiek sīkāk analizēta tīklu darbība piecos praktiskos scenārijos: ugunsgrēka detektēšana, mājas automatizācija, *RFID* atgādinājums, dzelzceļš, ceļa uzraugs. Tālāk ir redzams šo scenāriju draudu un aizsardzības tehnoloģiju apkopojums saskaņā ar *OSI* modeļa slāņiem (att. 5.3.).

Tālāk dots veikspējas testu rezultātu apkopojums. Rezultāti ir šādi: etalona eksperimentā bez šifrēšanas maksimālā inicializācijas aizkave bija 0,9 sekundes, aizsargātā scenārijā ar RC4 šifrēšanu maksimālais aizkaves laiks ievērojami pieauga — līdz 7,8 sekundēm. Neskatoties uz samērā lielo aizkavi, tā nerada problēmas, jo parādās tikai darba sākumā. Tas pierāda, ka lietojumos, kur gala lietotājs ir cilvēks, sensoru mezglu skaitļošanas jauda ir pietiekama, lai realizētu šifrētos sakarus bez ietekmes uz lietojuma kvalitāti.

Testi apstiprina, ka datu šifrēšana, izmantojot RC4 algoritmu, nerada pārtēriņus. Paketes dati aizņem 20 baitus no kopējā apjoma. Pēc absolūtās skalas virstēriņš nav pārlieku liels (20 baitu nodošana aizņem mazāk par 1 ms). Praksē bezvadu sensori nosūta nelielu datu apjomu, un derīgo datu izmērs ir pielīdzināms virstēriņam, tāpēc datu pārraides efektivitāte ir puse no maksimālā iespējamā. Lai palielinātu efektivitāti, datiem jābūt buferizētiem, tos jāšūta lielos blokos, kuru apjoms ir tuvs maksimālajam pakešu apjomam (ne vairāk par ~ 1,5 KB). Šajā gadījumā efektivitāte ir > 99 %



5.3. att. Drošības draudu un aizsardzības tipu sadalījums pa *OSI* modeļa slāņiem

Pārbaudot šifrēšanas ietekmi uz enerģijas patēriņu, tika secināts, ka *SSL* režīmā sprieguma kritums ir pieaudzis par 48 %, salīdzinot ar testiem, kuros netika izmantota

šifrēšana. Galvenais iemesls ir nosūtīto datu virstēriņi un mikroprocesora slodzes pieaugums šifrēšanas datu dēļ. Jāatzīmē, ka šis tests nevar būt pilnīgi precīzs, jo sprieguma kritums nav lineārs, tomēr tests pierāda, ka enerģijas patēriņa izmaiņas eksistē.

Var secināt, ka arī sensoru mezglos, kuru skaitļošanas resursi ir stipri ierobežoti, ir iespēja ieviest šifrēto datu pārraidi, līdz ar to kopā ar pārējiem aizsardzības mehānismiem ir iespēja panākt gan drošumu, gan drošību.

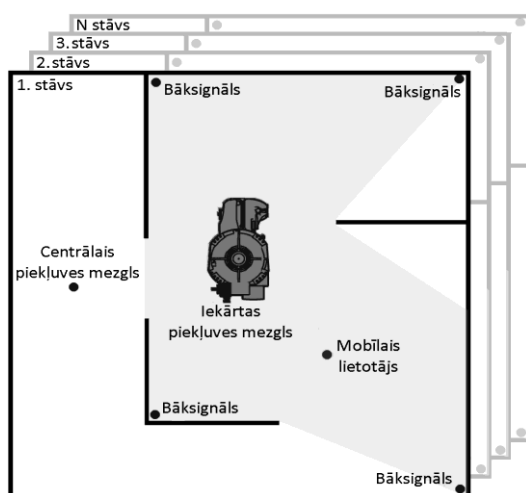
Neskatoties uz visiem drošības aspektiem, sistēmas ir jāaizsargā ne tikai no iebrukumiem no ārpuses, bet arī no pašu lietotāju bīstamās uzvedības. Datorsistēmās šo problēmu parasti risina, sadalot sistēmas vadības privilēģijas starp administratoru un lietotāju, un lietotājam parasti nav ļauts piekļūt kritiskajiem resursiem. Tomēr industriālās sistēmās lietotājam (iekārtas operatoram) ir vienlaikus gan jānodrošina plašas vadības iespējas, gan arī lietotājs jāaizsargā no bīstamiem gadījumiem. Risinājums šai problēmai ir operatora darbības kontroles mehānismu izmantošana, kas neļauj operatoram veikt bīstamas darbības.

Kā piemērs šādas problēmas risinājumam ir apvienot lietotāja (industriālas iekārtas operatora) bezvadu piekļuvi ar drošības kontroli. Lai uzlabotu rūpniecības iekārtas operatora mobilitāti un darba kvalitāti, tiek izmantoti bezvadu operatora paneļi. Vadot iekārtas, operators varētu nejauši vai ar nodomu zaudēt vizuālo kontaktu ar iekārtām, starp kurām vēl aizvien pastāv bezvadu savienojums. Ir ļoti bīstami vadīt iekārtu, nezinot tās pašreizējo stāvokli.

Tāpēc, kontrolējot lietotāja piekļuvi resursiem, ir svarīgi zināt lietotāja pašreizējo fizisko atrašanās vietu nevis tikai identificēt ar paroles palīdzību. Informācija par lietotāja pašreizējo fizisko atrašanās vietu ievērojami palielina funkcionālās iespējas, darba efektivitāti un iespējamās lietojuma jomas.

Resursu piekļuves kontroles uzdevums ir formulēts šādi: nepārtraukti sekot lietotāja atrašanās vietai, kamēr tiek izmantoti kontrolētie bezvadu resursi; pārvaldīt lietotāja tiesības piekļūt resursiem, izmantojot iepriekšdefinētu neapstiprinātās zonas karti, turklāt neietekmējot sākotnējo lietotāja identificēšanas mehānismu. Lietotāja lokalizēšanas kļūda nedrīkst būt lielāka par dažiem desmitiem centimetru: attālumu, kas ir samērojams ar iespējamo bezvadu elementa atrašanās vietas maiņu.

Esošās sistēmas nav spējīgas nodrošināt nepārtrauktu lietotāju piekļuves kontroli ar iepriekš definēto lokalizēšanas precizitāti [50]. Izstrādātā pieeja atrisina minētās problēmas, un salīdzinoši augstās precizitātes dēļ ir iespējams radīt detalizētas neapstiprināto zonu kartes operatoram.



5.4. att. Sistēmas arhitektūra

neapstiprināto piekļuves zonu karti. Sistēmas shēma parādīta attēlā 5.4. Lietotāja pozīcijas noteikšanai tiek izmantoti trīs vienādojumi un ir nepieciešami trīs bāksignāli. Pievienojot vēl dažus vienādojumus ar papildu bāksignālu stacijām, lokalizēšanas kļūda tiks samazināta.

Ņemot vērā izpētīto informāciju par sistēmu topoloģiju un doto uzdevumu, tika izvēlēta šāda sistēmas topoloģija: lokālās piekļuves kontrolēšana savienojumam ar centralizēto sistēmu, kas uzglabā lietotāju piekļuves tiesības, un neapstiprināto zonu kartes. Lokālā sistēma bez centrālās sistēmas palīdzības nepārtraukti kontrolē lietotāju piekļuvi. Tikai lietotāja identificēšanas laikā lokālā sistēma savienojas ar centrālo sistēmu, pieprasot lietotāja piekļuves informāciju un

DARBA REZULTĀTI UN SECINĀJUMI

Promocijas darbā tika analizēta bezvadu sensoru tīklu darbība laika kritiskos vadības uzdevumos objektiem ar nelineāru un dinamisku raksturu. Darbs tika praktiski pārbaudīts reālos industriālos objektos, un darba rezultāti ir izmantoti vairākos starptautiskos Eiropas projektos. Darba rezultātā ir izveidoti jauni algoritmi, rīki un metodes, ar kuru palīdzību ir iespējams formalizēt esošo vadības sistēmu, realizēt bezvadu datu pārraidi un veikt papildu pētījumus ar izveidoto vai citu bezvadu tīklu.

Darba galvenie rezultāti

- 1) Ir definēti kvantitatīvi kritēriji pētāmo objektu aprakstīšanai. Kā galvenais kritērijs tika izvirzīta datu sūtīšanas aizkave. Ņemot vērā lietojumu sfēru (industriālas sistēmas), ir definēta konkrēta pārraides aizkaves vērtība, kuru nepārkāpjot izstrādātais risinājums ļauj izmantot bezvadu datu pārraidi jaunā sfērā.
- 2) Specificēti sistēmu posmi, kuri ir kritiski svarīgi datu pārraidei. Darbā ir pārbaudīti vairāki esošie datu pārraides standarti un rezultātā ir pierādīts, ka kritiskais datu pārraides tīkla posms ir piekļuve tīkla videi. Eksperimentu gaitā ir demonstrēta esošo tīklu nespēja veikt datu pārraidi vadības sistēmās definētajā sfērā.
- 3) Izstrādāta metode nelineāru un dinamisku objektu formalizācijai. Metodes priekšrocība ir tāda, ka sistēmas ieejā ir iespējams lietot gan diskrētus, gan analogus signālus. Ar metodes palīdzību sistēma tiek aprakstīta ar nelielu parametru kopu. Izstrādātā metode pamatā izmanto Hameršteina bāzi un atdala sistēmas nelineāro un statisko daļu no dinamiski-lineārās.
- 4) Izveidots jauns tīkla piekļuves algoritms, kas apvieno esošo standartu elastību ar iespēju pārraidīt datus ar noteiktu aizkavi. Izveidotais algoritms tika praktiski pārbaudīts FP7 projektā, kur parādīja, ka spēj veikt datu apmaiņu starp 140 mezgliem ar frekvenci 300 Hz. Salīdzinājumam: šobrīd esošās sistēmas spēj strādāt ar frekvenci ne vairāk par 200 Hz tīklā ar 50 mezgliem.
- 5) Izstrādāts uzlabojums esošajam tīkla modelēšanas un simulācijas rīkam «*Castalia*». Jaunā funkcionalitāte realizē precīzu simulāciju tīklos ar sūtīšanas intervāliem zem 5 ms, kas tiek panākts ar jauna programmatūras bloka ieviešanu, kas modelē datu pārraidi starp centrālo skaitļošanas mezglu un radio modema atmiņu. Izmantojot uzlaboto simulācijas rīku, ir pārbaudīts izstrādātais

tīkla piekļuves algoritms pilna izmēra tīklā (140 mezgli), ko realizēt ar reālo aparatūru ir sarežģīti un dārgi.

- 6) Ir izveidots rīks, kas ļauj veikt eksperimentālo datu apstrādi un vizualizāciju. Tā priekšrocības, salīdzinot ar esošiem rīkiem, ir atvērts, un līdz ar to brīvi pieejams kods un automātiskais režīms, kas ļauj veikt apstrādi bez cilvēka līdzdalības.
- 7) Industriālo tīklu darbība ir analizēta reālos scenārijos, lai definētu iespējamās draudus tīkla drošībai un drošumam. Tika atrasti un specificēti iepriekš nezināmie drošumu traucējošie avoti un piedāvāti risinājumi šo avotu likvidēšanai.

Rezultātā var secināt, ka, izmantojot izstrādātos algoritmus un metodes, ir iespējams praktiski realizēt bezvadu datu pārraidi laika kritiskās vadības sistēmās ar nelineāru un dinamisku raksturu. Secīgi izmantojot sistēmas formalizācijas metodi, kritisko punktu atrašanu un arhitektūras plānošanu, var definēt datu pārraides kritiskos punktus un prasības pret laika parametriem. Zinot šos parametrus, ar piedāvāto tīkla piekļuves algoritmu ir iespējams īstenot datu pārraidi bezvadu formātā. Testējot sistēmu, ir iegūta pārliecība, ka sistēma ir lietojama arī reālos apstākļos ar elektromagnētisko trokšņu avotiem un uzbrukumiem drošības sistēmām.

Turpmākie pētījumu virzieni:

- paplašināt lietojuma sfēru, izmantojot izstrādātos algoritmus decentralizētās autonomās sistēmās ar vairāku simtu mezglu skaitu;
- integrēt datu drošības risinājumus esošā bezvadu tīklā;
- izpētīt maršrutēšanas problēmas tīklā ar lielu (virs 100) mezglu skaitu.

LITERATŪRA

- [1] 34 channel LOGICPORT logic analyzer / Internet: <http://www.pctestinstruments.com/>
- [2] A CTIA. Wireless Industry Indices Report: Year-End 2012, CTIA-The Wireless Association, February 2013
- [3] Asarin E., Maler O. Scheduling with timed automāta // Theor. Comp. Sc. 354.2, 2006, pp. 272–300
- [4] Asby W.R. Design for a Brain. – London: Chapman and Hall, 1952 – 260 p.
- [5] Baggio A., Wireless sensor networks in precision agriculture // ACM Workshop on Real-World Wireless Sensor Networks, Stockholm, Sweden, 2005
- [6] Bliznuk D. Fast Results Analysis and Display // The R User Conference Book of Contributed Abstracts, University of Warwick, 2011, 27. lpp.
- [7] Bliznyk D. IEEE 802.15.4 tīklu pētīšana industriālā vidē // RTU zinātniskie raksti. 5. sēr., Datorzinātne. – 42. sēj., 2010, 68.–73. pp.
- [8] Boukerche A., Werner N. P., Borges A. A fast and reliable protocol for wireless sensor networks in critical conditions monitoring applications // In Proceedings of the 7th ACM international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems MSWiM '04, ACM, New York, NY, USA, 2004, pp. 157–164
- [9] Bouy P., Fahrenberg U., Larsen G., Mark N. Quantitative analysis real-time systems using priced timed automata // Communications of the ACM, september 2011, vol. 54, no. 9, pp. 78–87
- [10] Bouy P., Fahrenberg U., Larsen G., Mark N. Quantitative analysis real-time systems using priced timed automata // Communications of the ACM, september 2011, vol. 54, no. 9, pp. 78–87
- [11] Buettner M., Yee G., Anderson E., Han R. X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks // In Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems, SenSys '06, ACM, New York, NY, USA, 2006, pp. 307–320
- [12] Buttazz G. Hard Real-Time Computing Systems: Predictable Scheduling Algorithms and Applications. – Springer-Verlag GmbH, 2011 – 521 p.
- [13] Cassez F. et al, Efficient on-the-fly algorithms for the analysis of timed games // In Proc. 16th International Conference on Concurrency Theory (CONCUR'05), Lecture Notes in Computer Science 3653, Springer, 2005, pp. 66–80
- [14] Chen C., Pai H. EcoDAQ: A Case Study of a Densely Distributed Real-Time System for High Data Rate Wireless Data Acquisition // Proceeding Proceedings of the 2008 14th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications IEEE Computer Society Washington, DC, USA 2008
- [15] Chong K.H., Li G.C.Y. PID control system analysis, design, and technology // IEEE Transactions on Control Systems Technology 13, 2005, pp. 559–576
- [16] Cody-Kenny B., Guerin D., Ennis D. Performance evaluation of the 6LoWPAN protocol on MICAz and TelosB motes // In Proceedings of the 4th ACM workshop on

- Performance monitoring and measurement of heterogeneous wireless and wired networks (PM2HW2N '09). ACM, New York, NY, USA, 2009, pp. 25–30
- [17] Crossbow Technology Inc., Crossbow Technology Releases TelosB Mote Platform / Internet: http://www.xbow.com/pdf/Telos_PR.pdf
 - [18] Czapski, P.P. A Survey: MAC Protocols For Applications Of Wireless Sensor Networks // TENCON, 2006 IEEE Region 10 Conference, ISBN: 1-4244-0548-3, 2006, pp. 1–4
 - [19] D'Apice C., Manzo R., Piccoli B. Simulation and Optimal Routing of Data Flows Using a Fluid Dynamic Approach // Telecommunications Networks – Current Status and Future Trends, Dr. Jesús Ortiz (Ed.), InTech, 2012
 - [20] Díaz S. E., Pérez J. C., Mateos A. C., Marinescu M. M., Guerra B. B. A novel methodology for the monitoring of the agricultural production process based on wireless sensor networks // Computers and Electronics in Agriculture, Volume 76, Issue 2, May 2011, pp. 252–265
 - [21] Energy capacity list. Internet // http://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density
 - [22] Eskinat E., Johnson S.H. Use of Hamerstein models in identification of nonlinear systems // AIChE J., 1991, pp. 255–268
 - [23] German Electrical and Electronic Manufacturers' Association ZVEI, Coexistence of Wireless Systems in Automation Technology, 2009
 - [24] Gowrishankar S., Basavaraju T.G., Sarkar S. Issues in Wireless Sensor Networks // Proceedings of the World Congress on Engineering 2008 Vol I WCE 2008, London, July 2008
 - [25] Hilton S. Forecast Report M2M device connections, revenue and ARPU: worldwide forecast 2011–2021, Analysys Mason Limited, May 2012
 - [26] Hong J., Lu S., Chen D. Towards Bio-Inspired Self-Organization in Sensor Networks: Applying the Ant Colony Algorithm // 22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications, 2008, pp. 1054–1062
 - [27] Huong H.T.T, Dong Liu. Can Grid help us to verify large systems // Allborg university, Denmark, 2003
 - [28] ISA100.11a standard, Release 1 / Internet [Visited on: 10.11.2013] www.isa.org/source/ISA100.11a_Release1_Status.ppt
 - [29] Kopke A., Hauer J.-H. IEEE 802.15.4 Symbol Rate Timer for TelosB // Telecommunication Networks Group Technical Report, Berlin, Germany, 2008
 - [30] Lee J., Su Y., Shen C. A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi // Industrial Electronics Society IECON, Nov 2007, pp. 46–51
 - [31] Li H., Yu D., Gao Y. Spatial synchronous TDMA in multihop radio network // Vehicular Technology Conference, VT Spring. 2004 IEEE 59th Volume 3, ISBN: 0-7803-8255-2, 2004, pp. 1334–1338
 - [32] Lin H., The development of software for ballistic-missile defense // Scientific American, 1985, vol. 253, no. 6, p. 48
 - [33] Lions J.L. Ariane Flight 501 Failure. Report by the Arianespace Inquiry Board // Paris, July 1996

- [34] Multiface measuring device description / Internet [Visited on: 10.11.2013]
<http://www.ifak.eu/index.php?id=787&L=3>
- [35] Ns2/3 networks simulator / Internet [Visited on: 10.11.2013]
<http://www.nsnam.org/overview/what-is-ns-3/>
- [36] OMNeT++ networks simulator / Internet [Visited on: 10.11.2013]
<http://www.omnetpp.org>
- [37] OPNET networks simulator / Internet [Visited on: 10.11.2013]
<http://www.opnet.com>
- [38] Osmani F., Slabbert A. A scalable distributed security infrastructure for industrial control and sensor networks // In Proceedings of the 2009 International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing: Connecting the World Wirelessly. ACM, New York, NY, USA, 2009, pp. 84–89
- [39] Otero J., Yalamanchili P., Braun H.-W. High Performance Wireless Networking and Weather // Report at High Performance Wireless Research and Education Network, 2001
- [40] Petersen S., Carlsen S. Performance evaluation of WirelessHART for factory automation // In Proceedings of the 14th IEEE international conference on Emerging technologies & factory automation, IEEE Press, Piscataway, NJ, USA, 2009, pp. 479–487
- [41] Polastre J., Hill J., Culler D. Versatile low power media access for wireless sensor networks // In Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems, SenSys '04, ACM, New York, NY, USA, 2004, pp. 95–107
- [42] Popular wireless embedded platforms review. Internet // <http://www.seeedstudio.com/blog/2014/10/31/linkit-one-vs-edison-vs-raspberry-pi-vs-beaglebone-black/>
- [43] ProSense project description / Internet [Visited on: 10.11.2013] <http://prosense.cti.gr>
- [44] ProSense project homepage / Internet: <http://www.prosense-project.eu>
- [45] Raptis P., Vitsas V., Paparrizos K. Packet Delay Metrics for IEEE 802.11 Distributed Coordination Function // Mob. Netw. Appl. 14, December 2009, pp. 772–781
- [46] Ren Q., Liang Q. Throughput and Energy-Efficiency-Aware Protocol for Ultrawideband Communication in Wireless Sensor Networks: A Cross-Layer Approach // IEEE Transaction on mobile computing Vol. 7, Nr 6, june 2008, pp. 805–816
- [47] Ruirui Z., Liping C., Jianhua G., Zhijun M. An energy-efficient wireless sensor network used for farmland soil moisture monitoring // IET-WSN IET International Conference, 2010, lpp. 2.–6
- [48] Scholtz R., Pozar D., Namgoong W. Ultra-Wideband Radio // EURASIP J. Adv. Sig. Proc., 2005, pp. 252–272
- [49] Siemens programmable logic controller catalogue. S7-300 analog inputs, Siemens AG, 2011, p. 90
- [50] SIMATIC Panels – Operator panels to suit every requirement // brochure Siemens AG, Nuernberg, Germany, 2008

- [51] Stankovic J. Real-Time Computing // BYTE, 1992, pp. 155–160
- [52] STRATOS project description / Internet [Visited on: 10.11.2013] <http://stratos.imamoter.cnr.it>
- [53] Suriyachai P., Brown J., Roedig U. Time-Critical data delivery in wireless sensor networks // In Proceedings of the 6th IEEE international conference on Distributed Computing in Sensor Systems DCOSS'10, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010, pp. 216–229
- [54] System on a Chip (SoC). Internet // <http://www.directindustry.fr/prod/cypress-semiconductor/systems-on-chip-soc-systemes-mono-puce-programmables-34220-200113.html>
- [55] Teng Z., Kim K. A Survey on Real-Time MAC Protocols in Wireless Sensor Networks // Communications and Network, Vol. 2 No. 2, 2010, pp. 104–112
- [56] The R Project for Statistical Computing, What is R? / Internets: <http://www.r-project.org/about.html>
- [57] UPPAAL - integrated tool environment for modeling, validation and verification of real-time systems / Internet [Visited on: 10.11.2013] <http://www.uppaal.org>
- [58] VDC. Strategic Insights 2012: Embedded Software & Tools Market – Track 2: Embedded Software Engineering Technologies, Volume 1: Embedded/Real-Time Operating Systems // VDC, 2012
- [59] Vertical wind tunnel «Sirius» (Finland) / Internet: <http://siriusport.fi/EN/Fly/>
- [60] Waez M.T., Dingel J., Rudie K. Timed Automata for the Development of Real-Time Systems, Research Report 2011-579, Queen's University–School of Computing, Canada, 2011, pp. 1–63
- [61] Wei Y.-H., Leng Q., Han S. RT-WiFi: real-time high speed communication protocol for wireless control systems // SIGBED Rev. 10, July 2013, p. 28
- [62] Wireless Technologies: Concepts, Methodologies, Tools and Applications: Concepts, Methodologies, Tools and Applications, Volume 1, Management Association, Information Resources IGI Global, Aug 31, 2011 – Technology & Engineering – 2358 lpp.
- [63] Yu F., Wu T., Biswas S. Toward In-Band Self-Organization in Energy-Efficient MAC Protocols for Sensor Networks // IEEE Transactions on mobile computing, Vol.7, No2, February 2008, pp. 156–170
- [64] Yue W., Hai-Tao Z., Tao Z. Multi-channel Hamerstein identification // 29th Control Conference (CCC), ISBN: 978-1-4244-6263-6, Beijing, 2010, pp. 6227–6232
- [65] Zagursky V., Morozov A. Macromodel for uncertainty estimation of mixed-signal system elements under extreme operating condition // Proceedings of VIII International Conference, ISBN 978-5-91450-027-3, SICPRO-09, Moscow, January 2009, pp. 821–827
- [66] Zagursky V., Zibin Dz. Random Multiple Access Method for Wire and Wireless Local networks // 17-th International Conference on Computer Theory and Applications, ICCTA 2007, Egypt, Alexandria, 2007, pp. 137–141
- [67] ZESAN project description / Internet [Visited on: 10.11.2013] <http://www.pt-it.pt-dlr.de/de/2419.php>