

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

Romāns TARANOVŠ

Automātikas un datortehnikas doktora programmas "Attēlu apstrādes un datorgrafikas,
datortehnikas un tīklu" virziena doktorants

**KOMPONENŠU KOLEKTĪVA MIJIEDARBĪBA
BEZVADU SENSORU TĪKLOS**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs

Dr. habil. sc. comp. Profesors

V. ZAGURSKIS

RTU Izdevniecība
Rīga 2014

UDK 004.72(043.2)
Ta 593 k

Taranovs R. KOMPONENŠU KOLEKTĪVA MIJIEDARBĪBA BEZVADU SENSORU TĪKLOS. Promocijas darba kopsavilkums.-R.:RTU Izdevniecība, 2014.-45 lpp.

Iespiests saskaņā ar DAD institūta 2013.gada 17. maija lēmumu, protokols Nr.109.



Ieguldījums Tavā nākotnē!

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā «Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai».

"
"

KUDP "; 9: /; ; 56/32/764/7"

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2014.g. 2. jūnijā plkst 14:30 Rīgas Tehniskās universitātes Datorzinātnes un informācijas tehnoloģijas fakultātē, Rīgā, Meža ielā 1/3, 202. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Jānis Grundspenķis
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors, Dr. sc. ing. Egils Ginters
Vidzemes Augstskola

Doc., Dr. sc. ing. Igors Sčukins
Rīgas Tehniskā universitāte, Daugavpils filiāle

APSTIPRINĀJUMS

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

Romāns Taranovs(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 6 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 3 pielikumus, 48 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 219 lappuses. Literatūras sarakstā ir 133 nosaukumi.

SATURS

VISPĀRĪGS DARBA RAKSTUROJUMS	5
Tēmas aktualitāte	5
Promocijas darba mērķis un uzdevuma nostādne	8
Pētījuma priekšmets un objekts	9
Darba zinātniskais jaunieguvums	9
Darba praktiskā vērtība un aprobācija	10
Aizstāvēšanai izvirzāmās tēzes	11
Zinātniskās publikācijas	11
Zinātniskās konferences	13
Piedalīšanas projektos	13
Darba struktūra un apjoms	13
1. ESOŠĀS SITUĀCIJAS ANALĪZE. SISTĒMAS ARHITEKTŪRA	16
1.1. Bezvadu sensoru tīkli	16
1.2. Divu līmeņu sistēmas arhitektūra	17
1.3. Pašreizējā stāvokļa analīze	20
2. DIVU LĪMEŅU SISTĒMAS MODELIS	23
3. BEZ SADURSMJU IEKŠKLASTERU KOMUNIKĀCIJA	26
4. SISTĒMAS OTRAIS LĪMENIS. KLASTERU AUTONOMA FORMĒŠANA	31
4.1. Klasteru autonoma formēšana	31
4.2. Sensoru un servisa informācijas apmaiņa starp maršrutētājiem	33
4.3. Divu līmeņu sistēmas projektēšanas metodika	35
5. DIVU LĪMEŅU SISTĒMAS MODELIS DATU APSTRĀDES AIZKAVES ANALĪZEI	37
GALVENIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI	40
LITERATŪRAS SARAKSTS	42

VISPĀRĪGS DARBA RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Datori un skaitļošanas ierīces paliek mazākas, lētākas, bet tajā pašā laikā palielinās arī to veiktspēja, kas ļauj iebūvēt skaitļošanas jaudu mūsdienu ierīcēs. Pēdējo desmit gadu laikā bezvadu sensoru tīkli (angliski Wireless Sensor Networks - WSN) [2] paradās kā jauna tehnoloģija, kas kombinē automatizētu sajušanu, iegultu apstrādi un bezvadu tīklošanu mazās iegultās ierīcēs. Kaut gan dažas WSN sastāvdaļas nav balstītas uz pilnībā jaunām idejām, tehnoloģiskie uzlabojumi, it īpaši mikro-elektromehāniskās sistēmas (angliski micro-electromechanical systems - MEMS), ļāva to integrāciju [11] mazos iegultos datoros.

Kā visagrākais pētījums par WSN tiek uzskatīts 1999. gadā publicētais raksts par projektu [1], kas ir saistīts ar maza enerģijas patēriņa ierīču izstrādi, kas ļautu būt lielā izmēra WSN. Klasiski WSN tiek būvēti, lai veiktu uzdevumus, saistītus galvenokārt ar fizikāla objekta parametru monitoringu. Bet mūsdienu pētījumos ir sastapti WSN lietojumi, kas ļauj šo tehnoloģiju izmantošanu medicīnā [27, 3, 12], izsekošanas uzdevumos [25], armijas pielietojumos [18] utt. Šādos uzdevumos WSN bieži tiek strukturēti – proti, tas tiek formēti no klasteriem, kas var būt gan agrāk izveidoti, gan formēti decentralizēti. Promocijas darbā tiek apskatīti WSN pielietojumi, kas saistīti ar efektīvas komunikācijas klasteru WSN veidošanu un sensoru tīkla komponentu kolektīvu mijiedarbību. Komunikācijas efektivitāte šeit tiek nodrošināta ar bez sadursmju komunikāciju, kas ir nepieciešama sadursmju-jūtīgos lietojumos, piemēram, tādos kā medicīnas lietojumi ar mezglu paškoordināciju un pašorganizācijas iespējām. Promocijas darba mērķis ir noteikt šķēršļus šādas komunikācijas īstenošanai un piedāvāt risinājumus to pārvarēšanai.

Mūsdienās bezvadu sensoru tīklos tiek veikti plaši pētījumi. To pierāda vairākas pasaules mēroga konferenču organizēšana, no kurām var minēt dažas: ACM SenSys 2013 [24], IEEE INFOCOM [14], UbiComp [29]. Pēdējos gados WSN pētījumi galvenokārt veltīti sistēmām vai bezvadu sensoru tīklu pielietojumiem.

No pēdējiem pētījumiem var izsecināt izplatītākās WSN lietojumu klases, starp kurām ir veselības aprūpes lietojumi, novērošanas lietojumi, militārie lietojumi, izsekošanas lietojumi, kā arī lietojumu klases kā ķermeņa vides tīkli (angliski Body Area Network - BAN). Dažām klasēm, tādām kā militāras, veselības aprūpes un ķermeņa vides tīklu, kā arī dažos citu lietojumu klašu gadījumos, ir svarīgi garantēt datu korektu nodošanu no sensoru mezgla sateknei.

Satekne, ir gala lietotājs, kam ir jāsaņem dati. Respektīvi, datu komunikācijai starp bezvadu sensoru tīkla elementiem nedrīkst zaudēt datus. Piemēram, izskatīsim veselības aprūpes klases uzdevumu, kad palātā atrodas vairāki pacienti. Katram pacientam ir pievienoti sensori viņu stāvokļa nepārtrauktai novērošanai. Paralēli eksistē sensori, kas uzņem datus par palātas apkārtējas vides stāvokli: gaisa temperatūru, gaisa kvalitāti, akustiku u.t.t. Tad ir skaidrs ka bezvadu sensoru mezglu jeb WSN elementu skaits var sasniegt vairākus desmitus. Intensīvi komunicējot savā starpā, var rasties datu pakešu sadursmes, kas noved pie saņemto datu pakešu zudumiem komunikācijas protokolu dēļ [31]. Cits lietojuma piemērs var tikt ņemts no novērošanas uzdevumu klases. Šādas sistēmas piemērs tika apskatīts [17], kur mobilās platformas tika paredzētas telpas monitoringam jeb novērošanai. Arī šeit ir nepieciešama efektīva komunikācija, jo vienlaikus radio-diapazonā atradīsies vairākas ierīces. Tie atkarībā no uzdotā uzdevuma, paralēli novērošanai veic arī telpas/objekta kartes veidošanu un/vai atjaunošanu. Tad ir skaidrs, ka, komunicējot savā starpā, mobilie mezgli intensīvi apmainīsies ar datiem, gan katrs ar katru, gan ar satekni. Protams, arī šeit, komunicējot var rasties datu pakešu sadursmes, kas rezultātā noved pie to zaudēšanas. Cits lietojuma piemērs ir WSN izmantošana kopā ar video WSN (VSN) [20] vai cita veida multimediju datu pārraidei, piemēram, video konferencēšanā [28], kur WSN uzdevums kopā ar datu nogādāšanu ir arī mezglu pozīcijas noteikšana [21]. Te ir redzams, ka sensoru mezgliem katru reizi, inicializējot komunikāciju, ir jāsaņem vienam ar otru veidojot intensīvu datu plūsmu, proti, tas atkal var novest pie pazaudētām datu paketēm. Protams, datu pakešu zaudēšana rodas MAC protokola ziņojumu sadursmju dēļ. MAC protokols ir atbildīgs par tīkla elementu piekļuvi videi. Ja WSN izmanto uz sāncensību balstītu MAC protokolu, tad tam piemīt negatīva īpašība - palielinot slodzi uz tīklu, palielinās arī sadursmju skaits [16], kas pārsvarā notiek inicializācijas fāzē. WSN gadījumā inicializācijas fāzes sensoru mezglam var rasties bieži, jo sensoru mezgls neuztur komunikācijas savienojumu visu darbības laiku, tas, piemēram, var aizmigt energoresursu ekonomijas dēļ un pamostoties jāsāk inicializācija no jauna.

Bieži komunikācijas infrastruktūra jau eksistē un to mainīt nav izdevīgi vai to nedrīkst. Piemēram, slimnīcas lokālais tīkls, kas var būt uzbūvēts izmantojot gan Ethernet, gan Wi-Fi tehnoloģijas, bet kopumā strādā ar TCP/IP protokolu steka vadību. Tad jaunas datu savākšanas tehnoloģijas ieviešana jau eksistējošā infrastruktūrā pieprasa turpināt strādāt ar jau eksistējošiem komunikācijas protokoliem, galvenokārt palielinot servisa kvalitāti un kvantitāti ar sistēmas paplašināšanu, nevis pārbūvēšanu. Tas ir viens no mūsdienās pētāmiem jautājumiem bezvadu sensoru tīklos.

Kā tika minēts sākumā, piedāvāto uzdevumu klašu un tām izvirzīto prasību risināšanai ir piedāvāts izmantot hierarhiskas sistēmas. Kopumā šīs sistēmas ir spējīgas datus no WSN savākt un pārraidīt sateknei, kā arī veikt datu apstrādi, piemēram, filtrēšanu, sapludināšanu, kā arī nodrošināt datu nogādi uz ārējiem, piemēram, TCP-IP tīkliem, ar speciālu moduļu palīdzību. Šādus moduļus sauc par vārtejām (angliski gateway - GW). WSN sistēmās vārtejus bieži var sastapt klasterizētos WSN. Pēdējos gados sensoru tīkla klasterizācija kļuvusi par vienu no populārākajām pieejām tīkla organizēšanai vienotā hierarhijā [34]. Izmantojot tīkla klasterizāciju, mezgli tiek organizēti grupās, kuras tad arī saucas par klasteriem. Katram klasterim ir izvēlēts klastera koordinators, kuru sauc par klastera galvu, (angliski cluster head - CH) un kāds skaits, tam pakļauto mezglu. Salīdzinot bezvadu sensoru tīkla arhitektūru bez klasterizācijas, ir redzamas vairākas priekšrocības:

- *Izkliedēta determinēta datu savākšana un komunikācija:* Tiek piedāvāts izmantot klasterizāciju informācijas plūsmu determinēšanai, kad, pateicoties specializētam MAC protokolam un klasteru uzstādījumiem, var panākt vēlamo informācijas plūsmu. Mezglam nav jāuztur tabulas ar kaimiņu vai adresātu datiem. Rezultātā starp-klasteru komunikācijas īstenošana prasa mazāk resursu, jo starp klasteriem datus pārraida tikai CH, pārējie mezgli par citu klasteru eksistenci nezina. CH eksistence nodrošina klastera vadību, proti, vadības komandas tiek nosūtītas tikai tai, nevis katram sensoru mezglam atsevišķi.
- *Sensoru mezglu grupēšana:* Klasteru sadalīšana ļauj sensoru mezglus apvienot pēc uzdevuma vai tā daļas efektīvas komunikācijas sasniegšanai.
- *Enerģijas patēriņa samazināšana:* Tas ir iepriekšējo divu punktu apvienojums. Datu paketes maršrutēšana no sensoru mezgla līdz sateknei ir jāveic caur CH, rūpējoties tikai par dažu lēkumu maršrutēšanu. Šādu lēkumu skaitu definē veidojot klasteri, respektīvi, lēkumu skaits ir iepriekš uzstādīta vērtība. Maršrutēšana pretējā virzienā (no sateknes uz sensoru mezglu) notiek caur klastera CH. Tas ļauj ievērojami samazināt atsevišķi ņemta sensoru mezgla enerģijas patēriņu veicot datu pakešu maršrutēšanu. Apvienojot sensoru mezglus klasteros, samazinās sadursmju skaits, jo pastāv iespēja nodrošināt efektīvāku komunikāciju klastera ietvaros. Klasterus sadala tā, lai tie pēc iespējas mazāk iespaido cits citu. CH var organizēt komunikāciju klasterī tā, lai sensoru mezgli pārietu pagarinātā gulēšanas režīmā.

- *Datu agregāciju*: To datu dzēšana klastera galvā, kas atkārtojas vai nav nepieciešami tālākajai pārsūtīšanai, dod barošanas enerģijas ekonomiju un uzlabo datu pārsūtīšanai nepieciešamo laiku.
- *Klasteru pašorganizācija*: Spēja pašiem sensoru mezgliem labot klastera struktūru gadījumā, ja kāds no tiem ir izgājis no ierindas.
- *Viēgla uztveršana un izmantošana*: Klasterizācija ir uzskatāma lietotājam, jo sniedz iespēju loģiski sadalīt WSN grupās vai veikt sadalīšanu automātiskā režīmā pēc uzdotā uzdevuma.

Promocijas darba mērķis un uzdevuma nostādne

Promocijas darbā galvenais mērķis ir izveidot risinājumu un projektēšanas metodiku klasterizētiem bezvadu sensoru tīkliem ar hierarhisku divu līmeņu struktūru. Pirmā līmenī nodrošināt bezvadu sensoru tīkla sensoru mezglu komponentu kolektīvo mijiedarbību. Otrajā sistēmas slānī nodrošināt kolektīvu mijiedarbību starp vārtejām. Tātad izveidot sistēmas būvēšanas pieeju jeb uzdevumu klasi, kurai piemīt šādas īpašības:

- Bez sadursmju piekļuve videi un inicializācijas WSN ietvaros.
- Determinēts datu savākšanas ātrums jeb determinētas informācijas plūsmas WSN.
- Iespēja izdalīt papildus komunikācijas resursus sensoru mezgliem, kā arī nodrošināt energotaupošu darbību.
- Sensoru mezglu pašorganizēta klasteru uzstādīšana un pašatjaunojoša funkcija.
- Integrēšanas iespēja eksistējošā TCP/IP infrastruktūrā izmantojot GW.
- Vārtejām piemīt palīga funkcijas WSN pašatjaunošanā, jaunu WSN dalībnieku inicializācijā, kā arī datu maršrutēšanā starp citiem klasteriem.

Promocijas darbā izvirzītās uzdevuma klases risināšanai tiek noteikti sekojošie uzdevumi:

1. Izveidot protokolu un klasteru sadalīšanas algoritmu apskatu. Izvērtēt eksistējošās divu līmeņu sistēmas. Izvērtēšanas rezultātus izmantot piedāvātās divu līmeņu sistēmas projektēšanā.

2. Izveidot detalizētu sistēmas modeli SysML valodā no divām diagrammām - izmantošanas un bloku-definētas.
3. Uzprojektēt pirmo sistēmas slāni, t.i. WSN slāni, atbilstoši sistēmas prasībām un izveidot bez sadursmju MAC protokolu ar determinētu vides piekļuves īpašību. Izveidot autonomu klasteru sadalīšanas algoritmu sensoru mezglu pašorganizācijai.
4. Atbilstoši izvirzītajiem sistēmas ierobežojumiem uzprojektēt otro jeb vārteju slāni. Izveidot transporta protokolu datu nogādāšanai galvenajam datoram un klasteru vadības nodrošināšanai.
5. Izveidot sistēmas pirmā un otrā slāņa projektēšanas metodiku.
6. Izveidot sistēmas analītisko modeli gadījumiem, kad ir nepieciešams novērtēt izvēlēto aparatūru un izvērtēt sistēmas caurlaidspēju.

Pētījuma priekšmets un objekts

Promocijas darba pētījuma priekšmets ir divu līmeņu klasterizēta bezvadu sensoru tīkla arhitektūra. Tajā skaitā arī WSN klasterizācija ar datu bez sadursmju pārraidīšana. Promocijas darba pētījuma objekts ir komunikācijas protokolu un atbilstošu algoritmu steks, kas nodrošina pētījuma priekšmeta izveidošanu. Turklāt, pētījuma objekts tiek paplašināts ar jautājumiem, kas saistīti ar klasterizēta tīkla autonomu pārkonfigurēšanu, pašatjaunojošanu un uzstādīšanu. Pētāmās sistēmas jēdzienā ir iekļauti algoritmu un risinājumu pētīšana starp-klasteru komunikācijai jeb datu maršrutēšanai starp klasteriem un galveno datoru.

Darba zinātniskais jaunieguvums

Izstrādātajā darbā ir šādi galvenie jaunieguvumi:

1. Piedāvāts jauns bez sadursmju komunikāciju nodrošinošs bezvadu sensoru tīklu MAC slāņa protokols. Tas tiek bāzēts uz TDMA principu ar determinētu pieeju videi. Izstrādāts klasterizācijas algoritms, kas ļauj nodrošināt klasteru autonomu formēšanu WSN slānī, nodrošinot bez sadursmju komunikācijas uzturēšanu.
2. Apkopotas un parādītas otrā hierarhiskā sistēmas slāņa elementa – vārtejas - funkcijas sistēmā. Piedāvāti sensoru mezglu datu apstrādes algoritmi, kā arī datu transporta protokols.

3. Tiek piedāvāts hierarhiskas sistēmas datu pārraides ātruma noteikšanas statistiskais modelis. Tiek parādīts sistēmas aprēķināšanas piemērs, kas ļauj novērtēt gan izvēlēto aparatūru, gan sistēmas gaidāmo datu pārraides ātrumu.

Darba praktiskā vērtība un aprobācija

Hierarhiskas bezvadu sensoru tīklu sistēmas izveidošana veido darba praktisko vērtību. Sistēma ir domāta iekļaušanai eksistējošā TCP/IP tīkla infrastruktūrā un nodrošina efektīvu datu savākšanu par pētāmiem objektiem. No praktiskā viedokļa var minēt arī šādus ieguvumus:

1. Piedāvāta pieeja šādu sistēmu aprakstīšanā ar SysML palīdzību, lietojot divu līmeņu sistēmas piemēru.
2. Projektēšanas metodika, izstrādājot katru sistēmas līmeni, kas tiek piedāvāta MAC protokola projektēšanai un izveidei, kā arī vārteju un klasterizācijas algoritma izveidei.
3. Parādīta pieeja protokola-specifisku laika konstanšu uzņemšanai un sistēmas aparāt-nodrošinājuma izvēlei.
4. Izstrādāts WSN infrastruktūras prototips, kas apmierina piedāvātās divu līmeņu sistēmas arhitektūrai izvirzītās prasības.

Darba rezultātu aprobācija notikusi, piedaloties vairākās zinātniskajās konferencēs, un ir atspoguļota 11 publikācijās zinātniskajos krājumos, kā arī vairākos projektos - Valsts pētījumu programmā "Informācijas tehnoloģiju zinātniskā bāze" projektā "Oriģinālu signālu apstrādes paņēmieni izveide un izpēte konkurētspējīgu IT tehnoloģiju radīšanai", Latvijas Zinātnes Padomes grantos:

- Nr.09.1564 Latvijas Zinātnes Padomes Grants "Imitācijas modelēšanas un skaitļošanas intelekta metodes loģistikas un elektronisko pakalpojumu optimizācijai" (2009.g. – 2012.g.).
- Nr.09.1541 Latvijas Zinātnes Padomes Grants "Inovatīvas signālapstrādes tehnoloģijas iegulto un radiofrekvenču identifikācijas sistēmu attīstībai un enerģijas patēriņa optimizācijai" (2010.g. - 2012.g.).

Izveidotās sistēmas abi līmeņi ir piedāvāti starptautiskā projektā STARTOS, kur sensoru mezglu, kas izvietoti uz traktoriem un piekabēm, savstarpēja komunikācija ir būvēta uz bez sadursmju MAC protokola bāzes. Saziņai ar globālu tīklu tika izmantots vārtejas izveidošanas princips. Turklāt darba rezultāti tika izmantoti un aprobēti arī citos bakalauru un maģistru diplomdarbos. Piemēram [30], kur tika pētītas vairākas sensoru tīklu modelēšanas programmas. Modelēšanas iespēju pārbaudei tika izmantots bez sadursmju MAC protokols, kas prezentēts promocijas darbā.

Izveidotās sistēmas aprobācija tika veikta arī, izstrādājot sistēmas prototipa modeli un pārbaudot katru sistēmas līmeni. Darba pielikumos ir piedāvāts MAC protokola pirmkods (1. pielikumā); vārtejas programmatūras datu apstrādes un pakošanas programmatūras pirmkods (2. pielikumā); galvenā datora programmatūras pirmkods (3. pielikumā).

Aizstāvēšanai izvirzāmās tēzes

1. Bezvadu sensoru tīklos ir iespējams nodrošināt bez sadursmju determinētu komunikāciju klastera ietvaros.
2. Jaunā bez sadursmju vides piekļuves protokola izmantošana neierobežo bezvadu sensoru tīkla klasteru skaita paplašināšanu.
3. Autonomai klasteru formēšanai ir iespējams izmantot bez sadursmju vides piekļuves protokolu, tikai paplašinot to ar jauno stāvokli.
4. Vārteju mezglu pielietošana ar piedāvāto transporta algoritmu klasterizētā bezvadu sensoru tīklā dod iespēju nodrošināt tīkla pašatjaunošanu un klasteru skaita paplašināšanu.

Zinātniskās publikācijas

Pieejamās SCOPUS datubāzē:

- Taranovs R., Zagurskis V. Medium Access Protocol for Efficient Communication in Clustered Wireless Sensor Networks // 19th Telecommunications Forum (TELFOR): Proceedings of Papers, Serbija, Belgrada, 22.-24. november, 2011. – pp 582.-586.

- Taranovs R., Zagurskis V., Morozovs A. Heterogeneous Collision-Free Clustered Scheme for Wireless Sensor Networks // Proceedings of 2010 IEEE 26th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel (Digital), Israel, Eliat , 17.-20. November, 2010. – pp 000282.-000285.

Publicētas RTU izdevumā "RTU Zinātniskie raksti":

- Zagurskis V., Bļizņuks D., Taranovs R. Pilot Signal Detection in Wireless Sensor Networks // RTU zinātniskie raksti. 5. series., Datorzinātne. - 48. vol. (2011), 36.-40. lpp.
- Zagurskis V., Bļizņuks D., Taranovs R. Self-Organization Paradigm at Critical Time Systems Functioning // Scientific Journal of RTU. 5. series., Datorzinātne. - 48. vol. (2011), pp 40-45.
- Miežītis G., Taranovs R. Passive Wireless Sensor Network Analyzing at Medium Access Level // Scientific Journal of RTU. 5. series., Datorzinātne. - 48. vol. (2012), pp 56-62.
- Kļaviņš Ē., Taranovs R. Attālinātā robotu vadība ierobežotā telpā izmantojot web kameru // RTU zinātniskie raksti. 5. sēr., Datorzinātne. - 48. sēj. (2011), 63.-68. lpp.
- Miežītis G., Zagurskis V., Taranovs R. Multiple Mobile Gateways in Wireless Sensor Networks // RTU zinātniskie raksti. 5. series., Datorzinātne. - 13. vol. (2012), pp 38.-42.
- Taranovs R., Zagurskis V., Miežītis G. An Efficient Clustering Approach to Hierarchical Wireless Sensor Networks // RTU zinātniskie raksti. 18. series., Datorvadības tehnoloģijas. - 13. vol. (2012), pp 43.-47.
- Taranovs R., Zagurskis V. Jaunā pieeja vides piekļuves vadībā bezvadu sensoru tīklos // RTU zinātniskie raksti. 5. sēr., Datorzinātne. - 39. sēj. (2009), 50.-59. lpp.
- Taranovs R., Vilde K., Erins A., Zagurskis V. Galvenie videokonferenču kvalitātes ierobežojumi lokālo tīklu bāzē // RTU zinātniskie raksti. 5. sēr., Datorzinātne. - 42. sēj. (2010), 38.-44. lpp.
- Miežītis G., Taranovs R. Objekta izsekošana Bezvadu Sensoru Tīklos: pārskats // RTU zinātniskie raksti. 5. sēr., Datorzinātne. - 42. sēj. (2010), 45.-52. lpp.

Zinātniskās konferences

- RTU 50. Starptautiskā zinātniskā konference, 12. - 16. oktobrī, 2009 gadā.
- 26. IEEE Elektronikas inženieru sanāksmē Izraēlā, Eilatā. 17. - 20. novembrī, 2010 gadā.
- RTU 51. Starptautiskā zinātniskā konference. 11. - 15. oktobrī, 2010 gadā.
- RTU 52. Starptautiskā zinātniskā konference. 13. - 16. oktobrī, 2011 gadā.
- 19th Telecommunications Forum (TELFOR), Serbija, Belgrādā. 22. - 24. novembrī, 2011 gadā.
- RTU 53. Starptautiskā zinātniskā konference. 11. - 12. oktobrī, 2012 gadā.

Piedalīšanas projekts

- Nr.09.1564 Latvijas Zinātnes Padomes Grants "Imitācijas modelēšanas un skaitļošanas intelekta metodes loģistikas un elektronisko pakalpojumu optimizācijai".
- Valsts pētījumu programma "Informācijas tehnoloģiju zinātniskā bāze" projekts "Oriģinālu signālu apstrādes paņēmieni izveide un izpēte konkurētspējīgu IT tehnoloģiju radīšanai".
- Nr.09.1541 Latvijas Zinātnes Padomes Grants "Inovatīvas signālapstrādes tehnoloģijas iegulto un radiofrekvenču identifikācijas sistēmu attīstībai un enerģijas patēriņa optimizācijai".
- Brīvprātīgs darbs pie starptautiskā projekta "System for Tractors' Autonomous Operations, STRATOS".

Darba struktūra un apjoms

Darba pirmajā nodaļā tiek piedāvāta informācija par bezvadu sensoru mezgliem, tajā skaitā par mezglu uzbūvi un galvenajām komponentēm, to funkcijām. Tiek paskaidrots bezvadu sensoru tīkla protokolu steks, tā īpašības un specifika pētāmajā sfērā, kā arī dots paskaidrojums par WSN vispārējām īpašībām.

Otras nodaļas pirmajā apakšnodaļā tiek pētīti eksistējoši MAC slāņa protokoli, kas ir pielietoti klasteru formēšanas algoritmiem kā pirmā sistēmas līmeņa daļa. Tiek piedāvāti pētīšanai

nepieciešamie skaidrojumi par klasteru formēšanas pieeju un ar to saistītiem ieguvumiem. Kopā ar klasteru formēšanu tiek skaidrota CH mezgla īpatnības un sniegti klasterizācijas atribūti, ar kuriem var aprakstīt jebkuru klasterizācijas algoritmu un tā specifiku. Pēc aprakstītās algoritmu klasifikācijas, saskaņā ar izvirzīto metodoloģiju, tiek piedāvāti eksistējošo MAC protokolu un klasterizācijas algoritmu pētījumu rezultāti. Otrās nodaļas otrajā apakšnodaļā tiek piedāvāta metodoloģija eksistējošo sistēmu pētīšanai un tās pielietošanai praksē. Pētītās sistēmas tika izvēlētas pēc iespējas atbilstošākās izvirzītajam uzdevumam un ar to saistītajiem ierobežojumiem. Apakšnodaļu beigās izdarīti secinājumi par pētāmajiem objektiem.

Trešajā nodaļā ir piedāvāts divu līmeņu hierarhiskās sistēmas modelis. Tas ir izveidots, izmantojot MDA pieeju ar SysML palīdzību. Tiek piedāvāti divu tipu diagrammas. Ar lietošanas gadījumu diagrammu palīdzību var parādīt sistēmas komponentu savstarpējo izmantojamību. Kā arī diagramma dod iespēju veikt padziļinātu katras komponentes analīzi un noteikt ārpus sistēmas objektus, no kuriem, piemēram, tiek iegūti dati. Izmantošanas diagrammas tiek padziļinātas, lai parādītu klastera parametru un gala sistēmas nesadalāmās komponentes. Otrās diagrammas tips parāda piedāvāto sistēmu, sastāvošu no blokiem ar noteiktām savstarpējām attiecībām vienam pret otru. Šī veida diagramma ļauj paskaidrot, kā atsevišķas sistēmas daļas ir izveidotas un apvienotas, piemēram, var redzēt no kādām daļām sastāv bezvadu sensoru mezgls vai GW. Kā pirmā tipa diagramma, tā arī otrā tipa, tiek paplašināta līdz termināliem blokiem.

Ceturtajā nodaļā ir piedāvāts sistēmas pirmā līmeņa iekš-klastera komunikāciju nodrošināošs TDMA-bāzēts MAC protokols. Kopā ar protokola aprakstu tiek piedāvāta MAC paketes struktūra un paskaidrota protokola pielāgošana lietojumam, t.i. paskaidrots, kā ir jāīstojas gadījumā, ja ir nepieciešamība MAC protokola realizēšana. Ir piedāvātas vadlīnijas, piemēram, nepieciešamās datu atmiņas apjoma izvēle, kā arī pielāgošana aparāt-nodrošinājumam. Nodaļas beigās ir doti MAC protokola analītiskās analīzes rezultāti.

Piektajā nodaļā tiek izskatīti jautājumi, kas saistīti ar sistēmas otro jeb vārteju līmeni. Pirmajā nodaļas apakšnodaļā tiek pētīti jautājumi un piedāvāti risinājumi iepriekš izvirzītām GW prasībām. Tiek piedāvāta pieeja datu no klasteriem nogādei TCP/IP tīklos, kā arī par nepieciešamo vārtejas programmnodrošinājumu. Ir aprakstīti realizētie sensoru mezglu datu transporta protokols un datu apstrādes algoritms. Otrajā apakšnodaļā tiek piedāvāts klasteru autonomas formēšanas algoritms. Algoritma apraksts ietver sevī oriģinālā MAC protokola izmainītās daļas un tā aprakstu, kā arī satur aprakstu par vārtejas darbības algoritma papildināšanu.

Sestā nodaļā aprakstītas piedāvātās divu līmeņu sistēmas aprēķināšanas iespējas. Tiek piedāvāta konfigurācija ietver sevī divas daļas. Pirmā ir iekš-klasteru parametru konfigurēšanas daļa. Šeit parametri ir saistīti ar izvēlēto aparāt-nodrošinājumu un WSN, piemēram, sensoru mezglu skaitu klasterī. Otrā ir vārtejas programmnodrošinājuma un aparat-nodrošinājuma parametru daļa. Tur tika pārbaudītas vairākas vārteju platformas, izpildot datu apstrādes algoritmus pie dažādiem tīkla izmēriem. Nodaļas beigās tiek piedāvāts aprēķināšanas piemērs ar reāliem WSN mezgliem.

Darbu noslēdz secinājumi un literatūras saraksts.

1. ESOŠĀS SITUĀCIJAS ANALĪZE. SISTĒMAS ARIHITEKTŪRA

1.1. Bezvadu sensoru tīkli

Bezvadu sensoru tīkli sastāv no bezvadu sensoru mezgliem. To daudzums var būt desmitos, simtos un pat tūkstošos, pie tam sensoru mezgli var būt homogēni vai heterogēni pēc to uzbūves, komunikācijas protokolu izmantošanas un barošanās veida. Taču kopā tie pilda galveno uzdevumu datu nogādē sateknei. Bieži vien datu pārraidei no mezgla uz satekni izmanto maršrutēšanu, ja avots atrodas pāris lēkumu attālumā no sūtītājmezgla. Gadās, ka maršrutēšana starp mezgliem nav vajadzīga, īpaši bezvadu sensoru tīkla vairāku līmeņu arhitektūras uzbūves gadījumā. Tādā gadījumā ar ziņojumu pārraidi nodarbojas speciāli nozīmēti tīkla mezgli, tādi kā maršrutētāji.

Bezvadu sensoru tīklus iedala pēc vairākiem parametriem:

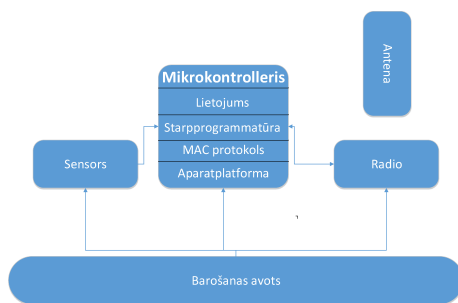
- *Skaitļošanas jauda* - mikrokontrolleri, izmantojami sensoru mezglu būvēšanai, ar ultra mazu barošanas patēriņu, kā rezultātā ar ierobežotu taktātumu līdz dažiem MHz. Tāpat mikrokontrolleri daļās pēc bitu skaita - 8 vai 16.
- *Atmiņas apjoms* – barošanas patēriņa samazināšanai atmiņas apjoms paliek dažu kilobaitu robežās, pie tam iebūvēta mikrokontrolieros.
- *Barošana* – bezvadu sensoru mezgli barojas no baterijām, kas ļauj tos izmantot grūti pieejamos objektos.

Tādā veidā bezvadu sensoru mezglam piemīt šādas īpašības:

- *Mazs izmērs* – Sensoru mezgliem jābūt pārnesamiem, lai sasniegtu lielāku izkārtojuma laukumu. Tāpat sensoru mezglus var izvietot arī uz cilvēka, kas pie liela sensoru mezglu izmēra var būt problemātiski to transportēšanai.
- *Zemas izmaksas* – Kā tika pieminēts agrāk, sensoru tīkls var sastāvēt no desmitiem, simtiem un pat tūkstošiem mezglu, tādēļ to lētums ir svarīgs projektējot tādu tīklu. Nākotnē viena bezvadu sensoru mezgla cena būs apmēram 1\$ [2].
- *Zems energopatēriņš* – Katrs sensoru mezgls skaitās WSN vienreizēja ierīce, kad baterijas nomaiņa mezgliem ir ekonomiski neizdevīga salīdzinājumā ar to atkārtotu izkārtojumu

Īpaši liela apjoma tīkla gadījumā. Tādēļ zems energopatēriņš veicina lielāku ekonomiju un ļauj sistēmai būt aktīvai ilgāku laiku.

1.1. attēlā redzams sensoru mezgla galveno komponentu shematisks atainojums. Nonākot vidē, bezvadu sensoru mezgls sāk pildīt tam uzdoto uzdevumu, visbiežāk tā ir vides sajušanas operācija. Dati par vidi pārvēršas ciparu formātā ar sensora palīdzību, kas izvietots uz sensora mezgla, tiek apstrādāti ar mikroprogrammu mikrokontrolierī un nodoti citiem tīkla dalībniekiem ar mikroshēmas raiduztvērēja un antenas palīdzību.

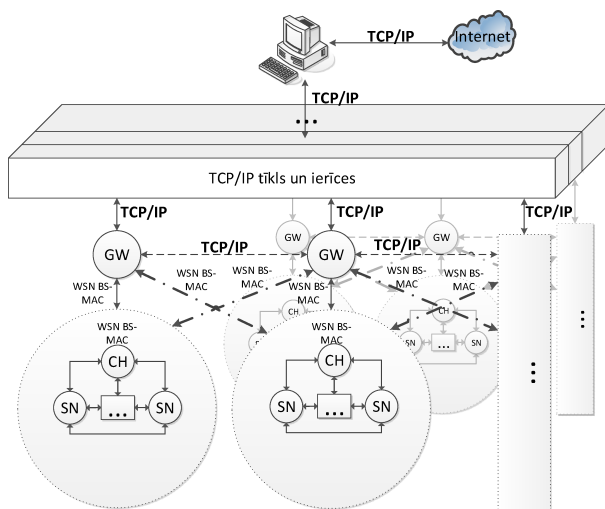


1.1. att. Bezvadu sensoru tīkla pamata komponenti

Kā redzams attēlā, mikrokontroleris ir sensoru mezgla centrālais komponents, jo nodrošina uzdevuma izpildi un realizē protokolu steku komunikācijas nodrošināšanai starp tīkla mezgliem. Šajā darbā tiek piedāvāts protokolu steku sadalīt trīs slāņos – fizikālajā, kanālu un aplikāciju. Saskaņā ar šo piedāvājumu sensoru mezgla programmas realizācija dalās šādās daļās. Aplikācija pilda operācijas, kas saistītas ar sajušanu un/vai ietekmi uz vidi vai objektu. Ar starpprogrammatūras (middleware) starpniecību tiek nodrošināta iespēja piekļūt MAC slānim, kas nodrošina vairāku sensoru mezglu pieeju videi. MAC slānis pēc MAC paketes formēšanas realizē tā pārraidī fizikālajam slānim caur atbilstošajiem interfeisiem.

1.2. Divu līmeņu sistēmas arhitektūra

Darbā tiek aprakstīta klasterizēta bezvadu sensoru tīkla sensoru mezglu mijiedarbība divu līmeņu sistēmā. Tādā sistēmā pirmajā līmenī atrodas klasterizēts sensoru tīkls, otrajā - maršrutētāji (gateway - GW), savienoti ar saviem klasteriem. 1.2. attēlā parādīta piedāvātās sistēmas arhitektūra, radīta atbilstoši darbā noteiktajiem mērķiem.



1.2. att. Divu līmeņu klasterizēta WSN sistēmas arhitektūra

Pirmais līmenis sastāv no klasterizēta WSN. Iekšpusē katram atrodas divu tipu sensoru mezgli – parastie sensoru mezgli (sensor node - SN) un klastera galva (cluster head - CH), pie tam abi mezglu tipi izmanto vienādu programmas nodrošinājumu un ir konstruktīvi vienādi. Komunikācijas nodrošināšanai klastera iekšienē tiek izmantots izstrādātais bezsadrumšju MAC protokols - WSN BC-MAC.

Otrais sistēmas līmenis sastāv no maršrutētājiem, katrs no tiem ir savienots ar noteiktu klasteri. Maršrutētājiem ir divi interfeisi – darbā ar WSN un datu no klastera pārraidei TCP/IP tīklā, kas ļauj iestrādāt sistēmu atbilstošā tīkla infrastruktūrā. Maršrutētāji izpilda transporta protokolu datu pārsūtīšanai galvenajam datoram un servisa informācijas apmaiņai starp GW. Arhitektūra tāpat apraksta sistēmā iespējamus sakarus starp tās komponentiem. Ar nepārtrauktām līnijām parādīts galvenais datu ceļš no sensoru mezgliem sistēmā. Tajā ietilpst datu pārraide no katra sensoru mezgla un klastera galvas, tāpat uzkrāto un apstrādāto datu pārraide no maršrutētājiem galvenajam datoram. Cits savienojumu veids ir starp-klasteru savienojums caur GW, 1.2. attēlā parādīts ar punktotām līnijām. Tāpat šis savienojums izmanto maršrutētājus servisa informācijas apmaiņai.

Tika izvēlēta bezvadu sensoru tīkla klasterizēta shēma, jo tai ir virkne priekšrocību, salīdzinot ar ne klasterizētu [34], precīzāk:

- *Resursu izdevumu komunikācijas nodrošināšanai samazināšana* – sensoru mezgliem nav jāsaturs maršrutēšanas tabulas, bet tikai jā rūpējas par to sakariem ar klasteru galvu. Tāpat starpklasteru mijiedarbības organizēšanā no katra klastera piedalās tikai CH, turklāt pārējie klastera sensoru mezgli var nezināt par tīkla topoloģiju un tās sastāvu.
- *Sensoru mezglu grupēšana* – tiek izmantota klasteru formēšanai konkrēta uzdevuma vajadzībām. Tāpat grupēšana var tikt izmantota klastera nepieciešamās caurlaidspējas nodrošināšanai.
- *Uzdevumu sadalījums starp sensoru tīkla mezgliem* – ļauj pārnest sensoru datu apstrādes uzdevumus no SN uz CH mezgliem energopatēriņa samazināšanai sensoru mezgliem. Turklāt, gadījumā ja sistēma ir hierarhiska, datu apstrādes uzdevumi var tikt pārnesti uz maršrutētājiem, tādējādi paaugstinās kalpošanas laiks arī CH mezgliem.
- *WSN vadības vienkāršošana* – klasteru vadība notiek caur CH, nododot tiem konfigurācijas ziņojumus no citiem mezgliem. Vai klasteru vadības signāli var iziet tieši no pašas klastera galvas, turklāt pārējie sensoru mezgli šajā gadījumā nodarbojas tikai ar saņemto vadības signālu izpildi.

Bez izklāstītajām klasterizēta sensoru tīkla priekšrocībām darbā tiek izskatītas papildu priekšrocības, kas iespējamas piedāvātās divu līmeņu sistēmas organizācijas dēļ:

- *Izkliedētas datu savākšanas nodrošināšana* – tā kā starpsensoru komunikācija klasteros tiek nodrošināta ar bez sadursmju MAC protokola palīdzību, izmantojot šo konfigurāciju, ir kļuvis iespējams garantēt datu pārraides ātrumu klasterī. Tādā veidā, ierobežojot sensoru mezglu daudzumu, var uzstādīt datu pārraides ātrumu, tā rezultātā garantējot datu saņemšanas laiku.
- *Sensoru mezglu pašorganizācija* – tā bez sensoru mezglu autonomas pašorganizācijas klasteros ļauj arī realizēt bezvadu sensoru tīklu paštīrīšanu. Ar otrā līmeņa – maršrutētāju – palīdzību tiek piedāvāts apmainīties ar servisa ziņojumiem klastera atklāšanai, kurā nepieciešams aizstāt no ierindas izgājušu mezglu.
- *Klasteru pašorganizācija* – bez pašorganizācijas klasteru līmenī ir ļauns arī organizēt klasteru grupas, apvienojot vairākas zem viena GW vadības. Tādā veidā tiek panākts liela sensoru tīklu skaita pieslēgums pie objekta apstrādes uzdevuma ar nemainīgu datu pārraides ātrumu šajos klasteros.

Pirms tālākas pētījuma turpināšanas attiecībā uz piedāvāto divu līmeņu sistēmu darbā tiek pētīti pastāvošie MAC protokoli ar klasterizācijas algoritmiem bezvadu sensoru tīkliem, tāpat tiek apskatīta pastāvošo hierarhisko sistēmu un piedāvātās sistēmas salīdzināšanas metodoloģija.

1.3. Pašreizējā stāvokļa analīze

Pastāvošo MAC protokolu ar klasterizācijas algoritmiem analīzei tika piedāvāts tos salīdzināt savā starpā pēc šādiem kritērijiem:

- *Protokola tips* – nosaka tā pielietojuma sfēru.
- *protokola pamatmomenti* – piedāvāts īss pamatfunkciju un protokola īpatnību apraksts. Tiek izmantots salīdzināšanai ar sistēmas pirmā līmeņa nepieciešamām funkcijām.
- *Pielietojums* – apraksta protokolu ierobežojumus attiecībā uz komunikāciju tīklā vai klasterī.
- *Savienojuma kvalitāte* – tāpat arī drošība tiek izmantotas izskatāmo protokolu pakalpojuma kvalitātes aprakstīšanai.

Pētījuma rezultātā bija izskatīti šādi protokoli ar klasterizācijas algoritmiem: LCA[5], CLUBS[22], FLOC[9], ACE[7], WCA[8], DWEHC[10], LEACH[13], HCC[6], HEED[35].

Veiktie pētījumi parādīja, ka izskatītie protokoli apmierina lielāko daļu prasību, kas izvirzītas sistēmas pirmajam līmenim. Pētījuma rezultātu salīdzināšanai tiek piedāvāta 1.1. tabula. Diemžēl neviens no izskatītajiem protokoliem nenodrošina bez sadursmju komunikāciju klastera iekšienē, turklāt tiek fiksēts, ka pastāv sadursmes starpmezglu komunikācijā un ka tās nepieciešams samazināt. Rezultātā neviens no izskatītajiem, pastāvošajiem MAC protokoliem nevar garantēt determinētu datu pārraides ātrumu klastera iekšienē. Tāpat arī nav zināšanu par to izmantošanas iespējām hierarhiskos bezvadu sensoru tīklos.

1.1. tabula. MAC protokolu pētījuma apkopošana

Protokols	Mobilitāte	Energoefektivitāte	Atjaunošana	Balanss
LCA	Iespējama	Jā	Jā	Jā
CLUBS	Iespējama	Nav datu	Jā	Jā
FLOC	Iespējama	Nav datu	Jā	Jā
ACE	Iespējama	Nav datu	Jā	Jā
WCA	Iespējama	Jā	Nav datu	Jā
DWEHC	Nē	Jā	Nav datu	Jā
LEACH	BS ir fiksēta	Nav	Jā	Jā
HCC	Iespējama	Nav datu	Jā	Jā
HEED	Nē	Jā	Nav datu	Jā

Pēc MAC protokolu pētīšanas klasterizācijai bezvadu sensoru tīklā tika piedāvāts izpētīt pastāvošās hierarhiskās sistēmas WSN integrācijai TCP/IP tīklā. Tāpat kā gadījumā ar MAC protokolu pētīšanu sistēmas tiek pētītas ar mērķi noskaidrot pieejas piedāvātās sistēmas uzstādīto uzdevumu realizēšanai.

Darbā tiek piedāvāta metodoloģija, kas ir domāta hierarhisko sistēmu pētīšanai. Tā sastāv no divām daļām. Pirmajā daļā tiek piedāvāts veikt pētīšanu saskaņā ar četru līmeņu modeli, kas ir specifisks dotā tipa divu līmeņu bezvadu sensoru tīkliem:

- *Kanālu (MAC) līmenis* – noteikts MAC protokols un to paplašinoši algoritmi.
- *Klasteru formēšanas līmenis* – šajā līmenī tiek pētīti algoritmi, kas nodrošina klasterizāciju.
- *Tīklu līmenis* – šeit tiek analizēta sistēmas spēja nodot datu paketes klasteru iekšienē, tāpat arī spēja nodrošināt starpklasteru datu pārraidi. Bez tam dotajā līmenī tiek pētītas izskatīto sistēmu iespējas ziņojumu no WSN pārraidē TCP/IP tīklā.
- *Aplikāciju līmenis* – tajā tiek pētīti servisi, kurus var nodrošināt katra izskatītā sistēma.

Otrajā hierarhisko sistēmu salīdzināšanas un pētīšanas metodoloģija piedāvātā tās salīdzināt ar sistēmas arhitektūru, kas parādīta 1.2. attēlā. Tam nepieciešams katru sistēmu sadalīt divos līmeņos. Pirmais – tas ir klasterizēta bezvadu sensoru tīkla līmenis, bet otrais – tas ir maršrutētājus apvienojošs līmenis.

Notika šādu sistēmu pētīšana: CDC-DSA[19], MARWIS[32], CWSNLECC[4], MLCASLAAS[36]. Tās rezultātā tika konstatēts, ka MAC protokoli neapmierina visu sistēmu izvirzītās prasības, tas ir, analīzes rezultāts ir tāds pats kā iepriekš izskatītajai parastu MAC protokolu analīzei. Tomēr otrā līmeņa sistēmas analīze deva rezultātus tās projektēšanā, piemēram, sistēmā MARWIS daļa maršrutētāja, kas strādā WSN, rodas no parasta sensora mezgla. Bet citā sistēmā maršrutētājs izpilda datu apstrādes algoritmu pirms to pārraides TCP/IP tīklā. Tajā pašā laikā piedāvātajās sistēmās otrais līmenis tiek izmantots WSN salaidumam ar TCP/IP infrastruktūru.

2. DIVU LĪMEŅU SISTĒMAS MODELIS

Šajā nodaļā tiek izskatīts divu līmeņu tīkla piedāvātais modelis, uzbūvēts ar modelēšanas valodas SysML[23, 33] palīdzību. Modeļa būvēšana notiek saskaņā ar iepriekš nozīmētiem ierobežojumiem un sistēmas funkcijām. Tāpat arī pamatojoties uz pastāvošo hierarhisko sistēmu bezvadu sensoru tīkliem analīzes rezultātiem. Modelēšana notiek atbilstoši piedāvātajai sistēmas arhitektūrai, parādītai 1.2. attēlā.

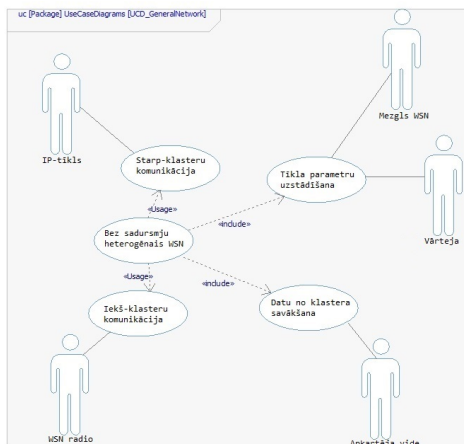
Lai nodrošinātu modeļa noderīgumu un adekvātumu, tai jāapmierina piecas īpašības. Pirmā – abstrakcijas nodrošināšana, tas ir, izvairīties no liekas, datu līmenī nevajadzīgas analīzes detalizācijas. Otrā īpašība – skaidrība, kas nodrošina iespēju rast skaidrību sistēmas principos bez tehniskās un protokolu specifikas. Trešā – precizitāte, modelim precīzi jāattēlo modelējamā sistēma. Ceturtā īpašība – prognozējamība, kad kļūst iespējams paredzēt sistēmas rīcību bez eksperimenta palaišanas. Piektā – zemas izstrādes izmaksas salīdzinājumā ar modelējamās sistēmas vai tās prototipa [26] izstrādi.

Izstrādājot sarežģītas sistēmas ir nepieciešams pievērst uzmanību to ierobežojumiem, funkcionalitātei un prasībām. Tā kā tādās sistēmās pastāv paaugstināts sakaru skaits starp sistēmas elementiem un iespējamām pārejām starp tās stāvokļiem – tādās īpašības sarežģī sistēmas saprašanu bez papildu līdzekļiem un pieejām, tādēļ tiek lietoti modeļi kā fizisko sistēmu abstrakcijas. Pamatā modelēšana tiek izmantota sistēmas uzlabošanai un uztveršanas vienkāršošanai, apzināti noteikt tās uzvedību un pārbaudīt ieviešanu [33]. Sistēmas piedāvātais modelis sastāv no divām daļām. Pirmā daļa ir lietošanas gadījumu diagramma (Use case diagram), kura nosaka darbojošos subjektu mijiedarbību ar sistēmas komponentiem. 2.1. attēlā parādīta lietošanas gadījumu diagramma piedāvātās divu līmeņu sistēmas. Šajā attēlā parādīta vairāku darbojošos subjektu mijiedarbība ar piedāvāto sistēmu. Tādā veidā bez sadursmju komunikācija WSN notiek divos sistēmas līmeņos. Pirmais līmenis realizē komunikāciju sensoru tīkla klasteru iekšienē, bet otrais līmenis – starp-klasteru komunikāciju grupēšanai un ziņojumu pārsūtīšanai uz galveno datoru, tāpat arī datu apmaiņu ar citiem otrā līmeņa mezgliem.

Pašai sistēmai pastāv divi pamatuzdevumi – datu no vides iestatīšana un apkopošana. Šajā uzdevumā ietilpst gan datu apkopošana, gan datu saglabāšanas operācija. Ja datu saglabāšana notiek ar to kopiju pārsūtīšanas uz galveno datoru palīdzību, tad datu noņemšana no sensoriem ir ierobežota ar prasībām pret sistēmu un izvēlēto sensoru mezglu aparat-nodrošinājumu.

Otrs sistēmas uzdevums ir nodrošināt kontroli un vadību caur parametru iestatīšanu atbilstoši izvirzītajām prasībām. Klasteru vadīšana sistēmā notiek ar galvenā datora starpniecību, no kura maršrutētāji saņem jaunus klasteru parametrus un to uzdevumus.

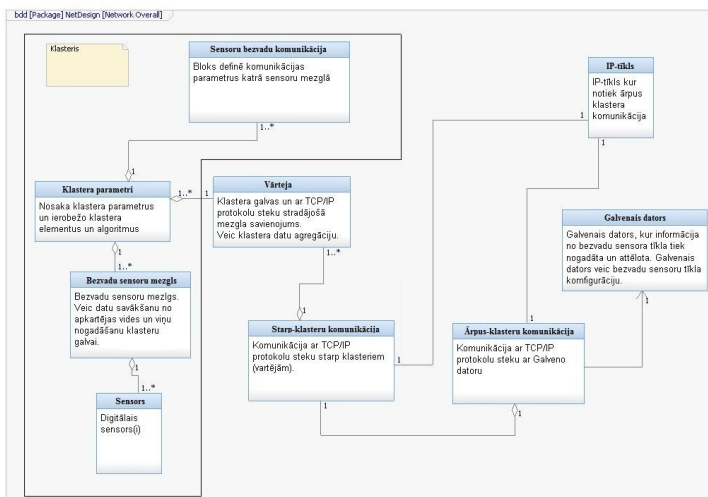
Katrs no agrāk pieminētajiem precedentiem ar tiem atbilstošām diagrammām ir sīkāk izskatīts darbā.



2.1. att. Sistēmas modeļa pirmā daļa. Lietošanas gadījumu diagramma

Piedāvātās sistēmas modeļa otrā daļa ir sistēmas kopējais modelis. Šāds modelis parāda atsevišķu sistēmas elementu-bloku savstarpējos sakarus, tāpat arī nosaka tādu sakaru interfeisus un sakarības. 2.2. attēlā parādīts sistēmas kopējais modelis bez sadursmju sistēmai, sastāvošs no divām daļām – iekš-klasteru un ārpus-klasteru elementiem. Katrs sistēmas elements saistīts ar citiem caur interfeisiem-portiem ar tipizētiem sakariem.

Klastera centrā atrodas bezvadu sensoru modulis, kas vada datu par vidi savākšanu. Tam pievienots viens vai vairāki ciparu sensori – par to liecina attiecība viens pret vienu vai vairākiem $1 - 1..*$. Sensoru mezgls vada datu savākšanu un to pārraidi klastera maršrutētājam, kurā tas atrodas. Šī piegāde tiek nodrošināta ar oriģinālā protokolu steka palīdzību, piedāvāta šajā darbā tāda veida sistēmām.



2.2. att. Sistēmas modeļa otrā daļa. Sistēmas kopējais modelis

Katru bezvadu sensoru mezglu klasterī ietekmē elements *Klastera parametri*. Šis elements sevī iekļauj ierobežojumus uz sensoru mezgliem, bezvadu komunikāciju un maršrutētājiem. Tādā veidā tas ir katra klastera centrālais elements, kas reglamentē iekš-klasteru komunikāciju.

Starp-klasteru komunikācija ir nodrošināta sistēmas otrajā līmenī. Maršrutētāji, savācot sensoru datus no savu klasteru mezgliem, izmanto *Starp-klasteru komunikācijas* elementu, savienojoties ar otra interfeisa palīdzību. Šis elements nosaka protokolu steku tādai komunikācijai, tāpat arī algoritmus tās realizācijai. Šajā sistēmas realizācijā starp-klasteru komunikācija notiek IP-tīklos, par ko liecina atbilstošais diagrammas elements.

Komunikācija ar citiem sistēmas objektiem, kā *Galvenais dators*, arī notiek IP-tīklos, bet ir ierobežota ar citu datu transporta algoritmu noteiktu elementā *ārpus-klasteru komunikācija*. Tomēr protokolu steks paliek nemainīgs, šajā gadījumā – TCP/IP.

3. BEZ SADURSMJU IEKŠKLASTERU KOMUNIKĀCIJA

Šajā darbā piedāvātās hierarhiskās sistēmas pamatā ir klasterizēts bezvadu sensoru tīkls. Katrs klasteris ir atdalīts no sava kaimiņa, izmantojot komunikācijai citas frekvences datu pārraides kanālu. Tādā veidā klasteru radio diapazoni, kas sastāv no sensoru mezgliem, var pārklāties bez sadursmju veidošanās negatīvā efekta. Līdz ar citām piedāvātās sistēmas īpatnībām nepieciešams nodrošināt bez sadursmju, determinētu komunikāciju starp katra klastera mezgliem, kas ļauj garantēt sensoru tīkla caurlaidspēju un precīzi noteikt iespējamās datu pārraides aizkaves. Attiecīgo prasību apmierināšanai darbā tiek piedāvāts jauns MAC slāņa protokols.

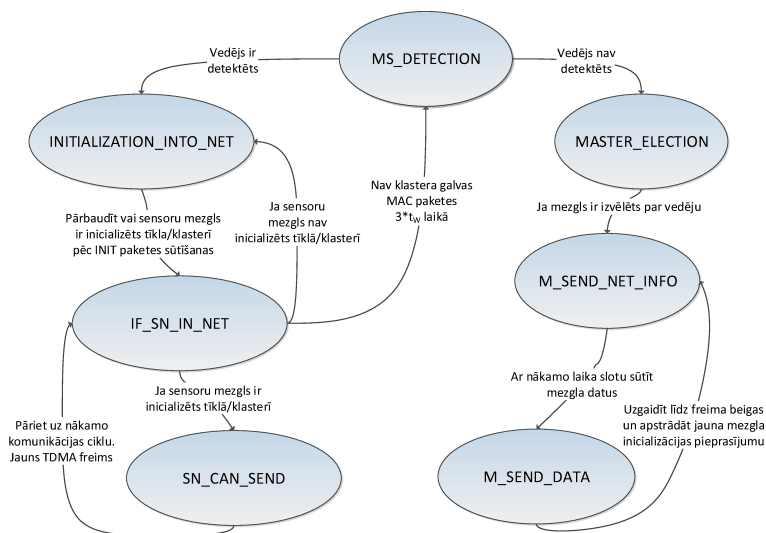
Piedāvātais bez sadursmju MAC protokols balstās uz laika sadalīšanas principu starp mezgliem. Šāda pieeja nodrošina bezkonfliktu datu pārraidi starp klastera mezgliem. Tomēr TDMA freimu nepieciešams noformēt jeb inicializēt sensoru mezglus klastera iekšienē, nosakot to laika slotus, kad tiem atļauts inicializēt datu pārraidi. Turklāt par sensoru mezglu inicializāciju atbild klastera galva – CH. No augstāk minētā izriet, ka bez sadursmju nodrošināšanai sistēmas pirmajā līmenī jābalstās uz trim MAC protokola darba etapiem: CH izvēle, jaunu klastera dalībnieku inicializācija, komunikācija TDMA freima iekšienē. Tādēļ jaunu TDMA freima dalībnieku bez sadursmju inicializācijas nodrošināšanai un CH izvēlei tiek izmantoti MAC protokola algoritmi, kas bāzējas uz sensoru mezglu ID sistēmas. Katram sensoru tīkla mezglam ir savs unikāls identifikators jeb ID.

Tā kā prasības pret sistēmu un tās iespējām var mainīties ar uzdevuma izpildīšanu, tāpat arī energoresursu ekonomijai MAC protokols piedāvā trīs darba režīmus. Pirmajā jeb noklusējuma režīmā katram sensoru mezglam tiek piešķirts viens laika slots. Otrajā režīmā CH var izdalīt papildu laika slotu vai vairākus konkrētajam sensoru mezglam – tāds režīms saucas par paaugstināta ātruma režīmu jeb papildus iedalītā laika slotu režīmu. Trešais režīms nodrošina energoresursu ekonomiju, kas tiek sasniegta, noliekot inicializētos dalībniekus miega stāvoklī.

Klastera galvas izvēlei MAC protokols izpilda iekš-klasteru pašorganizācijas algoritmu. Inicializētais TDMA freims sastāv no divu tipu mezgliem, tie tiek izvēlēti no konstruktīvi vienādiem mezgliem. CH izvēle tiek nodrošināta bez sadursmju manierē, tas ir, visos MAC protokola darba etapos, sākot ar inicializācijas fāzi, līdz inicializēta tīkla darba fāzei, sadursmju nav. Šī īpatnība ir unikāla, jo iepriekš sastopamajos darbos sadursmju neesamība tiek nodrošināta inicializētam tīklam, bet tās inicializācijas momentā tā netiek garantēta.

Piedāvātais MAC protokols nodrošina klastera robustumu, kas tiek sasniegts ar atbilstoša, trīs daļās sadalīta algoritma palīdzību. Pirmajā tā daļā tiek nodrošināta CH pastāvēšanas kontrole no klastera mezglu puses. Gadījumā ja noteiktajā laika intervālā netika saņemts ziņojums no CH, tad sensoru mezgli sāk atkārtotu inicializāciju. Otrajā daļā klastera galva nodrošina kontroli pār klastera stāvokli. Tas nozīmē, ka CH var noteikt, kādi klastera sensoru mezgli nav aktīvi, un ģenerēt atbilstošus ziņojumus otrā līmeņa un galvenām datora sistēmas elementiem. Taču trešajā klastera robustuma algoritma daļā pats galvenais dators vai sistēmas operators var reaģēt uz klastera stāvokļa izmaiņām atkarībā no uzstādītā uzdevuma.

MAC protokols ar tā specifiskajiem algoritmiem tiek piedāvāts galīgā automāta veidā (sk. 3.1. attēlā) ar noteiktiem stāvokļiem un pārejām.



3.1. att. Bez sadursmju MAC protokols galīgā automāta veidā

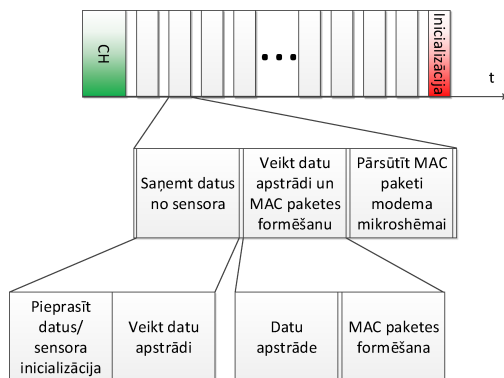
MAC protokolā ir realizēti šādi stāvokļi:

- *MS_DETECTION* – CH slotu noteikšana.
- *INITIALIZATION_INTRO_NET* – sensoru mezglu stāvoklis, kurā tie piedalās to inicializācijai tīklā.
- *IF_SN_IN_NET* – stāvoklis, kurā sensoru mezgls pārbauda, vai ir inicializēts tīklā.

- *SN_CAN_SEND* – šajā stāvoklī sensoru mezglam ir atļauts nodot datus tikai izdalītā laika slotā.
- *MASTER_ELECTION* – gadījumā ja CH nav noteikts stāvoklī *MS_DETECTION*, klastera mezgli sāk CH izvēles procesu šajā stāvoklī.
- *M_SEND_NET_INFO* – šajā stāvoklī izvēlētais sensoru mezgls sūta informāciju uz CH par tīklu, tādā veidā inicializējot jaunu TDMA freimu.
- *M_SEND_DATA* – nākamais CH stāvoklis pēc *M_SEND_NET_INFO*, kurā tas nosūta datus, kas saņemti no sava sensora(-iem).

Tāda algoritma aprakstīšanas forma tika izvēlēta, jo to var izmantot realizācijai izvēlētajos sensoru tīklu komponentos. Pie tā šāda pieeja ļauj paplašināt agrāk radīto protokolu. Šo var izdarīt izmainot un pievienojot jaunus stāvokļus un nosakot pāreju nosacījumus, pēc kā šī protokola struktūra ļauj izpētīt vai tajā nav loģisku pretrunu starp stāvokļiem.

Inicializēta komunikācija klasterī tiek organizēta TDMA freima veidā, kas sastāv no trim laika slotu veidiem, parādītiem 3.2. attēlā.



3.2. att. Piedāvātā MAC protokola TDMA freims ar trim slotu tipiem

Pirmais slotu tips pieder izvēlētajai CH un sastāv no divām daļām. Pirmajā daļā CH sūta informāciju par klasteri MAC paketes veidā, kurai ir datu lauka struktūra, kas parādīta 3.3. attēlā.

M _{ID0}	M _{ID1}		M _{SL0}	M _{SL1}	;	M _{ID0}	M _{ID1}		M _{SL0}	M _{SL1}	;	N _{ID0}	N _{ID1}		N _{SL0}	N _{SL1}	;	...	;	I _{NID0}	I _{NID1}
------------------	------------------	--	------------------	------------------	---	------------------	------------------	--	------------------	------------------	---	------------------	------------------	--	------------------	------------------	---	-----	---	-------------------	-------------------

3.3. att. MAC paketes datu lauka struktūra informācijas pārsūtīšanai par klasteri no CH

Datu lauks satur informāciju par CH mezglu – tā ID un slotu numuriem, kuru laikā tas var pārraidīt datu paketes, tāpat arī par citiem tīkla dalībniekiem klasterī. Katrs dalībnieks vai inicializētais sensoru mezgls ir reģistrēts datu struktūrā un atdalīts ar simbolu ”;” no citiem mezgliem. Piešķirtie laika sloti noteiktam sensoru mezglam tiek uzskaitīti pēc tā ID numura un atdalīti no tā ar simbolu ”|”. Freims beidzas ar nākamā sensoru mezgla ID numuru, kurš var pretendēt uz inicializāciju klasterī.

Slota otrais tips pieder sensoru mezgliem, tas parādīts 3.2. attēlā tukšs, pie tam slotu daudzums ierobežots ar klastera izmēru un sensoru mezgla aparāta ierobežojumiem. Katrs sensoru mezgls, saņemot CH paketi, palaiž taimeru un uzstāda tā pārbaudi uz laiku, kas vienāds ar laika slotu numuru, saņemtu no CH paketes ar informāciju par klasteri. Tādā veidā vienā laika vienībā var pārraidīt tikai viens sensoru mezgls.

Katrs sensoru laika slots dalās trīs etapos: datu no sensora saņemšanu, MAC paketes apstrādi un formēšanu un tā nodošanu modema-mikroshēmai. TDMA freims beidzas ar inicializācijas slotu, 3.2. attēlā tas apzīmēts ar tekstu *Inicializācija*. Šis laika slots izstrādāts, lai neinicializētie sensoru mezgli netraucētu klastera komunikācijai inicializācijas pakešu sūtīšanā.

Piedāvātais protokols dod iespēju izvēlēties trīs klastera darba režīmus. Pirmais nodrošina līdztiesīgu piekļuvi videi visiem inicializētajiem sensoru mezgliem, katram piešķirot vienu laika slotu. Gaidāmais sensoru mezgla datu pārraides ātrums n var tikt izteikts ar formulu:

$$V_n = \frac{t_{tx}}{t_{MS} + 2t_g + (n - 1) \cdot (t_s + t_g) + t_{init}} \cdot V, \quad (3.1)$$

kur V – sensoru mezglu izvēlētās platformas datu pārraides ātrums, piemēram, izstrādātā Texas Instruments platforma eZ430-RF2500 spējīga nodot datus ar ātrumu līdz 500kBs [15]; t_{tx} – nepieciešamais laiks datu pārraidei no sensoru mezgla mikroprocesora modēma-mikroshēmai un datu pārraide ēterā; m – sensoru mezglu daudzums klasteros; t_g – aizsardzības loga lielums starp kaimiņu slotiem.

Bet, ja tīklā eksistē mezgls ar papildus izdalītu laika slotu, tad mezgla j caurlaidspēju (V_{n_j}) var izskaitļot pēc sekojošās formulas:

$$V_{n_j} = \frac{t_{txa_j}}{t_{MS} + 2t_g + \sum_{i=2}^n \frac{t_{sa_i}}{t_s} \cdot (t_s + t_g) + t_{init}} \cdot V, \quad (3.2)$$

kur t_{txa_j} – ir sensoru mezgla laiks datus pārraidot modema mikroshēmai un tos nogādājot pārradies vidē, ar papildus izdalītiem slotiem; $\sum_{i=2}^n \frac{t_{sa_i}}{t_s} \cdot (t_s + t_g)$ – visu klastera mezglu kopējais slotu garums (kopā ar papildus iedalītajiem), izņemot CH.

Pēdējais piedāvātais protokola darba režīms ir samazināta energopatēriņa režīms, kad pēc komunikācijas cikla – TDMA freima, visi klastera sensoru mezgli aizmieg uz t_{sleep} laiku. Tādā gadījumā sensoru mezgla pārraides ātrums var būt izteiktis ar formulu:

$$V_n = \frac{t_{tx}}{t_{MS} + 2t_g + (m - 1) \cdot (t_s + t_g) + t_{init} + t_{sleep}} \cdot V. \quad (3.3)$$

Pārraidot ziņojumu no sensoru mezgla modema-mikroshēmai, tas tiek nodots noformētās MAC paketes veidā, kuras struktūra parādīta 3.4. attēlā.

2 Baiti	4 Baiti	4 Baiti	1 Baiti	50 Baiti	1 Baiti	1 Baiti	1 Baiti
MAC paketes garums	Sūtītāja adrese	Mērķa adrese	MAC paketes tips	Dati	Radio signāla stipruma indikators (RSSI)	Kontrolsumma (CRC)	Sākaru savienojum a indikators (LQI)

3.4. att. Piedāvātā MAC protokola MAC paketes struktūra

MAC pakete satur informāciju par paketes saņēmējiem un sūtītājiem, tāpat arī tās tipu, pēc kura var noteikt, kādā veidā apstrādāt paketi. Piemēram, paketes tipa lauks norāda uz CH tipu, tas ir, šajā paketē ir informācija par iekš-klastera struktūru. Tādā gadījumā datu nolaišanai vajadzēs izsaukt atbilstošu algoritmu. Citā gadījumā paketes tips norāda uz Datu paketi, tādā veidā skalārie dati tiks apstrādāti saskaņā ar klastera uzstādīto uzdevumu.

Datu lauka izmēra noteikšanai MAC pakete satur šī lauka garumu un glabā tā vērtību paketes sākumā. Tāda pieeja ļauj pāriet pie citas MAC paketes lauku grupas ar vienu komandu. Šī grupa satur nododamā signāla kvalitātes indikatorus.

4. SISTĒMAS OTRAIS LĪMENIS. KLASTERU AUTONOMA FORMĒŠANA

Iepriekšējā nodaļā bija aprakstīts piedāvātās sistēmas pirmais līmenis, kurā bija nodrošināta bez sadursmju komunikācija, citiem vārdiem, sensoru mezglu kolektīvā mijiedarbība bezvadu sensoru tīklā. Tomēr, piekrītot sistēmas arhitektūrai, kas parādīta 1.2. attēlā, mezglu kolektīva mijiedarbība pastāv arī otrajā līmenī. Tajā izvietoti maršrutētāji, kuru galvenais uzdevums ir protokolu transformācija no bezvadu sensoru tīkla TCP/IP tīklā. Bez tam, sensoru tīkla paplašināšana otrā līmeņa pievienošanas ceļā noved pie šādiem uzlabojumiem:

- *Klasteru autonoma formēšana.*
- *Sensoru datu piegāde TCP/IP tīklā.*
- *Klasteru vadības nodrošināšana.*
- *Datu apstrādes uzdevumu pārraide no CH maršrutētājiem.*

Tālāk īsi tiks izskafīts katrs no sistēmas funkciju uzlabošanas punktiem.

4.1. *Klasteru autonoma formēšana*

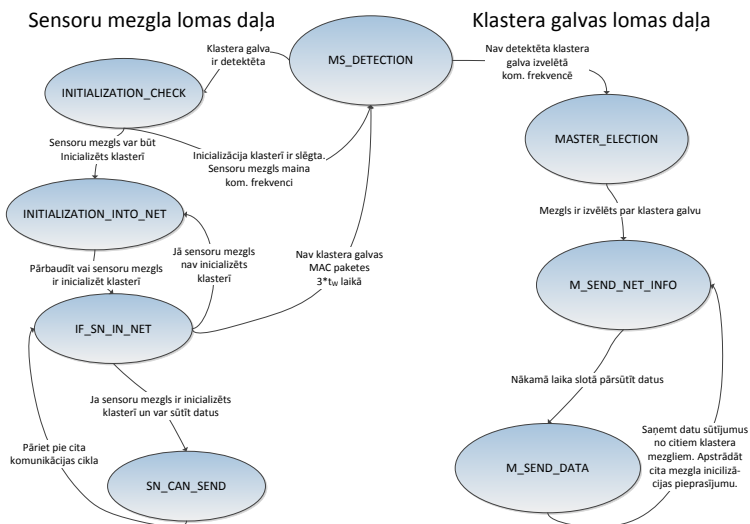
Darbā piedāvātais klasteru autonomas formēšanas algoritms domāts, lai strādātu sistēmas pirmajā līmenī un būtu daļa no bez sadursmju MAC protokola. Autonomā klasteru formēšana ļauj ieviest sensoru tīklā pašorganizāciju ne tikai iekš-klasteriem, bet arī to formatēšanu bez operatora piedalīšanās. Tāpat rodas iespēja nodrošināt tīkla pašatjaunojošanu, nosakot mērķa klasteri tikko vai jau inicializētam sensoru mezglam. Šī īpašība ir īpaši svarīga kritisko datu savākšanas uzdevumos, kad nepieciešams saņemt noteiktu daudzumu sensoru informācijas laika vienībā. Turklāt klasteru autonoma formēšana ļauj paplašināt sensoru tīklu atkarībā no pildāmajiem uzdevumiem, ierobežojot klasteru izmērus, tāpat arī apvienojot pastāvošos vai inicializēto to pārformēšanu konkrētā uzdevumā.

Visu klasteru autonomās formēšanas īpatnību nodrošināšanai nepieciešams ieviest izmaiņas oriģinālajā MAC protokolā:

- Visi bezvadu sensoru mezgli sāk savu darbu ar iepriekš noteiktu komunikācijas frekvenci.
- Ieviesti jauni MAC pakešu tipi, sk. 3.4. attēlā:

- CH servisa MAC pakete, kas informē par nepieciešamību pievienoties citam klasterim.
 - MAC pakete CH komunikācijai ar maršrutētāju.
- Maršrutētāji, savukārt, apmainās ar servisa informāciju.

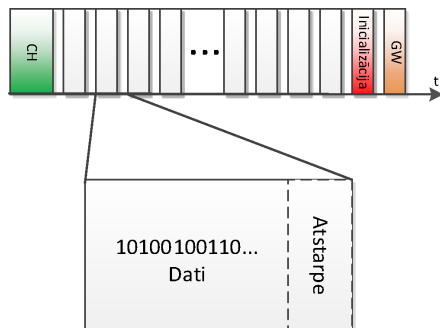
Oriģinālā MAC protokola izmaiņas ieviestas saskaņā ar aprakstīto pieeju – pievienojot jaunu stāvokli un aprakstot pārejas nosacījumus. Tā tika pievienots stāvoklis *INITIALIZATION_CHECK*, parādīts 4.1. attēlā, kurā neinicializētais sensoru mezgls pārbauda, vai var tikt inicializēts ar klastera galvu izvēlētajā komunikācijas frekvencē.



4.1. att. MAC protokola algoritms ar autonomas klasteru formēšanas algoritmu

Atrodies stāvoklī *INITIALIZATION_CHECK*, sensoru mezgls secīgi maina komunikācijas frekvences, meklējot inicializācijai brīvus klasterus. Lai paātrinātu procesu, tiek nodrošināta servisa informācijas apmaiņa starp maršrutētājiem. Tie apmainās ar ziņojumiem par to klasteru stāvokli, kas pēc tam tiek nodots CH mezgliem. Šī informācija iekļauj datus par: klastera galvas ID, sensoru mezglu daudzumu klasterī, brīvo vietu (slotu) daudzumu klasterī, bojāto sensoru mezglu daudzumu, klastera uzdevumiem, komunikācijas frekvenci klasterī. Tādā veidā neinicializētie sensoru mezgli saņem informāciju par inicializācijai brīvajiem klasteriem.

Ziņojumu apmaiņai starp klasteriem un maršrutētājiem tiek ieviests papildu laika slots *GW*, kas parādīts 4.2. attēlā.



4.2. att. MAC protokola TDMA freims ar autonomas klasteru organizācijas algoritmu

Attiecīgā slota ietvaros tiek apstrādāti ziņojumi no maršrutētāja. Piedāvātajā divu līmeņu sistēmā tie ir klastera konfigurācijas parametri tā uzdevumu risināšanai, tāpat arī informācija par brīvajiem klasteriem, kuros nepieciešams inicializēt jaunus klasterizēta sensoru tīkla daļībniekus.

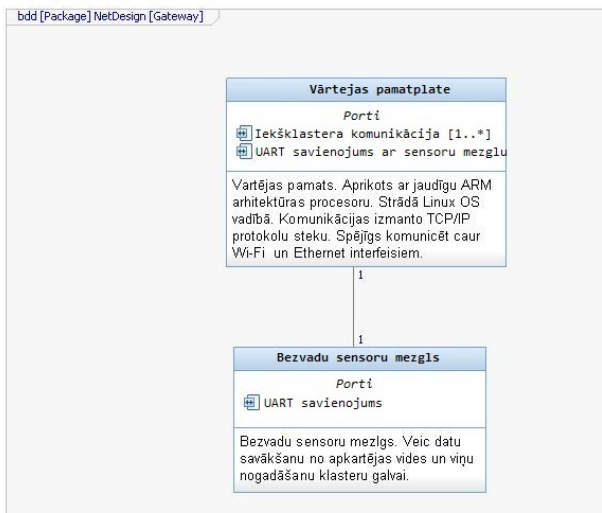
4.2. *Sensoru un servisa informācijas apmaiņa starp maršrutētājiem*

Jāatgādina, ka maršrutētāju primārā funkcija piedāvātajā sistēmā ir ietverta sensoru datu nogādāšanas nodrošināšanā no klasteriem TCP/IP tīklā. Attiecīgās funkcijas nodrošināšanai maršrutētājs sastāv no divām daļām, kā tas ir parādīts 4.3. attēlā.

Pirmā daļa – maršrutētāja bāze nodrošina bezvadu, klasterizēta sensoru tīkla protokolu steka pārvēršanu TCP/IP protokolu stekā. Bez tam maršrutētāji otrajā sistēmas līmenī nodrošina datu transportu no klasteriem līdz galvenajam datoram ar izstrādātā transporta protokola starpniecību. Tā kā tādu mezglu izmantošana sistēmā ļauj samazināt datu apstrādes slodzi CH, tad datu apstrādes algoritmi no sensoru tīkla notiek maršrutētājos. Tas kļuva iespējams, nodrošinot nepārtrauktu barošanu no tīkla.

Otrā mezgla maršrutētāja daļa parādīta 4.3. attēlā un ir interfeiss pie sensoru tīkla. Darbā tiek piedāvāts izmantot to pašu bezvadu sensoru mezglu, ko klasteru formēšanā, jo tādā veidā

tiek sasniegta bezvadu komunikācijas saskaņotība aparātīlmenī starp vienādiem mezgliem, kas paaugstina sistēmas drošību. Abu maršrutētāja daļu sakariem tiek piedāvāts izmantot UART tipa interfeisu. Šis interfeiss tika izvēlēts tā pieejamības mikroprocesoru tehnikā un piedāvāto funkciju dēļ: datu pārraides ātruma konfigurācija, kļūdu kontrole.

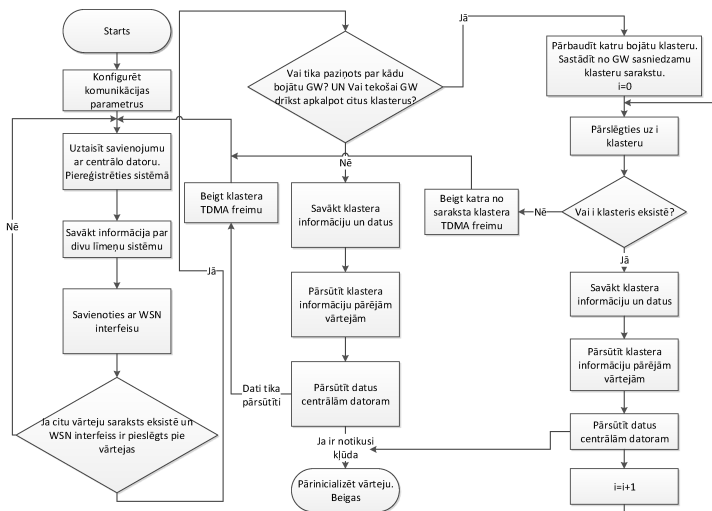


4.3. att. Maršrutētāja sastāvdaļas

Datu no klasteriem apstrāde notiek ar atbilstošu algoritmu starpniecību, kas ieprogrammēti un palaisti maršrutētājos. Darbā tiek piedāvāti četri plaši izmantojami sensoru datu algoritmi, to apraksts un izmantošanas piemērs kopējā programmas nodrošinājumā. Saskaņā ar piedāvāto pieeju citi algoritmi atbilstoši sistēmas uzdevumiem var tikt realizēti un uzstādīti maršrutētājos.

Pēc sensoru informācijas no klastera apstrādes maršrutētājs saskaņā ar transporta protokolu, parādītu 4.4. attēlā nodrošina datu pārraidi līdz galvenam datoram. Algoritms ir sadalīts trīs loģiskās daļās. Pirmajā notiek maršrutētāja pamatdaļas sakaru uzstādīšana ar otru daļu – interfeisu pie sensoru tīkla, tāpat arī maršrutētāja reģistrācija sistēmā. Pēc veiksmīgas reģistrācijas maršrutētājs saņem informāciju par sistēmas stāvokli: sensoru mezglu daudzumu klasteros, to stāvokli, tāpat arī citu maršrutētāju stāvokli. Tāpat šajā daļā maršrutētājs saņem vadības ziņojumus no operatora. Otrā transporta protokola daļa izpildās gadījumā, ja nepieciešams nodrošināt klasteru atbalstu, kuru maršrutētāji izgājuši no ierindas. Tādā veidā bez datu savākšanas, apstrādes un

pārtraides attiecīgais algoritms nodrošina bojāto sistēmas elementu atbalstu. Maršrutētājs, kurš ticis izvēlēts atbalsta nodrošināšanai, savāc sensoru datus no klasteriem secīgi, veicot datu pārsūtīšanu galvenajam datoram vai citiem maršrutētājiem. Trešajā algoritma daļā tā pati klastera apstrādes procedūra notiek attiecīgā maršrutētāja klasterī.

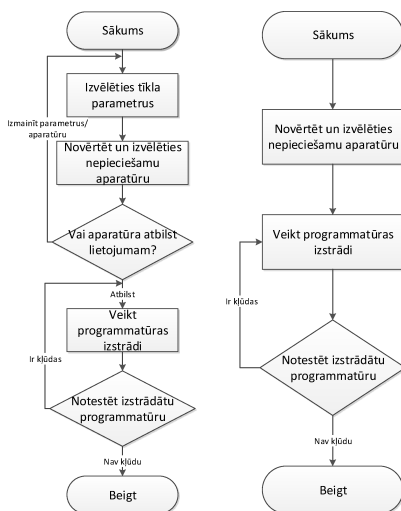


4.4. att. Maršrutētāja transporta protokols

4.3. Divu līmeņu sistēmas projektēšanas metodika

Darbā pēc protokolu, algoritmu un sistēmas spēju izklāstīšanas tiek piedāvāta divu līmeņu sistēmu projektēšanas metodika.

Metodika sastāv no divām metodēm: sistēmas pirmā līmeņa projektēšanas metode un sistēmas otrā līmeņa projektēšanas metode. Piedāvātās pieejas ilustrācijai tiek piedāvātas divas, abām metodēm atbilstošas blokdiagrammas (sk. 4.5. attēlā).



4.5. att. Divu līmeņu sistēmas projektēšanas metodika

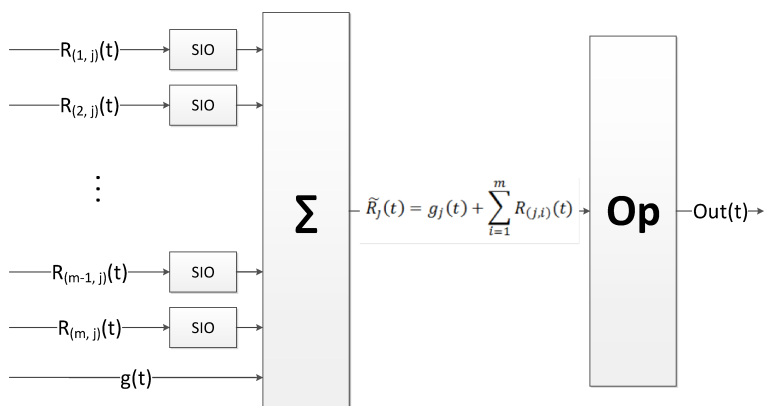
Darbā tiek piedāvāts sākt projektēšanu no sistēmas pirmā līmeņa, jo tīkla parametri vai augstākas pakāpes uzdevumi iespaido pirmā līmeņa aparātdaļas izvēli, tāpēc ka pašiem sensoru mezgliem ir ierobežoti resursi. Šī soli tiek piedāvāts izvēlēties aparātdaļu pirmajam līmenim. Ja aparātdaļas atbilstības uzdevumam pārbaude beidzās sekmīgi, tad drīkst pāriet pie cita soļa – programmatūras izstrādes. Darbā tiek piedāvātas rekomendācijas programmas nodrošinājuma izstrādei ierobežotu resursu apstākļos. Pēc programmas nodrošinājuma sensoru mezgliem izstrādes šajā darbā tiek piedāvāta pieeja iegūto rezultātu testēšanai: norādītas vietas, kurām jāpievērš uzmanība un pārliecināties par to darba pareizumu. Veiksmīgas testēšanas gadījumā pirmā metode tiek pabeigta un projektēšana turpinās sistēmas otrā līmeņa izstrādē.

Projektēšanas metodikas otrā daļa ir sistēmas otrā līmeņa projektēšanas metode. Tā kā saskaņā ar pirmās projektēšanas metodes rekomendācijām uzdevuma parametri ir zināmi un adaptēti zem konkrētas platformas, tad nav vajadzības ieviest atkārtotus soļus un atbilstības pārbaudes. Pēc aparātu platformas izvēles darbā tiek piedāvāts pāriet pie nākamā soļa – maršrutētāju programmas nodrošinājuma izveidošanas, pēc tam veikt tās testēšanu saskaņā ar norādēm darbā.

5. DIVU LĪMEŅU SISTĒMAS MODELIS DATU APSTRĀDES AIZKAVES ANALĪZEI

Tā kā piedāvātā divu līmeņu sistēma ir sarežģīta – sastāv no divām daļām, ir nepieciešams, lai būtu iespēja veikt iepriekšēju tās veiktspējas analīzi bez tās uzstādīšanas. Sistēmas uzdevums ir veikt datu uzkrāšanu, tāpat objektu vadīšanu ar sensoru mezglu palīdzību. Tāpēc nepieciešams zināt piedāvātās sistēmas arhitektūras iespējas izpildīt šādus uzdevumus. Ar sistēmu veiktspēju saprot pārraidīto datu daudzumu laika vienībā, tāpat arī iespējamo sistēmas mezglu sensoru datu apstrādes aizkavju lielumus.

Šajā darbā tiek piedāvāts statistisks modelis veiktspējas un iespējamo datu apstrādes aizkavju novērtēšanai, tos pārraidot no sensoru mezgliem TCP/IP tīklā. Modelis parādīts 5.1. attēlā.



5.1. att. Bez sadursmju MAC protokols galīgā automāta veidā

Modelis iekļauj sevī abus sistēmas līmeņus. Tā uz modeļa ieeju tiek padotas datu plūsmas no m sensoru mezgliem no j -tā klastera. Visas plūsmas iziet caur datu seriālās pārraides bloku - *SIO* saskaņā ar MAC protokolu. Katra saņemtā straume summējas klastera maršrutētājā kopējā datu masīvā, sadalītā pēc sensoru tipa. Līdzās no sensoru mezgliem saņemtajiem datiem uz summējošo bloku nokļūst arī no kaimiņu maršrutētājiem saņemtie dati. Summējošā straume tiek nodota uz modeļa apstrādājošo bloku - *Op*, pēc kura darba parādās rezultējošā, apstrādājošā

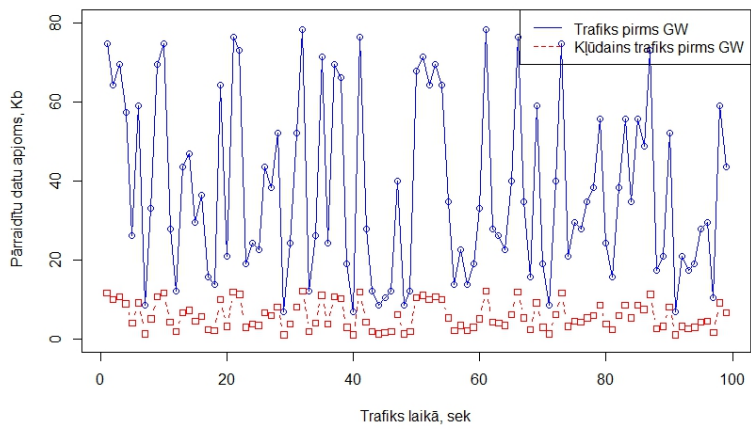
datu plūsma no vārtejas. Tādēļ rezultējošā datu straume $Out(t)$ caur interfeisu TCP/IP tīklā tiek nodota galvenajam datoram.

Otrais modelis ļauj pārbaudīt izvēlēto aparatbāzi dotā uzdevuma risināšanai bez palaišanas reālajā sistēmā. Katra modeļa bloka aprakstīšanai jāatbilst to reālajam aprakstam. Tā blokam *SIO* jābūt noteiktai tā caurlaides spējai, bet apstrādes blokam jābūt pārbaudītam, izpildot tā darbu simulējošu programmu. Tādā veidā šis modelis ir paredzēts ne tikai datu apstrādes aizkavju analīzei, bet arī sistēmas parametru izvēles pareizības pārbaudei.

Vārtejas sarežģītības dēļ, aparatnodrošinājums izmanto operētājsistēmu Linux. Šajā gadījumā izstrādātājam tiks piedāvāti izstrādes līdzekļi un interfeisi pie tīkla apakšsistēmas un vārtejas aparatdaļas formā bez saistīšanas pie konkrētas aparātu platformas. Tomēr daudzo uzdevumu dēļ OS piešķirto iespēju nodrošināšanai vārtejas programmas izpildes laiks var variēt. Šādas pieejas izmantošanas gadījumā, projektējot sistēmas otro līmeni, izvēlētai aparatplatformai jābūt novērtētai no kritiskā laika skatpunkta, ja tas ir nepieciešams. Izmantojot programmu, kas simulē maršrutētāja darbu izvēlētajā aparatplatformā, tiek piedāvāts ievākt statistiskos datus par programmas izpildes matemātisko cerību dažādam mezglu daudzumam klasterī, tāpat arī vidējā kvadrātiskā novirze katrā eksperimenta punktā. Saņemtos statistiskos datus tiek piedāvāts izmantot izvēlētas platformas programmu izpildes stabilitātes novērtēšanai. Apmierinoša vērtējuma gadījumā iepriekš saņemtos datus tiek piedāvāts izmantot modeļa blokā *Op*.

Ilustrāciju veidā tiks parādīts piemērs, 5.2. attēlā - sistēmas parametru nepareizas izvēles gadījums, precīzāk *SIO* bloka.

Šeit var redzēt pareizo summāro datu straumi no sensoru mezgliem, kas parādīta attēlā ar nepārtrauktu līniju. Tomēr nepareizi izvēlēta vai nokonfigurēta *SIO* bloka dēļ, daļa datu nepaspēj tikt nodoti maršrutētāja bāzes daļai, tādā veidā paliek pieejama tikai daļa datu. Tādēļ tiek uzskatīts, ka modeļa izmantošana pirms šādas sistēmas projektēšanas nepieciešama precizējumiem, platformas izvēlei un kļūdu atklāšanai.



5.2. att. Nodotais datu apjoms pie mainīga nododošo mezglu apjoma līdz to apstrādei maršrutētājā. Kļūdains konfigurēts bloks *SIO*

GALVENIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI

Promocijas darbā ir piedāvāta un izskatīta divu līmeņu bezvadu sensoru tīkla sistēma. Pirmā līmenī atrodas bezvadu sensoru tīkls, kas sastāv no sensoru mezgliem, kuri veic vides vai objekta mērījumus, kā arī sensoru vietā var atrasties aktuātori. Respektīvi, pirmais līmenis sastāv no resursu ierobežotiem bezvadu sensoru mezgliem, kas sadarbojas ar vidi. Bezvadu sensoru mezgli ir organizēti klasteros. Iekš-klasteru komunikācijai izstrādāts bez sadursmju vides piekļuves vadības protokols. Tas balstās uz TDMA principa ar īpašu inicializāciju un TDMA freima uzturēšanas algoritmiem. Bezvadu sensoru mezgli tiek sadalīti klasteros, izmantojot pašizstrādātu autonomu klasterizācijas algoritmu. Šā bezvadu sensoru tīkla organizācija ienes vairākas pozitīvas īpašības, tādas kā klasteru pašorganizēšana, determinēta datu savākšana, izmantoto resursu samazināšana, samazināta barošanas enerģijas izmantošana u.c. Katrs klasteris sastāv no parastiem sensoru mezgliem un starp tiem izvēlētu klasteru galvu. Klastera galva ir mezgls, kas veic galvenās atbalstīšanas funkcijas klastera ietvaros. Pēc būtības CH mezgls ir klastera vedējs, kas ir atbildīgs par neinicializētu sensoru mezglu iekļaušanu klasterī un TDMA freima sākuma paziņošanu, nosūtot informāciju par klastera konfigurāciju.

Izveidotās sistēmas otrais līmenis sastāv no vārteju mezgliem. Tie ir aprīkoti ar lielākiem resursiem kā bezvadu sensoru mezgli. Vārtejām ir lielāks atmiņas apjoms, skaitļošana i jaudīgāks procesors, kā arī tās var būt pieslēgtas pie nepārtrauktas barošanas. Šīs īpašības tiek nodrošinātas GW pildāmo uzdevumu dēļ, kur galvenais uzdevums ir veikt protokolu transformāciju no bezvadu sensoru tīkla jeb klasteriem uz TCP/IP-tīkliem. GW papildus uzdevums ir no klasteru iegūto datu apstrāde, kas noņem šo slodzi no CH mezgla, kā arī notiek dažās citās sistēmās. Šo operāciju veikšanai ir nepieciešams vismaz TCP/IP protokolu steks, organizēts ietvērprogrammatūras veidam, kā arī procesu pārslēgšanas algoritms. Šeit tika izmantota operētājsistēmu Embedded Linux, proti, to palaišanai un korektas darbības veikšanai nepieciešamie aparāt-resursi. Sistēmai korekti strādājot, katram klasterim tiek noteikta GW, bet sistēmas darbības laikā gan GW, gan sensoru mezgli var iziet no ierindas. Šo gadījumu novēršanai arī tika piedāvāts izmantot vārtejas. Vairāku klasteru atbalstīšanas algoritms ļauj novērst gadījumu, kad kāds klasteris paliek neaktīvs jeb dati no tā netiek pārsūtīti TCP/IP tīklā. Tad citi GW mezgli mēģina pieslēgt neaktīvu klasteru kā papildus klasteru. Cits kļūdu avots ir neaktīvu sensoru mezglu aizvietošana. GW mezgli apmainās ar informāciju par saviem klasteriem, kurā nodod ziņojumus par prasībām

iekļaut/aizvietot sensoru mezglu. No GW šī informācija tiek nodota klastera galvām un jaunam, neinicializētam sensoru mezglam tā būs pieejama inicializācijas fāzē. Šī GW īpašība ļauj ieviest ne tikai divu līmeņa tīkla paštjaunošanu, bet arī ātru jauno daļēnīeku iekļaušanu.

Divu līmeņu sistēmas projektēšanai tika piedāvāta metodika. Projektēšanas metodiku tika izvēlēts sadalīt vairākos etapos. Šāda sadalīšana palīdz sistēmas inženierim izstrādāt sistēmu izvēlētai platformai un veikt sistēmas pārkonfigurēšanu. Tas tiek panākts ar norādēm promocijas darba tekstā. Rezultātā inženieris var atrast viņu interesējošus paskaidrojumus, pārejot pēc norādēm. Projektēšanas metodika iekļauj gan vadlīnijas pie aparāt-nodrošinājuma izvēles, gan programmas izstrādes, gan testēšanai. Projektēšanas metodika tika izstrādātas pirmā sistēmas līmeņa izstrādei, kā arī otra jeb vārteju līmeņa izstrādei.

Pirms divu līmeņu sistēmas izstrādāšanas tika definēta tās arhitektūra, kuru aprakstīja un izmantoja mūsdienu situācijas novērtēšanai. Veicot eksistējošu divu līmeņu sistēmu analīzi, tika konstatēts, ka neviena no apskatītām sistēmām pilnā mērā neapmierina izvirzītās prasības, kaut gan satur to daļas. Tāpat, analizējot klasteru formējošus algoritmus ar MAC protokoliem, netika atrasti tādi, kuri apmierinātu izvirzītās prasības, kaut gan daži protokoli nodrošina bez sadursmju komunikāciju, bet tikai inicializētam sensoru tīklam. Taču inicializācijas fāzē māk traucēt citiem sensoru tīkla daļēnīekiem. Pēc piedāvātās arhitektūras tika izstrādāts modelis SysML valodā. Kopējais modelis tika dalīts divās daļās. Pirmais modelis deva iespēju aprakstīt un definēt priekšstatu par sistēmas izmantošanas iespējām, bet otrs modelis ļauj sistēmu analizēt un apskatīt no uzbūves skatpunkta, respektīvi, no kādiem elementiem jeb blokiem sistēma sastāv un kādas ir šo bloku attieksmes un veidi.

Balstoties uz iegūtās informācijas un divu līmeņu sistēmas MAC protokola un citiem algoritmiem, tika parādīta tīkla aprēķināšana divās daļās. Pirmā ir klastera komunikācijas daļa, kurā tiek modelēta MAC protokola caurlaidspēja. Bez sadursmju komunikācijas un bez konfliktu inicializācijas algoritma dēļ kļūst iespējams izveidot iekš-klasteru determinētu datu pārraidi, kā arī, kļūst iespējams sensoru tīklu pielietot laika kritiskos uzdevumos. Caurlaidspējas un datu pārsūtīšanas laiku noteikšanai tiek piedāvāti trīs darbības režīmu aprakstošie vienādojumi. Tika piedāvāts tos izmantot tīkla aprēķināšanas modelī, kur katra datu plūsma no sensoru tīkla mezgla tiek summēta un padota uz nākamo modeļa daļu - GW mezglu, kura balstās uz statistisku datu izmantošanas datu aprādes uz GW aizkaves noteikšanai. Modeļa otrai daļai tiek savākti nepieciešamie statistiskie dati. Tiek parādīts ar piemēru, kā var pielietot tīkla aprēķināšanas modeli, analizējot sistēmas caurlaidspēju noteiktās konfigurācijas klasteriem un vārtejām.

LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] Jonathan R. Agre, Loren P. Clare, Gregory J. Pottie, and Nikolai P. Romanov. Development platform for self-organizing wireless sensor networks. *Unattended Ground Sensor Technologies and Applications*, 3713(1):pp. 257–268, 1999.
- [2] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 38(4):pp. 393–422, March 2002.
- [3] Hande Alemdar and Cem Ersoy. Wireless sensor networks for healthcare: A survey. *Computer Networks*, 54(15):2688–2710, October 2010.
- [4] Bassam Aoun and Raouf Boutaba. Clustering in WSN with Latency and Energy Consumption Constraints. *Journal of Network and Systems Management*, 14:pp. 415–439, 2006.
- [5] Dennis J. Baker and Anthony Ephremides. The Architectural Organization of a Mobile Radio Network via a Distributed Algorithm. *IEEE Transactions on Communications*, volume 29, pp. 1694–1701, November 1981.
- [6] S. Banerjee and S. Khuller. A clustering scheme for hierarchical control in multi-hop wireless networks. *INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, volume 2, pp. 1028–1037, 2001.
- [7] Haowen Chan and Adrian Perrig. Ace: An emergent algorithm for highly uniform cluster formation. *Proceedings of the First European Workshop on Sensor Networks (EWSN)*, pp. 1–6, 2004.
- [8] Mainak Chatterjee, Sajal K. Das, and Damla Turgut. Wca: A weighted clustering algorithm for mobile ad hoc networks. *Journal of Cluster Computing (Special Issue on Mobile Ad hoc Networks)*, 5:pp. 193–204, 2001.
- [9] Murat Demirbas, Anish Arora, and Vineet Mittal. Floc: A fast local clustering service for wireless sensor networks. *Workshop on Dependability Issues in Wireless Ad Hoc Networks and Sensor Networks (DIWANS/DSN 2004)*, pp. 1–6, 2004.

- [10] Ping Ding, Joanne Holliday, and Aslihan Celik. Distributed Energy-Efficient Hierarchical Clustering for Wireless Sensor Networks. *Distributed Computing in Sensor Systems*, pp. 322–339, 2005.
- [11] Jeremy Elson and Deborah Estrin. *Wireless sensor networks*, chapter Sensor networks: a bridge to the physical world, pp. 3–20. Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, USA, 2004.
- [12] Renita Murimi Garth V. Crosby, Tirthankar Ghosh and Craig A. Chin. Wireless Body Area Networks for Healthcare: A Survey. *International Journal of Ad hoc, Sensor & Ubiquitous Computing (IJASUC)*, 3(3):pp. 1–26.
- [13] W.R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. *System Sciences, 2000. Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, volume 8, 2000.
- [14] INFOCOM 2013. The 32nd IEEE International Conference on Computer Communications. <http://infocom.di.unimi.it/index.php/home.html>. [Resurss apskatīts 22-Mar-2013].
- [15] Texas Instruments. eZ430-RF2500 Development Tool User’s Guide. Texas Instruments product documentation.
- [16] Joseph Kabara and Maria Calle. MAC Protocols Used by Wireless Sensor Networks and a General Method of Performance Evaluation. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2012.
- [17] Taranovs R. Klavins E. Remote web camera based robot control in bounded space. *Scientific Journal of RTU, Datorzinātne*, 48(5):pp. 63–68, 2011.
- [18] Sang Hyuk Lee, Soobin Lee, Heecheol Song, and Hwang Soo Lee. Wireless sensor network design for tactical military applications : Remote large-scale environments. *Military Communications Conference, 2009. MILCOM 2009. IEEE*, pp. 1 –7, oct 2009.
- [19] Mahdi Lotfinezhad, Ben Liang, and Elvino S. Sousa. Adaptive cluster-based data collection in sensor networks with direct sink access. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 7(7):pp. 884–897, July 2008.

- [20] M. Maimour, C. Pham, and D. Hoang. A congestion control framework for handling video surveillance traffics on wsn. *2012 IEEE 15th International Conference on Computational Science and Engineering*, 2:pp. 943–948, 2009.
- [21] Taranovs R. Miežitis G. Object tracking in wireless sensor network: Survey. *Scientific Journal of RTU, Datorzinātne*, 42(5):pp. 45–52, 2010.
- [22] Radhika Nagpal and Daniel Coore. An algorithm for group formation in an amorphous computer. *Proc. 10th International Conference on Parallel and Distributed Computing Systems (PDCS'98)*. Citeseer, 1998.
- [23] OMG. OMG Systems Modeling Language. <http://www.omgsysml.org/>. [Resurss apskatīts 22-Okt-2012].
- [24] Sensys: The ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. ACM SenSys 2013. <http://sensys.acm.org/>. [Resurss apskatīts 22-Mar-2013].
- [25] K. Ramya, K.P. Kumar, and V.S. Rao. A survey on target tracking techniques in wireless sensor networks. *International Journal of Computer Science & Engineering Survey (IJCSES)*, 3(4):pp. 93–108, August 2012.
- [26] Bran Selic. The pragmatics of model-driven development. *IEEE Softw.*, 20(5):pp. 19–25, September 2003.
- [27] J. A. Stankovic, Q. Cao, T. Doan, L. Fang, Z. He, R. Kiran, S. Lin, S. Son, R. Stoleru, and A. Wood. Wireless Sensor Networks for In-Home Healthcare: Potential and Challenges. *HCMDSS*, 2005.
- [28] Erins A. Zagurskis V. Taranovs R., Vilde K. Main quality limitations for based on local network videoconferencing. *Scientific Journal of RTU, Datorzinātne*, 42(5):pp. 38–44, 2010.
- [29] CH Ubicomp 2013 Sep. 8-12, Zurich. UbiComp 2013. <http://www.ubicomp.org/ubicomp2013/>. [Resurss apskatīts 22-Mar-2013].
- [30] Ovčiņņikova Viktorija. Bezvadu sensoru tīklu modelēšana. Rīgas Tehniskā universitāte, Datorzinātnes un informācijas tehnoloģijas fakultāte, Jūnijs 2013.

- [31] Hariharasudhan Viswanathan, Baozhi Chen, and Dario Pompili. Research challenges in computation, communication, and context awareness for ubiquitous healthcare. *IEEE Communications Magazine*, 50(5):pp. 92–99, 2012.
- [32] Gerald Wagenknecht, Markus Anwander, Torsten Braun, Thomas Staub, James Matheka, and Simon Morgenthaler. MARWIS: a management architecture for heterogeneous wireless sensor networks. *Proceedings of the 6th international conference on Wired/wireless internet communications*, WWIC'08, pp. 177–188, Berlin, Heidelberg, 2008. Springer-Verlag.
- [33] Tim Weilkiens. *Systems engineering with SysML / UML - modeling, analysis, design*. Morgan Kaufmann, p. 320, 1 edition, 2004.
- [34] O. Younis, M. Krunz, and S. Ramasubramanian. Node clustering in wireless sensor networks: recent developments and deployment challenges. *Network Magazine, IEEE*, 20(3):pp. 20–25, 2006.
- [35] Ossama Younis and Sonia Fahmy. Heed: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 3:pp. 366–379, 2004.
- [36] Marc Zeller, Gereon Weiss, Dirk Eilers, and Rudi Knorr. A multi-layered control architecture for self-management in adaptive automotive systems. *Proceedings of the 2009 International Conference on Adaptive and Intelligent Systems*, ICAIS '09, pp. 63–68, Washington, DC, USA, 2009. IEEE Computer Society.

Romāns TARANOVŠ

**KOMPONENŠU KOLEKTĪVA MIJIEDARBĪBA
BEZVADU SENSORU TĪKLOS**

Promocijas darba kopsavilkums

Parakstīts iespiešanai 2014.22.04. Reģ. apl. Nr. 2-0282.
Formāts 60x84/16. Ofseta papīrs. Ofseta papīrs. 3,00 iesp.l.,
2,05 uzsk.izd.l. Metiens 25 eks. Pasūt. Nr. 24.
Iespiests RTU tipogrāfijā, Rīga LV-1658, Kaļķu ielā 1.