

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

Kamran Ayub

Doktora studiju programmas “Attēlu apstrāde un datorgrafika, datortehnika un tīkli” doktorants

**IMPULSU RADIO PIELIETOJAMĪBAS IZPĒTE BEZVADU
SENSORU TĪKLOS UN JAUNAS ATBILSTOŠAS
ARHITEKTŪRAS IZSTRĀDE**

Promocijas darba kopsavilkums

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

**RTU Izdevniecība
Rīga 2016**

Kamran Ayub. Impulsu radio pielietojamības izpēte bezvadu sensoru tīklos un jaunas atbilstošas arhitektūras izstrāde. Promocijas darba kopsavilkums. – R.: RTU Izdevniecība, 2016. – 47 p.

Iespiests saskaņā ar DAD institūta 2016. gada 25. maija lēmumu, protokols Nr. 12200-2/3.

PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI
RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts gada 21. decembrī Rīgas Tehniskās universitātes Datorzinātnes un informācijas tehnoloģijas fakultātē, Sētas ielā 1, 202. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. habil. sc. ing.* Leonīds Novickis
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Profesors *Dr. sc. ing.* Aleksandrs Grakovskis
Transporta un sakaru institūts, Latvija

Asoc. profesors *Dr. Husrev Taha Sencar*
TOBB universitāte, Turcija

APSTIPRINĀJUMS

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

Kamran Ayub (Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, piecas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, divi pielikumi, 76 ilustrācijas, kopā 149 lappuses. Literatūras sarakstā ir 121 nosaukums.

SATURS

IEVADS	6
Tēmas aktualitāte.....	6
Uzdevumi	7
Promocijas darba mērķis un uzdevumi	7
Aizstāvamās tēzes.....	7
Pētījuma priekšmets	7
Zinātniskā novitāte	8
Darba struktūra	10
1. VIDES PIEKĻUVES VADĪBA PĀRRAIDĒS AR PILOTSIGNĀLU.....	10
1.1. Laika diagrammas	13
1.2. Veiktspējas analīze	14
1.3. Plūsmas diagramma.....	15
1.4. Simulācijas rezultātu apkopojums.....	16
2. MAC PĀRVALDĪBAS AR PILOTSIGNĀLA PĀRRAIDI ARHITEKTŪRAS DIZAINS.....	18
2.1. Pilotsignāla pārraide ar DH-Kods (Volterra modelis).....	18
2.2. BER veiktspēja	20
2.3. Simulācijas rezultāti	20
3. GRUPĒŠANAS PIELĀGOŠANAS IESPĒJAS.....	22
3.1. Piedāvātā stratēģija.....	22
3.2. Izveides režīms	22
3.3. Stabilizācijas režīms	23
3.4. Grupas iekšēja saziņa	23
3.5. Grupu savstarpējā saziņa	24
3.6. Interferences pārvaldība	24
3.7. Simulācijas un veiktspējas novērtējums.....	24
3.8. Vidējā enerģija	25
3.9. Tīkla dzīves laiks	26
3.10. Pakešu piegādes attiecība	27
4. UZ PA-MAC BALSTĪTA IR-UWB TĪKLA PAŠATJAUNOŠANĀS ANALĪZE.....	28
4.1. Enerģijas modelis	28
4.2. Pašorganizēšanas spējas	29
4.3. Simulācijas veiktspējas novērtēšana	30
5. «SMART INCUBATOR» PROJEKTS – PA-MAC IETVARA IEVIEŠANA WBAN TĪKLĀ.....	33
5.1. Arhitektūra un pamata uzbūves elementi	35
5.2. Uztvērēja arhitektūra	33
5.3. UWB uztveršana	36
5.4. Praktiskā aprīkojuma apraksts.....	38
REZULTĀTI UN SECINĀJUMI.....	43
LITERATŪRA.....	45

Saīsinājumu atšifrējums

Saīsinājums	Atšifrējums angļu valodā	Atšifrējums latviešu valodā
<i>ADC</i>	<i>Analog to Digital Converter</i>	Analogciparu pārveidotājs
<i>BAN</i>	<i>Body Area Network</i>	Ķermeņa apgabala tīkls
<i>BER</i>	<i>Bit Error Rate</i>	Bitu kļūdu biežums
<i>BPAM</i>	<i>Binary Pulse Amplitude Modulation</i>	Binārā pulsu amplitūdas modulācija
<i>BS</i>	<i>Base Station</i>	Bāzes stacija
<i>CDMA</i>	<i>Code Division Multiple Access</i>	Koddales daudzpiekļuve
<i>CH</i>	<i>Cluster Head</i>	Grupas vadītājs
<i>CM</i>	<i>Channel Model</i>	Kanāla modelis
<i>CSI</i>	<i>Channel State Information</i>	Kanāla stāvokļa informācija
<i>DH</i>	<i>Delay-Hopped</i>	Aiztures
<i>DSP</i>	<i>Digital Signal Processing</i>	Digitālā signālu apstrāde
<i>E_b/N_o</i>	<i>Energy per bit to Noise power spectral density</i>	Viena bita enerģija uz trokšņa spektrālo blīvumu
<i>FCFS</i>	<i>First Come First Serve</i>	Pirmais iekšā, pirmais ārā" princips
<i>IPI</i>	<i>inter pulse interference</i>	Iekšēja-pulsa iejaukšanās
<i>IR</i>	<i>Impulse Radio</i>	Impulsu radio
<i>ISI</i>	<i>Inter-Symbol Interference</i>	Starp-simbolu interference
<i>LNA</i>	<i>Low Noise Amplifier</i>	Zema trokšņa pastiprinātājs
<i>MAC</i>	<i>Medium Access Control (Layer)</i>	Vides piekļuves vadība (vadības slānis)
<i>MSI</i>	<i>Maximum Selection Interpolation</i>	Maksimālās izvēles interpolācija
<i>PA-MAC</i>	<i>Pilot-Assisted MAC</i>	Pilotsignāla asistēta vides piekļuves kontrole
<i>PAT</i>	<i>Pilot-assisted Transmission</i>	Pārraide ar pilotsignālu

<i>PHY</i>	<i>Physical (Layer)</i>	Fizikālais slānis
<i>P_{max}</i>	<i>Maximum Power</i>	Maksimālā jauda
<i>PPAM</i>	<i>Pulse Position Amplitude Modulation</i>	Pulsu pozīcijas amplitūdas modulācija
<i>QoS</i>	<i>Quality of Service</i>	Servisa kvalitāte
<i>RF</i>	<i>Radio Frequency</i>	Radio frekvence
<i>Rx</i>	<i>Receiver</i>	Uztvērējs
<i>SNR</i>	<i>Signal to Noise Ratio</i>	Signāla-trokšņa attiecība
<i>TH</i>	<i>Time Hopping</i>	(Aiztures) laika maiņa
<i>T_r</i>	<i>Resolution time of Receiver</i>	Uztvērēja izšķirtspējas laiks
<i>TR</i>	<i>Transmitted Reference</i>	Pārraidītā reference
<i>TRDH</i>	<i>Transmitted Reference Delay-Hopped</i>	Mainīgas aiztures pilotsignāla pārraide
<i>Tx</i>	<i>Transmitter</i>	Raidītājs
<i>U-MAC</i>	<i>Ultra Wideband MAC</i>	Platjoslas vides piekļuves vadība
<i>UWB</i>	<i>Ultra-Wide Band</i>	Platjosla
<i>WBAN</i>	<i>Wireless Body Area Network</i>	Bezvadu ķermeņa apgabala tīkls
<i>WSN</i>	<i>Wireless Sensor Network</i>	Bezvadu sensoru tīkls

IEVADS

Tēmas aktualitāte

Galvenais pētījuma mērķis ir izstrādāt elastīgu, integrētu platjoslas (*Ultra-wide band – UWB*) bezvadu sensoru tīklu (*Wireless Sensor Networks – WSN*) arhitektūru, ko var efektīvi izmantot visu veidu *WSN* tipa tīklos. Nesenākajos pētījumos tika novērots, ka lielākās *WSN* problēmas ir saistītas ar fizikālo un datu posma slāni. Vides piekļuves vadības (*Media Access Control – MAC*) savietojamība ar fiziskālo slāni un zemu virstēriņu datu apmaiņa ir *WSN* pamats. Šie apsvērumi ir izmantoti kā pētījuma sākuma nosacījumi. Promocijas darbs ir par vispusīgu un elastīgu ietvara izstrādi, kas var būt izmantojams gan mazos, gan blīvos tīklos. Pētījums pamatā orientēts uz diviem apgabaliem – *MAC* arhitektūru un fizikālā slāņa veidošanu.

Pētījumā ir izmantota «*Agile*» [1] izstrādes metodika, kurā visas pētījumu tēmas ir sadalītas atsevišķos posmos (sprintos), un katrs no tiem ir risināts atsevišķi, un pēc tam visi jautājumi ir pārbaudīti kopumā. Pētījuma beigās izstrādātā arhitektūra ir izmantota aparatūras platformā «*WBAN SMART Incubator*» projektā. Šis ir piecus gadus ilgs projekts, kurā pierādīts, ka *UWB* ir praktiskākais bezvadu sensora tīklu risinājums.

Promocijas darba mērķis un uzdevumi

Darba mērķis ir piedāvāt impulsa radio savietojamu bezvadu sensoru tīkla pārraides arhitektūru, ar pašorganizācijas iespējām.

Uzdevumi

Saskaņā ar mērķiem tika izvirzīti šādi uzdevumi:

1. izpētīt un noteikt *WSN* tīklu datu apmaiņas problēmas, fizikālā un datu posma slāņos;
2. pievērsties pirmajā uzdevumā noteiktajām problēmām un izstrādāt *MAC* algoritmu, kas strādātu gan ar mazu, gan lielu pieprasījumu apjomu;
3. novērtēt esošās radio pārraides principus un izveidot arhitektūru, kas būtu savietojama ar piedāvāto *MAC* algoritmu un uzticami strādātu bezvadu sensoru tīklos;
4. izstrādāt efektīvu un uzticamu klasterizēšanas stratēģiju blīviem tīkliem;
5. pārbaudīt piedāvātās arhitektūras veiktspēju, pašsakārtošanos, pastāvīgumu un energoefektivitāti;
6. implementēt un pārbaudīt arhitektūru reālās dzīves scenārijā.

Pētījuma priekšmets un objekts

Pētījuma objekts ir impulsa balstīti bezvadu sensoru tīkli.

Pētījuma priekšmets ir radio impulsu balstīta bezvadu sensoru tīkla arhitektūra.

Aizstāvējamās tēzes

1. *IR-UWB* ir efektīvs fizikālā slāņa bezvadu sensoru tīkla paņēmieni.
2. *DHTR (Delay-hopped Transmitted-Reference)* radio arhitektūra, raidot ar atsauci un mainīgu aizturi, ir piemērotāka bezvadu sensoru tīklam par *RAKE* un *WUR*.
3. Pārvaldības sasaitē starp *MAC* un fizisko tīklu slāņiem uzlabo tīkla pārvaldību.
4. Uz *COST* funkciju balstīta dinamiska grupēšana (*Dynamic Clustering*) ir labāka par klasisko *WSN* grupēšanu.
5. Piedāvātais impulsu radio ietvars ir praktiski lietojams bezvadu sensoru tīklos.

Zinātniskā novitāte

Darba zinātniskā novitāte ir šāda:

1. ir noteiktas impulsu radio bezvadu tīklu problēmas, un tās ir risinātas, izstrādājot jaunu tīkla ietvaru;
2. ir izstrādāts daudzpakāpju *MAC* algoritms, kas ir savietojams ar *WSN* un ir ar labāku veikspēju par *IR-UWB* tīklu;
3. izstrādāta vieglsvara *TRDH* radio arhitektūra, kas nodrošina daudzkārtu pieeju un samazina enerģijas patēriņu, novēršot kanāla stāvokļa apziņošanu;
4. dinamiska pārraides diapazona pielāgošana ļauj veikt iekārtu grupēšanu, kas nodrošina tīkla pašsakārtošanos un ļauj to lietot gan mazos, gan blīvos tīklos.

Darba praktiskā vērtība un aprobācija

Pētījums tika veikts sistemātiskā veidā. Izstrādātais uz pilota signālu balstītais vides piekļuves protokola (*MAC*) algoritms ar impulsu platjoslas (*IR-UWB*) paņēmieni fizikālā (*PHY*) slānī nodrošina uzticamu, pastāvīgu un energotaupīgu *WSN* platformu. Tas ir lietojams notikumu vadītos *WSN*, kā arī tīklos, kuros datu plūsma nav pastāvīga, bet mainās laikā. Datu apmaiņas ietvara fāzes ļauj pielāgot datu pārraidi datu plūsmai, un tāpēc tas ir lietojams dažādos *WSN* tīklos, bet parasti maza attāluma bezvadu tīkla sensoros ar notikumu vadītu darbību. Ietvars nodrošina kvalitatīvu datu apmaiņu ar augstu caurlaidspēju, salīdzinot, piemēram ar *PA-MAC* un *U-MAC* tipisko «standarta caurlaidspēju» un «standarta aizturi», *PA-MAC* veikspēja ir daudzkārt augstāka par *U-MAC* (skat. 1. tabulu).

1. tabula *U-MAC* un *PA-MAC* salīdzinājums

Algoritms	Vidējā caurlaidspēja	Mezglu skaits	Vidējā aizture
<i>U-MAC</i>	320 kbps	25	11,0 ms
<i>PA-MAC</i>	450 kbps	25	8,5 ms

Sakarā ar metodes drošumu un augsto veiktspēju, to var pielāgot laika-kritiskos datu pārraides tīklos, it īpaši ķermeņa apgabala tīklos (*Body area Networks – BAN*) un personālajos tīklos (*Personal Area Network – PAN*). Īpaši svarīgi tas ir militārajos un medicīnas lietojumos. Ietvara izstrādē ir lietots jauns radio apraides veids, kas līdz šim nav izmantots esošajos risinājumos. Integrētā radio arhitektūra neprasa kanāla novērtējuma apraidi, tādējādi būtiski ietaupot patērēto enerģiju, padarot to par ideālu risinājumu sensoru tīklos. Cits izplatīts lietojums šim risinājumam ir ceļu satiksmes un sastrēgumu novērošanas sistēmas.

Ar piedāvāto integrēto pārraides ar atsauci un manāmu aizturi (*Transmitted Reference and Delay hopped*) radio arhitektūru ir nepieciešama vienkārša uztverošā shēma, kas ļauj novērst interferences ietekmi no citiem nesējiem [2], [3] (piemēram, šaurjoslas iekārtām). Tas nodrošina labu atbilstību industriālajām iekārtām, kurās ir izmantoti dažādi saziņas nesēji. Sakarā ar vienkāršo radio shēmu risinājuma izmaksas ir mazas. Papildu labumi ir tīkla pastāvīgums, kas ļauj samazināt tīkla pārraudzības un uzturēšanas izmaksas. Pētījuma beigās risinājums tika implementēts medicīniskā sensoru projektā «*SMART Incubator*», kur tika izmantoti divi dažādi tīkli ar nemainīgiem un ķermenim pievienotiem sensoriem. Praktiski iegūtie rezultāti tika salīdzināti ar simulācijas rezultātiem, un tika konstatēts, ka ietvars strādā ļoti labi maza attāluma tīklos, kas ir būtiski svarīgi medicīnas iekārtām.

Zinātniskās publikācijas

1. Kamran Ayub, Zagurskis, V. SMART inkubators: īstenošana Impulse Radio-Ultra Wideband Based PA-MAC Arhitektūras Wireless Body Area Network. 2nd International Conference IEEE, on Systems Informatics, Modelling and Simulation (SIMS-2016). Riga Technical University, Riga Latvia. June-2016 (*Paper accepted*).
2. Kamran Ayub, Zagurskis, V. Pieņemšana funkcijas un pieeju UWB bezvadu sensoru tīklu, kura pamatā Pilot Signal palīdz MAC. International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS). Vol. 8, No.1 (2016). ISSN: 2076-0930. *Scopus & INSPEC*.
3. Kamran Ayub, Zagurskis, V. Tehnoloģiju ietekme UWB par bezvadu sensoru tīklu-sīku izpēti. International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS). Vol. 7, No. 3 (2015). ISSN: 2076-0930. *Scopus & INSPEC*.

4. Kamran Ayub, Zagurskis, V. Darbības novērtējums Pašorganizējošās iezīme Klasteru balstītu WSN eksperimentāliem Assisted-MAC ar IS-UWB. ICMSE – 2015 Starptautiskā konference par vadībzinātnē un inženierzinātnēs (22). IEEE Technology and Engineering Management Society. *Ieee-Xplore (Scopus)*. ISBN: 978-14673-6511-6.
5. Kamran Ayub, Zagurskis, V. IR-UWB Radio Arhitektūra bezvadu sensoru tīklu, kura pamatā Pilot Signal Assisted MAC. 6th International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS) 2014, pp. 1–5, ISBN 978-1-4799-3223-8 *Ieee-Xplore (Scopus)*.
6. Kamran Ayub, Zagurskis, V. Pilot Signal Assisted ultraplātjoslas Medium Access Control Algoritms bezvadu sensoru tīkliem. Starptautiskā konference *IEEE 21. Telekomunikācijas Forum (TELFOR)*, 2013. pp. 184–187, ISBN 978-1-4799-1420-3. *Ieee-Xplore (Scopus)*.

Zinātniskās konferences

1. Starptautiskā konference IEEE Systems Informatics, Modelling and Simulation - SIMS-2016, Rīga, Latvija (raksts akceptēts).
2. ICNGCCT 2015 -2nd International Conference on Next Generation Computing and Communication Technologies, Zelus, MTS, Czerka, El-Rijādā, 22.–23. aprīlis 2015. g., Dubajā, Apvienotie Arābu Emirāti (AAE).
3. Starptautiskā konference IEEE, ICMSE – 2015. gadam Starptautiskā konference par vadībzinātnē un inženierzinātnēs (22). IEEE Technology and Engineering Management Society, 19–22. 2015. g. oktobris, Dubaja, Apvienotie Arābu Emirāti (AAE).
4. Starptautiskā konference IEEE, NTMS 2014. gadā, Sestā starptautiskā konference par jauno tehnoloģiju, mobilitāti un drošību. IEEE Communications Society, IFIP, ADCO, 30. marts līdz 2. aprīlis 2014. g., Zayed University Dubai, UAE.
5. Starptautiskā konference IEEE 21. telekomunikācijas forums (TELFOR) 2013, 26.–28. novembris TELFOR 2013 Telekomunikācijas biedrība, skola elektrotehnikas Universitātes Belgrada, IEEE Communications Society, Belgrade, Serbija.

Promocijas darba struktūra

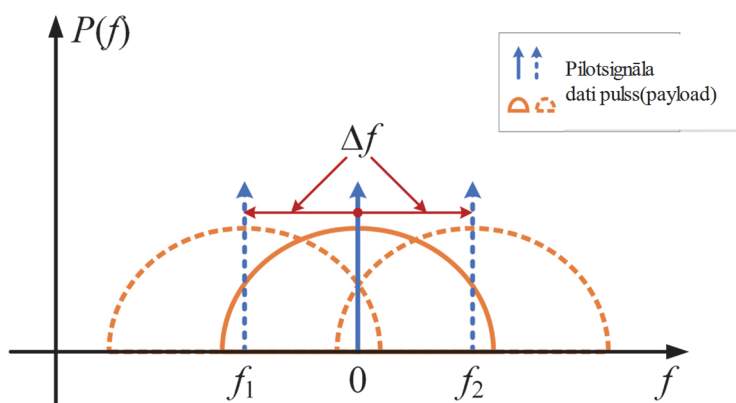
Darbā ir piecas nodaļas.

- Pirmajā nodaļā ir dots īss vides piekļuves vadības (MAC) slāņa apraksts un tajā izmantotie paņēmieni.

- Otrajā nodaļā ir dots fiziskā (*PHY*) jeb – šajā gadījumā – radio slāņa arhitektūras apraksts un tā savietojamība ar *MAC* slāni. Labākai izpratnei ir dots divu arhitektūru: *RAKE* un *Wake-up* apraksts.
- Trešajā nodaļā pēc *MAC* un *PHY* slāņu apraksta uzmanība ir pievērsta tīkla topoloģijai. Tajā ir apskatītas dažādas tīkla pielāgošanas iespējas, it īpaši ir aprakstīts jauns dinamisks iekārtu grupēšanas veids.
- Ceturtajā nodaļā ir detalizēti apskatītas dažādu tīkla pielāgošanas algoritmu iespējas un to veikspēja. Šajā nodaļā ir novērtēta izstrādātā ietvara pašsakārtošanās spēja. Ir izstrādāti dažādi darbību scenāriji, lai novērtētu tīkla pašatjaunošanās spēju, raugoties no dažādiem novērtējuma skatu punktiem.
- Piektajā nodaļā ir aprakstīta piedāvātās arhitektūras implementācija *WBAN* platformā «*SMART Incubator*» projektā. Aparatūras implementācijas praktiskie rezultāti ir salīdzināti ar datoru simulācijā aprēķinātajām vērtībām. Iegūtie reālās darbināšanas novērojumu dati apstiprina *PA-MAC* ietvara elastīgumu reālās dzīves lietojumā.

1. VIDES PIEKĻUVES VADĪBA PĀRRAIDĒS AR PILOTSIGNĀLU

Lai novērstu smagnējo kanāla novērtēšanu, izmantojam platjoslas radio impulsus ar pilotsignālu (*UWB* ar *PAT*), kas uzlabo sinhronizāciju un samazina sadursmju iespēju. Pilotsignālu izmanto kā saziņas frekvences marķieri, kā arī kanāla pārraudzībai un vadībai. Pilotsignāls īpaši noder arī kā paraugs platjoslas infrastruktūras iekārtu sinhronizēšanai. 1.1. attēls parāda frekvenču spektra jaudas sadalījumu platjoslas pilotsignāla un derīgo datu saistību. Piedāvātajā vides piekļuves vadības algoritmā (*MAC*) signāls ir bāzēts uz platjoslas impulsu radio pilotsignālu.



1.1. attēls. Pilotsignāla un derīgo datu spektra jauda [4].

Signāla pārraide tiek veikta tā, ka pārraida signāla pārus, kur pirmais platjoslas impulss ir pilotsignāls, bet otrs impulss ir modulēts ar pārraidāmajiem datiem, kā parādīts 1.1. attēlā. *MAC* pārvaldībai izmanto divu režīmu pārraidi, kas ilustrēta 1.3. attēlā. Izvēlētā divu režīmu pārraide ļauj ietaupīt kanāla novērtēšanai nepieciešamo enerģiju. Pirmo režīmu izmanto kanālā ar retu piekļuvi, un tajā izmanto «pirmais iekšā, pirmais ārā» datu pārraidi. Ja kanāla piekļuves pieprasījumu skaits pieaug un parādās sadursmes, datu pārraide pārslēdzas uz otru režīmu. Otrajā režīmā starp kanālā iesaistītajām iekārtām (mezgliem) pirms datu pārraides tiek veikta sinhronizēšana un plānošana kanāla piekļuvei un datu pārraidei. Pēc plānošanas katrs mezgls iegūst savu pieejas logu saskaņā ar pārraidāmo datu apjomu. Otrā režīma laikā plānošanas un pārraides laiks notiek cikliski, atkārtojoties secīgos «apļos». Ja plānošanas režīmā nav pietiekami daudz kanāla piekļuves pieteikumu, pārraide pārslēdzas atpakaļ uz pirmo režīmu.

Lai nodrošinātu daudzpieeju kanālam un paredzamu kanāla aizturi, tiek izmantots mainīgas aiztures (*delay-hopped – DH*) kods, kas ilustrēts 2. 1. attēlā. Mainīgās aiztures kods ar pilotsignālu uzlabo kanāla caurlaidspēju [5], [6] un arī nodrošina daudzkrāšu pieeju kanālam.

1.1. Piedāvātais algoritms

Tiek pieņemts, ka signāla ilgums ir ilgāks par T_r (uztvērēja izšķirtspējas laiks) un pārraides laiks (ilgums) ir proporcionāls prioritātei ($T \sim Pr$). Ir izvēlēta vienkārša tīkla topoloģija ar vienu kopu (*cluster*) un tiešu redzamību jeb vienu lēkumu (*one hop*), kurā visiem tīkla mezgliem ir dažādas prioritātes. Pieņemam, ka nepastāv slēptu vai mezglu atklāšanas problēma. Tiek izmantots apla (*Round Robin*) prioritāšu algoritms [7] ar nelieliem pielāgojumiem. Tālāk ir aprakstītas galvenās apla algoritma izmaiņas:

1. katrs mezgls katrā aplī saņem tikai vienu laikspraugu (*slot*), t. i., pēc pārraides (Tx) un uztveršanas (Rx) mezgls pāriet miega režīmā un nepiedalās aptaujā līdz nākamajam aplim;
2. katra apla beigās grupas vadītājs (*CH*) izstrādā jaunu mezglu secību, vadoties pēc pilotsignāla. Plānā tiek iekļauti tikai tie mezgli, kas tobrīd ir aktīvi. Ja kāds no mezgliem kļūst aktīvs plānošanas laikā (t. i., pirms ir beidzies pārraides aplis), tas gaida līdz nākamajam plānošanas laikam;
3. augstāka prioritāte tiek piešķirta mezgliem, kas nav beiguši pārraidi Tx iepriekšējā apla laikā;
4. ja divu mezglu prioritāte ir vienāda, par augstāku prioritāti atzīst to, kura paredzamā pārraide ir īsāka (vispirms izvēloties «īsāko darbu»);
5. ja grupas vadītājs nesaņem nevienu tīkla slāņa piekļuves pieprasījumu, algoritms pāriet režīmā 1.

Algoritms

Tabula 1.1.: tabulā ir aprakstītas algoritma svarīgākās īpašības.

Inicializācija	Initially all active nodes will set their priority timer $T_p = T_{max}$ // Maksimālā mezglam atļautā prioritāte $T_{max} = N_{tr} + T_{pac} + 3tr$ // kur; N = mezglu skaits, tr = uztvērēju izšķirtspējas laiks // T_{pac} = Datu kadra izmērs, T_p = prioritāte} Input N , Tr , $u.tml$.
(1. režīms)	
1. solis	//FCFS- plāns bez prioritātēm— labākais veids ar mazu slodzi for($i = 1$ to N) $T_p(n(i)) = T_{max}$; While($T_p \neq 0$) Node State= Rx
2. solis	//Visu mezglu prioritāte T_p iestatīta uz T_{max} //Prioritātes laikā // { klausīties kamēr ir T_p , ko uztvert } //Pēc T_p (Priority Time) // Ja ir Tx, ko raidīt //Ja kanāls nav brīvs — sadursme Go to Phase 2 // Sinhronizē un prioritizē saziņu Else //Turpina līdz notiek sadursmes Node State= Tx(data) $i++$; // Nākamais mezgls
(2. režīms)	Synchronization and Priority scheduling //Priekš pārraides T_p izmanto Tx

3. solis	*Synchronize (); <i>// Izsauca sinhronizāciju</i> *Prioritize (); <i>// Nosaka prioritāti</i> *TRDH () <i>// UWB sinhronizēšanai, Aplā algoritms prioritāšu noteikšanai</i>
4. solis	If Return(of above)= NULL or Active n =0 <i>// Nav aktīvu mezglu vai arī visi mezgli ir beiguši pārraidi</i> GoTo Phase 1 : <i>// Ja maza aktivitāte, pāriet uz 1. režīmu</i> Else go-to Step 5 :
5. solis	For(j= 1 to N) <i>// ar visiem aktīvajiem mezgliem</i> Calculate Tp[j]; <i>// nosaka prioritāti (t.i. laiku)</i> While Tp(j)≠0 <i>// kamēr ir ko raidīt</i> Tx Pilot >> Tx Data; <i>// pārraida pilotsignālu Tx un datus</i>
6. solis	switch (Tx & Tp) <i>// režīmu izvēle</i> <u>case 1</u> : Tx =complete & Tp=0 <i>// Ja pārraide ir pabeigta un nav datu nākamajam aplim</i> Node state =Rx() <i>// pārslēdz mezglu uztveršanā Rx // un nodod vadību nākamajam mezglam</i> Break; <i>// Nākamais mezgls</i> <u>case 2</u> : Tx=complete & Tp ≠0 <i>// Ja pārraide pārtraukta, bet vēl ir ko raidīt</i> Node state=Rx() <i>// pārslēdz mezglu uztveršanā Rx()</i> Break; <i>// Pāriet uz nākamo mezglu</i> <u>case 3</u> : Tx≠ complete & Tp=0 Node state = Tx <i>// Turpina raidīt Tx (ievainojamais brīdis)</i> If collision: Node State = Rx() break; <i>// pārtrauc raidīt Tx un pāriet uz nākamo mezglu</i> Else Node State= Rx() <i>// Rx() ir pavediens</i> Break; Thread Rx(); { for k=0; k< Tp ;k++) if node=Idle Node State = Sleep else Node State= Rx; Rx()}; <i>// Katrs mezgls klausās laiku (Rx) kas ir vienāds ar pārraides laiku Tx un pāriet uz snaudu pēc tam</i>

1.2. Laika diagrammas

Lai precīzi novērtētu algoritma darbību, tika izstrādāti un izpētīti daži iespējamie darbības gadījumi. Diagrammā izmantotie saīsinājumi :

TX = Pārraide, TP = Prioritāte, RX = Uztveršana, SL = Snauda, P = Tonis, A = Aktīvs.

Pieņemam, ka tīklā ir trīs mezgli n1, n2, n3 kas ir aktīvi un vēlas pārraidīt datus.

1. aplis: sākotnēji visiem mezgliem pārraides loga ilgums ir iestatīts uz **Tp = Tmax**, un to prioritātes ir attiecīgi **n3=1, n1=2, n2=3**. Visi mezgli sāks ar klausīšanos laiku Rx, kas vienāds ar **Tp** un pēc tam nosūta pilotsignālu **P**, pēc kura seko datu pārraide **Tx** un snauda **S**. Sākotnēji datu pārraide notiek secīgi bez sadursmēm, kā tas parādīts 1.2. attēlā (a).

Nodes	TP	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
n1	=2	A								P	TX	TX	TX	SL	RX	RX	RX	RX	P	TX	TX	RX	RX	RX	RX	RX	RX	RX	RX	RX
n2	=3	A												P	TX	TX	TX	TX	SL	RX	RX	RX	RX	RX	RX	P	TX	TX	TX	TX
n3	=1	A								P	TX	TX	SL	RX	RX	RX	RX	RX	RX	RX	RX	RX	RX	RX	P	TX	TX	RX	RX	RX
n4	=4																												A	P
n5	=5																												A	P

1. 2. attēls (a). Mezglu stāvoklis laikā 1. režīmā.

2. aplis: laika logā 27 tīklam pievienojas divi jauni mezgli **n4** un **n5**, kas pārraida pilotsignālu vides piekļuvei un izraisa sadursmi ar mezgla n2 pārraidi Tx. Šajā brīdī datu pārraide pārslēdzas 2. režīmā.

2. aplis (ideālais gadījums): mezgli pārraida Tx laiku un klausās Rx laiku, kas ir vienāds ar to prioritātēm T_p , un pēc tam pāriet snaudā. (Snaudā tie paliek līdz brīdim, kad tiek saņemts jauns pieprasījums pārraidīt datus). Visi mezgli aktivizējas saskaņā ar iepļānotajiem laikiem. Šajā aplī mezgls n3 nav aktīvs, jo tam nav pārraidāmo datu, tāpēc tas neizmanto iespēju savam pārraides logam. Skat. 1.2. attēlu (b).

	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Pin= $T_p=4$	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	P	TX	TX	TX	TX	RX	RX	RX	RX
Pin= $T_p=1$	P	TX	TX	TX	RX	RX	RX	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	A
Sleep	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	A
Pin= $T_p=2$	SL	SL	SL	SL	P	TX	TX	TX	TX	RX	RX	RX	RX	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	A
Pin= $T_p=3$	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	P	TX	TX	TX	TX	RX	RX	RX	RX	SL	SL	SL	SL	A

1.2. attēls (b). Mezgli 2. režīmā (ideālā gadījumā).

2. aplis (pārraide Tx ārpus prioritātes T_p) – neveiksmīgs: pieņemam, ka vairums mezglu pārraida datus Tx tiem paredzētajā plānotajā laikā T_p un pāriet snaudā, bet mezgls n3 nespēj to izdarīt laikā T_p un turpina raidīt pēc tam. Šajā brīdī pārraide ir ievainojama, jo saskaņā ar plānu sāk raidīt mezgls n2 un mezgla n3 pārraide tiks bloķēta. Skat. 1.2. attēlu (c).

	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78
Pin= $T_p=1$	P	TX	TX	RX	RX	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL
Pin= $T_p=3$	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	P	TX	TX	RX	RX	SL	SL	SL	SL	SL	SL
Pin= $T_p=2$	SL	SL	SL	SL	P	TX	TX	TX	TX	TX	TX	RX	RX	RX	RX	RX	SL	SL	SL	SL	SL
Pin= $T_p=5$	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	P	TX	RX	SL	SL
Pin= $T_p=4$	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	P	TX	RX	SL	SL	SL	SL

1.2. attēls (c). Mezglu stāvoklis 2. aplī ar neveiksmīgu pārraidi ārpus laika Tx.

2. aplis (Tx ārpus T_p loga) – veiksmīgs: pieņemot, ka mezgls n4 nespēj pārraidīt datus paredzētajā laikā T_p un turpina raidīt pēc tam, ja tajā brīdī nav vairs nav neviena cita mezgla, kam ir jāpārraida dati, pārraide tiek pabeigta veiksmīgi, kā tas attēlots 1.2. attēlā (d).

	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78
Pin= $T_p=1$	P	TX	TX	RX	RX	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL
Pin= $T_p=3$	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	P	TX	TX	RX	RX	SL	SL	SL	SL	SL	SL
Pin= $T_p=2$	SL	SL	SL	SL	P	TX	TX	TX	TX	TX	TX	RX	RX	RX	RX	RX	SL	SL	SL	SL	SL
Pin= $T_p=5$	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	P	TX	TX	TX	RX	RX
Pin= $T_p=4$	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	P	TX	RX	SL	SL	SL	SL

1.2. attēls (d). Mezgli 2. režīmā ar sadursmi.

1.3. Veiktspējas analīze

P veiktspēja tika pārbaudīta simulācijā, izmantojot *Mixim (Omnet++)* simulācijas vidi. Veiktspēja ir salīdzināta ar diviem konkurējošiem *LEACH* un *U-Mac* algoritmiem [8], [9]. Datu plūsmas ģenerēšanai ir izmantots maksimālais un minimālais laiks t. s. Hello paziņojumam (attiecīgi 10 s un 1 s). Bez tam *MSI* sliekšnis ir iestatīts uz 15 %, interferences sliekšnis – 50 %. Gan Tx jauda, gan Tx ātrums ir pielāgots saskaņā ar 802.15.4a nosacījumiem. Maksimālā jauda

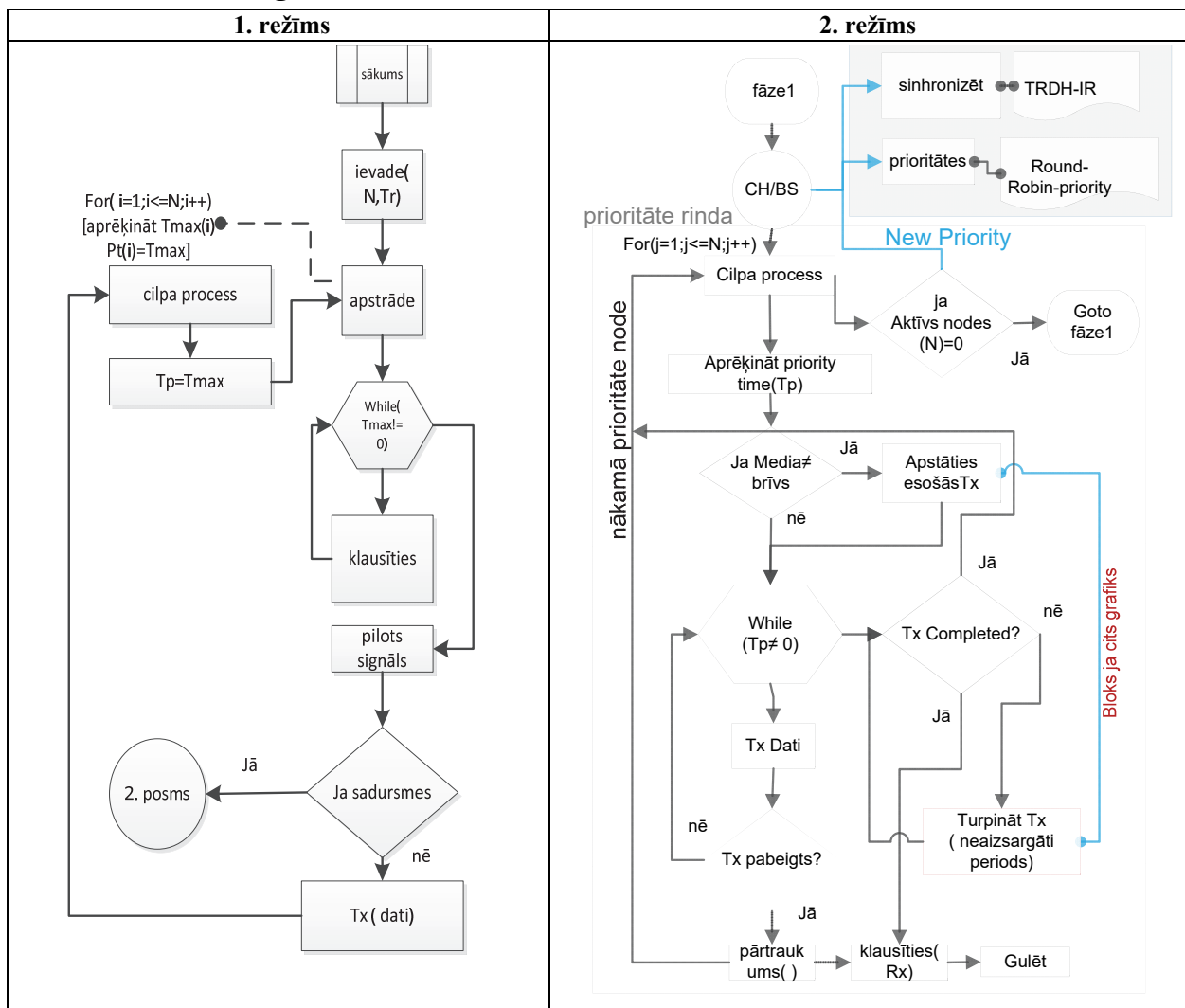
$P_{\max}$ ir iestatīta uz 15 dBm. Simulācija ir izmantoti 25 mezgli ($n=25$). Darba apjomā ir paredzēts analizēt tikai vides piekļuves vadības pārvaldību, tāpēc ir analizēta tikai ar *MAC* saistīto parametru izmaiņa. Plūsmas ātrums $\lambda = 0.25\text{--}5$ pieprasījumi/s. Tabulā 1.2 ir parādīts simulācijas rezultātu apkopojums

Tabula 1.2.: simulācijas parametri

Parametrs	Vērtība	Parametrs	Vērtība
Mezglu skaits N	5–25	Pārbaudes ātrums R	850 kb/s
Pārbaudes jauda P	–15dBm(39μW)	Pulsu atkārtotības laiks Tf	Mainīga tabula
Plūsmas ātrums (Pusons)λ	0.5-5.0 pieprasījumi/s	Fona troksnis un interference η	2.5×10^{-17} mW/Hz
Vērtuma izmērs	160 baiti	Sliekšnis γ	5dB
Simulācijas laukums (los)	25×25	Ceļa zudumu eksponenta α	2.5

T veikspēja ir salīdzināta šādiem parametriem: caurlaidspējai, pakešu aizturei un patērētajai jaudai.

1.4. Plūsmas diagramma

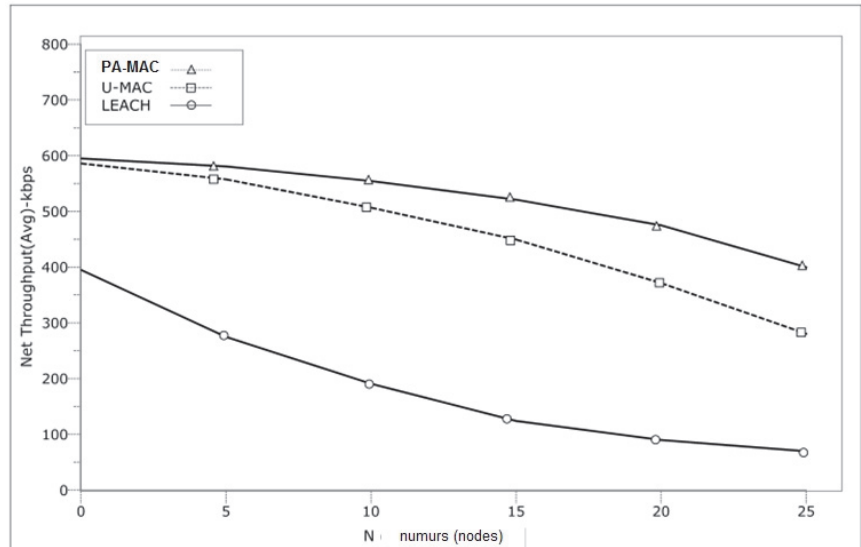


1.3. attēls. 1. PA-MAC pārbaudes 1. režīma (FCFS) un 2. režīma (prioritizētas saziņas) diagramma.

1.5. Simulācijas rezultātu apkopojums.

Caurlaidspējas analīze

1.4. attēls (a) parāda vispārējo iespējamo caurlaidspēju, izmantojot trīs kanāla pieejas vadības algoritmus. Caurlaidspēja ir noteikta vienkāršas topoloģijas tīkliem ar tiešu sasniedzamību (viena lēkuma ietvaros). Vidējā caurlaidspēja mūsu piedāvātajam *PA-MAC* algoritmam ir aptuveni 500 kb/s ar 25 aktīvajiem mezgliem.

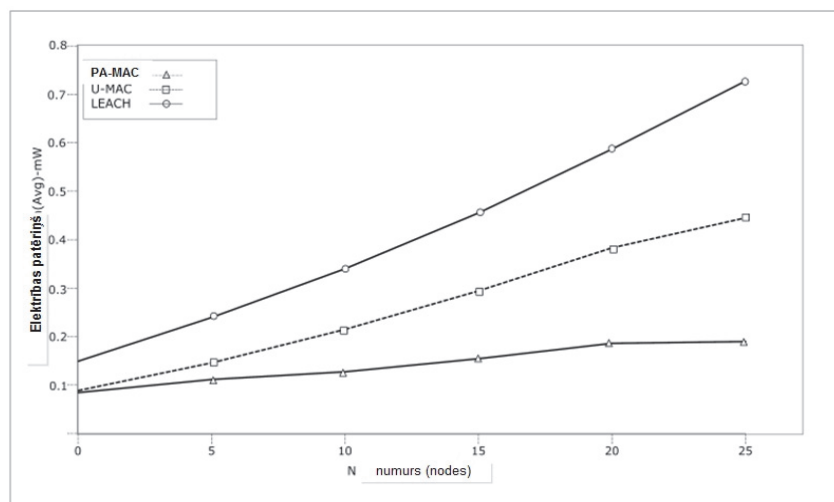


1.4. attēls (a). Caurlaides spējas atkarība no mezglu skaita.

Lai arī kopējā caurlaidspēja, pieaugot mezglu skaitam tīklā, pamazām samazinās, tā tomēr ir labāka nekā esošajiem *LEACH* un *U-MAC* algoritmiem. Ir redzams, ka, pieaugot mezglu skaitam, mūsu piedāvātais *U-MAC* algoritms ir ātrāks par *LEACH*, jo tie abi nodrošina labāku pārraides turpināšanas vadību. *LEACH* algoritma caurlaidspēja strauji krītas, pieaugot mezglu skaitam, jo pieaug signāla interference, ko izraisa *LEACH* algoritma nepiemērotība platjoslas raidītājos.

Vidējais jaudas patēriņš

Vidējā jaudas patēriņa noteikšanai ir izmantots mikroshēmu enerģijas modelis [10]. Trīs apskatīto protokolu jaudas patēriņa salīdzinājums ir dots 1.4. attēlā (b). Ir redzams, ka piedāvātais *U-MAC* algoritms patērē līdzīgu jaudu kā pastāvošie

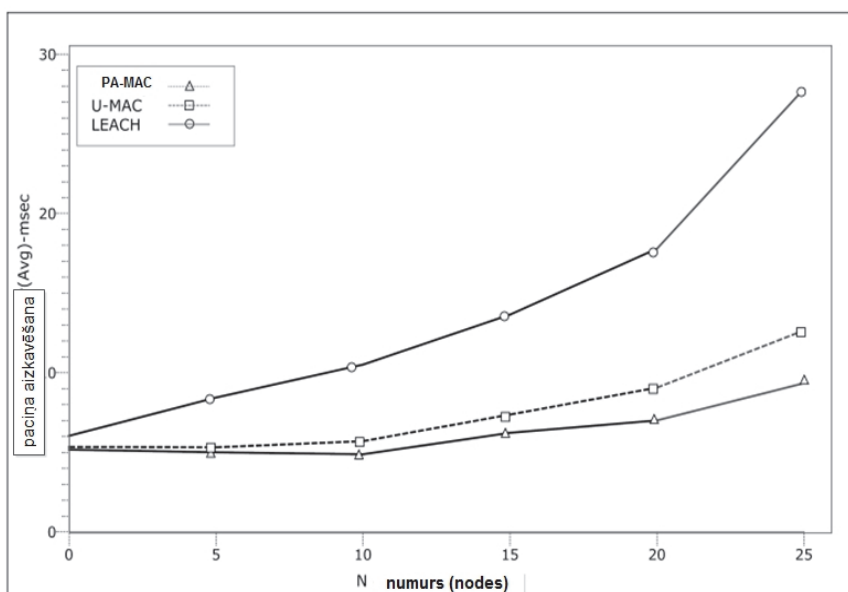


1.4. attēls (b) Enerģijas patēriņa atkarība no mezglu skaita

algoritmi ar nelielu mezglu skaitu, bet, pieaugot aktīvo mezglu skaitam tīklā, patērētā jauda pieaug, jo mezgli arvien vairāk laika pavada, gaidot piemērotu pārraides brīdi. Kad mezglu skaits tīklā ir 25 ($n=25$), gan *U-MAC*, gan *LEACH* patērē ievērojami vairāk jaudas, bet mūsu piedāvātajā algoritmā jaudas patēriņa pieaugums ir minimāls. Tas tiek panākts, ieplānojot pārraižu laiku sinhronizēšanai, tāpēc gaidīšanai patērētais laiks ir minimāls. Tas, ka pat ar 25 mezgliem tīklā 1.4. attēls (b) ($n=5-25$) datu pārraidi var nodrošināt ar jaudu zem 0,2 mW, ir atzīstams par būtisku piedāvātā algoritma ieguvumu.

Vidējā pakešu aizture

Vidējā pakešu aizture ir laiks, kas nepieciešams datu pārraidei no mezgla uz mezglu tīklā. Aiztures simulācijas rezultātu apkopojums ir redzams 1.4. attēlā (c). Grafikā uz x ass ir attēlots mezglu skaits tīklā N , bet uz y ass – vidējais aiztures laiks. Kā redzams, vidējais pakešu aiztures laiks ar mūsu piedāvāto algoritmu ir ap 5 ms (līdz 5 aktīviem mezgliem tīklā) un nepārsniedz 10 ms pat salīdzinoši noslogotā tīklā. Ir redzams, ka piedāvātais algoritms nodrošina mazāko aizturi, salīdzinot ar citiem algoritmiem. Salīdzinoši maza aizture ir arī *U-MAC* algoritmam, bet *LEACH* rādītāji būtiski pasliktinās, pieaugot mezglu skaitam tīklā.

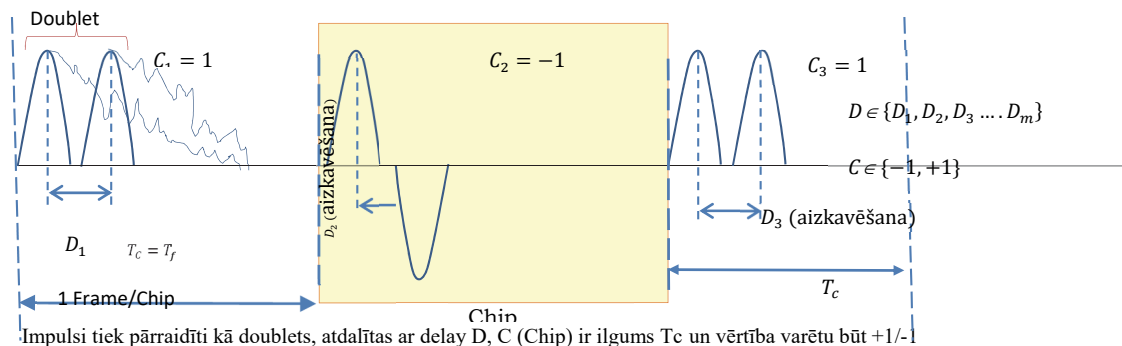


1.4. attēls (c). Pakešu aizkaves atkarība no aktīvo mezglu skaita

2. Pilotsignāla asistētā MAC radio pārraides arhitektūras izveide

Tradicionālajās impulsa platjoslas radio (*IR-UWB*) sistēmās uztverto signālu apstrādā ar analogo korelatoru, kam ir nepieciešams ilgs sinhronizācijas laiks un sarežģīta uzbūve kanāla novērtēšanai. No otras puses, interesanta alternatīva ir t. s. pilota impulsa izmantošana kā mērs (atsauce) modulētā signāla apstrādei. Izmantojot pilota signālu un modulējot signālu ar mainīgu aizturi, pilotsignālu var izmantot kā kanāla novērtēšanas signālu, kas samazina prasības sinhronizācijas precizitātei, un signālā var uzkrāt signāla daudzceļu izplatīšanās enerģiju. Rezultātā šī pieeja ir labākais platjoslas kanālu pārvaldības veids platjoslas tīklos.

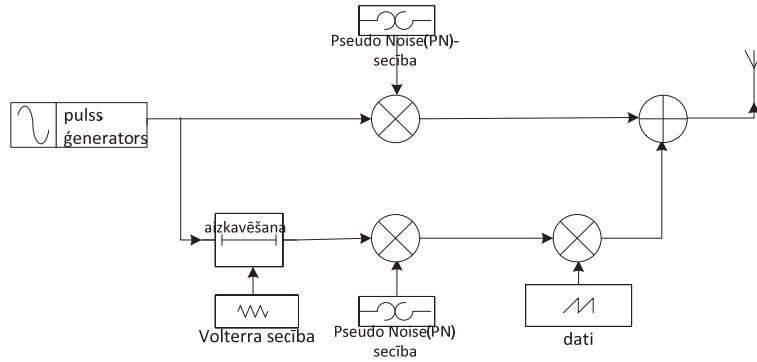
Ar pilotsignālu pārraidīto datu (*Transmitted Reference – TR*) struktūra ir tāda, ka datus pārraida nevis ar vienu pulsu, bet gan ar pulsu pāri, kā tas attēlots 2.1. attēlā. Pirmais pārraides pulss kalpo kā atsauce/mērs signāla un kanāla kvalitātes noteikšanai un nesatur nekādu informāciju. Uztvērējs šo uztverto signālu aiztur, lai izmantotu kā atsauci, salīdzinot ar nākamo pulsu, kurā ir iekodēts datu bits. Tomēr vienkāršai pilotsignāla aizturi ir ierobežots lietojums, tāpēc mēs izmainījām tīkla arhitektūru, pievienojot mainītās aiztures kodam Volterra modeli [11]. Izmantojot t. s. «Volterra sekvenci», ir iespējams nodrošināt arī daudzpieejas kanāla atbalstu.



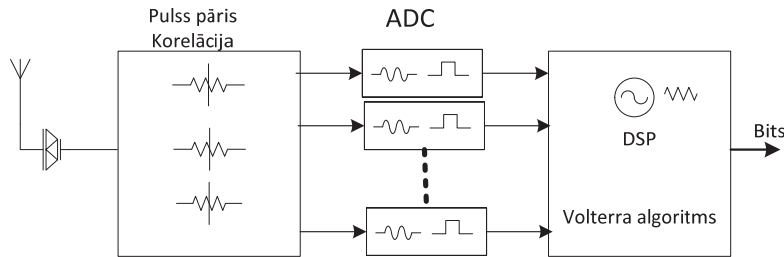
2.1. attēls. Impulsu platjoslas radio *UWB-TRDH* pulsu struktūra.

2.1 Volterra modelis (*TRDH*)

Pulsu pārraides mainīgās aiztures (*TRDH*) radio balstās uz energoefektīvu pulsu ģeneratoru, kura vispārīgā shēma dota 2.2. attēlā. Analogi raidītājam mūsu risinājumā uztvērējs ir papildināts ar Volterra shēmu. 2.3. attēlā redzamais uztvērējs nodrošina pārraides ātrumu no 5 kb/s līdz 1,2 Gb/s, un tas var sasniegt bitu kļūdu biežumu (*BER*) līdz aptuveni 2×10^{-4} ar saites attālumu līdz 10 m. *BER* var noteikt, pieskaņojot datu apmaiņas ātrumu un saites attālumu. Raidītājs patērē tikai 600 μ W jaudas, kas padara to par labu risinājumu dažādos bezvadu sensoru tīklos. Lai noteiktu radio slāņa veiktspēju, tika noteikts *BER/SNR*. 2.2. attēlā parādīti galvenie aprēķinos izmantotie elementi.



2.2. attēls. TRDH raidītāja blokhēma.



2.3. attēls. TRDH uztvērēja blokhēma.

Saņemto signālu var aprakstīt ar funkciju [12]

$$s^{TRDH}(t) = \sum_{i=0}^{N_p-1} \sqrt{\frac{E_b}{N_p}} \omega(t - iT_c - gd_k D) + \sqrt{\frac{E_b}{N_p}} a_k \omega(t - iT_c - T_m - gd_k D) \quad (2.1.)$$

Bināras pulsu modulācijas (*BPPM* — *binary pulse position modulation*) gadījumā modulācijas aizture D ir mazāka par $D < T_c$, un T_m ir minimālais kavēšanās starp diviem impulsiem (*doublet*). Līdz ar to, lai novērstu starppulsu interferenci (*IPI* – *inter pulse interference*) un starpsimbolu interferenci (*ISI* – *inter symbol interference*),

D ir jānosaka ar vairākiem paņēmieniem. Ir mainīgais, ko izmanto uztvērējs, un tā vērtība ir 1 *TRDH* gadījumā («g» ir nulle *RAKE* uztvērējam). Līdz ar to uztvertais signāls *RAKE* gadījumā [13] ir:

$$s^{RAKE}(t) = \sum_{i=0}^{NP-1} \sqrt{\frac{E_b}{N_p}} a_k, i\omega(t - iT_c - d_k D) \quad (2.2.)$$

Izmantotā signāla struktūras gadījumā saskaņā ar iepriekšminētajiem vienādojumiem simbola enerģija ir izvēsta laikā N_p (pulsi visi kopā veido pārraidīto simbolu)

$$\text{Uztvertais signāls} \rightarrow r(t) = s(t) * h(t) + n(t), \quad (2.3.)$$

«*» = nepārtraukts laika izvērsums; $h(t)$ = impulsa atbalss; $n(t)$ = Gausa baltā trokšņa vērtība. Lai salīdzinātu *TRDH* efektivitāti attiecībā pret *RAKE*, ir izmantota papildu Gausa trokšņa vērtība (*AWGN* – *Additive white Gaussian noise*) pārraidāmajā kanālā ar pieņēmumu, ka nepastāv *IPI* un *ISI* [14].

2.2. BER veikspēja

Uztvērēja veikspējas noteikšanai ar *MATLAB* pakotni tika simulēts *BER/SNR* modelis. Mēs analizējam *BER* veikspēju ar mūsu piedāvāto *TRDH* arhitektūru un tradicionālo *RAKE* arhitektūru e[15]. Mēs mērījām korelatora izejas Gausa vērtību tā, lai kļūdu biežums būtu aprakstāms kā *Q-Function* astes varbūtība (*tail probability*), izmantojot signāla-trokšņa attiecību *SNR* pret pārraidīto signālu.

$$BER_{TRDH-BPPM} = Q \left[\sqrt{\frac{\frac{2E_b}{N_o}}{(4+2g+2N_p 2TW \frac{N_o}{E_b})}} \right] \quad (2.4.)$$

$$BER_{TRDH-BPAM} = Q \left[\sqrt{\frac{\frac{2E_b}{N_o}}{(4+N_p 2TW \frac{N_o}{E_b})}} \right] \quad (2.5.)$$

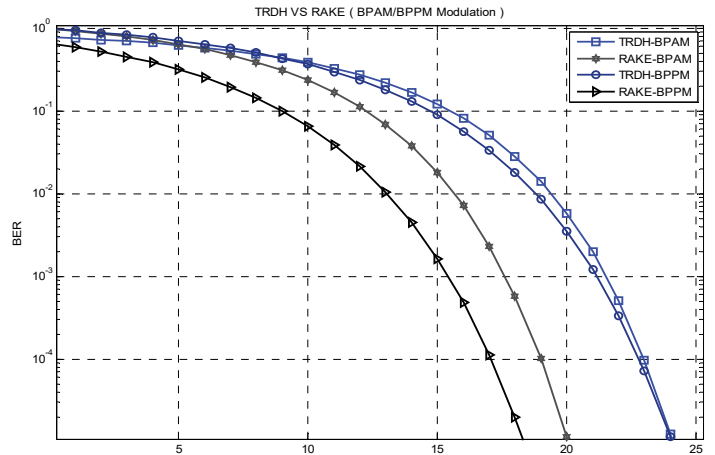
RAKE uztvērējam

$$BER_{RAKE-BPPM} = Q \left[\sqrt{\frac{\frac{2(N_p-1)E_b}{N_p N_o}}{4 \frac{N_p}{N_p-1} - \frac{6}{N_p-1} (N_p 2TW \frac{N_o}{E_b})}} \right] \quad (2.6.)$$

$$BER_{RAKE-BPAM} = Q \left[\sqrt{\frac{\frac{2(N_p-1)E_b}{N_p N_o}}{4 \frac{N_p}{N_p-1} - \frac{6}{N_p-1} (N_p TW \frac{N_o}{E_b})}} \right] \quad (2.7.)$$

2.3. Simulācijas rezultāti

Lai izprastu izstrādātā raidītāja arhitektūru, tā uzvedība tika salīdzināta ar *RAKE* arhitektūru. 2.4. attēlā redzamajā pirmajā testu sērijā ir attēlots *BER* attiecībā pret enerģiju par bitu pret trokšņa spektrālo jaudu E_b/N_o . No simulācijas rezultātiem ir redzams, ka *TRDH* darbojas labi gan ar *BPPAM*, gan ar *BPAM* modulāciju. Kopumā ņemot, *TRDH-BPAM* veikspēja ir nedaudz labāka par *TRDH-BPPM*.

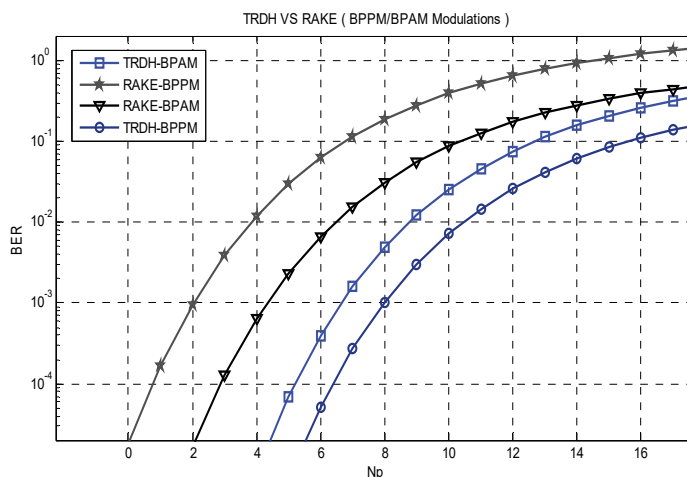


2.4. attēls. *BER* ar $N_p=15$ un $TW=150$ un $E_b/N_o=20$ dB.

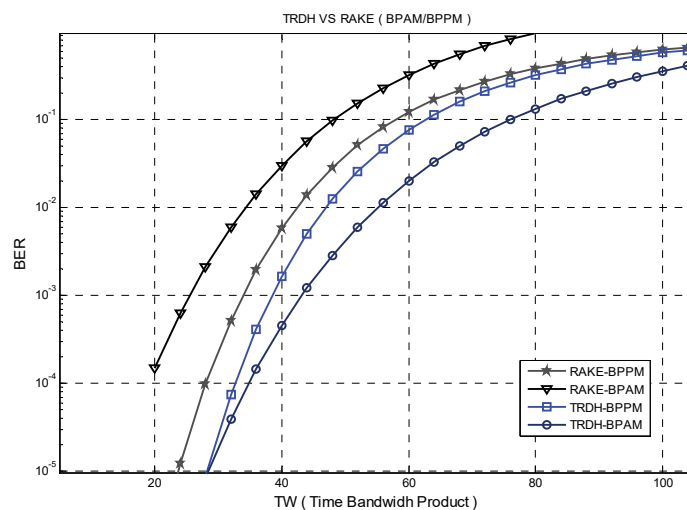
RAKE-BPPM veikspēja ir viszemākā. *RAKE-BPAM* ir labāks par *RAKE-BPPAM* ar $BER = 10e-4$, bet *RAKE-BPPM* sistēmas veikspēja ir mazāka par 2 dB (mazāka par sliktāko *TRDH* gadījumu). 2.5. attēlā redzams *BER* pret pārraidīto impulsu skaitu N_p . Gan *TRDH-BPAM*, gan *TRDH-BPPM* uzrāda labāku veikspēju. *RAKE* pārraides veikspējas, pieaugot N_p , samazinās, jo *RAKE-BPPM/BPAM* signāla struktūru būtiski ietekmē pulsu pārpildīšanās.

2.6. attēlā 2.6. redzama *BER* veikspēja pret laika-joslas reizinājumu TW . Gan *TRDH-BPAM*, gan *BPPAM* uzrāda labāku veikspēju ar zemākām TW vērtībām, *RAKE-BPPM*, bet *TRDH* ir nedaudz labāka veikspēja. Līdzīgi *RAKE (BPPM)* ir nedaudz labāka veikspēja par *TRDH* sistēmām sakarā ar ierobežoto signāla-troksņa vērtību, kas nosaka lēmuma vērtību.

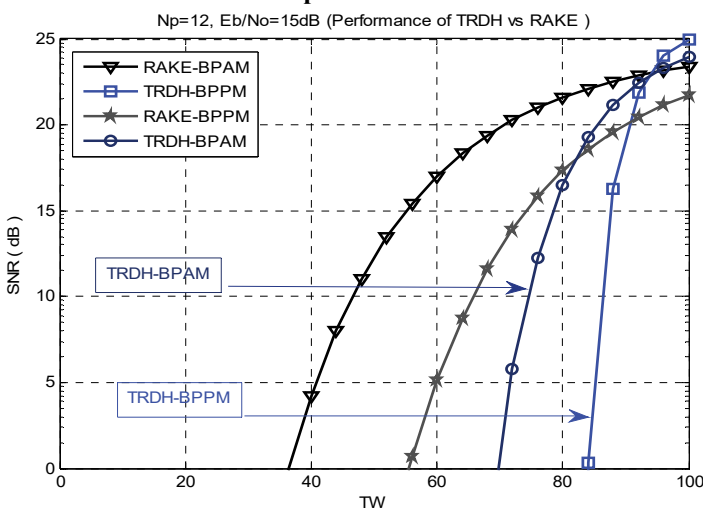
2.7. attēlā parādīti rezultāti papildu veikspējas testiem par abu dizainu SNR pret TW vērtībām. Kā paredzams, *TRDH* nodrošina augstu SNR pat ar lielu TW vērtību. Piemēram, gan *TRDH (BPAM un BPPM)* nodrošina $SNR > 20$, kad TW ir virs 70. No otras puses, *RAKE-BPAM* nodrošina SNR ap 25, kad $TW < 40$.



2.5. attēls. *BER* vs. N_p par $TW=150$ un $E_b/N_0=20$ dB.



2.6. attēls. *BER* vs. TW par $TW=150$ un $E_b/N_0=20$ dB.



2.7. attēls. SNR pret N_p ar $TW=150$ un $E_b/N_0=20$ dB.

3. GRUPĒŠANAS PIELĀGOŠANAS IESPĒJAS

Izstrādātais grupēšanas algoritms ir balstīts uz pārraides diapazona likumu, kurā grupas tiek veidotas saskaņā ar pārraides diapazona attiecību pret bāzes staciju. Papildus tam ir noteikta sliekšņa vērtība labākajai grupas piederībai, un grupas dalībnieku pārraides diapazons nekad nepārsniedz šo vērtību. Bez tam grupas iesākuma daļa ir balstīta uz vairāku parametru vērtību, kurus saskaita ar īpašu cenas funkciju [16]. Tā nodrošina, ka par grupas centrālo mezglu izvēlas mezglu ar lielāko cenas vērtību. Šie divi galvenie uzlabojumi ne tikai vienkāršo tīkla izveidi, bet arī uzlabo tīkla kopējo veiktspēju.

3.1. Piedāvātā stratēģija

Mūsu piedāvātā stratēģija sastāv no diviem režīmiem: izveides un stabilizēšanas. Izveides režīmā uzmanība tiek pievērsta grupas un grupas vadītāja *CH* izvēlei, bet datu pārraide un maršrutēšana tiek nokārtota stabilizēšanas režīmā. Stratēģijas galvenie soļi (ar dažiem pieņēmumiem) ir šādi:

- mezgli ir varbūtīgi izvietoti mērķa apgabalā;
- simulācijas sākumā visiem mezgliem ir pieejams vienāds enerģijas daudzums;
- visiem mezgliem pastāv iespēja pārraidīt datus uz jebkuru citu mezglu vai uz bāzes staciju *BS*;
- datu slānī tiek izmantota *IR-UWB* pārraide;
- kanāla īpašības ir simetriskas (pārraidei nepieciešamā jauda signāla pārraidei no mezgla x uz mezglu y ir tāda pati kā no y uz x). T. i., $(x \rightarrow y)$ ir vienāds ar $(y \rightarrow x)$.

3.2. Izveides režīms

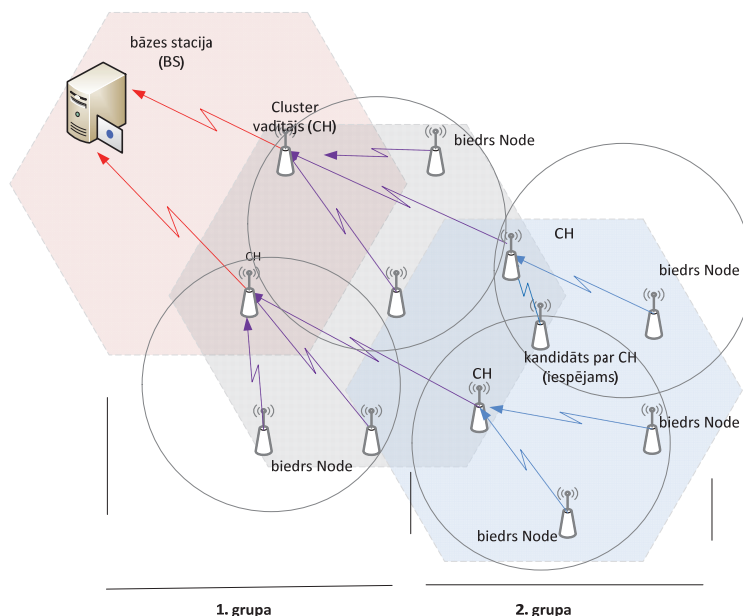
Grupas izveide un vadītāja *CH* izvēle: mezgli tiek sakārtoti grupās, balstoties uz to attālumu no bāzes stacijas. Lai ierobežotu mezglu skaitu grupā, tiek noteikts maksimālais mezglu skaits. Līdz ar to mezglu skaits kanālā nepārsniedz izvēlēto maksimālo skaitu grupā. Izveide notiek šādos soļos.

Sākumā bāzes stacija savāc ziņas par visiem mezgliem.

Uztverot pilottoni, visi aktīvie mezgli pārraida galveno informāciju par sevi: mezgla identifikatoru, pieejamo enerģiju un attālumu no bāzes stacijas.

Balstoties uz saņemtajiem datiem, tiek izveidotas vairākas grupas, kā tas parādīts 3.1. attēlā. No grupā izvēlētajiem kandidātiem tiek izvēlēts atbilstošs līderis.

Grupēšana tiek veikta, balstoties uz attālumu no *BS*. (Mezgli ar pārraides laiku *Tx* no bāzes stacijas ir 1. grupā, tālākie mezgli – 2. grupā utt.



3.1. attēls. Mezglu grupēšanas ilustrācija.

Pēc grupas vadītāja izvēles starp iesaistītajiem mezgliem tiek izveidots pārraides plāns. Galvenie izveides soļi ir šādi:

1. tiek sākts datu apkopošanas process;
2. balstoties uz sensoru datiem, mezgli gaida savu kārtu, kad tie varēs pārraidīt datus uz *CH* (saskaņā ar noteikto *MAC* plānu);
3. katra apļa beigās *CH* veic datu apkopošanu un pārraida tos uz *BS*.

3.3. Stabilizācijas režīms

Šajā režīmā katra grupa veic datu apkopošanu un izveido maršrutēšanas plānu saskaņā ar *MAC* algoritmu [2]. Stabilizācijas režīmā notiek divi svarīgi sazināšanās soļi: saziņa grupas iekšienē un saziņa ar datu saņēmēju (un citiem *CH*). 3.2. attēlā parādīts mūsu piedāvātais stabilizācijas režīms. Lai novērstu interferenci starp šiem diviem saziņas veidiem, katrā grupā tiek izvēlēts cits pārraides kanāls. Šis kanāls ir kopīgs visiem mezgliem grupā un *CH*. *CH* savāc šo informāciju no *BS* grupas izveides laikā.

3.4. Grupas iekšējā saziņa

Pēc grupas izveides tās mezgli vāc sensoru datus un pārraida tos grupas vadītājam saskaņā ar *MAC* plānu. Grupas vadītājs sagrupē un apkopo uztvertos datus. Pēc šī soļa dati tiek pārsūtīti uz bāzes staciju (pa tiešo *BS* vai caur kaimiņu grupas vadītāju), kā tas parādīts 3.2. attēlā.

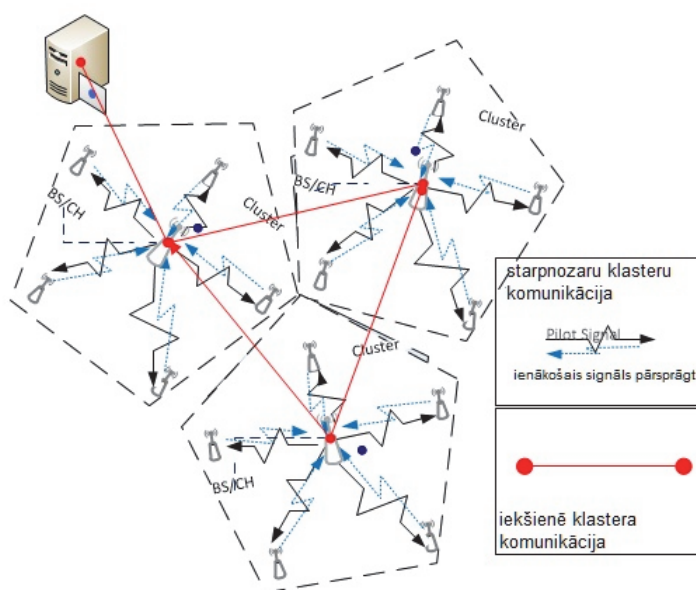
Visi grupas dalībnieki un grupas *CH* izmanto unikālu kanālu. Tas novērš interferenci starp dažādām grupām.

3.5. Grupu savstarpējā saziņa

Katras grupas vadītājs izstrādā saziņas plānu, balstoties uz Pilota signāla kanāla piekļuves algoritmu, kas tiek veikts vairākos soļos, kā aprakstīts [2]. 3.2. attēlā ir parādīts abu saziņas veidu loģiskais ceļš. Saziņa no *CH* uz *CH* vai no *CH* uz *BS* izmanto atsevišķus kanālus (citādāku nekā grupas iekšējā saziņā), kas novērš interferenci starp dažādām grupām.

3.6. Interferences pārvaldība

Raksturīgā interferences «tuvu vai tālu» problēma tiek risināta divos slāņos, kur radio/fiziskais slānis (kas detalizēti aprakstīts 2. nodaļā) tiek pārvaldīts kopīgi ar *MAC* slāni. Šīs vienotā starpslāņu pieeja nodrošina stabilu saziņu un samazina interferences radītos kropļojumus. Papildus starpgrupu interferences mazināšanai tiek izmantota Volterra [17] paņēmieni, kas novērš saziņas traucējumus no ārējiem interferences avotiem.



3.2. attēls. Grupu iekšējā un savstarpējā saziņa.

3.7. Simulācijas un veiktspējas novērtējums

Pirms eksperimentālā dizaina praktiskas izstrādes un veiktspējas testēšanas tika izmantots *MixiM* (ar *OMNET++*) veiktspējas modelis. Tabulā 3.1. ir parādīti simulācijas svarīgākie parametri.

Tabula 3.1. Galveno simulācijas parametru vērtības

Parameters	Vērtība	Parametrs	Vērtība
Tīkla platība (m)	100x100	Pulsa ilgums	5 ns
Mezglu skaits (n)	100	Simulāciju skaits	50
Mezglu sākotnējā enerģija	1 J	ϵ_{fs}	250 pJ/b
E_{elec}	5 nJ/b	d	50m
Datagrammas izmērs	4 Kbits		

3.8. Vidējā enerģija

Viens no veidiem, kā veikt modeļa optimizāciju, ir novērtēt vidējo enerģijas patēriņu. Enerģijas patēriņam viena bita izmaiņšanai ir izmantota formula [5]

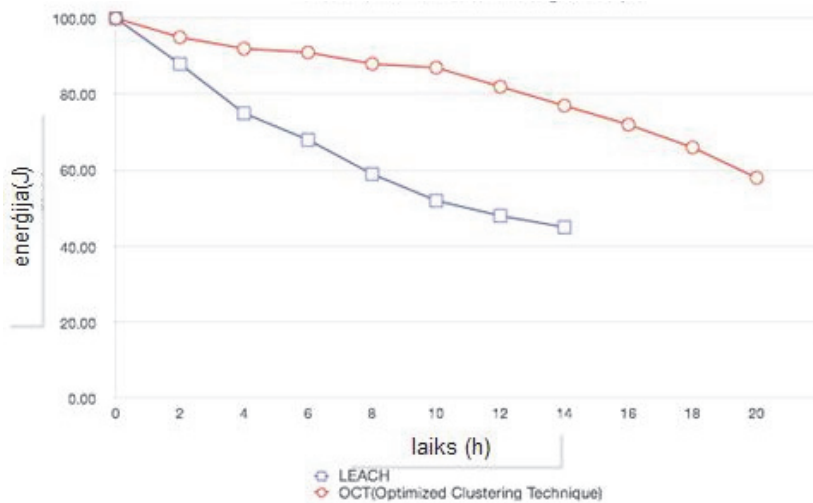
$$E_{TOT}(i) = E_{Tx} + E_{Rx} \quad (3.1.)$$

E_{TOT} ir kopējā mezgla i patērētā enerģija. E_{Tx} Ir raidītājā patērētā enerģija, ko nosaka ar formulu:

$$E_{Tx}(b, d) = (E_{elec} \times b) + (\epsilon_{fs} \times b \times d^2) \quad (3.2.)$$

Līdzīgi E_{Rx} ir uztvērēja patērētā enerģija, kas ir vienāda ar:

$$E_{Rx}(b) = E_{elec} \times b \quad (3.3.)$$



3.3. attēls. Enerģijas patēriņš (*LEACH* vs. *OCT*).

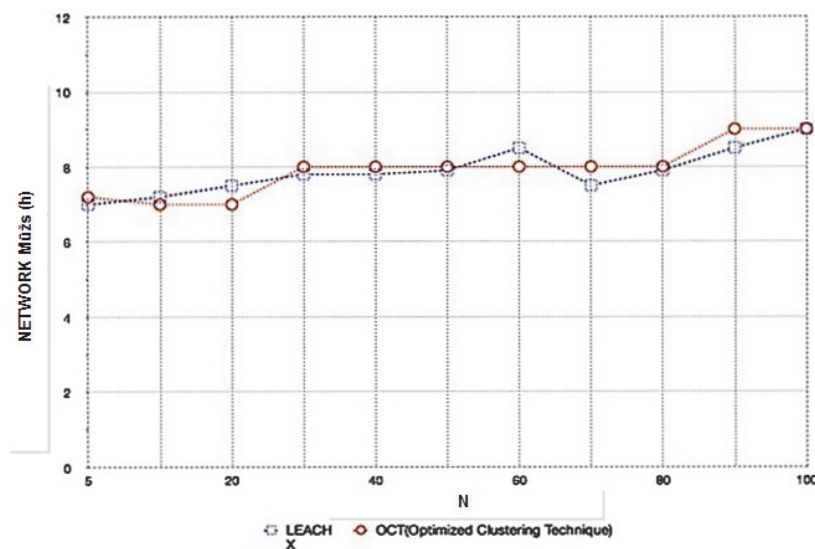
E_{elec} ir kopējā elektriskā enerģija (kopā ar radio) ,un tiek pieņemts, ka grupas izveides laikā mezgli zina citu mezglu atrašanās vietas. Datagrammas izmērs ir nemainīgi 4 Kb. Ja mezgla baterijas enerģija samazinās līdz nullei, tiek pieņemts, ka mezgls ir «miris».

No simulācijas rezultātiem 3.3. attēlā ir redzams, ka, lietojot mezglu grupēšanu, mezgliem atlikusī enerģija ir lielāka pat blīvos tīklos ($n=100$). Salīdzinot *LEACH* un *OCT*, ir redzams, ka pēc 14 stundām ar to pašu mezglu skaitu *LEACH* tīklā ir atlikusī enerģija ir aptuveni 40 J, bet *OCT* tā ir aptuveni 75 J. *OCT* ir pārāks ne tikai ar labākiem enerģijas, bet arī pakešu

piegādes rādītājiem. To nodrošina vairāki faktori: starpslāņu pārvaldība, sinhronizēšana, pats svarīgākais pluss ir *CH* izvēles veids..

3.9. Tīkla dzīves laiks

Tīkla dzīves laiks ir atkarīgs no tā mezglu dzīves laika. Tas savukārt ir atkarīgs no veiksmīgas pakešu piegādes. Palielinoties sadursmēm pārraižu laikā vai nomesto pakešu skatam, tīkla pārslodzes dēļ kopējais enerģijas patēriņš tīklā pieaug.



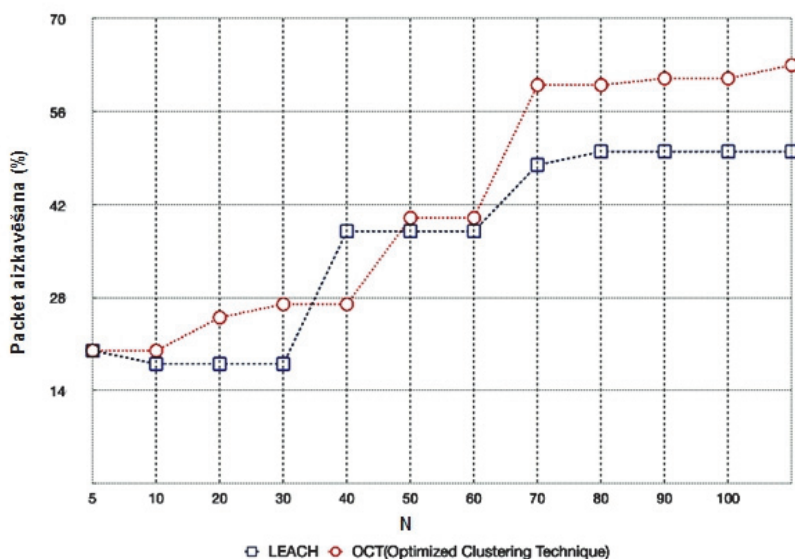
3.4. attēls. Tīkla dzīvotspējas analīze

Tas savukārt nelabvēlīgi ietekmē tīkla veiktspēju. Simulācijas laikā tīkla mezglu skaits tika pakāpeniski palielināts no $n=5$ līdz $n=100$ mezgliem. Tika novērots, ka tīkla dzīves ilgums saglabājas no 6 līdz 9 stundām (kas ir ļoti stabils rādītājs). Palielinot mezglu skaitu tīklā, tā kopējais dzīves ilgums pieaug. Tas notiek tāpēc, ka, pieaugot mezglu skaitam, pieaugt tīklā kopējais pieejamais enerģijas apjoms. Grafikā ir redzams, ka visilgākais tīkla dzīves laiks ir ar maksimālo mezglu skaitu tīklā, kad $n=100$. Tas nozīmē, ka *OCT* algoritms efektīvi atrisina kanāla piekļuves problēmas (uz pilota balstītu *MAC*) blīvā tīklā, bet dzīves laiks ir nedaudz sliktāks par *LEACH*. Simulācijas rezultāti parāda, ka *OCT* ir aptuveni tikpat efektīvs kā *LEACH*. Lai pārlicinātos, ka rezultāti ir precīzi, simulācija tika atkārtota vairākas reizes. 3.4. attēlā redzams, ka tīkla dzīves laiks ir vienmērīgs. Viens no iemesliem ir cenas funkcijas izmantošana, kurā ņem vērā ne tikai patērēto enerģiju, bet arī citus faktorus.

3.10. Pakešu piegādes attiecība

Attiecība ir aprēķināta saskaņā ar šādu formulu: *Veiksmīgi piegādāto pakešu attiecība* = $\frac{\text{Kopējais saņemto pakešu skaits}}{\text{Kopējais nosūtīto pakešu skaits}}$.

3.5. attēlā ir redzams, ka, izmantojot mezglu grupēšanu, piegādāto pakešu attiecība ir labāka par *LEACH*, kā arī šī attiecība ir pietiekami augsta pat ar lielu mezglu skaitu tīklā,



3.5. attēls. Veiksmīgi piegādāto pakešu attiecība.

(piemēram, ar $n=100$). Tas pierāda *PA-MAC* algoritma piemērotību blīvos tīklos. Tika arī novērots, ka, pieaugot mezglu skaitam, piegādāto pakešu attiecība uzlabojas. Tas notiek tāpēc, ka, pieaugot mezglu skaitam, tiem pastāv plašākas iespējas savienoties ar *BS* pa tiešo vai arī izvēlēties kādu no grupas vadītājiem. 3.5. attēlā varam redzēt, ka līdz bāzes stacijai nonāk vairāk pakešu, ja tiek izmantota tīkla optimizēšana (t. i., ir izmantots *OCT* algoritms).

Lietojot *PA-MAC* algoritmu blīvos tīklos, tā pakešu piegāde, enerģijas patēriņš un kopējais tīkla dzīves laiks pasliktinās. Mēs pētījām tā iemeslus un ievērojām, ka galvenais iemesls ir tīkla topoloģija un vājā maršrutēšanas struktūra. Šajā darbā mēs pievērsāmies šo problēmu risināšanai, izmantojot dažādus tīkla pielāgojumus (piemēram, grupējot mezglus un samazinot dalībnieku skaitu grupā). Mūsu pieejā grupas vadītāja izvēli veic, izmantojot cenas funkciju. Tajā ir iekļautas vairākas lietas, piemēram, pārraides attālums, atlikusī enerģija u. tml. Šo faktoru izvērtēšana ļauj saglabāt sabalansētu mezglu grupu. Grupēšana, vadoties no pārraides attāluma, nodrošina stabilu un viegli vadāmu mezglu grupu. Simulācijas rezultāti parāda, ka ar mūsu pielāgojumiem *PA-MAC* tīkla veiktspēja uzlabojas pat blīvos tīklos. Salīdzinot mūsu algoritma kopējos simulācijas rezultātus ar *LEACH* algoritmu, ir redzams, ka mūsu algoritma rādītāji ir kopumā labāki pēc visiem kritērijiem.

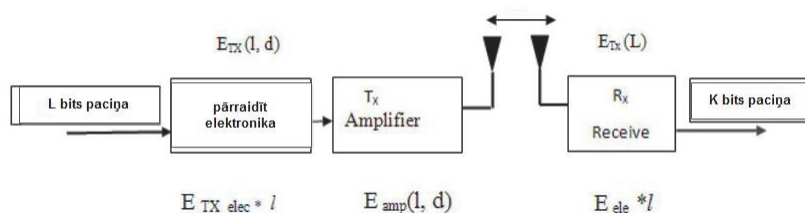
4. UZ PA-MAC BALSTĪTA IR-UWB TĪKLA PAŠATJAUNOŠANĀS ANALĪZE

Ieviešot mūsu *TRDH* tīkla arhitektūru, tā veiktspēja bija ļoti laba nelieliem iekštelpu tīkliem, bet, pārbaudot to blīva tīkla apstākļos, tīkla dzīves laiks tika būtiski pasliktināts. Lai risinātu šo problēmu, mēs lietojām dažādus uzlabojumus, piemēram, grupēšanu. Šīs nodaļas galvenā tēma ir novērtēt mūsu piedāvātā tīkla ietvara pašatjaunošanās spēju.

Tiek izmantots tas pats tīkla modelis, ko izmantojām iepriekšējā nodaļā [18]. Līdz ar to gan *MAC*, gan *PHY* tīkla pieejas process ir tāds pats.

4.1. Enerģijas modelis

Enerģijas modelis ir aizgūts no ietvara [18] [19], kurā tīkla mezglu skaits ir maināms no 100 līdz 500 (katrā no scenārijiem). Tīkla fiziskais izklājums ir 100×100 metru, kā parādīts 4.1. attēlā.



4.1. attēls. Piedāvātā tīkla ietvara enerģijas modelis [19].

4.1. attēlā parādītais enerģijas modelis tiek izmantots enerģijas zudumu noteikšanai [19]. Lai noteiktu attālumu starp mezgliem un to enerģiju, tiek pieņemts ka starp tiem ir brīva telpa (d_2). Līdzīgi daudzceļu vājinājuma (d_4) noteikšanai ir ņemts vērā kanālu modelis. Bitu x pārraide nepieciešamo enerģiju var noteikt ar formulu [20].

$$E_{TOT}(i) = E_{Tx} + E_{Rx}, \quad (4.1.)$$

kur E_{TOT} ir kopējā i patērētā enerģija un E_{Tx} ir pārraides enerģija raidītājā:

$$E_{Tx}(b, d) = (E_{elec} \times b) + (\epsilon_{fs} \times b \times d^2) \quad (4.2.)$$

Līdzīgi enerģija E_{Rx} uztvērējā ir:

$$E_{Rx}(b) = E_{elec} \times b \quad (4.3.)$$

E_{elec} ir radio kopējā patērētā enerģija. Noklusētais paketes izmērs ir 4 Kb, bet apjoms, ko katrs mezgls pārraida *CH*, mainās atkarībā no pseidogadījumu skaitļa. Kad mezgla atlikusī enerģija ir nulle, tā tiek noņemta no tīkla.

4.2. PAŠORGANIZĒŠANĀS SPĒJAS

Pašorganizēšanās spēja ir svarīga sensoru tīklu īpašība [21]. Tā uzlabo mērogojamību un automātisko iestatīšanos, mainoties tīkla apstākļiem [22]. Galvenā pašorganizējoša tīkla spēja ir spēja mainīt tīkla topoloģiju, mainoties tīkla vides faktoriem. Pašorganizēšanās izmanto zināšanas par tīkla topoloģiju un nodrošina tā stabilitāti. Pašorganizēšanās procesa blokshēma ir attēlota 4.2. attēlā.

1. scenārijs: viena nejauši izvēlēta mezgla atslēgšana.

Novērtēšanu mēs sākam ar vienkāršāko gadījumu – vienu varbūtīgi izvēlēta mezgla atlikušo enerģiju izmainot uz nulli. Tas nozīmē, ka mezgls tika noņemts no tīkla, kā tas parādīts 4.3. attēlā (a).

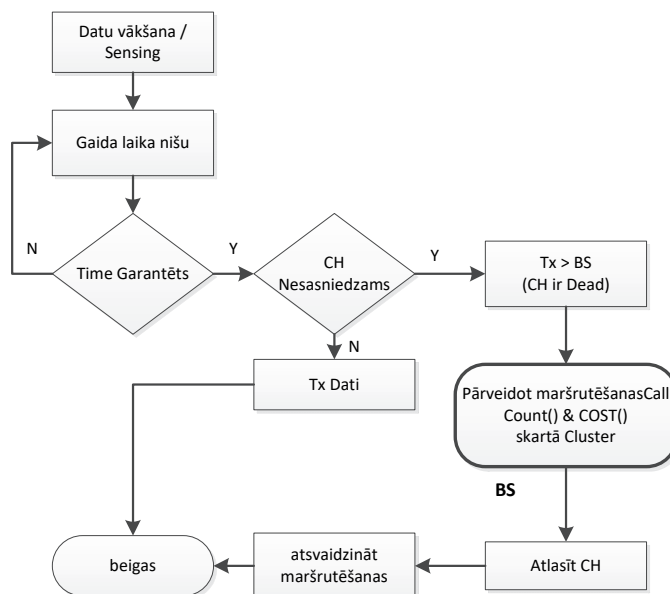
2. scenārijs: *CH* mezgla atslēgšana nejaušā secībā.

Šajā scenārijā mēs varbūtīgi izmainījām atlikušo enerģijas līmeni uz nulli grupas vadītājam.

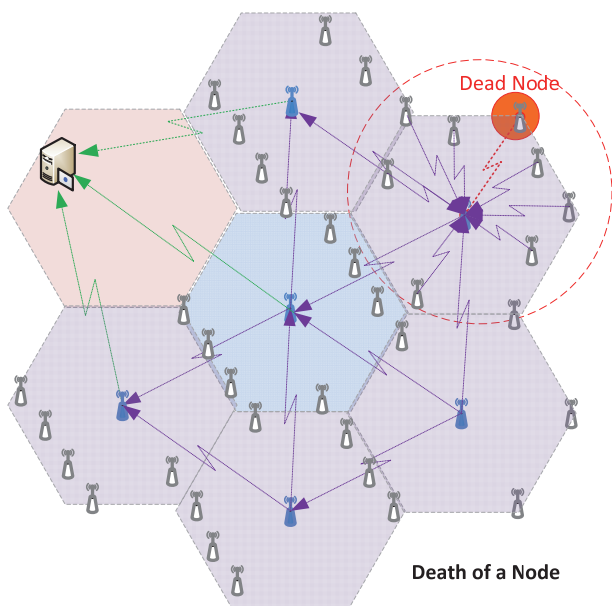
Lai iegūtu precīzus rezultātus, šis scenārijs tika atkārtots vairākas reizes ar dažādu *CH* skaitu. Skat. 4.3. attēlu (b).

3. scenārijs: vienlaicīga *CM* un grupas mezgla atslēgšana.

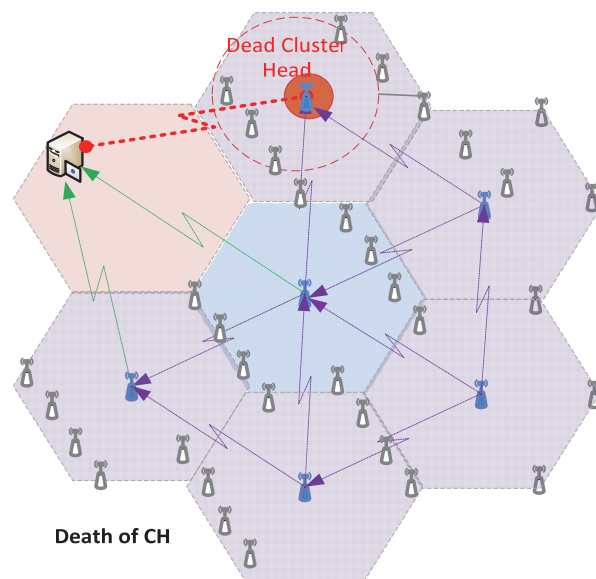
Šajā scenārijā mēs vienlaikus atslēdzām vienu mezglu un grupas vadītāju. Mēs atkārtojām scenāriju vairākkārt, izvēloties dažādus mezglus un dažādus grupu vadītājus. Piemēram, mezglu un *CH* no tās pašas grupas, *CH* un mezglu no blakus grupām, *CH* un mezglu no varbūtīgi izvēlētajām grupām u. tml. Mezglu atslēgšana notika gan varbūtīgi, gan manuāli, kā parādīts 4.3. attēlā (c).



4.2. attēls. Pašorganizācijas plūsmas shēma



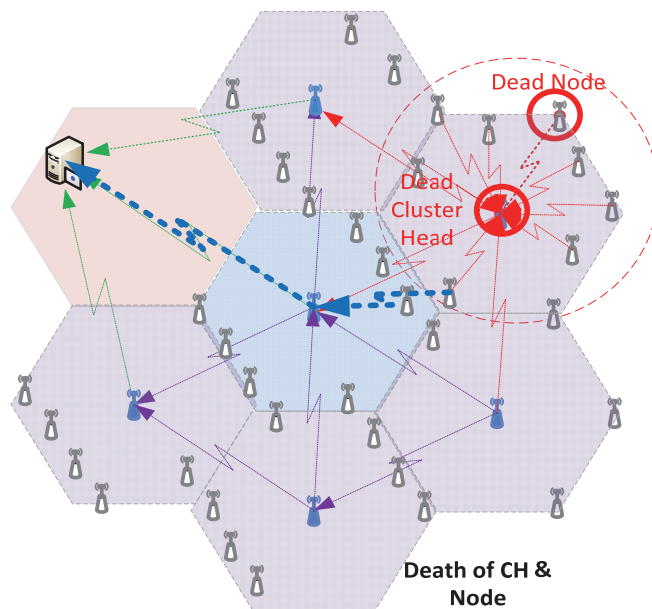
Att. 4.3 (a). Pašorganizācijas mehānisms.



Att. 4.3 (b). Pašorganizācijas mehānisms.

4.3. Simulācijas veikspējas novērtēšana

Mūsu ietvara novērtēšanai tika izmantota *Omnet++* simulācijas platforma [23]. Simulācijas parametri ir parādīti tabulā 4.1. Simulācija tika atkārtota vairākas reizes ar mezglu skaitu tīklā no 100 līdz 500.

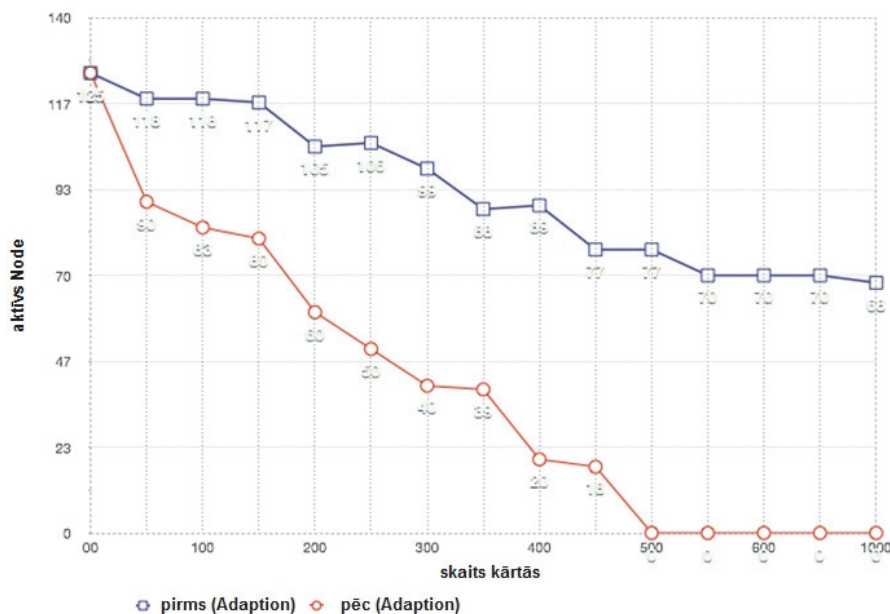


4.3. attēls (c). Pašorganizācijas mehānisms.

Tabula 4.1. Simulācijas parametri

Parametrs	Vērtība
Tīkla izmērs (m)	100x100
Mezglu skaits (n)	100-500
Mezglu sākotnējā enerģija	100 J
E_{elec}	5 nJ/b
Datagrammas izmērs	4 Kbits (<i>default</i>)
Pulsa ilgums	5 ns
Palaišanas skaits	50–100
ϵ_{fs}	250 pJ/b
D	50 m

Veicot tīkla arhitektūras pašorganizēšanās simulācijas testus, tika veikti šādi novērojumi. Mēs noteicām piedāvātā ietvara tīkla dzīves laiku pirms un pēc pielāgojumu lietošanas. Tabulā 4.2. un 4.4. attēlā: pirms pielāgošanas mezglu pusdzīves laiks (*HND*— *Half Nodes Death*) bija aptuveni 152 cikli. No otras puses, pēc pielāgojumu ieviešanas *HND* bija aptuveni 890 cikli. Tas ir vairāk nekā 60 % tīkla dzīves laika uzlabojums.



4.4. attēls. Tīkla dzīves laiks pēc tīkla pielāgošanās.

Tabula 4.2. Tīkla dzīves laiks

S#	Scenārijs	1. mezgla nāve	HND	dzīves laika uzlabojums %
1	Pirms pielāgojumiem	45	890	59,23
2	Pēc pielāgojumiem	4	152	NA

Salīdzinot pakešu piegādi pirms un pēc pielāgojumiem Tabulā 4.3. ir redzams:

Tabula 4.3. Piegādes attiecība

S#	Scenārijs	Piegādes attiecība %
1	Pirms pielāgojumiem	15 %
2	Pēc pielāgojumiem, bez izmaiņām tīklā	95 %
3	.. un ar 1 <i>CH</i> nāvi	65 %
4	.. un ar 1 mezgla nāvi	90 %

Tabulā 4.3. ir redzams, ka pirms pielāgojumiem pakešu piegāde ir būtiski pasliktināta un piegādāto pakešu attiecība ir tikai 15 %. Pēc pielāgošanas pakešu piegāde ir būtiski uzlabota, un pakešu piegādes attiecība sasniedz 95 %. Pat ar viena mezgla nāvi piegāde ir 90 %. Bet, ja nomirst vienas grupas vadītājs, piegāde samazinās līdz 61 %. Tas ir loģiski, jo viena grupas vadītāja nāve ietekmē visu tīklu. Salīdzinot enerģijas patēriņu pirms un pēc pielāgojumu ieviešanas, redzams, ka pēc 50 cikliem atlikusī enerģija bija 34 J, bet pēc 800 tā nokritās līdz 0,057 J. Savukārt pēc mūsu pielāgojumiem atlikusī enerģija pēc 1000 cikliem un *CH* izzušanas bija 2.1 J, un ar viena parasta mezgla izzušanu patēriņš bija aptuveni 8 J/s, kas ir būtisks energoefektivitātes uzlabojums. Skat. tabulu 4.4.

Tabula 4.4. Atlikusī enerģija

S#	Scenārijs	Kopēja atlikuša enerģija
1	Pirms pielāgojumiem	0,045 J/s
2	Pēc pielāgojumiem, bez izmaiņām tīklā	8,124 J/s
3	.. un ar 1 <i>CH</i> izzūšanu	2,183 J/s
4	.. un ar 1 mezgla izzūšanu	7,782 J/s

5. «SMART Incubator» projekts – PA-MAC ietvara ieviešana WBAN tīklā

«SMART Incubator» ir projekts, kurā izstrādā viedu priekšlaicīgi dzimušu zīdaiņu inkubatoru. Šajā projektā tika praktiski izmēģināts mūsu izstrādātais platjoslas UWB frekvences WBAN tīkls ar PA-MAC arhitektūru un mūsu uzlabojumiem.

Šajā tīkla ietilpst dažādi gan sarežģīti sensori, gan vienkāršāki sensori, piemēram, ECG, SPO2, gan ķermeņa kustības un temperatūras sensori. Tīkla topoloģija ir sadalīta divos segmentos (grupās) – statisks tīkls ar 13 nemainīgiem mezgliem (kas ir uzstādīti inkubatorā) un dinamisks tīkls ar deviņiem zīdaiņa ķermenim pievienojamiem mezgliem. Statiskā tīkla galvenās funkcijas ir vākt datus par vidi, piemēram, mitrumu, temperatūru, apgaismojumu. BAN tīkla galvenās funkcijas ir vākt datus par zīdaiņi. Abi tīkli sūta datus uz centrālo bāzes staciju caur maršrutētāju (grupas vadītāju CH). Lietojumu slānī savāktie dati tiek izmantoti medicīnas vajadzībām.



5.1. attēls. MAS WBAN eksperimentālais komplekts: (a) bezvadu sviedru sensors; (b) vadības mezgls; (c) lietojumu slānis.

5.1. Arhitektūra un pamata uzbūves elementi

Augsta līmeņa arhitektūra sastāv no diviem galvenajiem segmentiem. Skat. 5.2. attēlu.

Statiskā tīkla grupa (inkubatori pastāvīgi uzstādītie sensori). Dinamiskā tīkla grupa (ķermeņa sensori, kas pievienoti dažādām ķermeņa daļām).

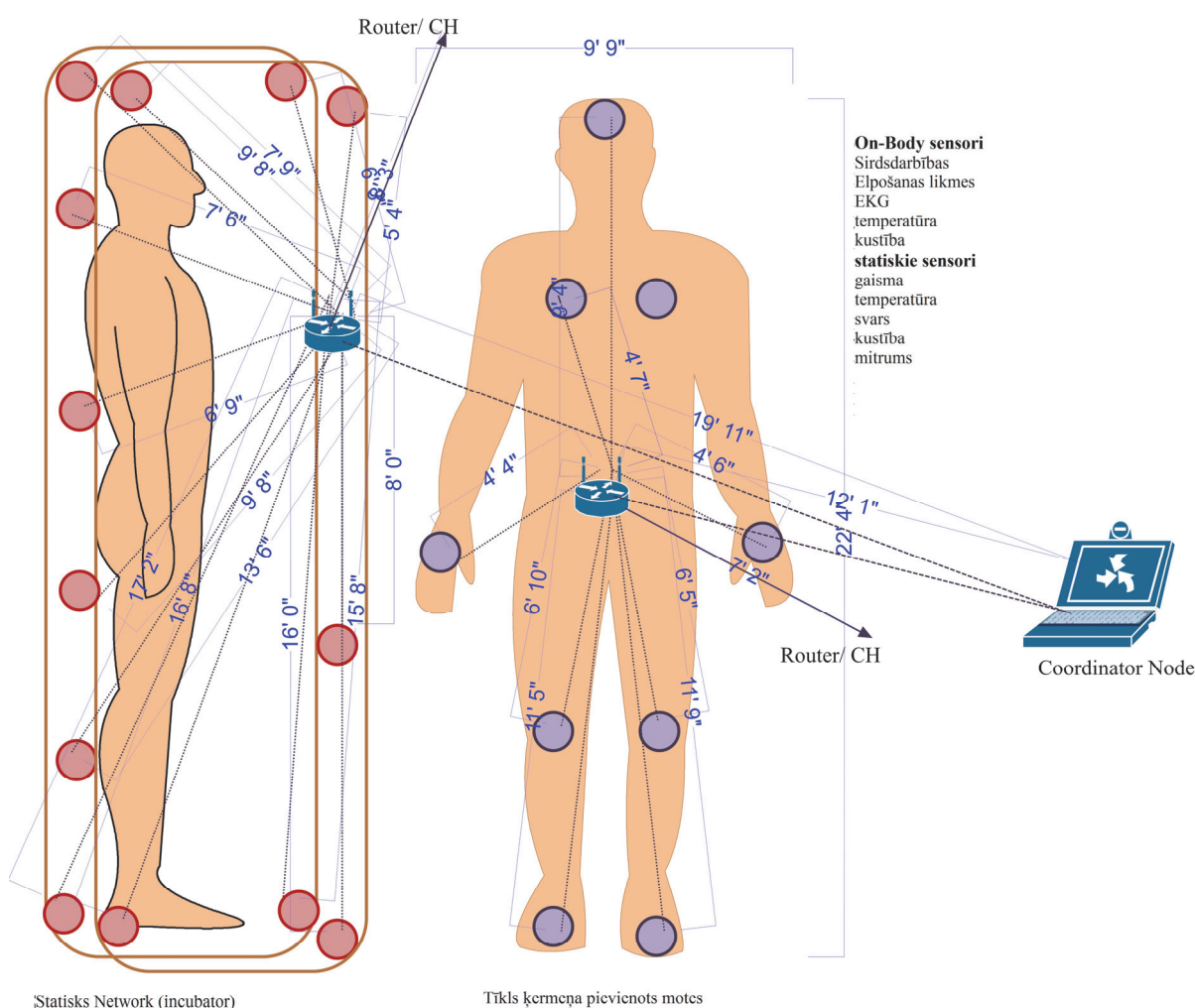
Katrai tīkla grupai ir savs CH, kas kalpo arī kā maršrutētājs. Abi CH ir pievienoti centrālajai BS, kas kalpo kā koordinējošais mezgls un savāc un apkopo sensoru datus lietojumu slānī. Datu pārraide starp mezgliem un uz bāzes staciju kā vidi izmanto UWB. Katram mezglam ir divas galvenās daļas: sensora shēma un raidītāja uztvērēja shēma.

Dažādu sensoru datu ātrums ir parādīts tabulā 5.2.

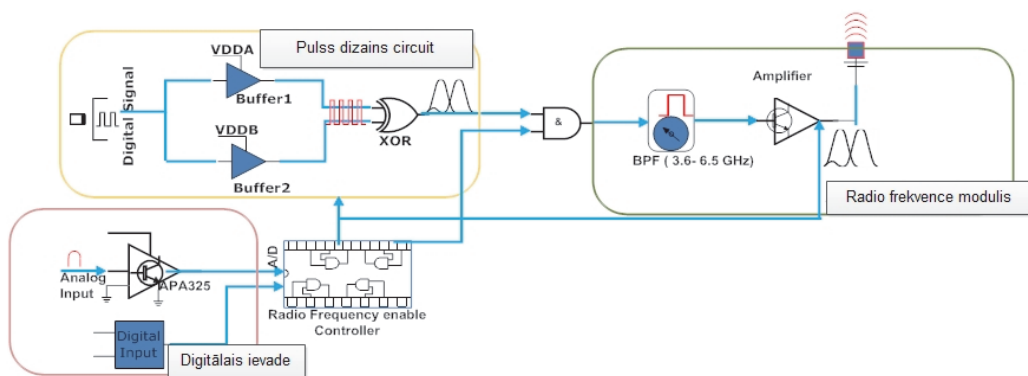
Atšķirībā no parasta WSN pārraudzības tīkla «Smart Incubator» darbības ir kritiskas, tiem ir jādarbojas nemainīgi stabili dažādos apstākļos. (Kas, piemēram, ir svarīgi priekšlaicīgi dzimuša zīdaiņa pirmajās 48 stundās). Tāpēc sensoru sniegto datu uzticamība ir kritiska.

Mezglu arhitektūra

5.1. attēlā parādīts *MAS WBAN* komplekts, kas nodrošina elastīgu tīkla mezglu struktūru. Veicot pamatīgu «*SMART Incubator*» projekta prasību analīzi, tikai izvēlēta uz pastiprinātājiem balstīta mezglu arhitektūra [24], kā tas parādīts 5.3. attēlā. Ar šādu funkcionālo dizainu šauri pamatjoslas pulsi tiek nofiltrēti ar 3,5–6,5 GHz filtru. Pēc tam *UWB* pulsi tiek pastiprināti, izmantojot platjoslas zema trokšņa pastiprinātāju (*LNA*), lai panāktu $-41,3$ dBm pārraides jaudas līmeni. Šis pastiprinātājs tika iekļauts, lai nodrošinātu, ka *UWB* pulsi ir pietiekami jaudīgi.



5.2. attēls. «*SMART Incubator*» statistiskie un dinamiskie tīkla mezgli.

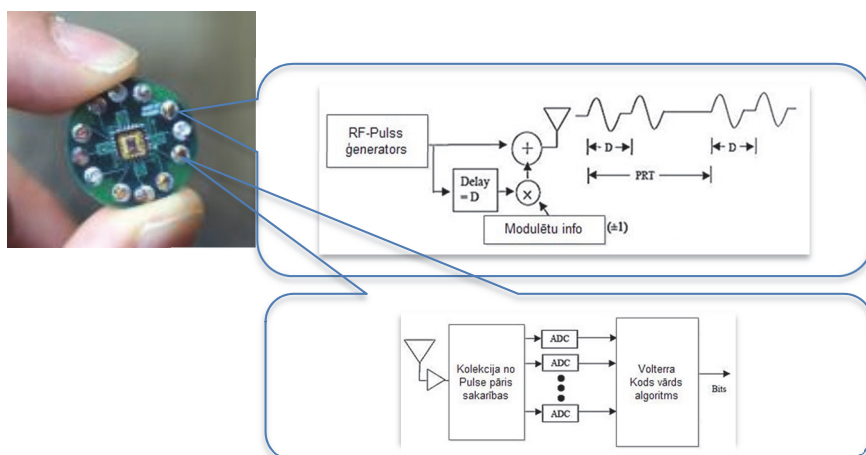


5.3. attēls. MAS eksperimentālā komplekta tīkla arhitektūra.

Tīkla jauda ir sadalīta vairākās frekvenču joslās, kas ir izkliedētas *UWB* frekvencē. Paaugstinoties frekvencei, joslu jauda pakāpeniski samazinās. *UWB* sensoru mezgli pārraida *UWB* signālus joslā no 3,8 līdz 4,5 GHz. Joslu jaudas amplitūda 3,8–4,5 GHz joslā ir daudz zem *FCC* maksimāli pieļaujamā līmeņa (-41.3 dBm/MHz) [25]. Mezglu dizains ļauj izmantot divas pastiprinātāju pakāpes, kas pastiprina *UWB* 3,8–4, 5GHz signālu līdz nepieciešamajam (skat. 5.5. attēlu) un ļauj izmantot pārraides jaudu, nepārkāpjot *FCC* noteikto jaudu.

5.2. Uztvērēja arhitektūra

Pētījumā izmantotais uztvērējs ir balstīts uz *DHTR* (*Delay hoped transmitted reference*) [1]. 5.4. attēlā shematiski parādīta *DHTR* dubletu pārraide. Dubletu atkārtošanas laiks (*PRT*) (aizture) dažādā joslās var būt izmantots dažāds. 5.4. attēlā redzamais atsaucēs uztvērējs darbojas, salīdzinot korelāciju starp atsaucēs impulsu un datu impulsu [26]. Modulācijai izmanto aizturi starp atsaucēs signālu un pilota signālu [27].



5.4. attēls. *DHTR* uztvērēja principiālā diagramma.

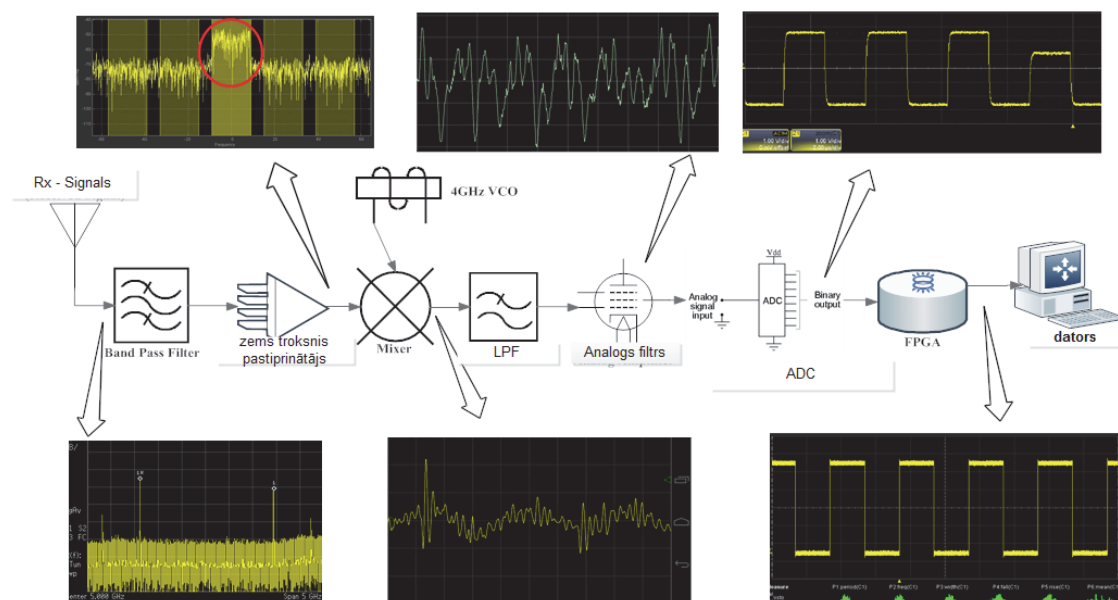
DHTR principiālā diagramma ir dota 5.5. attēlā. Tajā ir pulsu pāru korelatoru virkne, kas savieno antenu ar *LNA*.

Katrs korelators darbojas ar citādāku aizturi. Pēc korelatora ir Volterra koda [11] vārdu korelators. Korelācija tiek apstrādāta *DSP* aparātprogrammatūrā programmējamā loģiskajā iekārtā (*Programmable Logic Device – PLD*), no kā *ADC* iztver dubletu paraugus.

Korelācijas process balstās uz aizturi, multipleksēšanu un integrēšanu. Katru signālu sadala divās daļās, kur viena daļa ir uztvertais signāls, bet otra daļa ir signāls ar noteiktu aizturi y [28]. Beigās abi signāli tiek sareizināti, un rezultāts tiek integrēts.

5.3. *UWB* uztveršana

Uztvērēja principiālā diagramma ir dota 5.4. attēlā [1], [29]. No uztvertā signāla tiek izfiltrēta josla no 3,2 līdz 5,6 GHz. Pēc filtrēšanas signāls tiek pastiprināts ar vairākiem *LNA*, līdz tas sasniedz 50dB līmeni. Pēc tam pastiprinātais signāls tiek apstrādāts jaucējā (*Mixer*) un sprieguma vadītā oscilatorā (*Voltage Controlled Oscillator – VCO*) un, kā tas parādīts 5.5. attēlā. Izejas signāls no jaucēja un *VCO* tiek padots uz zemfrekvences filtru un integratoru, kas nodrošina, ka pamatjoslas signālu var pastiprināt ar *ADC*. Zemfrekvences filtru lieto, lai izgludinātu pulsus līdz *ADC* uztveramības diapazonam. Izvades signāli (piemēram, no jaucēja un zemfrekvences filtra) ir attēloti 5.5. attēlā.



5.5. attēls. TRDH *UWB* uztvērēja pakāpju attēlojums.

Analogais pastiprinātājs nodrošina *UWB* pastiprinājumu līdz atpazīstamam līmenim, kurā to nodod analogajam-digitālajam pārveidotājam, un tas savukārt tiek nodots programmējamu lauka aizvaru masīvam (*Field Programmable Gate Array – FPGA*), kas ir pēdējā *UWB* uztvertā

impulsa pakāpe. *FPGA* loma ir pārveidot uztverto digitālo signālu binārā datu signālā.

Mūsu gadījumā datu pārraide tiek vadīta ar *PA-MAC* (*Pilot Signal Assisted MAC*), kā tas aprakstīts 2. nodaļā [2].

Mūsu testa komplekts «*MAS WBAN*» ir integrēts ar *LabView* [30] un *MATLAB* [7], [31], lai simulācijas rezultātus būtu viegli salīdzināt ar praktiskos eksperimentos iegūtajiem rezultātiem.

Praktisko pētījumu apraksts

Praktiskie pētījumi tika veikti ar “*Agile*” pieieju [32], kur statiskā un dinamiskā tīkla (ķermeņa sensoru) segmenti tika pārbaudīti atsevišķi, un pēc veiksmīgas pārbaudes – arī abi kopā. Beigās visi praktisko pētījumu rezultāti tika salīdzināti ar simulācijā iegūtajiem rezultātiem. Attēlā zemāk ir parādīta detalizēta tīkla uzvedība.

Kanāla izplatīšanas modelis

Kanāla izplatīšanas modeli var aprakstīt ar formulu:

$$P_{dB}(d) = P_{0,dB} + a(d/d_0)^n + N(\mu(d), \sigma^2(d)) \quad (5.1.)$$

$$h_i(t) = M_i \sum_{u=0}^K b_{u,v}^i \delta(t - T_u^i - \tau_{u,v}^i) \quad (5.2.)$$

$$h_i(t) = M_i \sum_{u=0}^K \sum_{v=0}^L b_{u,v}^i \delta(t - T_u^i - \tau_{u,v}^i), \quad (5.3.)$$

kur M_i ir lognormalizēta ēna, $b_{u,v}^i$ ir daudzdzēļu koeficients. T ir u -tā *UWB* pulsa aiztures laiks. Mēs šo ieguvām no [12], pieņemot, ka distancei d , vidējais zudums ceļā būs:

$$L1=20\log\left(\frac{4\pi f_c}{c}\right), L2=20 \log (d) \text{ and } L=L1+L2,$$

kur f_c ir centrālā frekvence un $d = 1\text{m}$ visās pārbaudēs.

Pārbaudes parametri

Veiktspējas pārbaudei tika izmantotas šādas formulas un svarīgākie parametri:

$$PL = \frac{L}{S} \quad (5.4.)$$

$$D=T1-T2 \quad (5.5.)$$

$$Throughput(\%) = \frac{R}{C} * 100\% \quad (5.6.)$$

$$E\left(\frac{J}{bit}\right) = (\sum_{i=0}^K (I(A) * V(V) * T_{tx-rx}(s)) / \sum_{i=0}^K B), \quad (5.7.)$$

kur R ir ātrums b/s, C ir kapacitāte b/s, S ir pārsūtīto pakešu skaits, E ir enerģija un PL ir pakešu zudums. Tabulā 5.1. ir doti galvenie parametri.

Tabula 5.1. «*SMART Incubator*» galvenie parametri

Parametrs	Vērtība
Kopējais statisko mezglu skaits	13
Kopējais (ķermeņa) dinamisko mezglu skaits	9
Ķermeņa periodiskās plūsmas mezgli	6 (body)
<i>UWB frequency</i>	3,2–5,6 GHz
<i>UWB</i> raidītāja jauda Tx	1,5 mW
<i>UWB</i> uztvērēja jauda Rx	15 mW
Snaudas jauda	0,25 mW

Darbības ierobežojumi

MAS-WBAN komplekta praktiskās veikspējas novērtēšanai tika izmantoti tie paši scenāriji, kas tika izmantoti simulācijā. Pārbaužu beigās tika salīdzināti praktiski un simulācijā iegūtie rezultāti. Pārbaužu laikā *CH* tika nodrošināta lielāka jauda nekā parastam mezglam, lai tas var saglabāt datus un pārsūtīt tos uz *BS*, kā arī lai izstrādātu *MAC* plānu tīkla grupas dalībniekiem. Pārsūtīto datu ātrums dots tabulā 5.2.

Tabula 5.2. Galvenie sensoru parametri

Parametrs	Loma	Pārraides cikls	Pārraides ātrums
<i>ECG</i>	Sirds pukstu pārraudzība	Nepārtraukti	2,8 kbps
<i>SPO2</i>	Elpošanas pārraudzība	Nepārtraukti	1,1 kbps
<i>Temp</i>	Temperatūra inkubatorī	Katras 2 s	15 bps
<i>Humidity</i>	Mitrums inkubatorī	Katras 5 s	10 bps
<i>Notch</i>	Ķermeņa kustības	Katru 1 s	5 bps
<i>Light</i>	Apgaismojums inkubatorī	Katru 1 min	2 bps

Nepārtrauktās darbības sensoriem, mezgla pārraidītajiem datiem ir aptuveni septiņi virstēriņu baiti un 550 vērtuma baiti. To var pārraidīt vienā pārraides aplī (ar vienu pieeju *MAC*). Periodiski sūtošo sensoru dati satur piecus virstēriņu baitus un 43 vērtuma bitus.

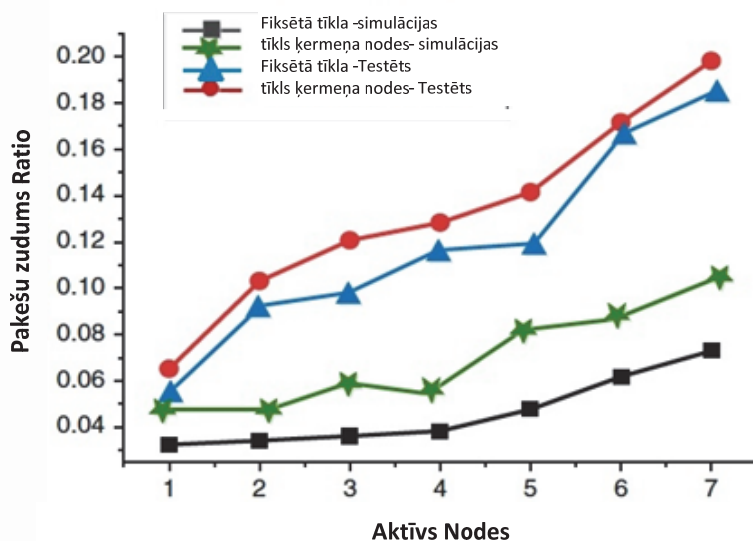
5.4. Simulācijas un praktiskās pārbaudes rezultātu analīze

Detalizētai analīzei tika izmantoti praktiski un simulācijā iegūtie dati.

Pakešu zudumi

Pakešu zudumu *WBAN* saziņā divi galvenie iemesli ir: sadursmes slikti saskaņotu *MAC*

pārāižu dēļ un interferences dēļ [33]. Sakarā ar ierobežotajiem resursiem gan statiskajā, gan dinamiskajā tīkla grupā praktiski tika izmantots neliels mezglu skaits, tāpēc sadursmju skaits bija neliels.



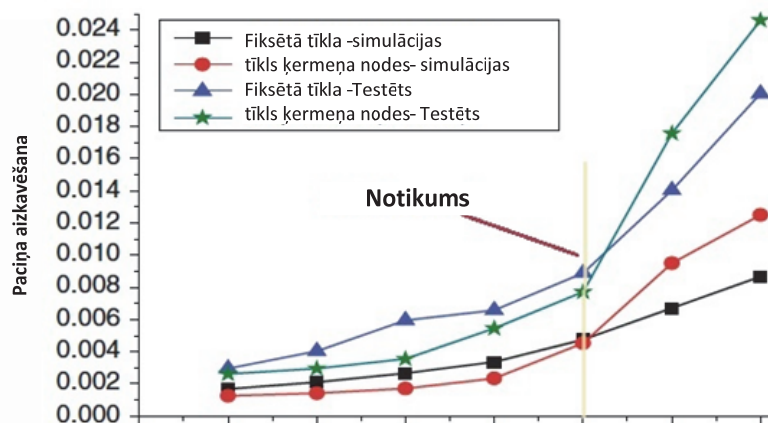
5.6. attēls. Pakešu zudums simulācijā un praktiskajā pārbaudē.

5.6. attēlā parādīts, ka praktiski pārbaudītajās pārraidēs pakešu zudums ir nedaudz lielāks nekā simulētajos testos. Tas ir pašsaprotami, jo realitātē un iekārtu komplektam ir pastāvīgi papildu nezināmi traucējumu avoti, kas simulācijā neparādās. Tāpat tika novērots, ka statiskajā tīklā pakešu zudums ir nedaudz mazāks nekā dinamiskajā apakštīklā. Tas notiek tāpēc, ka cilvēka ķermenis tomēr rada nelielu pretestību pārvaļdamajam signālam.

Vidējā notikumu radītā aizture

Notikumu bāzētā aizture ir īpašs veiktspējas tests, ko veica, radot avārijas notikumu kādā no sensoriem (piemēram, apstājas pulss vai vairāki sensori pārraidi veic vienlaikus). Simulācijā šajā gadījumā tika ģenerēti dati, kas 30 sekundes kā sajosto vērtību uzrādīja nulli. Praktiskajos testos ar aparāturu starp sensoru un ķermeni tika ievietota tērauda plāksne (uz tām pašām 30 sekundēm).

Šajā gadījumā tika aprēķināta aizture starp faktisko notikumu un lietojumu slānī (*MAS WBAN*) uztvertā signāla izmaiņu (t. i., laiks no faktiskā notikuma līdz brīdim, kad tas uzrādījās lietojumu slāņa datos). Tests tika veikts divos veidos, kad tīklā esošie mezgli tika

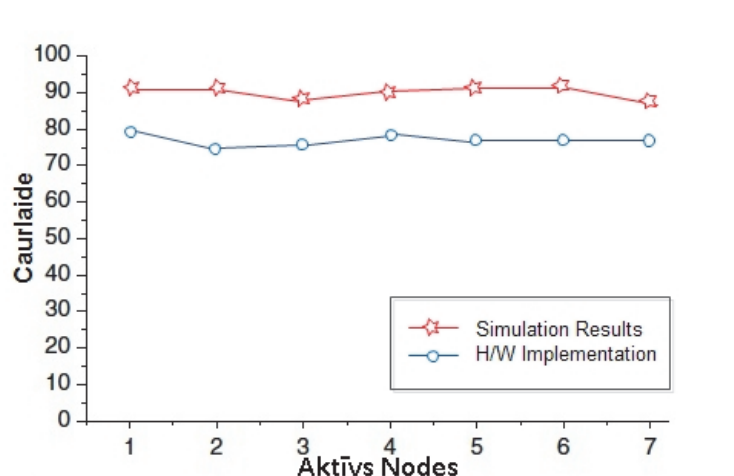


5.7. attēls. Pakešu aizture pēc notikuma simulācijā un praktiskajā pārbaudē.

pievienotie paralēli un kad viens no mezgliem tika atvienots. Šis tests tiešā veidā uzrāda *MAC* slāņa veiktspēju, un tika novērots, ka tad, kad šāds notikums pienāk, pieaug pakešu aizture. Praktiskajā aparatūras pārbaude aizture bija lielāka gan fiksētajā, gan dinamiskajā apakštīklā. Tomēr atšķirība pakešu zudumos starp simulāciju un praktisko rezultātu nav liela. Piemēram, aizture statiskajam tīklam aparatūrai un simulācijai ir tikai 0,011 s. Līdzīgi aizture dinamiskajā tīklā simulācijā un aparatūrā ir tikai 0,012 s). 5.7. attēlā redzams, ka pakešu aizture uz sensoru notikumiem statiskajā tīklā ir mazāka nekā dinamiskajā (ķermeņa) tīklā. Ir redzams, ka brīdī, kad tīklā parādās 5. mezgls, aizture pieaug straujāk. Notikumu aiztures kopējo laiku veido laiks, kas nepieciešams gaidīšanai rindā uz vidi, laiks, kas nepieciešams vienas paketes pārraidei, paketes tālāka pārraidīšana uz bāzes staciju un saņemto datu apstrāde. Vides piekļuves laiks sastāv ne tikai no laika, kas nepieciešams gaidīšanai rindā, bet arī laika, kad pienāk nākamais raidīšanas laiks, ja iepriekšējā kadra pārraide bija nesekmīga, un vidējā atkāpšanās pieauguma laika, kas tiek izmantots, lai atrisinātu sadursmes pārraides laikā. Aparatūras pārbaudes laikā grupas vadītājs apkalpoja tikai četrus mezglus, bet simulācijā tika pārbaudīts, kā tas strādā, ja visi mezgli izmanto vienu kopīgu kanālu. Palielinot mezglu skaitu tīklā, palielinās arī aiztures laiks. Praktiskajā pārbaudē parādījās, ka, ja mezglu skaits tīklā pārsniedz piecus, tad aiztures atkarībā no mezglu skaita sāk pieaugt straujāk nekā ar mezglu skaitu līdz pieciem. Praktiski tika novērots, ka savienojumā starp CH un BS saziņa notiek lēnāk nekā simulācijā. No tā var secināt, ka simulācijā aparatūra tika simulēta ideālākos apstākļos nekā tas notika praktiski dabā.

Caurlaidspējas analīze

Daži notikumi ir kritiskāki par citiem, tāpēc nepārtraukti pārraidīto datu pārraidei ir jābūt ātrai, bet periodiski iegūto datu pārraide (piemēram, mitrums, apgaismojums) ir mazāk kritiska. Līdz ar to, ir vērts grupēt mezglus tīklā, šķirojot tos ar augstu un zemu prioritāti.



5.8. attēls. Caurlaidspējas rezultāti simulētajiem un praktiski iegūtajiem mērījumiem.

Caurlaidspējas mērīšanai netika mērīta viena atsevišķa mezgla caurlaidspēja, bet gan visa tīkla segmenta kopējā caurlaidspēja. 5.8. attēlā var redzēt, ka praktiskā tīkla caurlaidspēja ir tuva simulētajai caurlaidspējai, tomēr ir zemāka par simulēto gan statiskajā, gan dinamiskajā tīklā. Praktiskajos mērījumos tika arī konstatēts, ka, pieaugot pārraidāmo datu apjomam, caurlaidspēja samazinās.

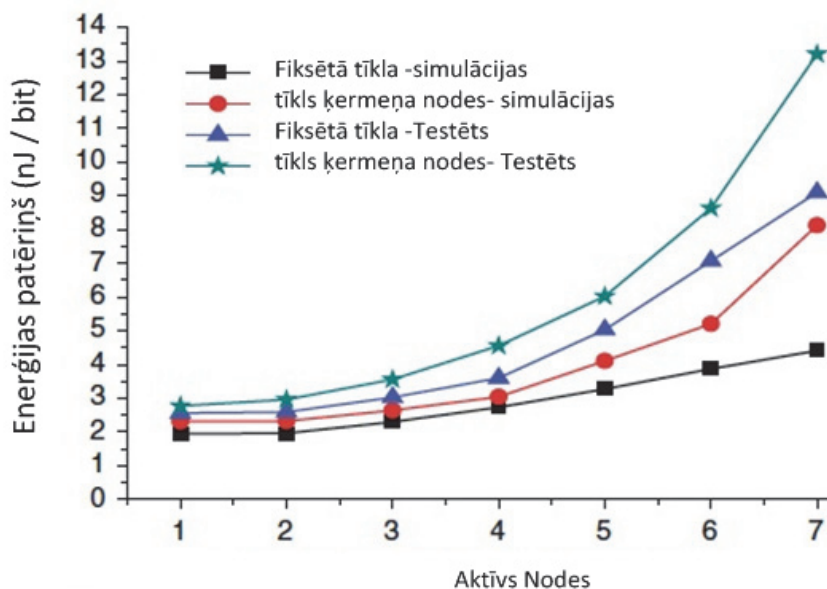
Tomēr, lai arī aparatūras caurlaidspēja ir zemāka par simulācijā aprēķināto, ir svarīgi atzīmēt, ka tā ir vienmērīgi mazāka visur. Piemēram, praktiskā caurlaidspēja ir aptuveni 75%, salīdzinot ar simulācijā aprēķināto, ne tikai ar vienu tīkla mezglu, bet arī ar septiņiem tīkla mezgliem.

Visu mērījumu vidējā aparatūras caurlaidspēja ir 77% no teorētiskā maksimuma, bet simulācijā iegūtā vērtība – ap 88%. Šāda starpība starp simulācijas rezultātiem un praktiskiem eksperimentiem ir pieņemama un pierāda mūsu piedāvātā ietvara priekšrocības.

Enerģijas patēriņš

Ietvars, kas patērē mazāk enerģijas, ļauj iekārtām ar baterijām darboties ilgāk, autonomāk un ar retāku cilvēka iejaukšanos.

5.9. attēlā var redzēt, ka praktiski novērotais enerģijas patēriņš aparatūrai ir salīdzināms, tomēr nedaudz lielāks par simulācijā aprēķināto. Salīdzinot atkārtoto pārraižu skaitu simulētajā vidē un aparatūrā, arī šeit tika novērots, ka simulācijā rādītāji ir zemāki nekā praksē pārbaudītie. Šāds rezultāts nav pārsteidzošs, jo ir skaidrs, ka simulācija parasti ir tuva, bet neatspoguļo 100 % visas praktiskās aparatūras un vides īpatnības. Simulācijas scenārijos, lai sasniegtu līdzīgu kļūdu skaitu kā praksē (10–4), sensoru pārraides jauda tika samazināta līdz minimumam. Tāpēc atkārtoti pārraidīto pulsu daudzums bija salīdzinoši mazāks nekā praktiski aparatūrā novērotais. Tā kā īsās distancē kanāla raksturlielumi ir pietiekami stabili, dinamiskā pulsu skaita izmaiņas ir mazākas. Tāpēc sensoru mezgli simulācijā patērē mazāk enerģijas nekā praktiski aparatūrai novērotajam patēriņam.



5.9. attēls. Energijas patēriņš (*Simulation vs. praktiskā*).

REZULTĀTI UN SECINĀJUMI

Promocijas darbs ir par bezvadu impulsu bāzētu platjoslas radio sensoru tīkliem. Darba pētījumu galvenie rezultāti ir šādi:

- 1) ir veikta detalizēta «Platjoslas bezvadu sensoru tīklu tehnoloģiju izmantošana» [2] izpēte un noteikts, ka svarīgākais bezvadu sensoru tīklu ierobežojums, kas visbūtiskāk ietekmē bezvadu tīkla saziņu, ir radio slānis un vides piekļuves vadības (*Media Access Control – MAC*) plānošana;
- 2) ir izstrādāts jauns daudzpakāpju *MAC* algoritms «Uz pilota signālu balstīta vides piekļuves vadība», un tas ir salīdzināts ar pastāvošajiem *MAC* algoritmiem (*U-MAC*, *Leach* u. c.). Pārbaude ar pilotsignālu (*Pilot Assisted Transmission – PAT*) ir integrēta *MAC* algoritmā, tādējādi ir vienkāršota pārbaudes kanāla kvalitātes novērtēšana;
- 3) apvienojot atsauces pārraidī (*Transmitted Reference*) ar mainīgu aizturi (*Delay Hopped*) ir izstrādāta mainīgas aiztures pilotsignāla pārbaudes (*Transmitted Reference Delay Hoped – TRDH*) radio slāņa arhitektūra. Daudzlietotāju nodrošināšanai radio arhitektūrā ir iekļauts Volterra modelis. Šīs arhitektūras bitu kļūdu biežums (*BER*) dažādos scenārijos ir salīdzināts ar esošajiem radio pārbaudes veidiem (piemēram, *RAKE* un *WAKE-Up*). Simulācijā iegūtie rezultāti pierāda izstrādātās arhitektūras uzticamību un saderību ar *MAC* algoritmu;
- 4) ir izstrādāts iekārtu grupēšanas veids, kurā grupas tiek veidotas, balstoties uz pārbaudes attālumu. Pārbaudes grupās, lietojot pārbaudes «Cenas» funkciju, tiek izvēlēti grupu vadītāji. Tīkla

grupu izveide uzlabo tīkla iespējas, kā arī nodrošina saskaņotu un uzticamu pārraidi arī blīvi izvietotos tīklos;

5) ir pārbaudītas tīkla pielāgošanās un pašatjaunošanās spējas dažādos scenārijos gan reti, gan blīvi izvietotos tīklos, piemēram, kā tīkls atjaunojas viena tīkla mezgla vai grupas vadītāja pazušanas gadījumā. Ir veikta detalizēta tīkla dzīves ilguma, piegādāto pakešu, atlikušās enerģijas un citu svarīgāko tīkla veiktspējas parametru analīze;

6) izstrādātā arhitektūra ir praktiski pārbaudīta izmēģinājumu stendā. Detalizētai analīzei ir praktiski izmērīts enerģijas patēriņš, pakešu aizture un tīkla caurlaidspēja atsevišķiem tīkla segmentiem, kā arī visam tīklam kopā. Visi praktiski iegūtie rezultāti ir salīdzināti simulācijā iegūtajiem rezultātiem.

Salīdzinot mērījumus, kas iegūti, praktiski darbinot aparāturu, ar simulācijas rezultātiem, ir secināts, ka izstrādātā tīkla un *MAC* arhitektūra ir piemērota nākotnes personālo (ķermeņa apgabala) bezvadu sensoru tīkliem. Rezultāti pierāda, ka platjoslas personālie tīkli izmēģinājumu stendā darbojas praktiski tikpat efektīvi kā teorētiski aprēķinātajās simulācijās.

Tālākie izpētes virzieni:

- paplašināt izstrādātās arhitektūras lietojumu no ķermeņa apgabala tīkliem uz pilsētas satiksmes sensoru (*Urban traffic Control Sensor*) tīkliem;
- pievienot izstrādātajai arhitektūrai drošības mehānismu, lai to varētu lietot arī drošībai.

LITERATŪRA

- [1] Fowler, M. Highsmith, J., The agile manifesto // Software Development. vol. 9, no. 3, 2001, pp. 28–35.
- [2] Ayub, K., IR-UWB Radio Architecture for Wireless Sensors Network Based on Pilot Signal Assisted MAC // in 2014 6th International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS), 2014, Dubai, Mar. 2014, pp. 1–5.
- [3] Ayub, K. Zagurskis, V., Pilot signal assisted Ultra Wideband medium access control algorithm for Wireless Sensor Networks // in 2013 21st Telecommunications Forum Telfor (TELFOR). Nov. 2013, pp. 184–187.
- [4] Ayub, K. Zagurskis, V., Technology Implications of UWB on Wireless Sensor Network- A detailed Survey // International Journal of Communication Networks and, Information Security (IJCNIS), Volume 7, No. 3. pp. 1–14.
- [5] Zhao, D., Xi, L., Tang, X., Zhang, W., Qiao, Y., Zhang, X., Digital pilot aided carrier frequency offset estimation for coherent optical transmission systems. // Opt. Express volume. 23, no. 19. 2015, pp. 24–32.
- [6] Mathews, V. . Sicuranza, G. ., Polynomial Signal Processing, Illustrate.. New York: John Wiley & Sons Ltd, 2000, – 260 p.
- [7] Rousselot, J. Decotignie, J.D., An ultra-wideband impulse radio PHY layer model for network simulation // Simulation vol. 87, no. 1, Jul. 2010, pp. 82–112.
- [8] Mohanty, R., Behera, H. S., Patwari, K., Dash, M., Prasanna, M. L., Priority Based Dynamic Round Robin (PBDRR) Algorithm with Intelligent Time Slice for Soft Real Time Systems // (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications, vol. 2, no. 2, 2011, pp. 46–50.
- [9] Tao, L., Qing-Xin, Z., Luqiao, Z., An Improvement for LEACH Algorithm in Wireless Sensor Network // , in Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2010, pp. 1811–1814.
- [10] Jurdak, R., Baldi, P., Lopes, C. V., U-MAC: A proactive and adaptive UWB medium access control protocol // Wirel. Commun. Mob. Comput. vol. 5, no. 5 2005, pp. 551–566.
- [11] El Fawal, A., Le Boudec, J. Y., Merz, R., Radunovic, B., Widmer, J., Maggio, G. M., Trade-off analysis of PHY-Aware MAC in low-rate low-power UWB networks // IEEE Commun. Mag. vol. 43, no. 12 Dec. 2005, pp. 147–155.
- [12] ZOU, D., GAO, L., LI, S., Volterra filter modeling of a nonlinear discrete-time system based on a ranked differential evolution algorithm // J. Zhejiang Univ. vol. 15, no. 8, 2014, pp. 687–696.

- [13] Oppermann, I., Stoica, L., Rabbachin, A., Shelby, Z., Haapola, J., UWB wireless sensor networks: UWEN - A practical example // IEEE Commun. Mag. vol. 42, no. 12 2004, pp. 317–322.
- [14] Li, F., Xiao, H., Yang, J., On channel estimation for RAKE receiver in a mobile multipath fading channel // , in Proceedings of ICASSP '94. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, pp. 577–580.
- [15] Ha, T. T., Theory and Design of Digital Communication Systems, no. 2010. Cambridge University Press, 2010, – 629 p.
- [16] Calhoun, G. M., Third Generation Wireless Systems, Volume 1, no. 2003. Artech House, 2003–473 p.
- [17] Latiff, N. M. A., Tsimenidis, C. C., Sharif, B. S., Kingdom, U., Energy-Aware Clustering for Wireless Sensor Networks Using Particle Swarm Optimization // 18th Annual IEEE Int. Symposium Pers. Indoor Mob. Radio Commun, 2007, pp. 5–9.
- [18] Orcioni, S., Pirani, M., Turchetti, C., Advances in Lee-Schetzen method for Volterra filter identification // , in Multidimensional Systems and Signal Processing, no. 2005, pp. 265–284.
- [19] Ayub, K. Zagurskis, V., Adoption features and approach for UWB Wireless Sensors Network based on Pilot Signal assisted MAC // International Journal of Communication Networks and , Information Security (IJCNIS), Volume 8, No. 1. pp. 20–46.
- [20] Kaur, H. Seehra, P. A., Performance Evaluation of Energy Efficient Clustering Protocol for CH selection in Wireless // International Journal of Peer to Peer Networks (IJP2P) Vol. 5, No. 3, August 2014, pp. 1–13.
- [21] Naruephiphat, W. Charnsripinyo, C., An Energy-aware Clustering Technique for Wireless Sensor Networks // pp. 189–211.
- [22] W. Elmenreich, F. Dressler, V. Loreto, Self-Organizing Systems// 7th IFIP TC6 International Workshop, IWSOS 2013, Palma de Mallorca, Spain, May 9–10, 2013, Revised Selected Papers, Springer, 2014, – 191 p.
- [23] Dressler, F., A Study of Self-Organisation Mechanisms in Ad Hoc and Sensor Networks // Comput. Commun. vol. 31, no. 13 2008, pp. 3018–3029.
- [24] Simulation Technologies in Networking and Communications: Selecting the Best Tool for the Test, vol. 6, no. 2014. CRC Press, 2014.
- [25] Yuce, M. R., Redouté, J. M., Thotahewa, K. M., Keong, H. C., Development of low-power UWB body sensors // Int. Symp. Commun. Inf. Technol. 2012, pp. 143–148.
- [26] Chase, R., UWB: Fostering Innovation Through Balanced Regulatory Framework,

- Engineering Technol. no. 2006, – p 37.
- [27] Hootor, R. Tomlinson, H., Delay-hopped transmitted-reference RF communications // IEEE Conf. Ultra Wideband Syst. Technol. (IEEE Cat. No.02EX580). 2002, pp. 265–270.
 - [28] Zhang, H. Z. H. Goeckel, D. L., Generalized transmitted-reference UWB systems // IEEE Conf. Ultra Wideband Syst. Technol. 2003, pp. 147–151.
 - [29] Abraha, S. T., Okonkwo, C. M., Tangdionga, E., Koonen, a. M. J., Experimental demonstration of 2 Gbps IR-UWB transmission over 100m GI-POF using novel pulse generation technique // 36th Eur. Conf. Exhib. Opt. Commun. 2010, pp. 1–3.
 - [30] IEEE, Federal Communications Commission, Ultra-wideband (UWB) first report and order. internet: <http://www.ieee802.org/15/pub/TG3a.html>. [Accessed: 12-Jun-2015].
 - [31] Robert, B., Labview 7 Express, Prentice Hall, Vol. 2009, pp. 133–145.
 - [32] Yusuf Khan, J., Yuce, M. R., Bulger, G., Harding, B., Wireless body area network (WBAN) design techniques and performance evaluation // Journal of Medical Systems vol. 36, no. 3, 2012, pp. 1441–1457.