KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS

Jūrų technikos fakultetas

Informatikos inžinerijos katedra

MOBILIŲ BEVIELIŲ SENSORINIŲ TINKLŲ OPTIMALUS TAIKYMAS TRANSPORTO VALDYMO SISTEMOSE

OPTIMAL APPLICATION OF MOBILE WIRELESS SENSOR NETWORKS IN TRANSPORT CONTROL SYSTEMS

Techninių informacinių sistemų inžinerijos specialybės magistro baigiamasis darbas

Autorius TISI-09 gr. Sergej Jakovlev

Vadovas prof. dr. Arūnas Andziulis

Klaipėda, 2011

SUTRUMPINIMAI

BST – Bevielis sensorinis tinklas (angl. Wireless Sensors Network).

GPS – Globali ozicionavimo sistema (angl. Global Positioning System).

QoS – Paslaugų kokybė (angl. Quality of service).

RSSI – Gauto signalo stiprumo indikatorius (angl. Receive Signal Strength Indicator).

MAC (address) – Tinklo sasajos unikalus identifikavimo numeris (angl. Media Access Control adress).

RFID – Radijo dažnio atpažinimas (angl. Radio Frequency Identification).

GPS – Globali pozicionavimo sistema (angl. Global Positioning System)

ANOTACIJA

Projektuojant (M)BST pagrindu sudarytą krovinių monitoringo ir valdymo sistemą, yra ypač svarbu numatyti kuriamos sistemos privalumus bei trukumus. Kur pagrindinis privalumas yra tai, kad atitinkami asmenys išanksto gali sužinoti apie krovinio pažeidimus susijusius su išorės ar vidiniais poveikiais. Tai sutaupo ne tik brangų laiką, bet ir pinigus. Tačiau yra tam tikrų sistemos trukumų susijusiu su ribotais energijos resursais pačiuose (M)BST mazguose ir galutiniu perduodamų duomenų patikimumu. Šitų nagrinėjamų parametrų valdymas gali padidinti kuriamos sistemos efektyvumą, pratęsiant tinklo gyvavimo laiką. Šio darbo tikslas, yra suprojektuoti krovinių monitoringo sistemą remiantis optimaliu energijos sunaudojimu mazguose, bei perduodamos informacijos patikimumu.

ABSTRACT

While developing a mobile WSN based cargo monitoring and control system, it is very important to foresee all the advantages and disadvantages of such system. Where the main advantage is that all the important information on the cargo damage can be sent to appropriate users in advance. It not only saves valuable time, but also money. Nevertheless, there are some disadvatntages concerning the limited energy resources in the WSN nodes and the reliability of the transferred data. The appropriate control of these parameters could increase the the efficiency of the developed system by extending the networks lifetime. The main objective of this work is to model a cargo monitoring and control system based on the optimum usage of nodes energy resources and the highest gathered information reliability.

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS 6
LENTELIŲ SĄRAŠAS 7
ĮVADAS 8
1. ANALIZĖS DALIS 10
1.1. Bevielių tinklų apžvalga 10
1.2. Bevielių Ad-Hoc tinklų apžvalga 10
1.3. Mobilių bevielių sensorinių tinklų problemų analizė 12
1.3.1. Problemos Ad Hoc ir BST 12
1.3.2. Tinklo plečiamumo problema 13
1.3.3. Paslaugų kokybės problema 14
1.3.4. Energijos taupymo problema 16
1.4.2. Bevielių sensorinių tinklų topologija 18
1.4.3. Bevielio sensorinio tinklo mazgo analizė 19
1.4.4. Maršrutizavimas BST 21
2. BEVIELIO SENSORINIO TINKLO MATEMATINIS MODELIAVIMAS 23
2.1. Problemos formulavimas stacionariam BST 23
2.2. BST optimizacinio modelio sudarymas 24
2.3. Bevielio sensorinio tinklo dinaminių savybių analizė 29
2.4. Saugumo problemos modeliavimas 31
2.5. Programinio algoritmo sudarymas 35
3. SUPROJEKTUOTO TINKLO TYRIMAS IR TAIKYMAS TRANSPORTO VALDYMO SISTEMOJE ANALIZĖ 37
3.1. Sensorinio tinklo dinaminių savybių tyrimas 37
3.2. Mobilių bevielių sensorinių tinklų taikymo analizė 42
3.2.1. Intermodalinių konteinerių transportavimo problemos aktualumas 42
3.2.2. Transporto valdymo ir monitoringo sistemos koncepcijos projektavimas 43
3.2.3. Valdymo sistemos grafinės vartotojo sąsajos projektavimas 44
3.2.4. Duomenų saugumo aktualumo problema 49
IŠVADOS 51
LITERATŪROS SĄRAŠAS 52

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Bevielio sensorinio tinklo panaudojimas transporto sistemoje 8
2 pav. Sensorinio (Ad Hoc) tinklo topologija 12
3 pav. BST architektūra National Instrument aplinkoje 13
4 pav. Sensorinio tinklo topologija 14
5 pav. Energijos sąnaudos sensoriniame mazge. 20
6 pav. NI WSN architektūra 21
7 pav. Mazgų būsenų kitimo grafikas 27
9 pav. Bevielio sensorinio tinklo topologija 30
10 pav. Mobilaus bevielio sensorinio tinklo topologija 34
11 pav. Sumodeliuota mobilaus bevielio sensorinio tinklo topologija 37
12 pav. Energijos sąnaudų ΔE palyginimas prie skirtingų atstumų tarp mazgų 38
13 pav. TEU konteinerių skaičiaus kitimas 42
14 pav. Sistemos veikimo koncepcija 43
15 pav. Sistemos sekų diagrama 44
16 pav. Konteinerių parinkimo programinis langas 45
17 pav. Konteinerio sekimas ir duomenų atnaujinimo programinis langas 46
18 pav. Spendimų priėmimo veiklų diagrama 47
19 pav. Kritinės situacijos sprendimo programinis langas 48
20 pav. Sistemos duomenų bazės modelis 50

LENTELIŲ SĄRAŠAS

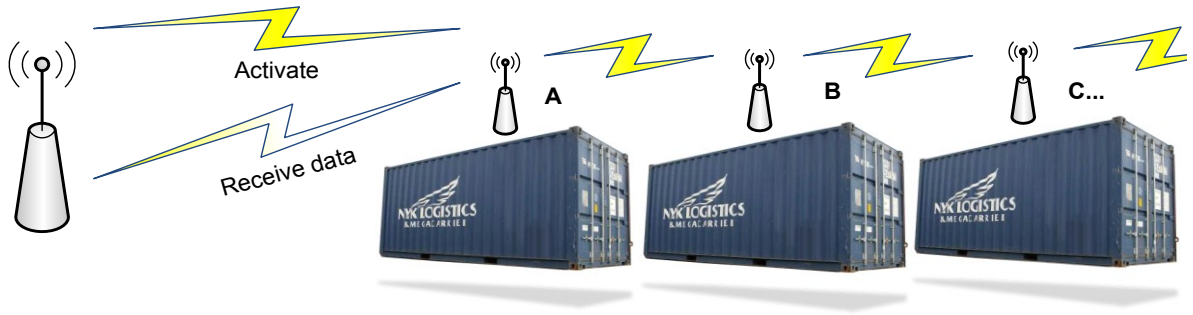
1 lentelė. 2 paveikslo žymejimai 12
2 lentelė. 9 paveiksle naudojami žymėjimai 30
3 lentelė. 10 paveiksle naudojami žymėjimai 34
4 lentelė. Algoritmas skirtas mazgo programavimui 35
5 lentelė. Mazgų energijos sąnaudos pagal 6 lentelės duom., (1 atvejis) 38
6 lentelė. Atstumai tarp mazgų (1 atvejis) 39
7 lentelė. Mazgų patikimumo reikšmės (1 atvejis) 40
8 lentelė. Mazgų energijos sąnaudos pagal 9 lentelės duom., (2 atvejis) 40
9 lentelė. Atstumai tarp mazgų (2 atvejis) 40
10 lentelė. Mazgų patikimumo reikšmės (2 atvejis) 41

ĮVADAS

Šiuolaikiniame pasaulyje vis daugiau populiarumo įgauna skirtingos sensorinės sistemos, nes tobulinant sensorines technologijas, mažėja jų matavimų paklaidos. Bei jų papildoma integracija į jau plačiai naudojamą bevielių tinklų WiMax, WiFi, 3G, 4G ir (Mobilių) Bevielių Sensorinių Tinklų ((M)BST) ir t.t., infrastruktūra tik padidina jų panaudojimo efektyvumą. Todėl atsiranda vis daugiau sričių kur šitos inovatyvios technologijos įgauna vis daugiau pritaikomumo [1,2,3,4].

Nagrinėjant BST, reikia pabrėžti kad vienas iš pagrindinių tokių sistemų tikslų yra atlikti teisingus aplinkos matavimus kiek įmanoma ilgesnį laiko tarpą. Norint tai padaryti, reikia sumažinti energijos sąnaudas gaunant, apdorojant, praturtinant ir toliau perduodant informaciją bevieliame tinkle [5,6,7]. Tai stengiamasi atlikti mažinant bereikalingus kreipinius tarp mazgų ir keičiant mazgų būsenas, t.y., neaukojant naudingo duomenų perdavimo. Šiuo metu BST technologija sparčiausiai plėtojama ir kituose srityse: karo pramonėje, apsaugos infrastruktūroje, aplinkosaugai ir gyvūnams stebėti, transporto eismui valdyti, seisminiuose tyrimuose ir medicinoje. Kur mobilių bevielių sensorinių tinklų (MBST) panaudojimas karo pramonėje ir intelektualiuose transportavimo sistemose yra šiuo metu ypač aktualus [8,9].

Vienas iš mobilių sensorinių tinklų tiesioginio panaudojimo pavyzdžių yra intermodalinių konteinerių krovinio monitoringo ir valdymo sensorinės sistemos [10] (1 pav.).



1 pav. Bevielio sensorinio tinklo panaudojimas transporto sistemoje

Tokios sistemos veikimas yra pagrįstas bevielių sensorinių tinklų standartais prie visų tinklo mazgų: *A, B, C*. Toks jų panaudojimas atneša tiesioginę piniginę naudą įmonėms kurios realiu laiku ir be mechaninio patikrinimo trokšta žinoti ar jų prekės buvo pažeistos transportavimo metu ir kur įvyko krovinio pažeidimas [11]. Tokiai sistemai sudaryti ir testuoti gali būti naudojami kompanijos „National Instrument“ specifiniai BST produktai „NI WSN Module“, kuris atitinka paskutinius BST standartus ir yra pritaikytas tiesioginiam grafiniam programavimui per „NI LabVIEW“ ir „NI WSN Module Pioneer“ programinius paketus [12].

Tokiu atveju, tokios transporto valdymo ir monitoringo sistemos tampa globalaus internetinio tinklo dalimi kuris praturtina skaitmeninį turinį turinčių teikiamų paslaugų kokybę bet kurioje pasaulio dalyje, užtikrinant gabenamų prekių kokybę ir krovinio duomenų saugumą. Kita vertus, patys BST susideda iš daug mažų nepriklausomų baterijomis maitinamų įrenginių (toliau vadinamu mazgais), kurių pagrindas susideda iš panaudojimo krypties: ar tai būtų mažos energijos sąnaudos; ar maža savikaina, bet su ribota atmintimi; skirtinga skaičiavimo galia (perduodamų duomenų apdorojimo laikas bei galimybė apdoroti sudėtingus maršrutizavimo algoritmus: užtikrinti perduodamų duomenų saugumą ir patikimumą BST). Čia svarbiausias aspektas yra riboti energijos ištekliais. Jų valdymas (M)BST yra svarbiausias parametras kuri pabrėžia daugelis autorių savo darbuose [13,14,15,16]. Čia yra pabrėžiamas svarbiausi uždaviniai: sudaryti kuo racionalesnę tinklo mazgų topologiją ir optimizuoti maršrutizavimo algoritmų darbą pagal naujus duomenų perdavimo ir saugumo kriterijus, kad tinklo mazgai naudotų kiek įmanoma mažiau energijos komunikuodami tarpusavyje ir sugebėtų pakankamai greitai ir saugiai atlikti realaus laiko skaičiavimus. Taip pat didelę reikšmę įgyja BST perduodamų duomenų grafinis pateikimas.

Bendrai: BST mazgai yra maži, nebrangūs, mažai energijos naudojantys, sumanūs, vienkartinio ar daugkartinio naudojamo maitinami įrenginiai kurie gali būti išdėstomi didžiuliais kiekiais, prie skirtingų oro sąlygų ir įvairiais atstumais aplinkoje. Sudaryti tinklus su šiais mazgais galima tiek rankiniu išdėstymu, tiek atsitiktiniu būdu. Mazgai savyje turi vieną arba kelis sensorius: oro drėgmės, temperatūros, vibracijos, radiacijos lygiui nustatyti ir t.t., įmontuotą bevielę sistemą, duomenų apdorojimo komponentus ir ribotus energijos resursus. Tokio BST gyvavimas priklauso nuo jame esančių mazgų sukauptos ir eikvojamos energijos. Todėl ypač aktualus yra optimizavimo klausymai susiję su maršrutizavimu tinkle bei saugumu, o ypač energijos taupymu [17,18,19,20]. Tokių problemos gali būti sprendžiamos kuriant naujus arba optimizuojant senus maršrutizavimo algoritmus ir kitus saugumo užtikrinančias posistemes.

Darbo tikslas – suprojektuoti intermodalinių krovinių monitoringo ir valdymo sistemą naudojant mobilių bevielių sensorinių tinklų technologijas, bei ištirti šių tinklų optimizavimo galimybes tikslu padidinti sistemos patikimumą pagal sudarytą tikslo funkciją.

Darbo uždaviniai:

- išanalizuoti mobilių bevielių sensorinių tinklų ((M)BST) naudojamas technologijas;
- ištirti energijos sunaudojimo optimizavimo galimybes BST mazguose – paskelbti tikslo funkciją kuriamai sistemai;
- išanalizuoti mazgų patikimumo kriterijus bei jų įtaką perduodamos informacijos saugumui ir patikimumui;
- suprojektuoti intermodalinių konteinerių monitoringo ir valdymo sistemos prototipą taupanti energijos resursus.

1. ANALIZĖS DALIS

1.1.Bevielių tinklų apžvalga

Bevieliai tinklai – alternatyvi, lanksti duomenų perdavimo sistema. Bevieliai vietiniai tinklai naudoja skirtingus radijo dažnių (RF) technologijos grindžiamus duomenų mainų standartus: Wi-Fi, 3G, WiMax, ZigBee, kurios leidžia perduoti ir priimti duomenys per orą dideliais atstumais, kas žymiai palengvina tokių tinklų nuotolinį reguliavimą ir ryšio klaidų šalinimą [21,22,23]. Be to, tokių sistemų įrengimas yra daug kartų pigesnis nei vielinis internetas. Tačiau saugumo požiūrių tokie tinklai yra labiau pažeidžiami. Bevielio ryšio pranašumai:

- greitas įrengimas ir įdiegimas;
- bevielio ryšio bangos gali praeiti ten, kur paprastas kabelis nepraeitų;
- įrengti bevielį tinklą gali būti brangiau nei įprastą vielinį, tačiau jis ateityje atsipirks;
- bevielio ryšio tinklai gali būti pritaikomi įvairioms technologijoms [24];
- bevielį tinklą galima pritaikyti ir mažoms, ir didelėms įmonėms, kurių darbuotojams reikia susisiekti per atstumą;
- vartotojas gali pasirinkti skirtingas bevielio ryšio technologijas, tinkančias skirtingiems atvejams [25].

1.2.Bevielių Ad-Hoc tinklų apžvalga

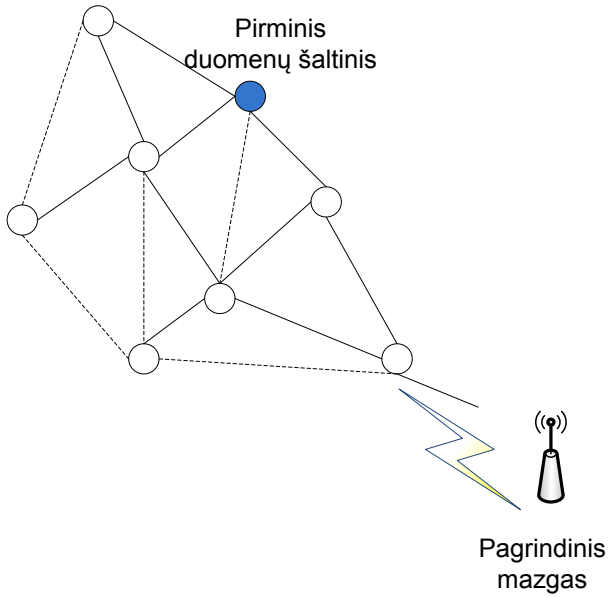
Nuo pat bevielių tinklų atsiradimo, jų populiarumas augo dideliais tempais bei atsirado daug jų taikymo sričių [26,27,28]. Yra visa eilė technologijų, realizuojančių bevielį duomenų perdavimą bei skirtingų rūšių tinklų struktūrų [29,30]. Be to, vis labiau populiarėja mobilus gyvenimo būdas, kai prieiga prie Interneto bet kur ir bet kada tampa vis paklausesnė, paskatino bevielės Interneto prieigos viešoje erdvėse (oro uostų laukimo salėse, prekybos centrų holuose ir t.t.) atsiradimą. Įsibėgėjantis bevielių technologijų vystimasis per pastaruosius keletą metų ne kartą vertė nespėjusius priprasti prie vienos technologijos vartotojus pereiti prie kitos – naujesnės technologijos [31]. Pastaruoju metu didelį daug darbų nagrinėjo būtent novatoriškus mobilūs Ad Hoc tinklus [32, 33,34,35,36].

Mobilūs Ad Hoc tinklai (angl. Mobile Ad Hoc networks) yra judančių įrenginių rinkinys, kurie yra sujungti tarpusavyje bevieliu ryšiu. Jie gali laisvai ir dinamiškai sudaryti tinklo topologijas. Tokie tinklai dar yra vadinami Multihop Ad Hoc tinklais, nes čia įrenginiai gali komunikuoti vienas su kitu kitų tarpinių mazgų pagalba. Kiekvienas šių įrenginių gali laisvai, atsitiktinai arba apibrėžtai

judėti skirtingais greičiais v ir kryptimis $\vec{v}$. Galimas ir nejudančio tinklo variantas – kaip atskiras šio abstraktaus apibūdinimo atvejis.

Tokių tinklų idėja nėra nauja, tačiau iki šiol jie buvo taikomi dažniausiai tik kariniams tikslams [37,38]. Naujausios pigios bevielių tinklų technologijos (pvz. ZigBee [39,40], Bluetooth ir IEEE 802.11b [41,42]) iš naujo sukėlė susidomėjimą Multihop Ad Hoc tinklais ir jų taikymu jau ir platesniems, paprastiems vartotojams skirtiems tikslams [43]. Paprasti taškas-taškas Ad Hoc tinklai jau naudojami WiFi (IEEE 802.11 standartų šeimos) technologijose nuo pat jos atsiradimo pradžios. Tačiau daugelio taškų (multihop) technologija vis dar nėra įprasta, ypač kai kalbama apie judančius objektus (taškus – tinklo įrenginius). Pagrindiniai tokių tinklų taikymai:

- Karo lauko komunikacijoms – šiuo atveju kariniai daliniai (atskiri objektai) suformuoja judantį tinklą. Galimi įvairūs įrenginių tipai (tankai, šarvuočiai, lėktuvai, pėstininkai ir t.t.), o tinklas taip pat gali būti jungiamas ir prie kitų išorinių tinklų, norint išplėsti tipologiją.
- Prieiga prie interneto – „Multihop“ Ad Hoc tinklo technologija leistų interneto ryšį turėti net nuošaliose gyvenvietėse esantiems vartotojams. Šiuo tikslu gali būti taikomos hierarchinės tinklo struktūros, susidedančios iš skirtingų technologijų [44].
- Intelektualios transporto sistemos - remiantis šia technologija krovinių srautai galėtų būti stebimi realiu laiku. Taip pat viešas transportas galėtų būti aprūpintas beviele tinklo įranga, kas leistų nebrangiai, efektyviai ir saugiai kontroliuoti transporto darbą, planuoti tvarkaraščius ir t.t [45].
- Viešas saugumas – policijos, gaisrinės, greitosios pagalbos automobiliai galėtų būti aprūpinti nešiojamais kompiuteriais su beviele tinklo įranga, kas sudarytų judantį tinklą, perduodantį aktualią informaciją tarp mobilių objektų.
- Kritiškoms situacijoms – žemės drebėjimų, ugnikalnių išsiveržimų, karo bei kitais atvejais, kai visa ryšių infrastruktūra sunaikinta, galėtų būti greitai suformuojamas toks duomenų perdavimo tinklas.
- Kosmoso (planetų) tyrinėjimams – kur reikalingas bendravimas tarp intelektualių įrenginių be žmogaus įsikišimo.
- Sensoriniai tinklai (2 pav.) – šiuo metu pradedama naudoti vis daugiau įvairių rūšių „intelektualių įrenginių“ (angl. Smart devices), bei jutiklių (angl. Sensors), kurie diegiami automobiliuose, lėktuvuose, sudėtinguose įrengimuose, naudojami žemės ūkyje, gamtosaugoje ir t.t. Taip pat plačiai naudojami kritiškoms situacijose bei Intelektualiuose transportavimo sistemose. Iš jų formuojami sensoriniai tinklai, leidžiantys sujungti visą grupę šių paprastų specializuotų įrenginių [46,47,48].



2 pav. Sensorinio (Ad Hoc) tinklo topologija

1 lentelė. 2 paveikslo žymejimai

	Pirminis duomenų šaltinis, bevielio sensorinio tinklo mazgas.
	Bevielio sensorinio tinklo mazgas.
	Optimalus ryšys (energijos ir saugumo atžvilgiu).
	Neefektyvus ryšys (energijos ir saugumo atžvilgiu).

1.3.Mobilių bevielių sensorinių tinklų problemų analizė

1.3.1. Problemos Ad Hoc ir BST

Paskutiniu metu, populiarėjant mobiliems Ad Hoc tinklams, buvo labai plačiai dirbama tyrinėjant tokius tinklus ir sprendžiant su jais susijusias problemas. Tačiau iki šiol egzistuoja nemažai atvirų klausimų, kurie reikalauja tinkamų sprendimų skirtingoms situacijoms [48]. Galima išskirti šias pagrindines atviras problemas: Plečiamumas (angl. Scalability) [50], Paslaugų kokybė (angl. Quality of Service) [51], Energijos taupymas (angl. Energy Efficiency) [52,53], Saugumas (angl. Security) [54].

Daugybė skirtingų bevielių sensorinių tinklų (toliau BST) tipai gali būti naudojami bevielių tinklų modeliuose. Šiuos tinklų modelius galima naudoti įvairiai stebint aplinkos pokyčius, t.y. temperatūrą, drėgmę, judėjimą, slėgį ar net garsą žemėje ir ne tik. BST modelius sudaro daug mažų baterijomis maitinamų įrenginių, kurie aplinkoje išdėstomi įvairiais kiekiais ir atstumais (3 pav.).

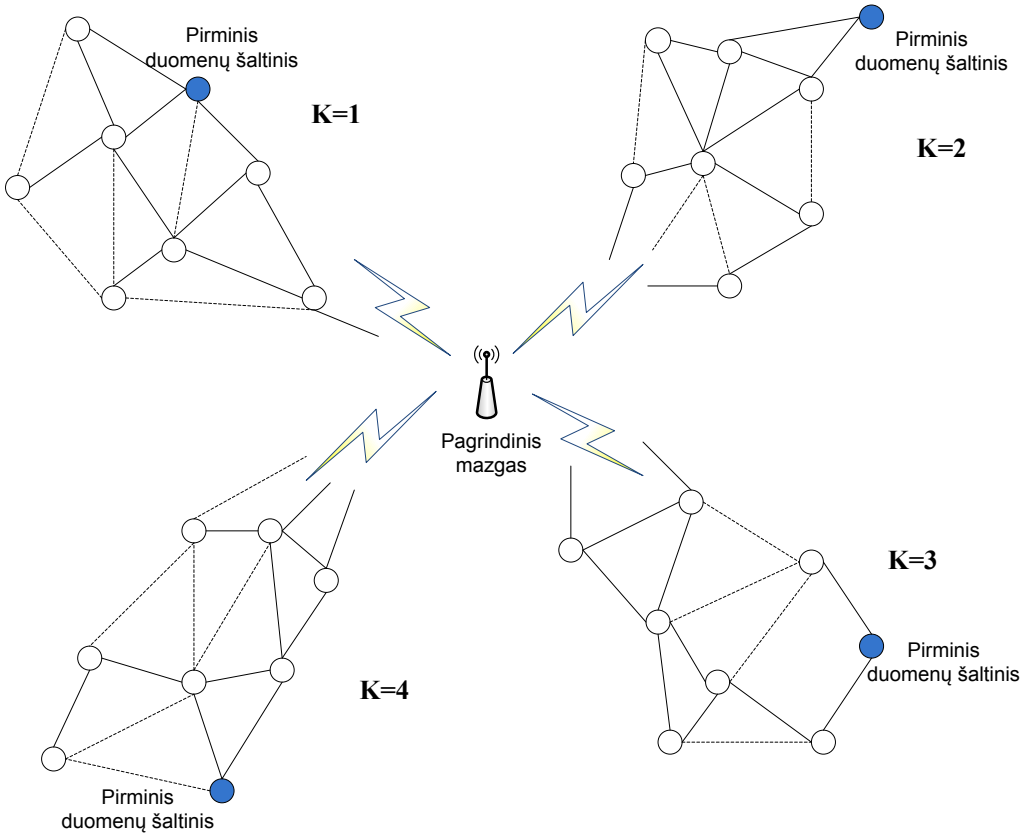
3 pav. BST architektūra National Instrument aplinkoje

Pagrindinės bevielių sensorinių tinklų mazgų charakteristikos yra: patikimumas, keičiamo dydžio tinklas, sensorinio mazgo modelis, valdymo aplinka ir energijos sunaudojimas. Šios charakteristikos yra būtinos norint projektuoti stacionarius ir mobilius bevielius sensorinius tinklus bei juos optimaliai taikyti.

1.3.2. Tinklo plečiamumo problema

Plečiamumas gali būti apibūdinamas kaip savybė, parodanti, ar tinklas gali teikti tinkamo lygio paslaugas esant dideliam įrenginių skaičiui. Tai viena svarbiausių neišspręstų problemų Ad Hoc ir BST tinkluose. Visų pirma egzistuoja plečiamumo problemos dėl tinklo pralaidumų. Paprastame tinkle, kur naudojamos nekryptinės antenos, tinklo pralaidumas krenta greičiu $\frac{1}{\sqrt{N}}$, kur N yra įrenginių skaičius tinkle. Ši problema negali būti išspręsta kitaip nei fizinio lygio priemonėmis. Maršrutizavimo protokolai taip pat nustato tam tikras plečiamumo ribas. Kelio užklausimas, vietos aptikimas arba kodavimo raktų apsikeitimas reikalauja didelio tarnybinės informacijos persiunčiamo kiekio, kas lemia didelį uždelsimą ir energijos sunaudojimą. Savaime suprantama, kad šios tinklo veikimui reikalingos informacijos kiekis greitai išaugs plečiantis tinklui. Jeigu ir taip mažas tinklo resursų (energijos) kiekis yra švaistomas gausiems kontrolinių paketų srautams, judančių Ad Hoc tinklų taikymas praktikoje gali tapti neįmanomas. Stacionarus maršrutizavimas nėra tinkamas didelio mobilumo aplinkose dėl didelio informacijos kiekio transliavimo vykstant pasikeitimams tinkle. Papildomai atsirandant triukšmui ir silpnėjant signalams dėl išorės poveikių. Dinaminiai protokolai leidžia kurti didelius Ad Hoc tinklus ir BST, bet tai daroma maršrutų užklausos laiko ir energijos sunaudojimu BST sąskaita. Taigi, kai maži užklausos laikai yra ypatingai svarbūs, tinklo dydis taip pat turi būti apribojamas. Kuriamas optimizacinis matematinis modelis padėtų nustatyti plečiamumo ribas prie duotų sąlygų.

Plečiamumas dažnai didinamas naudojant hierarchinį maršrutizavimą, t.y. skirstant tinklą į atskirus hierarchiniu lygmenis ir vykdant maršrutizavimo bei kitas tinklo funkcijas nepriklausomai (4 pav. kur *K*=1, *K*=2, *K*=3 ir *K*=4 potinkliai BST).



4 pav. Sensorinio tinklo topologija

Tai gali būti pasiekta naudojant klasterizavimo algoritmus, kurie suskirstytų šalia esančius mazgus į grupes ir apribotų tarnybinių paketų srautus tose grupėse. Visgi dar daug kas turi būti atlikta, siekiant suderinti tinklo plečiamumą bei duomenų perdavimo pralaidumą skirtingais taikymo atvejais.

Kitais atvejais, BST gali sudaryti šimtai tūkstančių ar netgi milijonai sensorinių mazgų. Šie didžiuliai BST modeliai turi pajėgti dirbti su šiais didžiuliais kiekiais mazgų. BST tankumas gali būti nuo kelių iki kelių šimtų sensorinių mazgų kvadratiniame kilometre. Todėl įmanoma įvertinti mazgų tankumą [56].

1.3.3. Paslaugų kokybės problema

Paslaugų kokybės (QoS) užtikrinimo metodai yra kuriami, norint patenkinti specialių aplikacijų reikalavimus netgi tokiame tinkle kaip internetas, kuris veikia didžiausių pastangų principais. T.y. galima sakyti, kad standartiškai nėra jokių garantijų apie duomenų persiuntimo greitį, patikimumą ir

pan., o viskas veikia pagal aplinkybes. Paslaugos kokybė (QoS) yra tinklo garantija teikti tam tikros kokybės paslaugą, kurią galima vertinti pagal visą eilę kokybinių parametrų: pralaidumas, vėlinimas, vėlinimo sklaida, paketų praradimo tikimybė ir t.t. [56]. Galima teigti, kad paslaugos kokybės (QoS) vertinimas turėtų būti atliekamas dviem požiūriais:

- Paslaugos kokybės (QoS) maršrutizavimo protokolai, kurie suteikia galimybę formuoti skirtingo tipo srautus, suteikti jiems prioritetus ir parinkti maršrutus pagal apibrėžtas kokybines taisykles.
- Maršrutizavimo protokolų efektyvumas ir jų įtaka duomenų perdavimo kokybei.
- RSSI ir signalų stiprumo ir jų atskirų parametrų įtaka paslaugų suteikimo kokybei.

Paslaugos kokybės užtikrinimas bevieliuose tinkluose yra didelė problema, kuri yra vis dar atvira. Tai yra dėl to, kad tinklo pralaidumas yra labai ribotas, o radijo kanalų charakteristikos ir veikimo aplinka mobiliame tinkle dažnai keičiasi nenuspėjamai [57]. Bendras ryšio kanalas turi būti dalinamas keliems mazgams (vartotojams), o daugumos protokolų nuolat reikalauja skirtingos kokybės paslaugų. Kai kurie nauji dinaminiai protokolai gali būti nustatyti taip, kad gražintų maršrutus tik su reikiamais kokybiniais parametrais, bet dažnai šie keliai gali būti asimetriniai ir pristatyti (M)BST.

Yra visa eilė bandymų QoS problemoms spręsti, stengiantis tai įgyvendinti keliuose tinklo lygiuose iš karto: pradedant nuo paslaugų sutarčių, ir baigiant MAC lygiu. Žiūrint į paslaugų kokybę (M)BST antruoju požiūriu, taip pat yra atliekama nemažai tyrinėjimų, norint ištirti klasikinių Ad Hoc tinklų maršrutizavimo protokolų veikimo savybes bei jų įtaka bendram tinklo darbui. Tai reikalinga kuriant naujus maršrutizavimo protokolus, dažniausiai senųjų protokolų modifikacijas, palaikančias paslaugų kokybės (QoS) užtikinimo praplėtimo reikalavimus.

Galima išskirti išorinius (angl. external) ir vidinius (angl. internal) matomus BST parametrus, kuriuos reikėtų stebėti vertinant tinklo darbą [58]. Išoriniai parametrai:

- Duomenų perdavimo pralaidumas (angl. end-to-end data throughput) – statistinės duomenų maršrutizavimo efektyvumo (angl. performance) reikšmės: vidurkiai, dispersijos t.t.
- Duomenų perdavimo vėlinimas (angl. delay) – statistinės duomenų maršrutizavimo efektyvumo (angl. performance) reikšmės: vidurkiai, dispersijos t.t.
- Paketų praradimo koeficientas (angl. loss rate).
- Maršruto suradimo laikas – dinaminiams (angl. on demand) protokolams būdingas kokybės parametras.
- Neteisinga tvarka (angl. out-of-order) persiųstų paketų dalis procentais.

Vertinant maršrutizavimo protokolų veikimo efektyvumą ir poveikį bendram BST tinklo darbui, reikėtų tyrinėti šiuos pagrindinius kokybės vertinimo parametrus:

- Kontroliniai duomenys tam tikram persiųstų duomenų kiekiui (angl. overhead)

- Vėlinimas (angl. delay)
- Paketų praradimo koeficientas (angl. loss rate)

Matuojant ir skaičiuojant šių parametrų reikšmes, kaupiant ir apdorojant duomenys, yra svarbu įvertinti tai, kad šie parametrai nėra nepriklausomi dydžiai. Tai apsunkina tinklo kokybės vertinimą. Tokie parametrai kaip „Loss rate“ ir „delay“ – įtakoja maksimalų tinklo pralaidumą, ypač duomenų perdavimo aukštesniuose OSI modelio lygiuose. Jų dinaminis kitimas ir optimalus panaudojimas algoritmuose yra vienas iš būdų optimaliai reguliuoti srauto greičius BST, bet tai daroma paketų praradimo kaina. Matuojant „delay“ reikšmes, jos daugiausia atspindi trumpesnių ir patikimesnių kelių vėlinimą, nes kituose keliuose paketų praradimas gali išaugti, ir tai neatsispindės šio parametro reikšmėse. Parametras „Overhead“ – parodo tinklo plečiamumo ir mobilumo galimybes, norint išlaikyti priimtiną duomenų persiuntimo kokybę: jis turi įtakos tiek „loss rate“, tiek ir „delay“ parametrams.

Vidiniai parametrai kaip našumas (angl. efficiency) – tinklo viduje veikiančio maršrutizavimo protokolo įtaka kokybei. Jį gali atspindėti tokie santykiai išsiųsti duomenų bitai ir pristatyti duomenų bitai, išsiųsti kontroliniai bitai ir pristatyti duomenų bitai, bei išsiųstas kontrolinių ir duomenų paketų kiekis ir pristatytas duomenų paketų skaičius. Tai rodo protokolo kanalo prieigos efektyvumą (angl. protocol‘s channel access efficiency).

1.3.4. Energijos taupymo problema

Be fiksuotos infrastruktūros BST ir (M)BST turi veikti iš judančių ir ribotų energijos šaltinių. Reikia pabrėžti, kad BST įrenginys turi taip pat persiųsti ir kitų įrenginių duomenys, t.y. veikti tuo pačiu kaip maršrutizatorius. Taigi energijos taupymo problema gali tapti viena svarbiausių [59,60]. Yra siekiama kurti ne tik geresnius energijos šaltinius bei aparatūra su mažesniu galios suvartojimu, bet ir ieškoti energijos taupymo sprendimų, mažinant siųstuvo ir imtuvo energijos suvartojimą [61,62,63]. MAC lygyje, ir virš šio lygio, tai paprastai realizuojama pervedant imtuvą į „miego“ rėžimą ir naudojant siųstuvą su galimybę reguliuoti išspinduliuojamą galią. Paskutiniu metu nemažai dirbama prie specialių maršrutizavimo protokolų, kurie įvertina energijos problemą ir veikia kartu su fiziniu ir MAC lygiais. Tokiu atveju protokolas gali įvertinti siųstuvo galią: priimamų signalų stiprumus bei RSSI reikšmes.

Sensorinio mazgo sunaudojimo energijos galia turi būti minimali, nes nuo jo priklauso sensorinio mazgo gyvavimo laikas. Bevielis sensorinis tinklas kiekvienam mazgui suteikia pradinius duomenys ir maršruto kelią. Mazgai, išeikvoję savo energijos resursus, pakeičia tinklo topologiją atsitiktinai. Kas yra pagrindinė problema, dėl ko BST ir (M)BST turi riboto panaudojimo galimybes. Jie tampa neprognozuojami. Todėl reikalingi nauji mazgų maršrutizavimo protokolai ir

valdymo posistemes. Sensorinio mazgo užduotys: suprasti gaunamus duomenys, atlikti jų apdorojimą ir juos ištransliuoti kitam mazgui. Energijos sunaudojimas mazge dalinamas į šias dalis: apdorojimas ir siųstuvas - imtuvas. Mazgas daugiausiai savo energijos išeikvoja siųstuvo-imtuvo bloke [64].

1.3.5. Saugumo ir patikimumo problemos

Saugumas yra kritinė problema MBST ir tai dar palyginus mažai ištyrinėta sritis [65]. Kadangi tinklo mazgai naudoja atvirą ir bendrą radijo terpę, jie yra ypač jautrūs kenkėjiškoms atakoms – pvz. paslaugos užblokavimo ataka (angl. Denial of Service). Kadangi nėra jokio centralizuoto tinklo valdymo arba sertifikavimo galimybės, dinamiškai besikeičianti bevielio tinklo struktūra tampa labai pažeidžiama infiltracijoms, šnipinėjimui bei interferencijos. Bei dirbant kenkejiškoje aplinkoje, gali atsirasti išorės poveikiai dėl kurių perduodama informacija tampa nepatikima tolimesnei analizei. Galima sakyti, kad šiuo metų saugumą galima laikyti didžiausia problema, kodėl MBST vis dar sunku taikyti verslo tikslams.

Naudojant tradicinius kriptografinius duomenų apsaugos metodus [66], yra susiduriama su raktų apsikeitimo ir atnaujinimo problemomis. Pagrindinė grėsmė yra tinklo įrenginio perėmimas, kai įsilaužėlis gali prieiti prie tinklo ir perimti maršrutizuojamus duomenys pats apsimetęs tam tikrų tinklo įrenginiu. Vienas iš saugumo sprendimų yra sukurti atskirą viešo rakto infrastruktūrą BST šifravimui. Bet raktų apsikeitimas sukelia plečiamumo problemą. Kitas sprendimas būtų saugus maršrutizavimas, kai duomenys būtų suskaidomi į H dalių ir išsiunčiami skirtingais maršrutais, o vėliau gavėjas juos surinktų į bendrą visumą.

Kiti aplinkos trikdžiai, fizinis sugadinimas ar išeikvota energijos dalis gali nulemti sensorinio mazgo susilpnėjimą tinkle ir jo kaupiamos informacijos patikimumą. Tačiau svarbiausia tai, kad atskiro mazgo susilpnėjimas tinkle neturėtų esminio poveikio visam tinklo darbui ar jo topologijai. Bevielių sensorinių tinklų patikimumas: užtikrina tinklo funkcionalumą, nepaisant išsekusių sensorinių mazgų.

1.4.Bevielių sensorinių tinklų technologijų apžvalga

1.4.1. BST „ZigBee“ ryšio apžvalga

Vienam iš labiausiai naudojamų standartu BST ir (M)BST yra „ZigBee“ bevielis ryšis, kuris priklauso naujam standartui *802.15.4*. Jis priklauso fiziniam lygiui ir vidutiniam informacijos valdymo sublygiams su mažais greičiais bevieliuose tinkluose, kurie palaiko paprastus prietaisus

išeikvojant minimalias energijas ir tipiškai atlieka operacijas savo atstumu iki 300 metrų spinduliu ir mažiau [67,68]. Naujas „Zigbee“ standartas - vienintelė standartinė bevielė tinklo technologija realizuojanti tokius reikalavimus, kaip:

- Patikimumas (CRC klaidų kontrolė).
- Mažos energijos sąnaudos (Naudojama energijos taupymo sistema, kuri „ZigBee“ tinklo įrenginius perveda į budintį režimą, kurio metu naudojama mažai energijos. Atsiradus poreikiui naudotis šiuo įrenginiu, jis „pažadinamas“ mažiausiai per 15 ms.).
- Maža kaina.
- Paprasta priežiūra, administravimas bei veiksmų stebėjimu.
- Integracija su kitais standartais (palaikomas glaudus ryšys su *IEEE* standartais, kad būtų užtikrinta šio naujo standarto pritaikomumo galimybė).
- Saugumas.

Šis standartas veikia 2.45 GHz radijo dažniu, tačiau pasižymi sąlyginai maža perdavimo sparta, nuo 10 iki 250 Kbps. Šį „ZigBee“ tinklo trūkumą kompensuoja mažos energijos sąnaudos, kas užtikrina nepertraukiamą ir taupų sistemos darbą gana ilgą laiką bei taupo sistemos administravimui skirtą laiką bei pinigus. Su tokiomis savybėmis „Zigbee“ sėkmingai konkuruoja su kitomis BST technologijomis.

Energijos taupymą realizuoja jai būdinga savybė, nenaudojamam mazgui pereiti į taupymo rėžimą, arba taip vadinama miego režimą. Tokiu būdu ilgą laiką nenaudojamas mazgas naudoja labai mažai energijos, o prireikus juo pasinaudoti, jis „pažadinamas“ per 15 ms. Sužadintas mazgas iškart sugeba patikimai siųsti ir priimti duomenys, o jo naudojimui pasibaigus vėl pereiti į energijos taupymo rėžimą.

Bevielio „ZigBee“ tinklo topologijoje gali būti iki 65536 mazgų. Tai leidžia sistemas, realizuotas „ZigBee“ tinklo pagrindu, diegti objektuose, kuriuose reikalingas didelis objektų skaičius arba numatomi sistemos praplėtimai. Sistemos praplėtimo galimybės, tai dar viena priežastis, kodėl buvo pasirinkta ši bevielio tinklo technologija. Mišraus „ZigBee“ tinklo atveju PAN (angl. Personal area network) komutatorius jungiamas su pilnų funkcijų įrenginiais, kurie savo ruoštu gali būti jungiami su dalinių funkcijų įrenginiais.

1.4.2. Bevielių sensorinių tinklų topologija

Topologijos įvairumas ir priežiūra gali būti matoma trimis aspektais: pradinis išsidėstymas, pakitimai po išsidėstymo ir pakartotinas išsidėstymas. Pirmoji topologija yra sudaroma per mazgų išsidėstymą. Mazgai gali išsidėstyti vienas šalia kito arba dauguma jų išdėstomi atsitiktinai. Topologijos pakitimai po išsidėstymo yra susiję su mazgo pašalinimu ir topologijos pakitimais

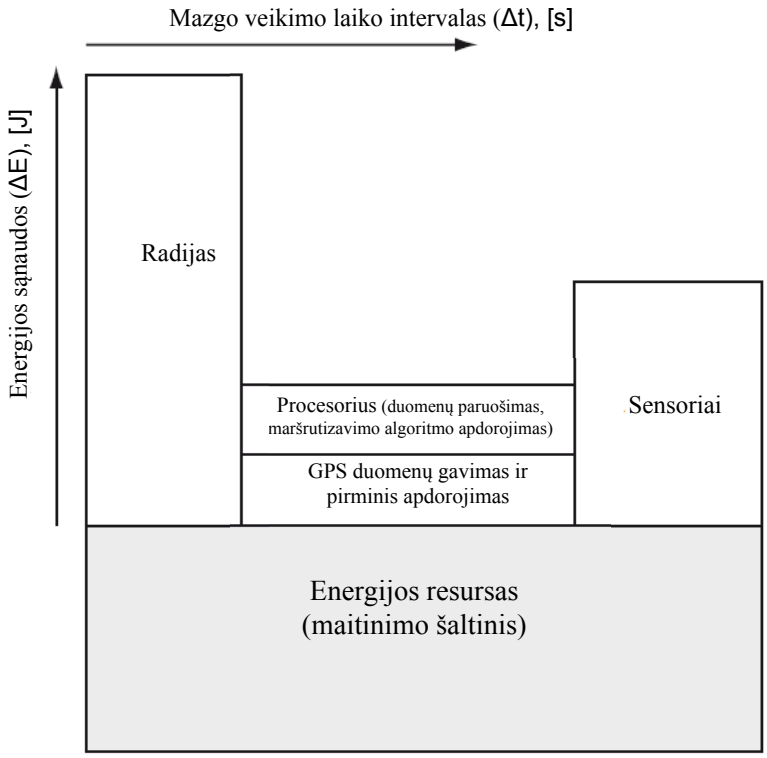
tinkle. Pakartotinas išsidėstymo arba naujas tinklo konfigūravimas yra pridėtiniai mazgai ar nauja tinklo topologija. Tai gali atsitikti bet kokiu laiku.

Sukurtas *IEEE 802.15.4* standartas buvo planuojamas tam, kad palaikyti daugialypę tinklo topologiją – nuo žvaigždinio tinklo iki mišraus tinklo peer-to-peer ryšiu, įskaitant žvaigždę, mišraus tipo ir medžio tinklą [70,71]. Skirtingų tipų tinklo topologijos, kurios palaiko šitą standartą:

- *Žvaigždinis tinklas* – žvaigždinėje topologijoje, ryšys yra kontroliuojamas unikalių koordinatorių, kurie veikia kaip tinklų savininkai, siųsdami sinchronizavimo signalus įrenginiams ir palaikydamas tarpusavio bendravimą. Šioje topologijoje, tinklo mazgai bendradarbiauja tiktai su koordinatoriumi; *IEEE 802.15.4* valdymas žvaigždiniame tinkle gali būti gera alternatyva paprastam taškas-į-tašką (point-to-point) taikymui, kuris reikalauja ypač mažos kainos.
- *Peer-to-peer tinkas* – peer-to-peer ryšio susisiekimas *IEEE 802.15.4* standartu, leidžia sukurti daugybę įvairių tipų peer-to-peer tinklų, kur kiekvienas iš jų turi savo privalumų ir trūkumų.
- *Mišraus tinklo topologija* – tai paprasta tinklo topologija. Tinklą sudaro daugybė sensorinių mazgų, tačiau ne visi mazgai gali komunikuoti tarpusavyje. Siunčiamus duomenys mazgai gauna iš artimiausio mazgo ir toliau siunčia į paskyrimo vietą per didžiulę mišraus tinklo topologiją.
- *Blokinė tinklo topologija* - maršrutizavimo protokolas mišriojo tinklo topologojoje turi neišvengiamus apribojimus daugelyje pritaikymų, ir tai leidžia sudaryti tinklą, kuris maršrutizuoja algoritmus buvusius keliose vietose loginėse struktūrose tinkle, ypač kai mazgų skaičius tinkle būna didžiulis.

1.4.3. Bevielio sensorinio tinklo mazgo analizė

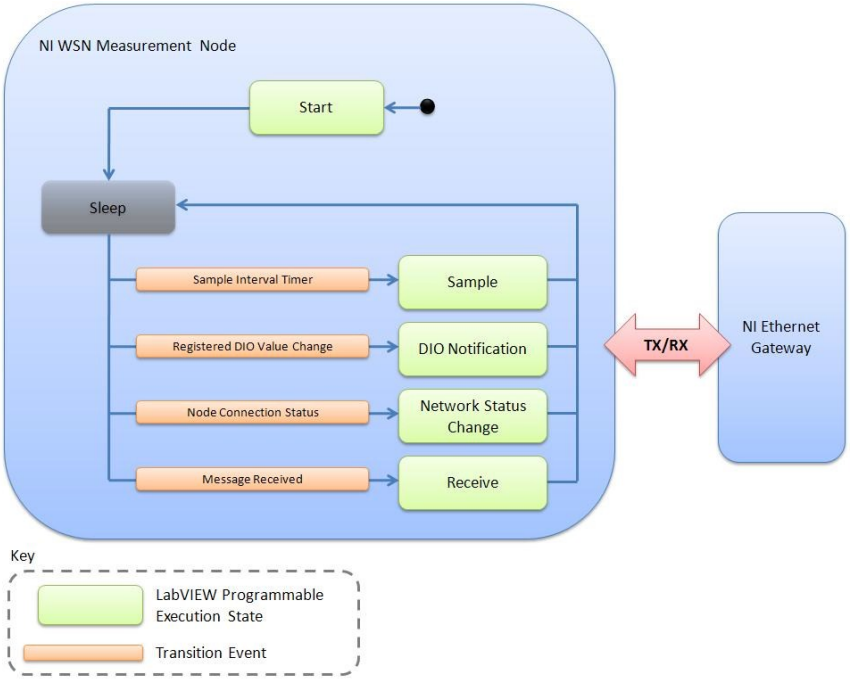
Yra keturi pagrindiniai baziniai komponentai, kuriuos galime atrasti visuose mazguose. Sensorinis modelis susideda iš tokių komponentų: energijos blokas, apdorojimo modulis, jutiklis ir siųstuvas-imtuvas. Tačiau kartais pasitaiko tokių sensorinių mazgų, kurie turi nebūtinų komponentų, kaip vietos nustatymo sistemą, mobilaizerį ar energijos generatorių. 5 paveikslas parodo sensorinio mazgo bazinius komponentus. Kur energijos blokas yra labai svarbus sensoriniame mazge. Tai dalis, kuri atsako už visas kitas dalis susijusias su energijos naudojimu. Energijos generatorius ar energijos blokas sudaro vieną energijos komponentą.



5 pav. Energijos sąnaudos sensoriniame mazge.

Vienas iš papildomų energijos gamintojų sensoriniame mazge gali būti saulės baterija. Apdorojimo dalį sudaro procesorius su keletu atminčių. Ši dalis atsako užduočių įvykdymą sensorinėje dalyje. Jutiklio dalis bendrai susideda iš dviejų dalių: sensorių daviklių ir analoginio skaitmeninio keitiklio (toliau ASK). ASK pakeičia analoginius duomenys iš sensorių į skaitmeninius, kurie apdorojami procesoriuje. Siųstuvas-imtuvas sujungia sensorinius mazgus į tinklą. Kiti papildomi komponentai, kaip vietos nustatymo sistema ar mobilaizeris, gali pagerinti maršrutizavimą sensoriniame tinkle. Tokiu būdu, vietos nustatymo sistema gali nustatyti algoritmą, kurį realizuotų apdorojimo bloke. Taip pat, sensoriniai mazgai gali naudoti mobilaizerio komponentą, kada yra būtina atlikti pavestai užduočiai. Ypač didelis aktualus mobiliuosiuose bevieliuose sensoriniuose tinkluose yra tikslus jo mazgų koordinačių žinojimas realiu laiku arba laiko intervale Δt. Nes tikslus padėties žinojimas yra pagrindinis faktorius atsakantis ar mazgas gali būti naudojamas optimaliame maršrutizavime. Tam yra taikomos GPS technologijos iki kiti navigaciniai metodai.

Sensorinių mazgų programavimas ypač efektyviai naudojamas kompanijos „National Instruments“ sukurtuose BST įrankiuose (NI WSN) (6 pav.).



6 pav. NI WSN architektūra

Mazgų programavimui yra naudojama paprasta grafinė vartotoja sąsaja (LabVIEW Wireless Sensor Network (WSN) Pioneer programinis produktas). Kuriuo pagalba įmanoma išgauti reikiamus duomenys realiu laiku be papildomo vargo.

1.4.4. Maršrutizavimas BST

BST maršrutizavimo protokolai gali būti klasifikuojami trim būdais: priklausomai nuo to ar maršrutizavimo kelias yra nustatytas, priklausomai nuo tinklo struktūros ir priklausomai nuo susisiekimo pradžios [71,72,73].

Maršrutizavimo kelias gali būti nustatytas vienu iš trijų būdu: būtent veiksnus, reaguojantis ir mišrus. Veiksnūs protokolai įvertina visus maršrutus net jei nėra reikalingi, tada įrašo šiuos maršrutus į maršrutizavimo lentelę kiekviename mazge (sudaro mazgo istoriją). Kada maršrutas keičiasi, pasikeitimas persiduoda visame tinkle. Reaguojantys protokolai įvertina maršrutus tiktai tada kai jie reikalingi. Mišrūs protokolai naudoja šių dviejų idėjų kombinaciją. Iš esmės gali būti trys BST tinklo struktūros. Jos yra: standartinė, hierarchinė ir tiesioginė. Tiesioginis perdavimas yra nepraktiškas BST, nes jisai reikalauja, kad visi mazgai pereitų per vieną šuolį. Standartiniuose protokoluose visi mazgai tinkle vienodi ir gali vienodai dalyvauti maršrutizavimo užduotyje. Artimiausi mazgai žemiausiajam lygyje dalyvauja daugiau negu tolimesni mazgai, kai visos numatytos žinutės žemesniajame lygyje išsiskirstomos aplink mazgą. Hierarchiniame arba grupiniuose protokoluose, tinklas yra padalinamas į mazgų grupes ir kiekviena grupė turi pagrindinį

tašką. Mazgai savo grupėje siunčia žinutes tiktai pagrindiniam taškui. Pagrindinis taškas tuomet persiunčia visas žinutes, kurios gaunamos iš jo grupės, į žemiausiąjį mazgą.

Susisiekimas su BST gali būti priimtas, kaip pirminiai duomenys arba numatyti duomenys. Pirminiuose priimtuose protokoluose, mazgai siunčia duomenys į žemiausią kada jie turi svarbius duomenys. Pirminiai priimti protokolai naudojo laiko arba įvykių varomą duomenų ataskaitą. Tai reiškia, kad duomenys yra siunčiami arba į būtinus intervalus arba kai mazgai registruoja tam tikrus įvykius. Numatyti sukurti protokolai naudoja užklausos ataskaitas ir mazgai atsako į duomenų užklausas, kurios yra siunčiamos žemesniojo arba kito mazgo. Tai reiškia, kad kiekviena duomenų užklausa baigiasi tinklo paplitimu.

Daugelis maršrutizavimo protokolų gali būti dalijami arba į standartinius arba į hierarchinius protokolus aukščiausiame lygyje ir tada jie gali būti dalijami į pirminius priimtus arba numatytus priimtus protokolus [74]. Pagal visus keliamus reikalavimus tinklo veikimas (maršrutizavimo protokolų optimalus panaudojimas) buvo suprojektuotas optimaliai naudoti energijos atsargas mazguose ir didinti saugumą maršrutizavime.

2. BEVIELIO SENSORINIO TINKLO MATEMATINIS MODELIAVIMAS

2.1.Problemos formulavimas stacionariam BST

Yra daugybė maršrutizavimo kelio sudarymo algoritmų būdų mobiliam bevieliui tinklui [75]. Jų visų veikimas yra skirtingas. Kiekvienas algoritmas turi sau būdingų savybių [76,77]. Tačiau duomenų perdavimui naudojamui principai yra tie patys: vieno mazgo duomenų siuntimas kitam ir taip iki pagrindinės stacionarios ar mobilios stoties. Darbe toliau yra nagrinėjamos dinaminės (mobilus tinklai) ir stacionarios sistemos, prie kurių yra derinamas pagrindinis keliamas reikalavimas: minimaliausios energijos sąnaudos prie visų naudojamų maršrutizavimo algoritmų ir didžiausias saugumo užtikrinimas. Tačiau į tokius parametrus kaip: netikėti paketų praradimai ar techniniai gedimai yra neatsižvelgta šiame darbe.

Pavyzdžiui yra naudojamas MPSR (angl. Multi-path source routing protocols) algoritmas [78,79]. MPSR yra reaguojantis maršrutizavimo protokolas mišrioje tinkle topologijoje, ir pritaikytas bevieliams tinklams su bazine stotim. MPSR turi būti veiksnus ir pasirengęs topologijų permainom, nes mazgai gali judėti, gali atsitikti įvairios techninės problemos, kaip energijos sąnaudų pasibaigimas, aukšta temperatūra ir kitos problemos, arba gali būti judamoje aplinkoje. Vadinasi, tinklas turi būti ribojamas mazgų skaičiaus ir tokiu būdu šie tinklai yra didžiuliai, kuriuos galime lyginti su medžio tinklo topologijomis. Maršrutizavimo keliai iki tikslo kūrimo, kuriame atėjusio mazgo duomenys yra išsaugomi pagrindinėje stotyje, yra daromi trim etapais. Pirmu žingsniu kelio transliavimas su pažymėtu paketu vadinamas RREQ (angl. Route REQuest). Šie RREQ paketai yra transliuojami per visus tinklo mazgus, kol paketai yra išsaugomi paskyrimo vietoje.

Paskutinis transliavimo taškas išsaugo keletą RREQ paketų iš įvairių sensorinio tinklo kelių, nes siunčiamas paketas gali naudoti keletą maršrutų. Antru žingsniu, tiksliai įvertinama kaina kiekvienu atrastu maršrutu su kiekvienu RREQ išsaugojimu. Trečiu žingsniu, sukuriamas RREP kelias (angl. Route REPly). Šis RREP turi keletą maršrutų su atitinkama kelio kaina, ir atsitiktinai parinktu maršrutu perduodami duomenys. Sensorinis tinklas turi trijų tipų paketus: maršruto kelio radimas (RREQ), surasto maršruto su atitinkama kaina parinkimas (RREP) ir duomenų paketai duomenims perduoti. Maršruto nustatymas: RREQ paketai yra transliuojami visuose kaimyniniuose mazguose, šie siunčiami paketai transliuojami į juos tol, kol tikslas yra pasiekiamas.

Kiekvienas ankstesnis mazgas palieka savo adresą paketo viduje. Tokiu būdu galinis mazgas ar paskyrimo vieta turi visų mazgų adresus tarp jų ir maršrutus. Po RREQ paketo priėmimo, paskyrimo vietoje atliekamas algoritmo kainos apskaičiavimas ir tada siunčiamas atsakas per

pasirinktą RREP kelią. Duomenų paketas yra siunčiamas priešingu kelio maršrutu RREP. Pastarajam tikslui pasiekti įvedami žymėjimai:

- $\alpha_{i,j}$: duomenų perdavimo kaina, *j* maršruto tarp sensorinio mazgo *i* ir kito mazgo ar pagrindinio mazgo, siunčia duomenys (tarkime, mes naudojame vienodus paketų ilgius), kurie turi būti siunčiami mazgams šiame maršrute. Šita duomenų kaina turi atitikti vykdomas sąlygas: $\sum \alpha_{i,j} = 1$.
- E_j: energijos sunaudojimas mazge *i*, gaunant, apdorojant ir perduodant siunčiamus duomenys, kur *n* sensorinių mazgų skaičius tinkle.

Šis paprastas algoritmas įvertina optimalaus kelio konfigūraciją $\alpha_{i,j}$, kuri turi atitinkamą pasiskirstymo judėjimą ir siunčiamų duomenų energijos suvartojimą tarp visų tinklo taškų maršrutizavimo kelyje. Taigi darant tai, mes minimizuojame skirtingų mazgų energijos sąnaudas (1):

$$\min E_j(\alpha),\ \alpha = \{\alpha_{i,j}\}. \tag{1}$$

Iš čia matosi kad įmanoma parinkti geriausią maršrutą statiniam tinklui naudojant MPSR maršrutizavimo algoritmą. Tam tikslui pakanka įvertinti optimalaus kelio konfigūraciją ir duomenų perdavimo kainas $\alpha_{i,j}$.

2.2.BST optimizacinio modelio sudarymas

Kita vertus, kai yra įvertinami kiti duomenų perdavimo kokybę ir stiprumą įtakojantis parametrai: aplinka kurioje sensorinis tinklas yra naudojamas, tai atsiranda papildomi apribojimas vertinant tokius parametrus kaip energijos sunaudojimas atskirame mazge E_j ir suminį tinklo energijos praradimą $\min \sum E_j$. Šiuo atveju visas tinklas yra atvaizduojamas kaip grafas *G*=(*V, R*), kur *V* yra aibė sensorinių mazgų ir $n = |V|$ sensorinių mazgų skaičius, *R* yra atstumas tarp mazgų tinkle (mazgų susisiekimo aibė $R \subseteq V^2$). Taip pat priimama, kad didžiausias atstumas tarp sensorinių mazgų žymimas r_{max} ir atstumas (atstumų matrica) tarp mazgų *u* ir *v* žymimas kaip $R = (r_{u,v})$. Kur sakykime, kad aibė *L* sudaryta iš poros viršūnių $(u,v) \in L$, reiškiančių sensorinio mazgo *u* susijungimą su *v*, ir šis susijungimas visada yra teigiamas. Todėl aibė *L* gali būti apibrėžta (2):

$$L = \left\{ (u,v) - V^2 \middle| r_{u,v} < r_{\max} \right\} \tag{2}$$

Tuo atvejų kai yra reikalingas kuo greitesnis duomenų surinkimas iš BST esančių mazgų pagal tą patį anksčiau minėta MPSR maršrutizavimo algoritmą (kai yra žinomi visi mazgai naudojami maršrutizavimo ir atstumai tarp jų iš GPS parametrų), tai yra vertinami minimaliausi atstumai tarp jų ir tai yra pagrindinis faktorius, pagal kuri yra sprendžiama kad duomenų perdavimo greitis tarp visų tinklo mazgų yra maksimalus visame tinkle. Trumpiausi atstumai tarp sensorinių mazgų maršrutizavimo lemia ir mažiausius energijos nuostolius visame tinkle. Tokiu atveju suminės energijos praradimas tinkle yra užrašomas kaip (3):

$$\min \sum E_j(R),\ R = \{r_{u,v}\} \tag{3}$$

Tokios maršrutizavimo problemos bevieliam sensoriniam tinkle dar gali būti vadinamos kombinatorinės optimizacijos problemomis. Formuluojant energijos taupymo problemą, reikia įšvęsti papildomą kintamąjį $x_{u,v} = \{1,0\}$, kai $\{1\}$ pasako kad maršrutas (*u,v*) buvo jau panaudotas planuojant trumpiausią maršrutą. Tada problemą ir jos tikslinė minimizavimo funkcija BST pagal pasirinktus mazgus maršrutizavimas yra užrašoma kaip (4):

$$\min \sum_{k=1}^{K} \sum_{u,v=1}^{n-1} r_{u,v} \cdot x_{u,v},\ K = 0,...,4,\ K \in Z \tag{4}$$

Kur:

$$\sum_{u,v=1}^{n-1} x_{u,v} = 1,\ v = 1,...,n,\ u = 1,...,n, \tag{5.1}$$

$$+ \text{ papildomi apribojimai,} \tag{5.2}$$

$$x_{u,v} \in \{1,0\},\ \forall (u,v) \in A. \tag{5.3}$$

Čia: (5.1) ir (5.3) yra paprasti apribojimai. Papildomi apribojimai (5.2) yra naudojami kad eliminuoti pakartotiną tos pačios $r_{u,v}$ panaudojimą daugiau nei vieną kartą.

$$\sum_{u \notin S} \sum_{j \in S} x_{u,v} \geq 1, \ \forall S \subseteq V \setminus \{1\}, \ S \neq \emptyset. \tag{5.4}$$

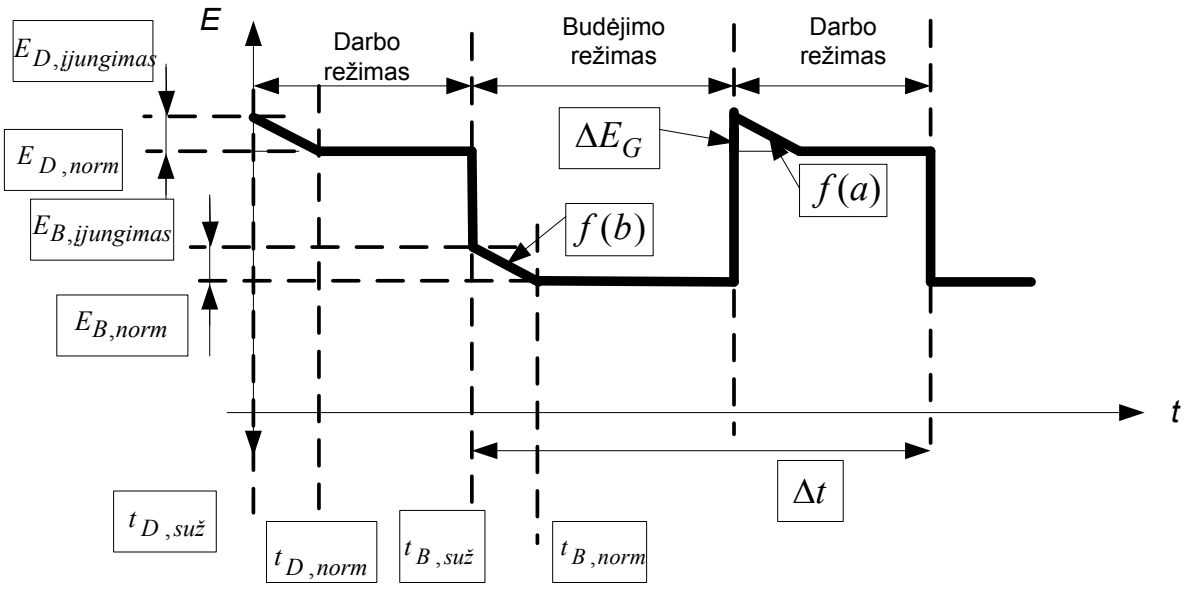
Dėl to kad pagrindinis mazgas yra maitinamas, jis turi būri eliminuotas iš skaičiavimų ir todėl yra formuojamas apribojimas (5.5) ir tikslinėj funkcijoje nurodoma kad $(n-1)$, o naudojami sensoriniai mazgai susideda iš aibės atstumų $R = \{r_{u,v}\}$. Sudaryta maršruto seka nurodo minimalią įmanomą atstumą duomenų perdavimui visiems mazgams. Bendras energijos sunaudojimas vienam potinkliui *K* kai visi mazgai siunčia savo duomenys tada gali būti išreikštas kaip (6) [80]:

$$E = \sum_{u,v=1}^{n-1} \left(e_c + c \cdot r_{u,v}^m \right) = (n-1) \cdot e_c + \sum_{u,v=1}^{n-1} c \cdot r_{u,v}^m . \tag{6}$$

Energijos sąnaudos perduodant 1 bitą informacijos nuo *u* mazgo iki *v* yra proporcingas $r_{u,v}^m$, m reikšmė yra nustatoma vertinant sensorinio mazgo veikimo aplinką ir svyruoja nuo 2 iki 4 (įgaunamas triukšmas ir t.t.). T.y. energijos kiekis reikalingas perduoti duomenys atstumu $r_{u,v}$ [m] yra $c \cdot r_{u,v}^m$, kur *c* yra energijos paviršinis tankis $\left[\frac{J/bit}{m^2} \right]$. Kitas energijos sunaudojimas e_c [J] nėra surištas su atstumų tarp sensorinių mazgų ir atsako už vidinį energijos praradimą mazge (sensorių maitinimas, energijos apdorojimas) ir yra konstanta. Viso sensorinio tinklo energijos sąnaudos visam tinklui yra užrašomos (7):

$$E_K = \sum_{k=1}^{K} \sum_{u,v=1}^{n-1} \left(e_c + c \cdot r_{u,v}^m \right) = \sum_{k=1}^{K} \left((n-1) \cdot e_c + \sum_{u,v=1}^{n-1} c \cdot r_{u,v}^m \right) = K \cdot (n-1) \cdot e_c + \sum_{k=1}^{K} \sum_{u,v=1}^{n-1} g \cdot c_{u,v}^m \tag{7}$$

Papildomai, energijos sunaudojimą e_c sensoriniame mazge galima sumažinti kontroliuojant mazgo darbo ir budėjimo būsenas. Kadangi sensorinis mazgas susideda iš skirtingų blokų, kur kiekvienas turi savo paskirtį mazge bei atitinkamą energijos sunaudojimą, tai toks valdymas suteikia papildomą efektyvumą taupant mazgo energiją. Tačiau kiekvieno mazgo perėjimas iš darbinės būsenos į budėjimo režimą ir atvirkščiai, turi gaišties laiką ir papildomas energijos sąnaudas $\Delta E_G = \int_{E_{D,norm}}^{E_{D,įjungimas}} \int_{t_{D,norm}}^{t_{D,suž}} f(a)da + \int_{E_{B,norm}}^{E_{B,įjungimas}} \int_{t_{B,norm}}^{t_{B,suž}} f(b)db$, kur $f(a)$ ir $f(b)$ yra funkcijos aprašančios energijos kitimą keičiantys būdejimo būsenoms (7 pav.).



7 pav. Mazgų būsenų kitimo grafikas

Todėl, yra būtina užtikrinti kad mobilaus bevielio sensorinio tinklo maršrutizavimo algoritmo veikimas sutaptu su darbo ir budėjimo būsenom ir jų suminės energijos sunaudojimas (kai duomenys renkami iš visų mazgų) yra užrašomos (8):

$$E_K = \sum_{k=1}^{K}\sum_{u,v=1}^{n-1}\left(\left(e_c + \left(\int_{E_{D,norm}}^{E_{D,įjungimas}}\int_{t_{D,norm}}^{t_{D,suž}} f(a)da + \int_{E_{B,norm}}^{E_{B,įjungimas}}\int_{t_{B,norm}}^{t_{B,suž}} f(b)db\right)\right) + c\cdot r_{u,v}^{m}\right) =$$

$$\sum_{k=1}^{K}\left((n-1)\cdot\left(e_c + \left(\int_{E_{D,norm}}^{E_{D,įjungimas}}\int_{t_{D,norm}}^{t_{D,suž}} f(a)da + \int_{E_{B,norm}}^{E_{B,įjungimas}}\int_{t_{B,norm}}^{t_{B,suž}} f(b)db\right)\right) + \sum_{u,v=1}^{n-1} c\cdot r_{u,v}^{m}\right) = . \qquad (8)$$

$$K\cdot(n-1)\cdot\left(e_c + \left(\int_{E_{D,norm}}^{E_{D,įjungimas}}\int_{t_{D,norm}}^{t_{D,suž}} f(a)da + \int_{E_{B,norm}}^{E_{B,įjungimas}}\int_{t_{B,norm}}^{t_{B,suž}} f(b)db\right)\right) + \sum_{k=1}^{K}\sum_{u,v=1}^{n-1} c\cdot r_{u,v}^{m}$$

Todėl suformuluota maršrutizavimo problema vieisms mazgams gali būti užrašoma papildomai kaip (9):

$$\min\sum_{k=1}^{K}\sum_{u,v=1}^{n-1} r_{u,v}\cdot x_{u,v} \propto \min G\cdot\sum_{k=1}^{K}\sum_{u,v=1}^{n-1}\left(\left(e_c + \left(\int_{E_{D,norm}}^{E_{D,įjungimas}}\int_{t_{D,norm}}^{t_{D,suž}} f(a)da + \int_{E_{B,norm}}^{E_{B,įjungimas}}\int_{t_{B,norm}}^{t_{B,suž}} f(b)db\right)\right) + c\cdot r_{u,v}^{m}\right)\cdot \qquad (9)$$

Čia tikslinės funkcijos įgaunama reikšmė (suminis minimalus atstumo įvertinimas) yra tiesiogiai proporcingas minimaliam bendram energijos sunaudojimui mobiliam tinkle su skirtingų mazgo būsenų kaita per vieną laiko intervalą $\Delta t = t_{k+1} - t_k$.

Reikia atkreipti dėmesį, kad energijos skaičiavimo efektyvumas priklauso nuo bevielio sensorinio tinklo mazgų struktūros. Kuo daugiau mazgų BST, tuo bendras energijos sunaudojimas yra mažesnis. Todėl, tikimybė surasti trumpesnį ir tuo pačiu geresnį maršrutą žymiai didėja, kas leidžia padidinti sensorinių mazgų veikimo laiką. Tokia priklausomybė tarp mazgų skaičiaus ir energijos sunaudojimu tinkle yra netiesinė.

Vertinant optimalus energijos sunaudojimo atvejį, galima teigti kad minimalus praradimai įvyksta tinkle kai mazgai yra nutolę vienas nuo kito vienodu atstumu $r_{optimum} = \frac{R_{main}}{n-1}$ t.y. nuolat juda mobiliame tinkle ta pačia kryptimi $\vec{v}$ ir vienodais greičiais v. Kur R_{main} yra pilnas suminis maršrutizavimo atstumas. Tada galima teigti, kad minimalus energijos sunaudojimas priimant ir siunčiant signalus yra (10) [80]:

$$E_{\min} = \frac{c \cdot R_{main}^{m}}{n-1}. \tag{10}$$

Ir bendras minimalus energijos praradimas (11):

$$E_{\min,total} = (n-1) \cdot (e_c + \Delta E_G) + c \cdot r_{optimum}^{m} \cdot (n-1)^{m-1}. \tag{11}$$

Todėl suformuluota maršrutizavimo problema visiems mazgams gali būti užrašoma papildomai kaip (12):

$$\min \sum_{k=1}^{K} \sum_{u,v=1}^{n-1} c_{u,v} x_{u,v} \propto G \cdot \sum_{k=1}^{K} \left((n-1) \cdot (e_c + \Delta E_G) + c \cdot r_{optimum}^{m} \cdot (n-1)^{m-1} \right). \tag{12}$$

Čia: *G* yra mastelio koeficientas.

Tikslinės funkcijos įgaunama reikšmė (suminis minimalus atstumo įvertinimas) yra tiesiogiai proporcingas minimaliam bendram energijos sunaudojimui tinkle.

2.3.Bevielio sensorinio tinklo dinaminių savybių analizė

Dinaminė tinklo būsena gali būti apibūdinama kaip asinchroninė maršrutizavimo problema mobiliam bevieliam sensoriniam tinkle kai atstumai tarp mazgų nuolat kinta. Atsiranda papildomi kintamieji kaip: skirtingi judėjimo greičiai *v* ir kryptys $\vec{v} \in (x, y)$, kurie nuolat kinta laike t_{k+1}. Tada judėjimo dinamika yra išreiškiama lygtimis (13,14,15):

$$r_{u,v}(t_{k+1}) = r_{u,v}(t_k) + \Delta r_{u,v}(t_{k+1}), \tag{13}$$

$$\Delta r_{u,v}(t_{k+1}) = r_{u,v}(t_{k+1}) - r_{u,v}(t_k), \tag{14}$$

$$r_{u,v} = \begin{cases} r_{u,v}(t_k) \neq r_{v,u}(t_{k+1}) \\ r_{u,v}(t_k) = r_{v,u}(t_{k+1}) \end{cases}, \forall (u,v) \in A. \tag{15}$$

Čia: (t_k) yra laiko atskaitos reikšmė, $k \in Z, Z > 0$.

Atstumams $r_{u,v}(t_{k+1})$ ir judėjimo kryptims $\vec{v}_k(t_{k+1})$ įvertinti yra naudojamas 2–D Trilateriacijos (angl. Trilateration) metodas kai visi objektai yra judantys laike *t*. Tačiau žinant išankstines sensorinių mazgų koordinates prie kiekvieno laiko (t_k) ir (t_{k+1}), tai įmanoma juos įvertinti įvedant į skaičiavimus mobilių mazgų koordinačių ir kitų parametrų kitimus (16):

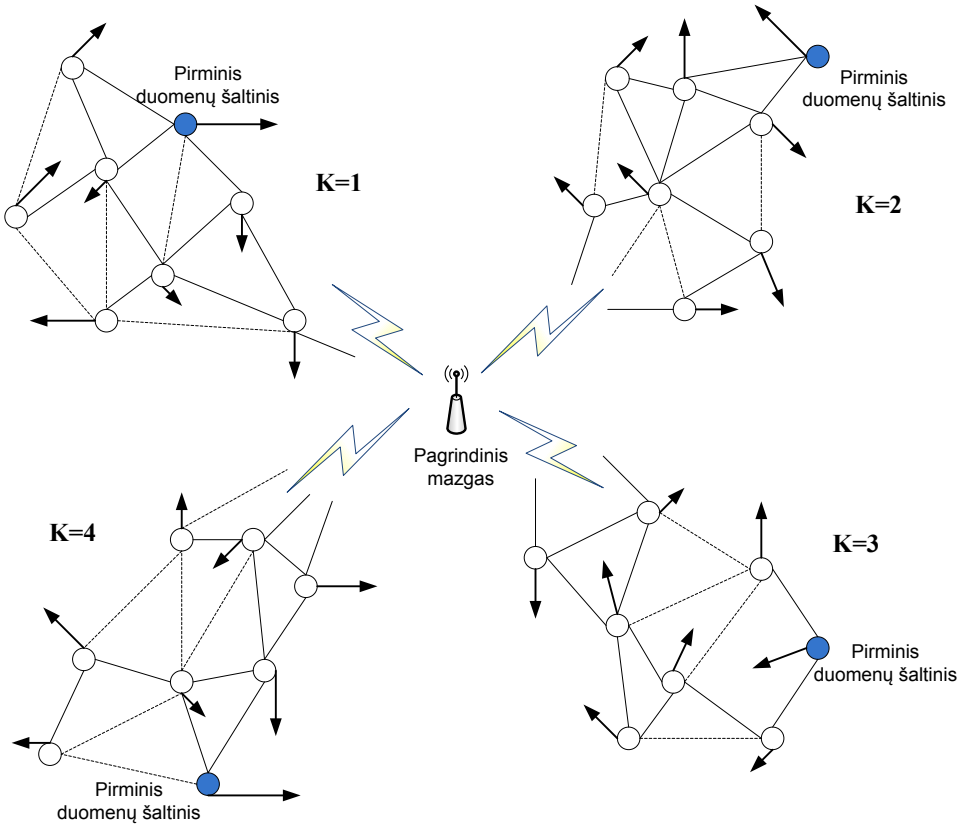
$$r_{u,v}(t_{k+1}) = \sqrt{\begin{aligned}&\left(x_{senas}(t_k) + \Delta x_{naujas}(t_{k+1}) - x_{naujas}(t_{k+1})\right)^2 + \\ &\left(y_{senas}(t_k) + \Delta y_{naujas}(t_{k+1}) - y_{naujas}(t_{k+1})\right)^2\end{aligned}}. \tag{16}$$

Todėl dinaminiam tinklui suminės energijos sunaudojimas užrašomas kaip (17):

$$\begin{aligned} E_K &= \sum_{k=1}^{K} \sum_{u,v=1}^{n-1} \left(e_c + c \cdot r_{u,v}^m(t_{k+1})\right) = \sum_{k=1}^{K} \left((n-1) \cdot (e_c + \Delta E_G) + \sum_{u,v=1}^{n-1} c \cdot r_{u,v}^m(t_{k+1}) \right) = \\ &K \cdot (n-1) \cdot (e_c + \Delta E_G) + \sum_{k=1}^{K} \sum_{u,v=1}^{n-1} c \cdot r_{u,v}^m(t_{k+1}) \end{aligned} \tag{17}$$

.

Čia tikslinės funkcijos įgaunama reikšmė (suminis minimalus atstumo įvertinimas) yra tiesiogiai proporcingas minimaliam bendram energijos sunaudojimui mobiliam tinkle per vieną laiko vienetą $\Delta t = t_{k+1} - t_k$.



9 pav. Bevielio mobilaus sensorinio tinklo topologija

2 lentelė. 9 paveiksle naudojami žymėjimai

	Pirminis duomenų šaltinis, bevielio sensorinio tinklo mazgas
	Bevielio sensorinio tinklo mazgas
	Optimalus ryšys (energijos ir saugumo atžvilgiu)
	Neefektyvus ryšys (energijos ir saugumo atžvilgiu)
	Mobilaus sensorinio tinklo mazgų judėjimo vektoriai $\vec{v}$

Norint nustatyti ar ryšys yra netinkamas duomenų siuntimui (neefektyvus), reikia naudoti Gauto Signalo Stiprumo Indikatoriaus (angl. Received Signal Strength Indication RSSI) matavimus kiekvienam sensoriniam mazgui. Kiekvienas atskiras mazgas gali būti suprogramuotas skaičiuoti RSSI lygį ir tuo pačiu įvertinti galimybę siusti duomenys šituo maršrutu, įvertinant RSSI lygį kiekvieną intervalą mobiliam tinkle $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ ir stacionariam. Kur stacionariaus tinklo RSSI skaičiavimai ir signalo stiprumo skaičiavimai yra išreiškiami lygtimis (18,19,20) [83]:

$$RSSI\left(r_{u,v}\right)=\left(P_{T_{u,v}}-PL\left(r_{u,v0}\right)-10\cdot\eta\cdot\log_{10}\left(\frac{r_{u,v}}{r_{u,v0}}\right)+X_{\sigma}\right), \tag{18}$$

$$P_{RX_{u,v}}=P_{TX_{u,v}}\cdot\left(\frac{\lambda}{4\cdot\pi\cdot r_{u,v}}\right)^{2}, \tag{19}$$

$$\eta=\varepsilon-\delta\cdot h_{BS}+\frac{\psi}{h_{BS}}. \tag{20}$$

Tada atstumą tarp sensorinių mazgų galima išreikšti (21):

$$r_{u,v}=\frac{\lambda}{4\cdot\pi\cdot\sqrt{\frac{P_{RX_{u,v}}}{P_{TX_{u,v}}}}}. \tag{21}$$

Čia: η nusako aplinka kurioje veikia sensorinis tinklas;

h_{BS} nusako sensorinio mazgo antenos aukštį [m];

ε, δ, ψ yra vidutiniai galios susilpninimo parametrai;

$P_{TX_{u,v}}$ yra signalo siuntėjo u perdavimo galia [mW];

$P_{RX_{u,v}}$ yra bangos galios likutis fiksuojamas sensoriniame mazge v [mW];

λ siunčiamo signalo bangos ilgis [m];

$r_{u,v}$ yra fiksuotas ir $r_{u,v}(t_{k+1})$ yra dinaminiai atstumai tarp sensorinių mazgų [m];

$P_{T_{u,v}}$ yra signalo perdavimo galia [mW];

$PL\left(r_{u,v0}\right)$ yra signalo kelio nuostolis [dBm];

X_{σ} yra Gauso atsitiktinis kintamasis (šešėlinimas).

Reikia atkreipti dėmesį, kad mobiliame tinkle keičiantis atstumams tarp mazgų, keičiasi ir jų veikimo aplinka. Dėl to, tokie parametrai kaip: vidutiniai galios susilpninimo parametrai, bangos galios likutis fiksuojamas sensoriniame mazge ir pan., yra nuolat kintantys laike.

2.4.Saugumo problemos modeliavimas

Sparčiai vystantis bevielio ryšio technologijoms stipriai išaugo informacinių sistemų intelektualių agentų teikiamų mobiliųjų paslaugų skaičius (pvz., BST), o kartu ir resursų aptikimo

saugumo ir kontrolės poreikis. Mobiliąja erdve teikiamos paslaugos netruko paplisti transporto ir logistikos sektoriuose, kur išskirtinis dėmesys skiriamas operatyvumui ir veiksmų vykdymo tikslumui. Šiuo metu, sukurtos saugumo posistemes BST realiu laiku kontroliuoja atskirus mazgus, bei pritaikant funkcionalius apsaugos algoritmus padeda spręsti gana sudėtingus saugumo, privatumo bei autentifikavimo uždavinius. Apsaugos procesus aprašantys algoritmai reikalauja nemažai sisteminių resursų, o būtent energijos sąnaudų. Dėl ko sumažėja atliekamų operacijų greitaveika, tačiau išgaunamas gana aukšto lygmens įrenginių tarpusavio pasitikėjimas maršrutizavimo uždavinyje bei jį atitinkantis informacijos pateikimo tikslumas. Nepaisant to, naudojantis mobiliosiomis paslaugomis vis dar susiduriama su saugumą lemiančių sąlygų koordinavimo ir paslaugų turinio kontekste atsirandančių klaidų koregavimo realiu laiku neefektyvumu, tiesiogiai įtakojančiu taisyklingą užduotų komandų vykdymą ir padidinančiu sistemos reakcijos laiką.

Atskirų objektų ar jų būsenų efektyviam valdymui, resursų ir paslaugų aptikimui yra sukurta nemažai modelių, paremtų saugumo užtikrinimu, kurių kiekvienas išsiskiria savo teikiamais privalumais ir ypatingomis savybėmis [81,82]. Vienas iš sėkmingiausių IT sprendimų yra tarpinė programinė įranga (TPĮ), kuri į bendrą sistemą leidžia apjungti įvairias programas, techninę kompiuterinių sistemų ir tinklų įrangą, bei valdyti informacijos srautus paremtus nustatytomis taisyklėmis. Nežiūrint į tai, jose aptinkami trūkumai skatina atlikti išsamesnę analizę ir kurti vis perspektyvesnius TPĮ modelius, įgalinančius pasiekti sistemose vis aukštesnį saugumo ir kitų teikiamų paslaugų kokybės lygmenį. Tokiu būdų tarpinę programinę įrangą tikslinga suskirstyti į dvi pagrindines grupes: Tipinė tarpinė programinė įranga (T-TPĮ) ir Saugi tarpinė programinė įranga (S-TPĮ), tačiau šiuo metu didėja TPĮ poreikis, kurioje akcentuojamos ne tik saugumo, privatumo ir komunikacijų funkcijos tarp mobiliųjų įrenginių, bet ir naujos paslaugos, tokios kaip prioritetų nustatymas, kuri leistų nustatyti atskirų įrenginių patikimumą BST atžvilgiu realiu laiku. Patikimumo funkcijų valdymui būtina kaupti atskirų tinklo mazgų informaciją, kurią sudaro informacija apie pasitikėjimo laipsnį (nuo 0.0 iki 1.0) ir kinta priklausomai nuo atliktų veiksmų kenksmingumo istorijos. Taip pat vertinama informacija apie įrenginių resursų/paslaugų grupes, kurioms priklauso konkretus įrenginys ir bendras tinklo turimų resursų E_K skaičius kinta priklausomai nuo tuo metu atskiro įrenginio turimų energijos resursų E_N. Mobilaus mazgo N energijos kitimas gali būti aprašytas (22):

$$E_{MOB,N}(t_{k+1}) = E_{MOB,N}(t_k) - \Delta E_{MOB,N}(t_{k+1}). \tag{22}$$

Ir mazgo energijos sunaudojimas per vieną žingsnį Δt (23):

$$\Delta E_{MOB,N}(t_{k+1}) = (e_c + \Delta E_G) + c \cdot r^m_{u,v}(t_{k+1}) = (e_c + \Delta E_G) + c \cdot r^m_{u,v}(t_{k+1},). \quad (23)$$

Čia reikia atkreipti dėmesį, kad naujai įvestas koeficientai $T_{MOB,N}$ yra vertinamas kaip mazgo gyvavimo laiko koeficientas mobiliame tinkle. Nuo jo dydžio priklauso maršrutizavimo algoritmų parinkimas, saugumo užtikrinimas ir kiti reikalingi parametrai (24,25):

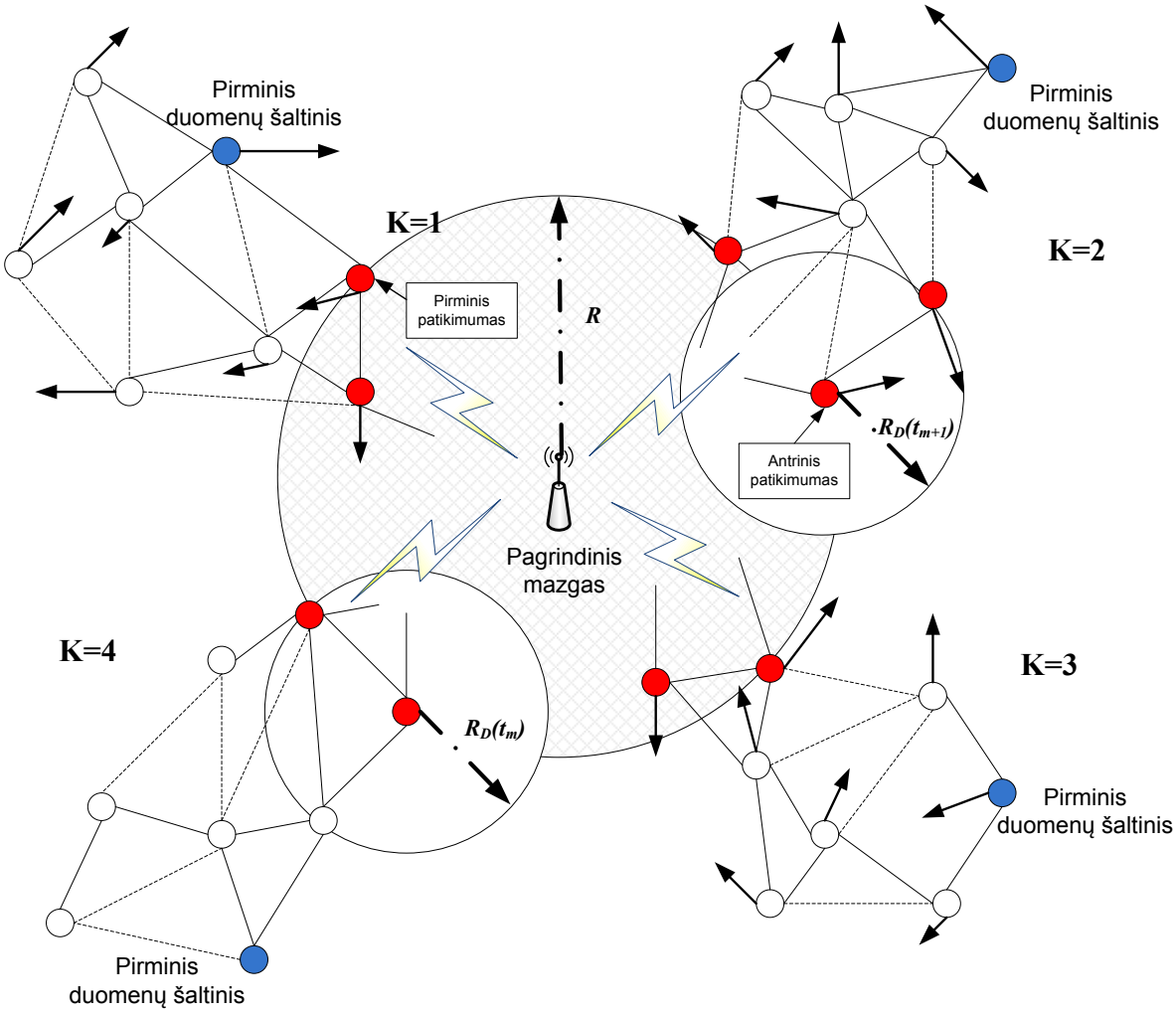
$$T_{MOB,N}(t_{k+1}) = \frac{E_K}{\Delta \overline{E}_{MOB,N}}, \quad (24)$$

$$\Delta \overline{E}_{MOB,N} = \frac{\sum \Delta E_{MOB,N}(t_{k+1})}{n-1}. \quad (25)$$

Nemažiau svarbus kriterijus, tai informacija apie sėkmingai atliktas operacijas $O_{SC} \in \{0,1\}$ (maršrutizavimo/duomenų perdavimų), priklausantis nuo įrenginių, kuriems buvo suteikti resursai/paslaugos, rekomendacijų.

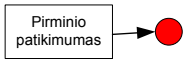
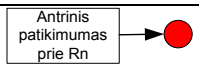
Taip pat numatyta funkcinių algoritmų DB, kurioje saugoma įvykių ir/arba vykusių duomenų mainų sekos, reikalingos individualių situacijų tyrimams. Atskirų tinklo mazgų informacijos ir funkcinių algoritmų duomenų bazės bei prioritetų nustatymo funkcijų pagalba apjungiami vienodo ir/arba panašaus pasitikėjimo laipsnio mazgai į atskiras grupes ypač greitam maršrutizavimui. Prioritetų nustatymo valdiklio pagalba įrenginiams prisijungus prie sistemos, pateikiamos atsijungimo nuostatos arba galimi atsijungimo nuo sistemos laiko intervalai t_0 (resursų teikėjas davęs užsakovui sutikimą į užklausą paslaugų suteikimui, atsijungia tik po maršrutizavimo įvykdymo sekos, kitu atveju gali būti įtraukiamas į kenksmingų įrenginių sąrašą (įgyjamas mažesnio pasitikėjimo laipsnis). Tokiu būdu užtikrinamas sistemos patikimumas, o tarp atskirų įrenginių išlaikomas aukštas pasitikėjimo lygmuo, leidžiantis vykti greitiems ir patikimiems resursų mainams. Tokiu atveju, atskirų sensorinių mazgų patikimumas tinkle prieš kitus mazgus antriniame patikimumo rate (10 pav.) yra aprašomas kaip (26) [84]:

$$\rho_N(t_{k+1}) = \frac{O_{SC}(t_k) \cdot \overline{\rho}_N(t_k)}{\rho_{N+1}(t_k)} \cdot 100\%. \quad (26)$$



10 pav. Mobilaus bevielio sensorinio tinklo topologija

3 lentelė. 10 paveiksle naudojami žymėjimai

	Pirminis duomenų šaltinis, bevielio sensorinio tinklo mazgas
	Bevielio sensorinio tinklo mazgas
	Optimalus ryšys (energijos ir saugumo atžvilgiu)
	Neefektyvus ryšys (energijos ir saugumo atžvilgiu)
	Mobilaus sensorinio tinklo mazgų judėjimo vektoriai $\vec{v}$
	Transliuojama srities radiusas nuo pagrindinio mazgo kas sudaro pirminį patikimumo ratą – R, $R_D(t_{m+1})$ yra antrinio patikimumo rato spindulys nuo kiekvieno mazgo mobiliam ir stacionariam tinkle.
	Pirminio patikimumo rato mazgas.
	Antrinio patikimumo rato mazgas.

Kur vidutinis duomenų patikimumas nusako gautos informacijos patikimumo lygį (27):

$$\bar{\rho}(t_{k+1}) = \frac{\sum \rho_{N+1}(t_{k+1})}{n-1}. \tag{27}$$

Analizuojant BST algoritmo veikimą svarbu pažymėti tai, kad kiekvienas sensorinis mazgas turėtų turėti kaimyninių mazgų veikimo istoriją ir atliekamas funkcijas, bei turėti galimybę priimti naujus mazgus į tinklą. Kaimyninėse mazguose turi būti saugomi duomenys: artimiausių sensorinių mazgų atstumai (pagal GPS arba RSSI), energijos kainos vienetas, sekos skaičius ir kiti parametrai reikalingi mazgo naudojimui ir maršrutizavimo.

2.5.Programinio algoritmo sudarymas

Taikant ankščiau aprašytą mazgų vertinimo metodą maršrutizavime, yra galimybė suteikti mazgui intelektinio mąstymo savybių kad jis galėtu pats nustatyti geriausią maršrutą arba koreguoti esamą pagal naujas aplinkybes (prioritetų nustatymas). Kai pagal vieną iš pasirinktų maršrutizavimo metodų yra pasirenkami geri kandidatai, tai sekantis žingsnis yra įvertinti tokius esminius punktus kaip optimalus eiliškumas maršrutizavime ir proporcingai mažiausius energijos nuostolius tinkle. Papildomai atsiranda galimybė vertinti RSSI ir gaunamų signalų stiprumus vertinant atstumus ir proporcingai energijos nuostolius. Turint mobilų tinklą su nuolat atnaujinančiomis koordinatėmis, įmanoma labai tikslai įvertinti galimus energijos nuostolius visame tinkle ir tuo pačiu sumažinti mazgų gaišties laiką. Čia bendros posistemes algoritmo veikimas (kurio taikymas yra įmanomas NI WSN mazguose) yra pradedamas nuo sužadinto mazgo (Pirminio duomenų šaltinio) ir pritaikytas mobiliam ir stacionariam tinklui valdyti (4 lentelė).

4 lentelė. Algoritmas skirtas mazgo programavimui

Algoritmas apibūdinantis kiekvieno suaktyvinto mazgo maršrutizavimo kelio paiešką srityje R remiantis kitų mazgų patikimumo rodikliais:
Main.Begin { Set Initial_start _point; **Set** Initiate_routing_algorithm{X0}; **Set** Initiate_scenario{Reliability{Record_file:Memory{TF1:Time{t_{m+1}}}}}; // Po sekos radimo maršrutizavimo {X0} bus priimta komanda vertinti prioritetiškai patikimumo įvertinimą (kitos komandos yra atiduoti prioritetą kitiems parametrams arba atlikti mišrų įvertinimą // **Set** Time{t_{m+1}}$\rightarrow \Delta t$; **Set** Record_file:Record_initial__routing_destinations{Node:Number{Time{t_{m+1}}}}; **Get** {Coordinates;RSSI;Reliability;Life_coeff;Succesfull_routing}

If {Coordinates==False{Coordinates:Time{t_m}}} {

// koordinatės neaatitnka istorijos koordinatėms, reiškia tinklas dinaminis (mobilūs) //

Update {Record_file{Time{t_{m+1}}}} → **Up.Begin { Set** Processor

Allocate Memory{TF1}

Compute {R_D{t_{m+1}}}

Compute {Coordinates{Time{t_{m+1}}}}

Compute {RSSI{Time{t_{m+1}}}}

Compute {Reliability{Time{t_{m+1}}}}

Compute {Life_coeff{Time{t_{m+1}}}}

Compute {Succesfull_routing{Time{t_{m+1}}}}

Update {Record_file:Memory{TF1:Time{t_{m+1}}}}**}**

// mazge yra atliekami vidiniai skaičiavimai (sunaudojama papildoma energija procesoriau, atminties darbams), apskaičiuojami pagrindiniai parametrai įvertinant gautus duomenys iš mazgų ir lyginant juos su jau turimais //

Choose {Coordinates:Memory{TF1}} → **Ch.Begin {**

Ch.Update {Recod_file{Time{t_{m+1}}}}

Set Processor

Allocate Memory{TF1:{Time{t_{m+1}}}}

Set {Route{Node:Number{Time{t_{m+1}}}}}

Ch.Update {Record_file:Memory{TF1:Time{t_{m+1}}}}**}**

} **else** { **Update** {Record_file{Time{t_{m+1}}}} → **Up.Begin {**

Set Processor

Allocate Memory{TF1}

Compute {RSSI{Time{t_{m+1}}}}

Compute {Reliability{Time{t_{m+1}}}}

Compute {Life_coeff{Time{t_{m+1}}}}

Compute {Succesfull_routing{Time{t_{m+1}}}}

Update {Record_file:Memory{TF1:Time{t_{m+1}}}}**}**

Choose {Coordinates:Memory{TF1}} → **Ch.Begin {**

Ch.Update {Recod_file{Time{t_{m+1}}}}

Set Processor

Allocate Memory{TF1:{Time{t_{m+1}}}}

Set {Route{Node:Number{Time{t_{m+1}}}}}

Ch.Update {Record_file:Memory{TF1:Time{t_{m+1}}}}**}}**

Main.End

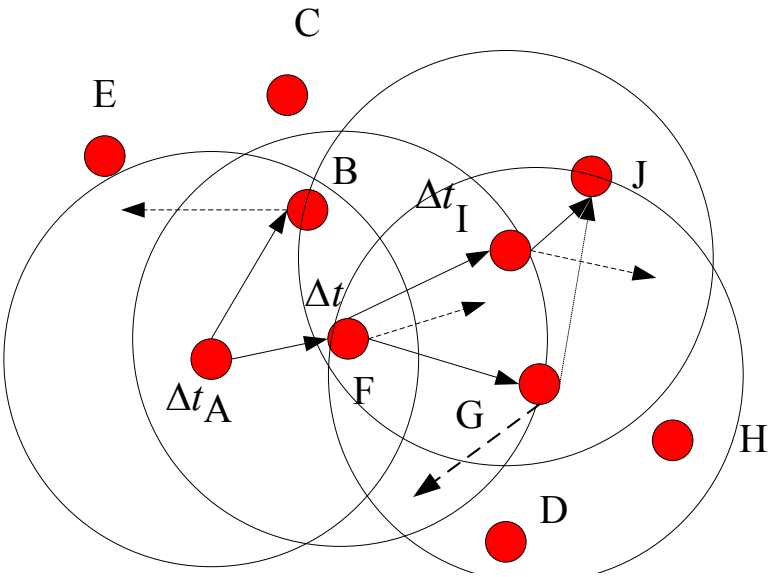
// Kiekvoenos pilnos iteracijos pabaigoje, kai atminties sektoriai yra pilnai užpildyti Record_file:Memory{TFn:Time{tm+1}} informacija, tai įvyksta informacijos ištrinimas t.y. tinklo atnaujinimo procedūra **Restart** //

3. SUPROJEKTUOTO TINKLO TYRIMAS IR TAIKYMAS TRANSPORTO VALDYMO SISTEMOJE ANALIZĖ

3.1.Sensorinio tinklo dinaminių savybių tyrimas

Remiantis matematiniu modeliu yra keliamas darbo uždavinys, patikrinti kuriamos posistemės ir maršrutizavimo algoritmo veikimą prie sumodeliuotų sąlygų vertinant patikimumo, judėjimo ir kitus aspektus dinaminiam tinkle.

Tinklas buvo sumodeliuotas iš 10 mazgų kur mazgas *J* yra pagrindinis mazgas, o mazgas *A* yra sužadintas. Maršrutizavimo algoritmas buvo supaprastintas (aprašyti tik pagrindiniai procesai įtakojantis energijos praradimus) (11 pav.).



11 pav. Sumodeliuota mobilaus bevielio sensorinio tinklo topologija

Buvo priimta kad:

a) vidinės galios sąnaudos – 50 [*mW*];

b) aplinkos konstanta $m = 2$;

c) energijos paviršinis tankis $c = 100 \left[\frac{pJ/bit}{m^2} \right]$;

d) Efektyvus duomenų perdavimo greitis – 10 [*Kbps*];

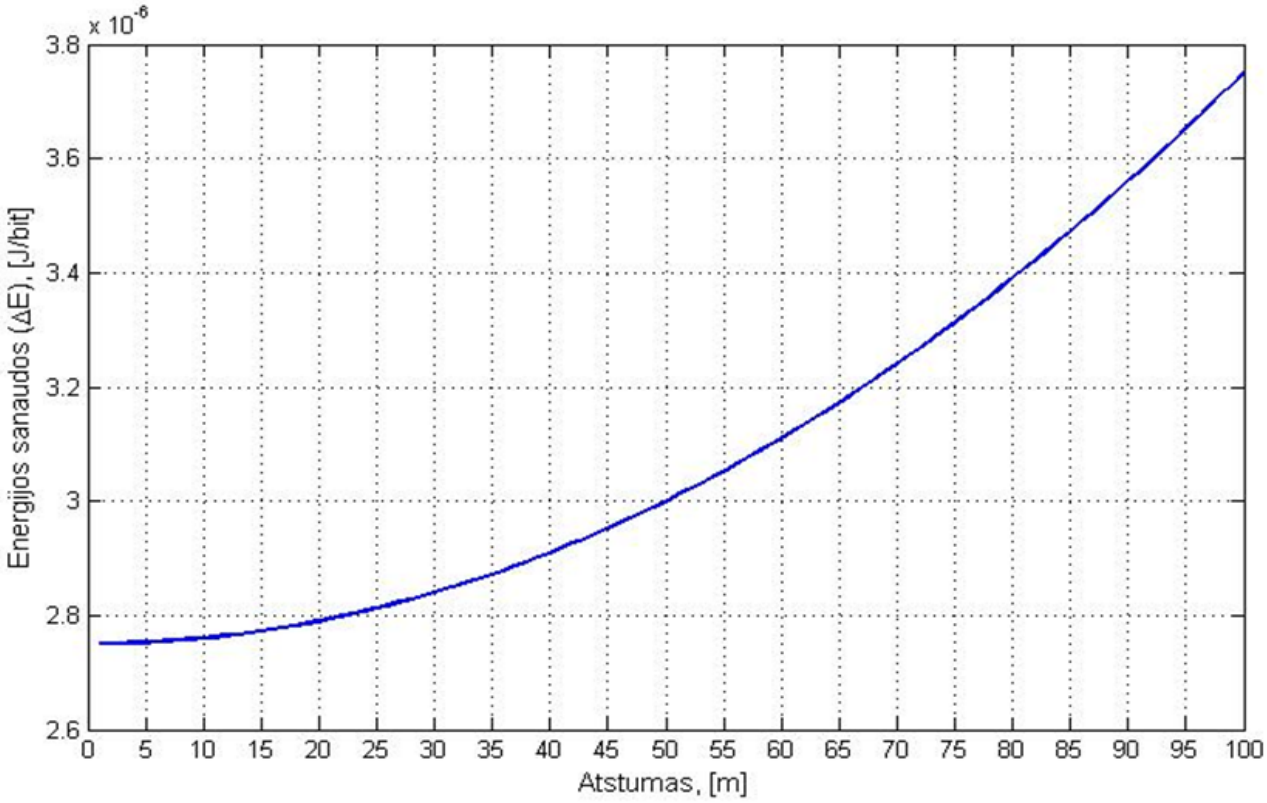
e) Vidinės energijos sąnaudos $e_c = \frac{25 \cdot 10^{-3}}{10^4} = 25 \cdot 10^{-7}$ [*J/bit*];

f) Papildomos energijos sąnaudos yra įvertinamos kaip $\Delta E_G = 2.5 \cdot 10^{-7}$ [*J/bit*].

Papildomai buvo priimta, kad 100 metrų riba yra tas atstumas po kurio signalas yra per silpnas arba jo kiti kokybiniai parametrai yra virš normos). Sumodeliuoto tinklo kiekvieno mazgo energijos sąnaudos yra aprašytos funkcijos:

$$\Delta E_{MOB,N}\left(r_{u,v}(t_{k+1})\right) = e_c + \Delta E_G + c \cdot r_{u,v}^{m}(t_{k+1}). \tag{35}$$

Duomenų perdavimo energijos sąnaudos yra pateiktos 12 paveiksle.



12 pav. Energijos sąnaudų ΔE palyginimas prie skirtingų atstumų tarp mazgų

Remiantis gautais duomenimis, maksimalus energijos sunaudojimas prie 100 metrų ribos yra $\Delta E_{MOB,N}\left(r_{u,v}(t_{k+1})\right) = \Delta E_{MOB,N}(100) =$ 3.75*10^{-6} [*J/bit*]. Todėl vertinant sumodeliuota maršrutą įmanoma įvertinti atskiro mazgo energijos praradimus (5 lentelė) siunčiant teorinį 1 bito paketą iš mazgo *A* iki nustatyto mazgo *J*.

5 lentelė. Mazgų energijos sąnaudos pagal 6 lentelės duom., (1 atvejis)

Laiko pokytis	**Energijos sąnaudos mazguose**		
	A	**F**	**I**
Δt	2.95*10^{-6} [*J/bit*]	3.56*10^{-6} [*J/bit*]	3.05*10^{-6} [*J/bit*]

Vertinant suminį tinklo energijos praradimą prie 4 mazgų n=4, 1 potinklio K=1 ir aplinkos konstantos m=2:

$$E_K = \sum_{k=1}^{K} \sum_{u,v=1}^{n-1} \left(\left(e_c + \Delta E_G \right) + c \cdot r_{u,v}^{m} \left(t_{k+1} \right) \right) = \sum_{k=1}^{1} \sum_{u,v=1}^{4-1} \left(\left(e_c + \Delta E_G \right) + c \cdot r_{u,v}^{2} \left(t_{k+1} \right) \right) = 9.56 * 10^{-6} \ [J/bit].$$

Tačiau vertinant tinklo efektyvumą (optimalų resursų panaudojimą), kai:

$$r_{optimum} = \bar{r}_{u,v} = \frac{\sum_{u,v=1}^{n-1} r_{u,v} \left(t_{k+1} \right)}{n-1} = \frac{45+90+55}{4-1} = 63.33 \, [m].$$

$$E_{\min,total} = \left(n-1 \right) \cdot \left(e_c + \Delta E_G \right) + c \cdot r_{optimum}^{m} \cdot \left(n-1 \right)^{m-1} = 9.45 * 10^{-6} \ [J/bit].$$

Taigi, sumodeliuotas tinklo efektyvumas Ef yra:

$$Ef = \frac{E_{\min,total}}{E_K} \cdot 100\% = \frac{9.45 * 10^{-6}}{9.56 * 10^{-6}} \cdot 100\% = 98.85\% .$$

Sumodeliuoti 1 atvejo atstumai yra pateikti 6 lentelėje, kur maršrutizavimo žingsnis yra nurodytas kaip Δt .

6 lentelė. Atstumai tarp mazgų (1 atvejis)

Laiko pokytis	**Atstumai tarp sensorinių mazgų (atstumai po duomenų atnaujinimo (t_{m+1}) tarp pirminio mazgo ir kitų mazgų)**									
	A	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**G**	**H**	**I**	**J**
Δt_1	0	90	140	120	150	45	180	250	350	240
Δt_2	120	140	125	250	180	0	90	260	90	130
Δt_3	360	320	250	150	180	120	130	140	0	55

Vertinant mazgus reikia atkreipti dėmesį ir į mazgo patikimumą tinkle. Sumodeliuotu atveju, maršrutizavimas buvo daromas per mazgą I nes jo atstumas $r_{u,v}(t_{k+1})$ buvo vertinamas kaip mažiausias ir papildomas prioritetas pagal 2.4 sukurta algoritmą buvo skelbiamas mazgo

patikimumui, kuris buvo įvertintas atliekant skaičiavimo operacijas su atliktų maršrutizavimo operacijų istorija, mazgų gyvavimo laiko koeficientais ir galimomis energijos sąnaudomis.

7 lentelė. Mazgų patikimumo reikšmės (1 atvejis)

Laiko pokytis	**Mazgų patikimumo reikšmės, [%]**									
	A	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**G**	**H**	**I**	**J**
Δt_1	69	69	35	29	69	71	35	45	65	100
Δt_2	72	69	35	29	69	74	35	45	65	100
Δt_3	72	69	35	29	69	74	35	45	66	100

Tačiau jeigu prioritetą palikti tik prie atstumų įvertinimo, tai tada keičiasi ir maršrutizavimas kuris eis per mazgą *G*. Todėl vertinant sumodeliuota maršrutą įmanoma įvertinti atskiro mazgo energijos praradimus (8 lentelė) siunčiant teorinį 1 bito paketą iš mazgo *A* iki nustatyto mazgo *J*.

8 lentelė. Mazgų energijos sąnaudos pagal 9 lentelės duom., (2 atvejis)

Laiko pokytis	**Energijos sąnaudos mazguose**		
	A	**F**	**G**
Δt	$2.95*10^{-6}$ [*J/bit*]	$3.56*10^{-6}$ [*J/bit*]	$3.56*10^{-6}$ [*J/bit*]

Vertinant suminį tinklo energijos praradimą prie 4 mazgų n=4, 1 potinklio K=1 ir aplinkos konstantos m=2:

$$E_K = \sum_{k=1}^{K}\sum_{u,v=1}^{n-1}\left(\left(e_c + \Delta E_G\right) + c \cdot r_{u,v}^{m}\left(t_{k+1}\right)\right) = \sum_{k=1}^{1}\sum_{u,v=1}^{4-1}\left(\left(e_c + \Delta E_G\right) + c \cdot r_{u,v}^{2}\left(t_{k+1}\right)\right) = 10.22*10^{-6}\ [J/bit].$$

9 lentelė. Atstumai tarp mazgų (2 atvejis)

Laiko pokytis	**Atstumai tarp sensorinių mazgų (atstumai po duomenų atnaujinimo (t_{m+1}) tarp pirminio mazgo ir kitų mazgų)**									
	A	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**G**	**H**	**I**	**J**
Δt_1	0	90	140	120	150	45	180	250	350	240
Δt_2	120	140	125	250	180	0	90	260	90	130
Δt_3	340	260	250	150	220	110	0	110	240	90

Tačiau vertinant tinklo efektyvumą (optimalų resursų panaudojimą), kai:

$$r_{optimum} = \bar{r}_{u,v} = \frac{\sum_{u,v=1}^{n-1} r_{u,v}(t_{k+1})}{n-1} = \frac{45+90+90}{4-1} = 75 \ [m].$$

$$E_{\min,total} = (n-1)\cdot(e_c + \Delta E_G) + c \cdot r_{optimum}^{m} \cdot (n-1)^{m-1} = 9.93 * 10^{-6} \ [J/bit].$$

Taigi, sumodeliuotas tinklo efektyvumas Ef yra:

$$Ef = \frac{E_{\min,total}}{E_K} \cdot 100\% = \frac{9.93 * 10^{-6}}{10.22 * 10^{-6}} \cdot 100\% = 97.16\%$$

10 lentelė. Mazgų patikimumo reikšmės (2 atvejis)

Laiko pokytis	**Mazgų patikimumo reikšmės, [%]**									
	A	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**G**	**H**	**I**	**J**
Δt_1	69	69	35	29	69	71	35	45	65	100
Δt_2	72	69	35	29	69	74	35	45	65	100
Δt_3	72	69	35	29	69	74	36	45	65	100

Vertinant vidutinius perduotų duomenų patikimumus (informacijos patikimumo lygius) prie 2 skirtingų maršrutų (1 – kai naudojamas mazgas *I*, ir 2 – kai naudojamas mazgas *G*):

$$\bar{\rho}_1(t_{k+1}) = \frac{\sum \rho(t_{k+1})}{n-1} = \frac{69+71+65}{4-1} = 68.33\%$$

$$\bar{\rho}_2(t_{k+1}) = \frac{\sum \rho(t_{k+1})}{n-1} = \frac{69+71+35}{4-1} = 58.33\%$$

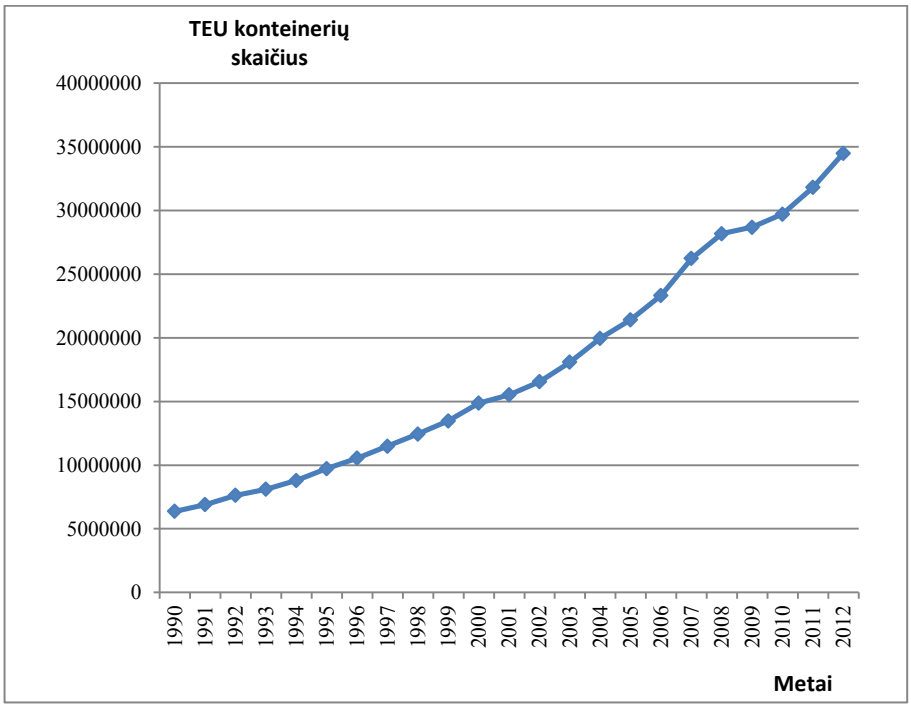
Taigi, skaičiavimo rezultatai parodė, kad prie sumodeliuotų sąlygų 2 prioritetų (mazgų patikimumas ir duomenų perdavimo atstumas) įvertinimas maršrutizavimo metu, padidina bendrą

tinklo efektyvumą mažinant sunaudojamus energijos resursus ir užtikrinant aukštesni informacijos patikimumo lygį.

3.2.Mobilių bevielių sensorinių tinklų taikymo analizė

3.2.1. Intermodalinių konteinerių transportavimo problemos aktualumas

Kuriant intermodalinių konteinerių krovinių monitoringo (valdymo) sistema, kurios pagrindas yra (M)BST reikia atsižvelgti į sistemos diegimo aplinką ir bendrai į intermodalinių krovinių transportavimą pasaulyje. Remiantis kompanijos „World Shipping Council“ duomenimis, TEU konteinerių didėjimas išliks pastovus ir 2012 metais (13 pav.).

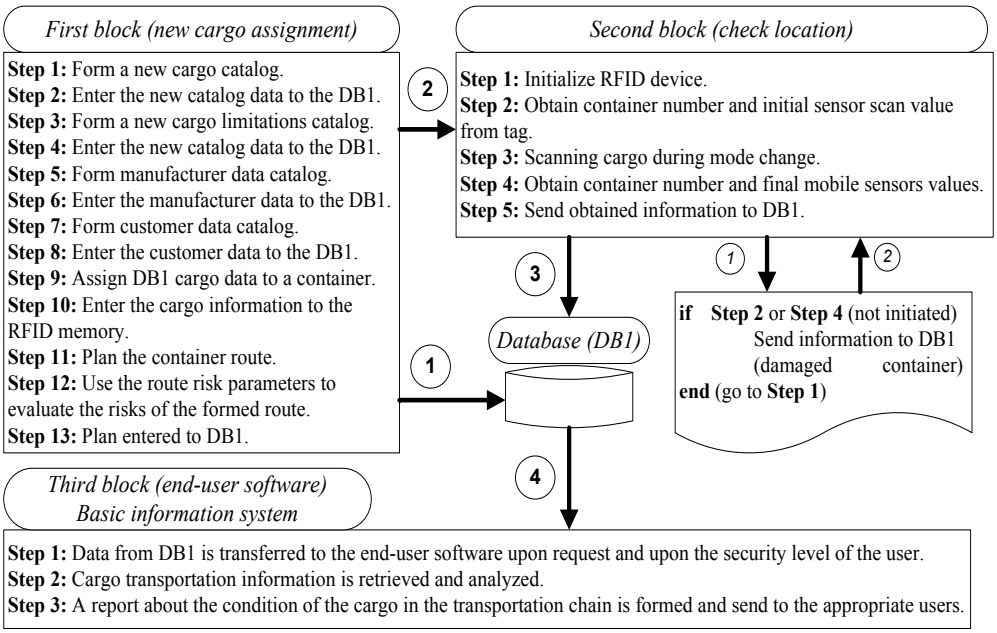


13 pav. TEU konteinerių skaičiaus kitimas

Todėl yra ypač svarbu, kad diegiamos sistemos plečiamumas būtų lankstus ir tuo pačiu neprarastu savo efektyvumo. Kuriamos sistemos architektūra turi palaikyti ne tik greitą naujų mazgų įdiegimą į sistema, bet ir efektyviai valdyti senų energiją išeikvojusių mazgų (arba pažeistų konteinerių) kaitą. Jeigu sistema tampa globali, tai jos plečiamumas turi palaikyti ir kitų komponentų įdiegimą naujuose konteineriuose su naujų standartų palaikymu.

3.2.2. Transporto valdymo ir monitoringo sistemos koncepcijos projektavimas

Norint maksimaliai išnaudoti diegiamo tinklo privalumus kuriamoje valdymo ir analizės sistemoje, minimizuojant sistemos kūrimo kaštus, reikia apžvelgti sistemos grafinės vartotojo sąsajos prototipą bei išanalizuoti galimas rizikas sistemos kūrimo bei diegimo etapuose. Todėl buvo pasiūlytas programinės įrangos prototipas logistikos procesų optimizavimui naudojant įmontuotą į intermodalinius konteinerius BST. Kur programos pagrindinį funkcionalumą apibūdina galimybė nuotolinių būdų stebėti krovinio judėjimą bei jo gabenimo sąlygas bei probleminės situacijas. Taip pat realiu-laiku reaguoti į galimus krovinio pažeidimus. Tinklas yra suprojektuotas naudoti Radijo Dažnių Identifikavimo sistemos komponentus (RFID) integruotais su sensoriais [85]. Tai suteikia papildomas galimybes stebėti tokius krovinio pažeidimus, kurie susiję su krovinio temperatūros, drėgmės ir vibracijos svyravimais. Sistemos veikimas yra pateiktas 14 pav.



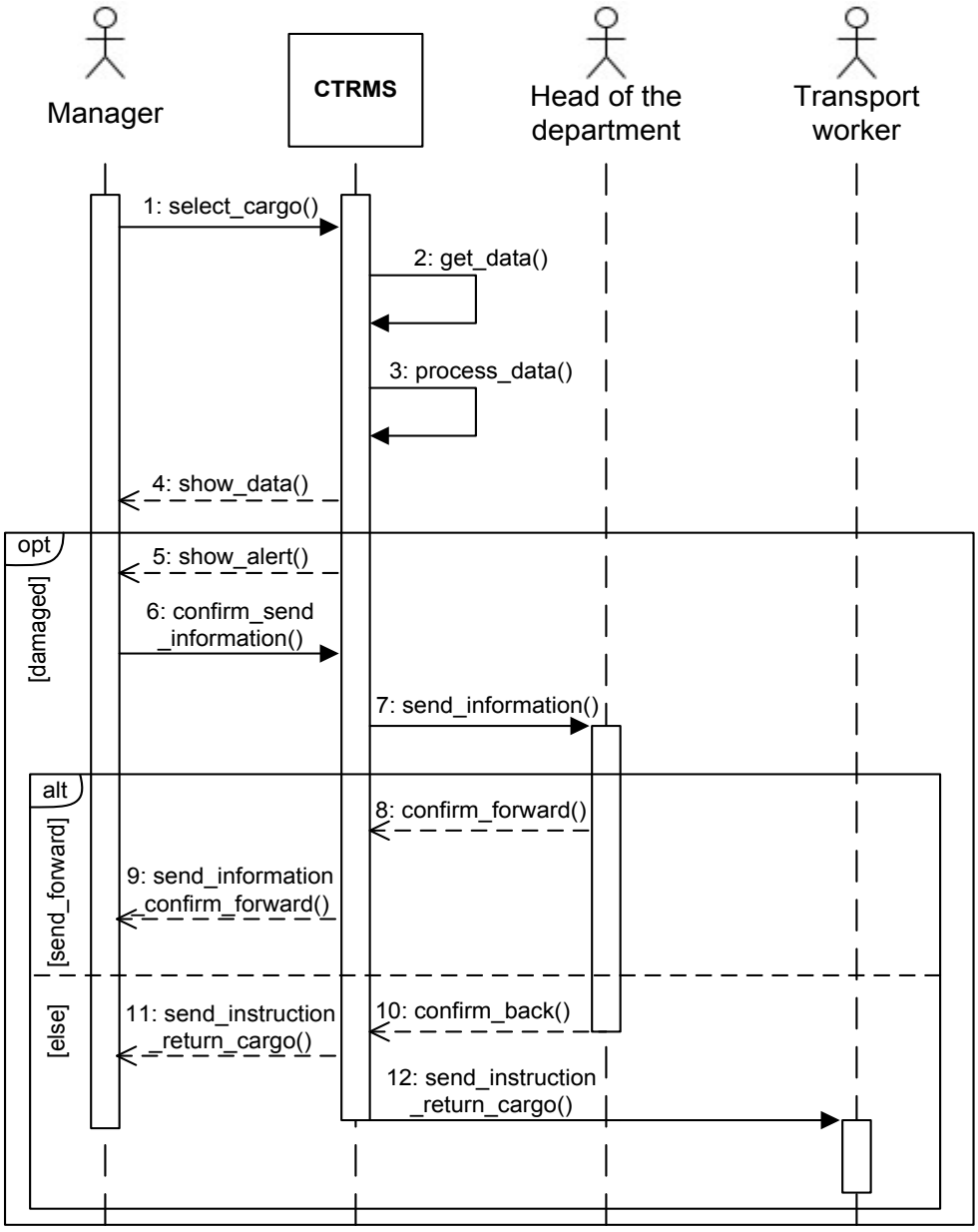
14 pav. Sistemos veikimo koncepcija

Sistemos automatinis duomenų rinkimas yra ypač naudingas vertinant krovinio galimų pažeidimų atvejus bei planuojant sekančio krovinio maršrutus. Tačiau per didelis duomenų kiekis gali apsunkint šitų duomenų apdorojimą bei atvaizdavimą realiu laiku. Todėl yra ypač aktualu reguliuoti informacijos srautą optimizuojant sensorinio tinklo veikimą (sensorių veikimą laiko atžvilgiu bei kitų resursų sunaudojimą ir pan.).

Tokios Intelektualios Transportavimo Sistemos (angl. Intelligent Transportation System) integravimas į logistikos ir transporto procesų optimizavimą sumažina žmogaus klaidos tikimybę iki minimumo. Kas papildomai išreiškia optimizavimo naudingumą kuriamoje sistemoje [86,87].

3.2.3. Valdymo sistemos grafinės vartotojo sąsajos projektavimas

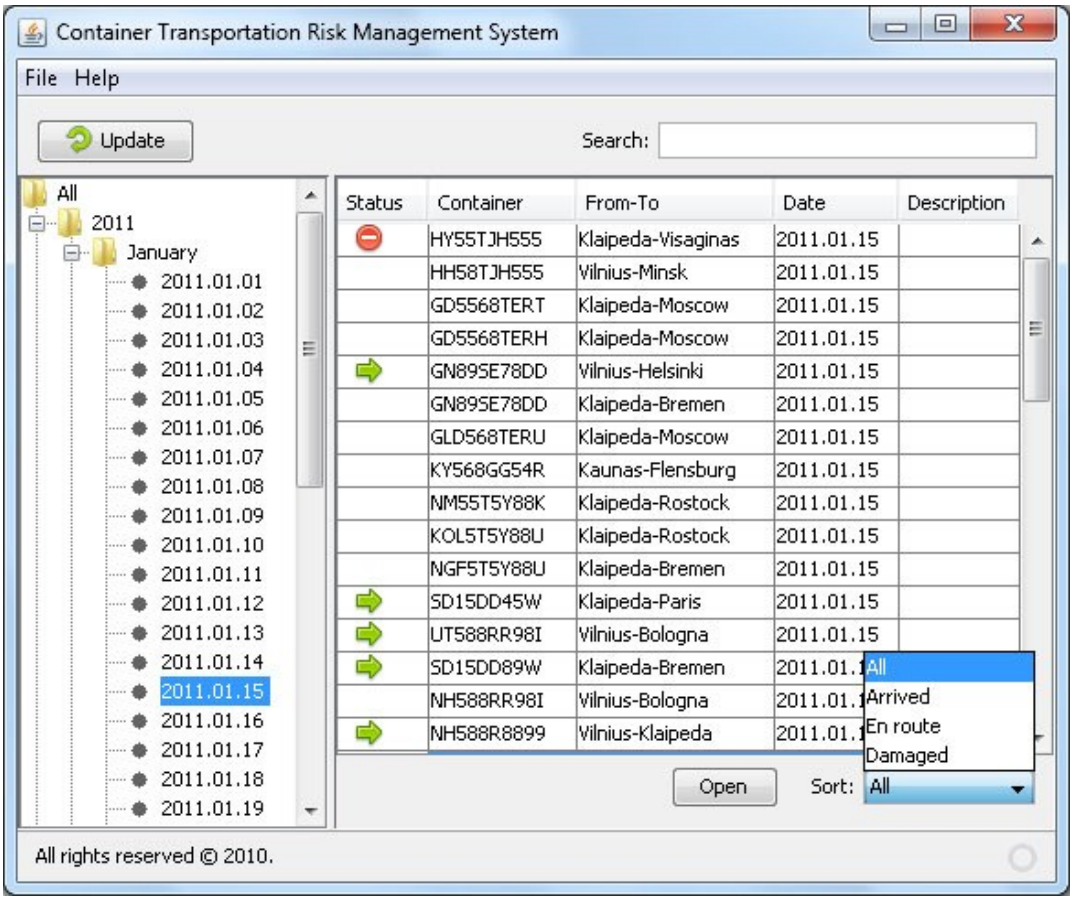
Kuriant specifinį programinį produktą yra ypač aktualu iš pradžių išnagrinėti esamą problema, kuriai spręsti yra kuriama informacinė sistema su BST. Išanalizuoti visus sistemos veikėjus (angl. users) ir objektus (angl. objects) kurie bendradarbiaudami tarpusavy sukuria vidinius verslo ryšius. Ryšiams paaiškinti ir tinkamiausias atvaizduoti yra naudojamos sekų diagramos. Sekos diagrama yra vienas iš UML diagramų tipų. Šios diagramos iliustruoja objektų, jų būsenų, veiksmų lygiagretų išsidėstymą laike bei pranešimus tarp jų. Sumodeliuota sekų diagrama (15 pav.) paaiškina bendradarbiavimą tarp CTRMS ir visų kitų sistemos objektų.



15 pav. Sistemos sekų diagrama

Kur tarp objektų siunčiami pranešimai (angl. message) aprašo bendradarbiavimo griežtą eiliškumą bei laiką, bei apibūdina sąveikos tikslą. Sukurtoje diagramoje yra pavaizduotas pagrindinis scenarijus kai skyriaus vadovas gauna krovinio pažeidimo specifinį pranešimą iš sistemos vadovo. Tada jis patvirtina arba atmeta tolimesnį krovinio judėjimą sukuriant kitą specifinį pranešimą, kuris yra siunčiamas sistemos vadovui bei žmogui kuris yra vietoje atsakingas už krovinio transportavimą. Papildomas „opt“ fragmento panaudojimas reiškia, kad keletas pranešimų yra vykdoma dėl tos pačios sąlygos „[damaged]“.

Didžiausia atsakomybė čia yra suteikiama sistemos vadovams, nes jie pirmiausia gauna pirminius krovinių transportavimo duomenys ir pirmieji atlieka prognozavimo, analizavimo bei pranešimų siuntimo veiklas. Taip bendrai yra užtikrinamas abipusis realaus laiko bendradarbiavimas tarp visų pagrindinių sistemos objektų (skyriaus vadovo, sistemos vadovo ir vežėjo). Tai leidžia efektyviai išnaudoti laiką bei kitus ne mažiaus svarbius resursus bei jų optimalų panaudojimą. Pirminė analizė gali iškarto pasakyti ar krovinio pažeidimo riziką yra didelė palyginus su kitomis to paties krovinio transportavimas prie panašių sąlygų. Taip įdiegiamas papildomas duomenų bazių užklausų sudarymo funkcionalumas bei iš to išplaukiantis tolimesnis bendradarbiavimas tarp naujų sistemos objektų (16 ir 17 pav.).

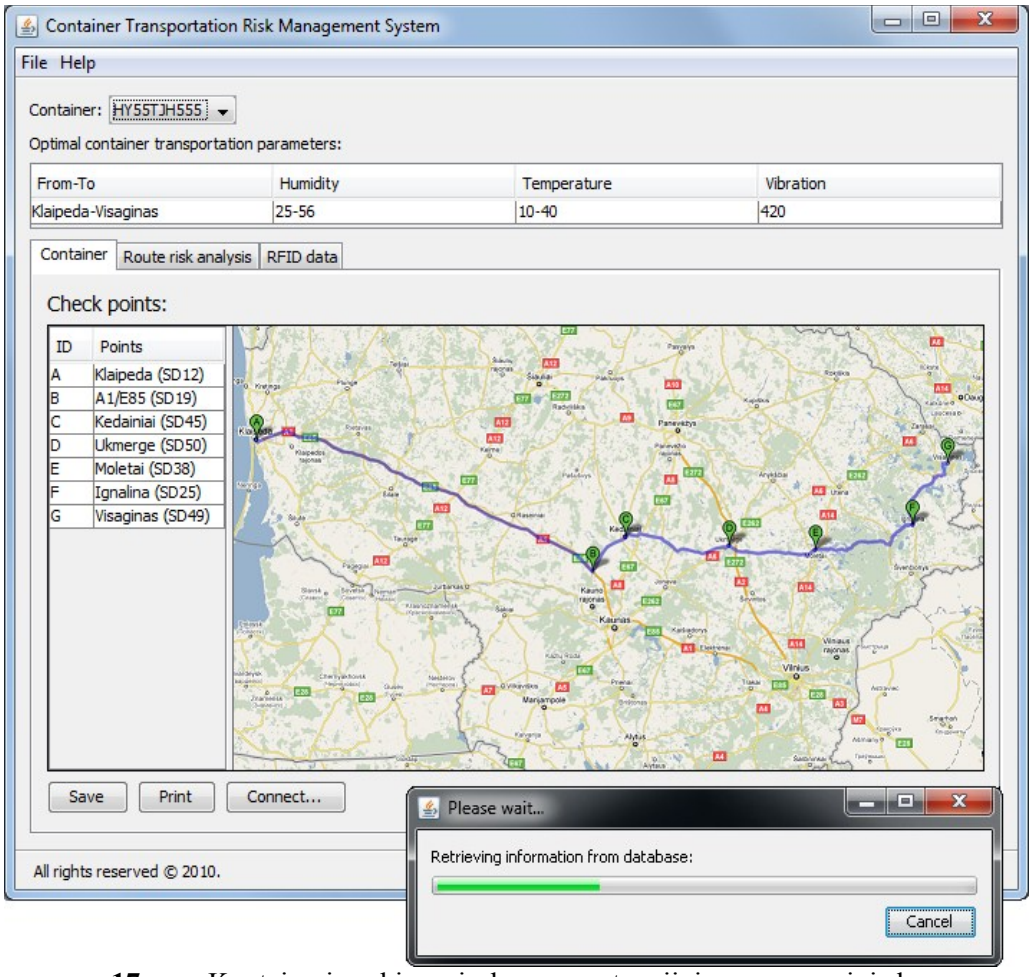


16 pav. Konteinerių parinkimo programinis langas

Tokiu būdu, sistema gali automatiškai reaguoti į nuolat kintančias sąlygas, bei pati priimti sprendimus: jeigu objektas pajudėjo be leidimo, arba jeigu atsiranda aiški problemą transportavimo metu, tai automatiški sistema sudaro problemos eliminavimo strategiją (verslo taisyklės) į kuriuos įeina specialių pranešimų, SMS žinučių generavimas be sistemos ar skyriaus vadovų sutikimo. Kas leis dar efektyviau išnaudoti reagavimo laiką bei leis vystyti kitas intelektualias posistemes.

Kuriamos programinės įrangos vizija susideda iš kelių etapų.

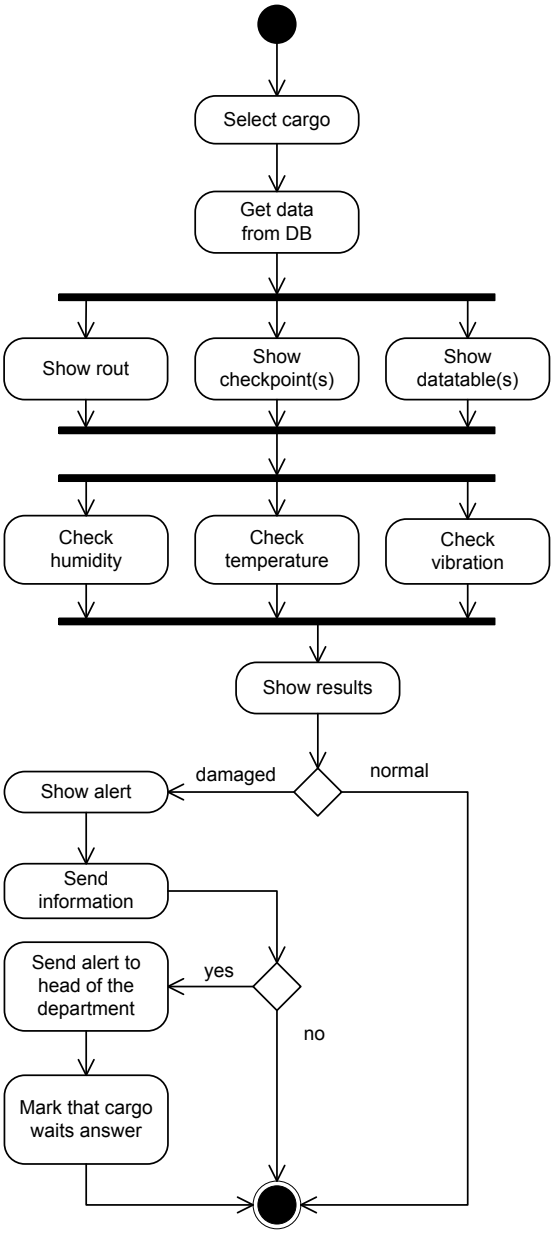
- Pagal vartojo (toliau yra aprašomas sistemos vadovas) poreikius yra pateikiamas pirmas pagrindinis vartoto-sąsajos programinis langas, kur yra pateikiama galimybė rankinių būdų išrinkti norimą datą bei konteinerį, sekti visus atnaujinimus kurie atsiranda paspaudus mygtuką „update“. Tada speciali užklausą yra sudaroma kuri kreipiasi į pagrindinę duomenų bazę kur yra saugomi visų konteinerių parametrai, numeriai bei gauti sensoriniai parametrai prie kiekvieno atskiro konteinerio.
- Papildoma rūšiavimo galimybė palengvina paieškos mechanizmą, kur pagrindiniai paieškos kriterijai yra: visi šiuo metu užsiregistruoti konteineriai (angl. all), atvikę į numatytą patikrinimo zoną (angl. arrived), dar kelyje (angl. en route) ir sistemos automatiškai nustatyti kaip pažeisti (angl. damaged) (18 pav.).



17 pav. Konteinerio sekimas ir duomenų atnaujinimo programinis langas

Kitas nemažiau svarbus paieškos laukas yra suprojektuotas naudoti raktinių žodžių paiešką, „search“ laukelyje išvedus atitinkamus tekstinius arba skaitinius ženklus. Papildomi saugumo mechanizmai turi užtikrinti, kad visi išoriniai ir vidiniai sistemos pažeidimai yra greitai pašalinami. Aktyvių žymių (Active RFID) panaudojimas užtikrina kad duomenys yra renkami automatiškai dideliu atstumu bei judant konteineriams ir be įsikišimo.

Tokie pagalbiniai saugumo mechanizmai leis sistemai būti labiau savarankiška, bei mažins žmonių klaidų skaičių rankiniu būdu tikrinant reikiamus transportavimo parametrus. Tai sumažins klaidingų pranešimų skaičių sistemoje ir dar labiau padidins jos efektyvumą (18 pav.).

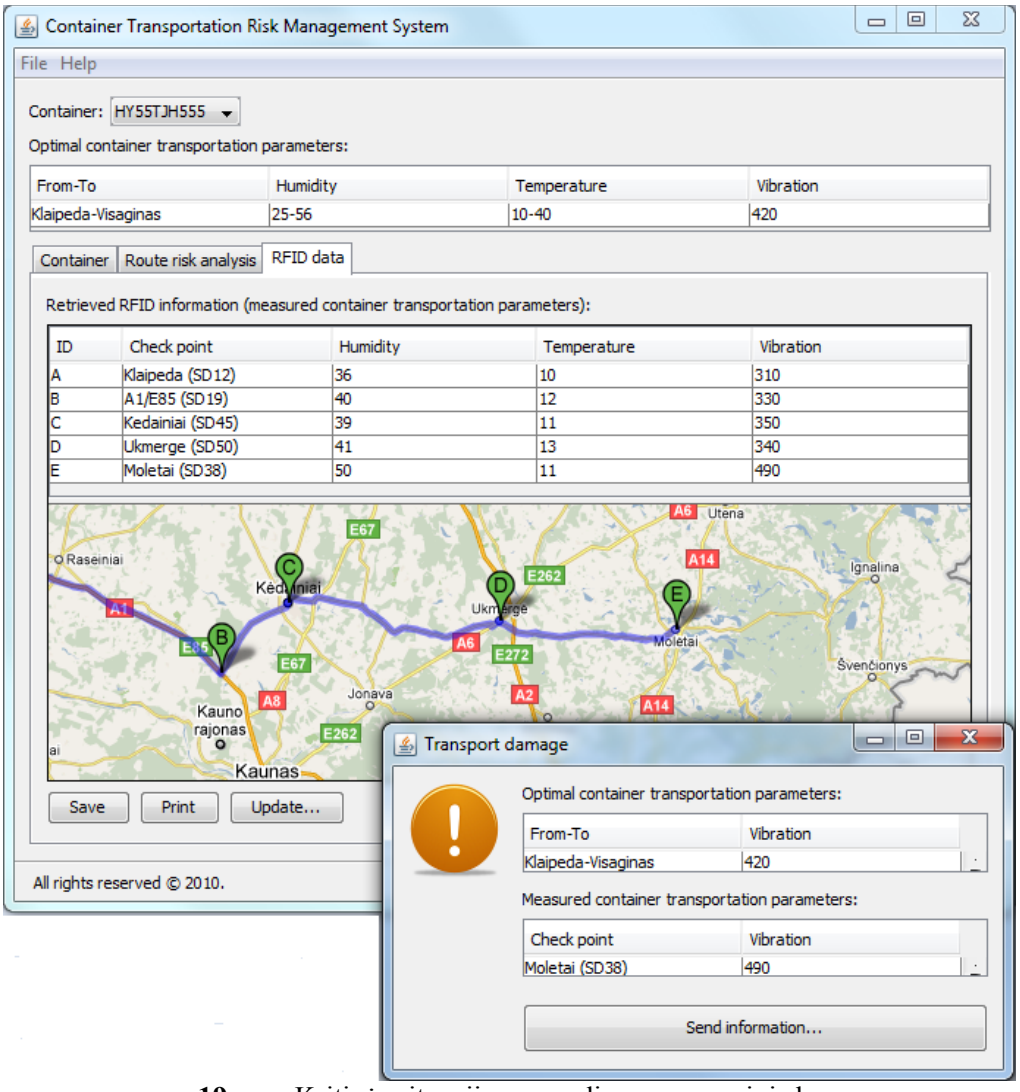


18 pav. Spendimų priėmimo veiklų diagrama

Pasirinkus norimą konteinerį, yra galimybė stebėti jo judėjimą realiu laiku naudojant GPS arba kitą palydovinės navigacijos techninę įrangą, arba stebėti konteinerio judėjimą palei kiekvieną iš

patikrinimo taškų „points“, nurodant kelio ruožo pirminius ir galutinius taškus „Check Points – ID-Points“. Krovinio optimalus transportavimo parametrai nurodomi langelyje „Optimal container transportation parameters“ kurie pilnai atitinka naudojamus sensorius tam konteineryje ir nusako kiekvieno parametri kritines ribas. Šitie parametrai irgi yra keliami iš duomenų bazės kai yra atliekama papildomą vieno konteinerio peržiūros užklausa. Realaus laiko atnaujinimas „connect...“ yra irgi įdiegtas šitame etape, nes konteinerio padėtys arba parametrai gali keistis žiūrint esamus duomenys. Todėl reikalinga nuolatinio stebėjimo funkcionalumas (19 pav.). Tai leidžia realiu laiku stebėti transportavimo procesą ir greitai reaguoti į pokyčius.

Kita nemažiau svarbi naudojama diagrama yra veiklos diagrama. Veiklos diagrama yra vienas iš UML diagramų tipų kuris yra labai artimos daugelio programuotojų naudojamoms programų blokinėms schemoms. Šiuo atveju ji vaizduoja darbų srautus (objektų sąveikas) sistemoje susijusius su duomenų palyginimu ir reagavimu sprendžiant tolimesnius transportavimo klausimus (18 pav.).



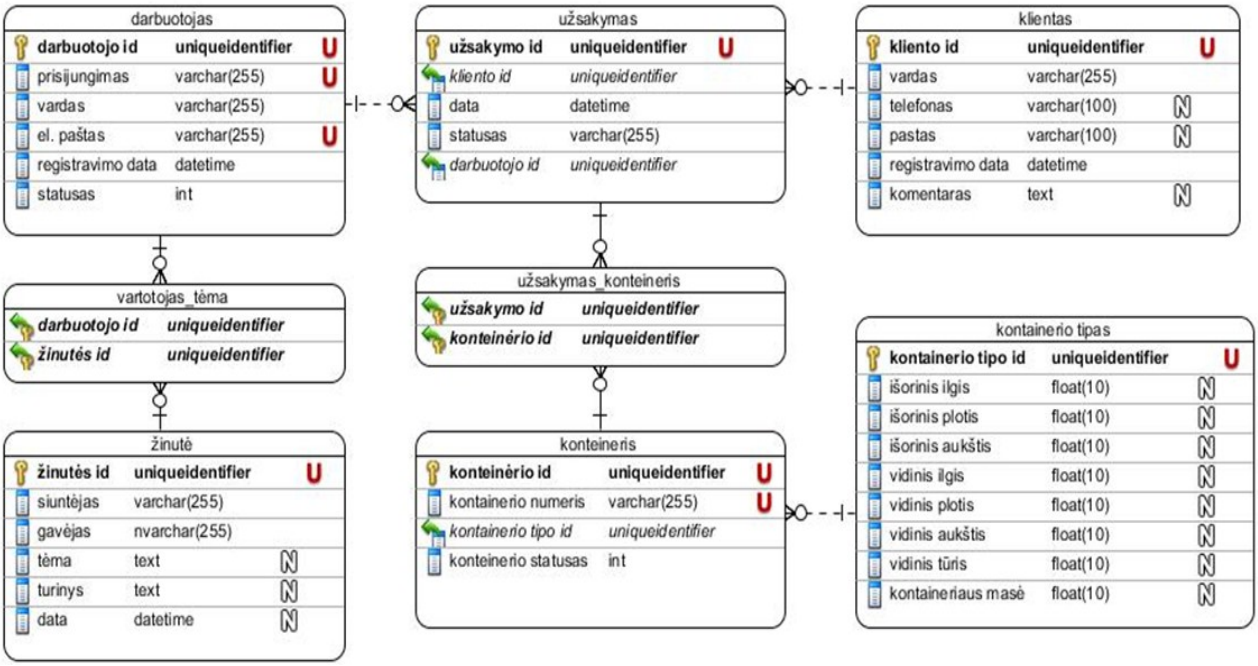
19 pav. Kritinės situacijos sprendimo programinis langas

Čia pirminis etapas yra aprašomas kaip užklausos pateikimas „select cargo“ ir gautas atsakas „Get data from DB“ (duomenų gavimas iš ankščiau minėtos pagrindinės duomenų bazės). Sekantis etapas susideda iš duomenų atvaizdavimo (17 ir 19 pav.). Tolimesniame etape yra vykdomas užprogramuotas duomenų palyginimas vienoje iš posistemių, kur kritinės ribos yra lyginamos su sensorių parodymais. Sistema turi būti suprogramuota taip, kad automatiškai atpažintu leistinas paklaidos ribas vertinant krovinio pakavimą, konteinerio sandarumą (egzistuojantis mechaniniai pažeidimai), krovinio tipą bei oro sąlygas kelio ruože. Tokie parametrai turi būti vertinami tik statistiniu požiūriu su ne mažiau 95% patikimumo intervalu. Galutiniame etape seka rezultatų atvaizdavimas programiniame lange, kur nurodomi galimi pažeidimai kroviniui bei pažeidimo dydis. Toliau seka sistemos vadovo atsakomybė įspėti skyriaus vadovą apie galimą pažeidimą arba pačiam praleisti krovinį „Send information...“ (19 pav.). Tačiau šituo atvejų visi sprendimai yra automatiškai fiksuojami ir siunčiami į atitinkamą duomenų bazę ir skyriaus vadovui (pagal nustatus vidinius verslo procesus). Taip yra atliekamas sprendimo priėmimo funkcionalumas, kuris leidžia vidutinio lygio vadovams priimti jų nuomone geriausius sprendimus remiantis realių duomenų analize, naudojat „RFID data“ duomenų atvaizdavimo lauką programiniame lange. Kas leis nuimti nereikalingą papildomą atsakomybės naštą nuo darbuotojų ir automatiškai padidins darbuotojų našumus bei vidinių verslo procesų efektyvumą.

3.2.4. Duomenų saugumo aktualumo problema

Plačiai paplitus naujoms informacinėms technologijoms, atsirado naujos problemos susijusios su duomenų saugumu ir patikimumu BST ir bendroje informacinėje sistemoje. Šiuolaikinės kuriamos sistemos pagal visas technologijų vystymo tendencijas turi sugebėti pakankamai gerai pasipriešinti išorės atakoms, vidinėms gedimams ir greitai atsigauti nuo jų. Tai turi būti daroma saugant visą informaciją duomenų bazėse (20 Pav.).

Kita vertus, saugumo užtikrinimas nėra nuolatinis vieno lygmens sistemos saugumo monitoringas. Sistemoje turi būti sudaryta atitinkama kelių saugumo lygmenų visų vartotojų hierarchija bei nustatyti prieigos prie sistemos reguliavimo mechanizmai. Vartotojų poreikių valdymas bei jų galimybių nustatymas turi būti paremtas atitinkamais autentikavimo algoritmais, atitinkamu leidimų priskirimu.



20 pav. Sistemos duomenų bazės modelis

Taip užtikrinant, kad tik tinkami vartotojai turėtų prieigą prie visos reikiamos informacijos. Atakų monitoringas, atpažinimas, atsigavimas ir bendrai saugumo užtikrinimas turi būti aprašyti verslo procesų lygmenyje ir patvirtinti prie visų saugumo lygių. Turi būti aprašyti procesai kurie stebės neleistinus įsibrovimus į sistemą, kurs naujas saugumo strategijas ir technologijas ir atstatinės pažeidimus iš rezervinių resursų. Visa tai turi būti suvesta į naujų protokolų, maršrutizavimo algoritmų bei visų vartotojų saugumo lygmenų atnaujinimus pagal esamus poreikius.

IŠVADOS

- Išanalizavus naujausias (M)BST taikomas technologijas, bei ištyrus jų vystymo tendencijas darbe buvo pasirinkta “National Instruments” modeliavimo platforma palaikanti naujausią “ZigBee” ryšio standartą ir sudaryta sistemos optimizavimo tikslo funkcija.
- Išanalizavus energijos praradimus sistemos tinklo modelyje vertinant du skirtingus sumodeliuotus atvejus, nustatyta, kad didesnis tinklo efektyvumas (>1.69%) yra pasiekiamas kai maršrutizavime yra įvertinami ne tik trumpiausi atstumai tarp mazgų (vieno prioriteto maršrutizavimas), bet ir atskirų mazgų patikimumo parametrai (dviejų prioritetų maršrutizavimas).
- Atlikus mazgų ir perduotų duomenų patikimumo analizę sumodeliuotame tinkle, paaiškėjo kad didesnis patikimumas (>10%) yra pasiekiamas kai yra naudojamas dviejų prioritetų maršrutizavimas tinkle.
- Suprojektuotas intermodalinių konteinerių monitoringo ir valdymo sistemos prototipas. Jame sensoriniai mazgai yra integruojami į intermodalinius konteinerius, kurie fiksuoja krovinių transportavimo sąlygas ir perduoda informaciją tiesiogiai ar per kitus mazgus ((M)BST) optimaliausiu pasiūlytu būdu vertinant prioritetų maršrutizavimą tinkle.

Įvykdžius visus užsibrėžtus uždavinius buvo pasiektas darbo tikslas – suprojektuota intermodalinių krovinių monitoringo ir valdymo sistemą naudojant mobilių bevielių sensorinių tinklų technologijas, bei ištirtos šių tinklų optimizavimo galimybes. Taip pat, atsižvelgiant į gautus rezultatus, galima teigti, kad norint pratęsti sistemos funkcionavimo laiką ir užtikrinti perduotų duomenų aukštą patikimumo lygį, reikia kurti arba tobulinti jau egzistuojančius maršrutizavimo ir duomenų siuntimo algoritmus.

Šie rezultati sudare prielaidas tolimesnems aukštesnio lygio tęstiniams tyrimams, todėl autorius sieks šiuos tyrimus tęsti doktorantūroje.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. P. Delannoy, H.D. Nguyen, M. Marot, N. Agoulmine, M. Becker. WiMax quality-of-service estimations and measurement. Computer Communications, Nr. 33 (1), 2010. p. 71-77
2. L. Chrost, A. Brachman. Towards a common benchmark in WiMAX environment. Computer Communications, Nr. 33 (1), 2010, p. 78-85
3. M. Ibrahim, K. Khawam, A.E. Samhat, Samir Tohme. Analytical framework for dimensioning hierarchical WiMax–WiFi networks. Computer Networks, Nr. 53 (3), 2009. p. 299-309
4. T.M. Fernández-Caramés, M. González-López, L. Castedo. Mobile WiMAX for vehicular applications: Performance evaluation and comparison against IEEE 802.11p/a. Computer Networks, In Press, Corrected Proof, 2011.
5. C. Torres, P. Glösekötter. Reliable and Energy Optimized WSN Design for a Train Application. Journal of Systems Architecture, In Press, Accepted Manuscript, 2011
6. K. Baoqiang, C. Li, Z. Hongsong, X. Yongjun. Accurate energy model for WSN node and its optimal design. Journal of Systems Engineering and Electronics, Nr. 19 (3), 2008, p. 427-433
7. H. Bany Salameh, T. Shu, M. Krunz. Adaptive cross-layer MAC design for improved energy-efficiency in multi-channel wireless sensor networks. Ad Hoc Networks, Nr. 5 (6), 2007, p. 844-854
8. O. Bischoff, X. Wang, N. Heidmann, R. Laur, S. Paul. Implementation of an ultrasonic distance measuring system with kalman filtering in wireless sensor networks for transport logistics. Procedia Engineering, Nr. 5, 2010, p. 196-199
9. D. Tacconi, D. Miorandi, I. Carreras, F. Chiti, R. Fantacci. Using wireless sensor networks to support intelligent transportation systems. Ad Hoc Networks, Nr. 8 (5), 2010, p. 462-473
10. J. Yick, B. Mukherjee, D. Ghosal. Wireless sensor network survey. Computer Networks, Nr. 52 (12), 2008, p. 2292-2330.
11. A. Wessels, X. Wang, R. Laur, W. Lang. Dynamic indoor localization using multilateration with RSSI in wireless sensor networks for transport logistics. Procedia Engineering, Nr. 5, 2010, p. 220-223
12. National Instruments. 2011. [žiūrėta 2011-05-12]. Prieiga per internetą: http://www.ni.com/wsn/
13. T.H. Shin, S. Chin, S.W. Yoon, S.W. Kwon. A service-oriented integrated information framework for RFID/WSN-based intelligent construction supply chain management. Automation in Construction, In Press, Corrected Proof, 2011

14. L. Qi, J. Zhang, M. Xu, Z. Fu, W. Chen, X. Zhang. Developing WSN-based traceability system for recirculation aquaculture. Mathematical and Computer Modelling, Nr. 53 (11-12), 2011, p. 2162-2172
15. D. Wang, L. Lin, L. Xu. A study of subdividing hexagon-clustered WSN for power saving: Analysis and simulation. Ad Hoc Networks, In Press, Corrected Proof, 2011
16. A. De Paola, S. Gaglio, G. Lo Re, M. Ortolani. Sensor$_9$k: A testbed for designing and experimenting with WSN-based ambient intelligence applications. Pervasive and Mobile Computing, In Press, Corrected Proof, 2011
17. D.L. Xie, F.H. Wang. A self-adjustment QoS architecture for wireless sensor networks. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, Nr. 17 (2), 2010, p. 79-83
18. N.N. Qin, L. Zhang, X.M. Shan, B.G. Xu. Locomotion trajectory with cooperative metrics in wireless sensor networks. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, Nr. 14 (2),2007, p. 64-68
19. N. Aitsaadi, N. Achir, K. Boussetta, G. Pujolle. Artificial potential field approach in WSN deployment: Cost, QoM, connectivity, and lifetime constraints. Computer Networks, Nr. 55 (1), 2011, p. 84-105
20. Z. Zhang, W.K. Chan, T.H. Tse, Heng Lu, Lijun Mei. Resource prioritization of code optimization techniques for program synthesis of wireless sensor network applications. Journal of Systems and Software, Nr. 82 (9), 2009, p. 1376-1387
21. V. Gunasekaran, F.C. Harmantzis. Towards a Wi-Fi ecosystem: Technology integration and emerging service models. Telecommunications Policy, Nr. 32 (3-4), 2008, p. 163-181
22. W. Lemstra, V. Hayes. License-exempt: Wi-Fi complement to 3G. Telematics and Informatics, Nr. 26 (3), 2009, p. 227-239
23. P. Chandra, D. Lide. Voice over Wi-Fi and Other Wireless Technologies. Wi-Fi Telephony, 2007, p. 235-260
24. J. Xia. The third-generation-mobile (3G) policy and deployment in China: Current status, challenges, and prospects. Telecommunications Policy, Nr. 35 (1), 2011, p. 51-63
25. S.T. Abu. Technological innovations and 3G mobile phone diffusion: Lessons learned from Japan. Telematics and Informatics, Nr. 27 (4), 2010, p. 418-432
26. W. Lehr, W. Lee. McKnight. Wireless Internet access: 3G vs. WiFi?. Telecommunications Policy, Nr. 27 (5-6), 2003, p. 351-370
27. Y.F. Kuo, C.W. Yu. 3G telecommunication operators' challenges and roles: A perspective of mobile commerce value chain. Technovation, Nr. 26 (12), 2006, p. 1347-1356

28. M. Pagani, C.H. Fine. Value network dynamics in 3G–4G wireless communications: A systems thinking approach to strategic value assessment. Journal of Business Research, Nr. 61 (11), 2008, p. 1102-1112
29. K. Akkaya, F. Senel, B. McLaughlan. Clustering of wireless sensor and actor networks based on sensor distribution and connectivity. Journal of Parallel and Distributed Computing, Nr. 69 (6), 2009, p. 573-587
30. W.H. Liao, Y. Kao, C.M. Fan. Data aggregation in wireless sensor networks using ant colony algorithm. Journal of Network and Computer Applications, Nr. 31 (4), 2008, p. 387-401
31. M. Iftikhar, B. Landfeldt, S. Zeadally, A. Zomaya. Service level agreements (SLAs) parameter negotiation between heterogeneous 4G wireless network operators. Pervasive and Mobile Computing, In Press, Corrected Proof, 2011
32. I.F. Akyildiz, W.Y. Lee, K.R. Chowdhury. CRAHNs: Cognitive radio ad hoc networks. Ad Hoc Networks, Nr. 7 (5), 2009, p. 810-836
33. H. Hassanein, T. You, H.T. Mouftah. Infrastructure-based MAC in wireless mobile ad-hoc networks. Ad Hoc Networks, Nr. 3 (6), 2005, p. 717-743
34. H. Mahmood, C. Comaniciu. Interference aware cooperative routing for wireless ad hoc networks. Ad Hoc Networks, Nr. 7 (1), 2009, p. 248-263
35. S.L. Su, Y.W. Su. Single phase admission control for QoS-routing protocol in ad hoc networks. Ad Hoc Networks, In Press, Corrected Proof, 2011
36. R. Guimarães, L. Cerdà, J.M. Barceló, J. García, M. Voorhaen, C. Blondia. Quality of service through bandwidth reservation on multirate ad hoc wireless networks. Ad Hoc Networks, Nr. 7 (2), 2009, p. 388-400
37. X. Wei, G. Chen, Y. Wan, F. Mtenzi. Optimized priority based energy efficient routing algorithm for mobile ad hoc networks. Ad Hoc Networks, Nr. 2 (3), 2004, p. 231-239
38. C.S. Hsu, Y.C. Tseng, J.P. Sheu. An efficient reliable broadcasting protocol for wireless mobile ad hoc networks. Ad Hoc Networks, Nr. 5 (3), 2007, p. 299-312
39. H. Kim, J.M. Chung, C. Hyun Kim. Secured communication protocol for internetworking ZigBee cluster networks. Computer Communications, Nr. 32 (13-14), 2009, p. 1531-1540
40. M. Benocci, C. Tacconi, E. Farella, L. Benini, L. Chiari, L. Vanzago. Accelerometer-based fall detection using optimized ZigBee data streaming. Microelectronics Journal, Nr. 41 (11), 2010, p. 703-710
41. N. Erasala, D.C. Yen. Bluetooth technology: a strategic analysis of its role in global 3G wireless communication era. Computer Standards & Interfaces, Nr. 24 (3), 2002, p. 193-206

42. M.C.H. Chek, Y.K. Kwok. Design and evaluation of practical coexistence management schemes for Bluetooth and IEEE 802.11b systems. Computer Networks, Nr. 51 (8), 2007, p. 2086-2103
43. N. Bisnik, A.A. Abouzeid. Queuing network models for delay analysis of multihop wireless ad hoc networks. Ad Hoc Networks, Nr. 7 (1), 2009, p. 79-97
44. C.M. Wu. Dynamic frame length channel assignment in wireless multihop ad hoc networks. Computer Communications, Vol .30 (18), 2007, p. 3832-3840
45. J. Redi, S. Kolek, K. Manning, C. Partridge, R. Rosales-Hain, R. Ramanathan, I. Castineyra. JAVeLEN – An ultra-low energy ad hoc wireless network. Ad Hoc Networks, Nr. 6 (1), 2008, p. 108-126
46. S. Tian, S.M. Shatz, Y. Yu, J. Li. Querying sensor networks using ad hoc mobile devices: A two-layer networking approach. Ad Hoc Networks, Nr. 7(5), 2009, p. 1014-1034
47. E. Ekici, S. Vural, J. McNair, D. Al-Abri. Secure probabilistic location verification in randomly deployed wireless sensor networks. Ad Hoc Networks, Nr. 6 (2), 2008, p. 195-209
48. H. Alemdar, C. Ersoy. Wireless sensor networks for healthcare: A survey. Computer Networks, Nr. 54 (15), 2010, p. 2688-2710
49. M. Won, S. M. George, R. Stoleru. Towards robustness and energy efficiency of cut detection in wireless sensor networks. Ad Hoc Networks, Nr. 9 (3), 2011, p. 249-264
50. K. K. Rachuri, C. Siva Ram Murthy. On the scalability of expanding ring search for dense wireless sensor networks. Journal of Parallel and Distributed Computing, Nr. 70 (9), 2010, p. 917-929
51. M. Liu, S. Xu, S. Sun. An agent-assisted QoS-based routing algorithm for wireless sensor networks. Journal of Network and Computer Applications, In Press, Corrected Proof, 2011
52. N.A. Pantazis, D.J. Vergados, D.D. Vergados, C. Douligeris. Energy efficiency in wireless sensor networks using sleep mode TDMA scheduling. Ad Hoc Networks, Nr. 7 (2), 2009, p. 322-343
53. T. Zhu, Z. Zhong, T. He, Z.L. Zhang. Energy-synchronized computing for sustainable sensor networks. Ad Hoc Networks, In Press, Corrected Proof, 2010
54. W.R. Claycomb, D. Shin. A novel node level security policy framework for wireless sensor networks. Journal of Network and Computer Applications, Nr. 34 (1), 2011, p. 418-428
55. N. Bulusu, D. Estrin, L. Girod, J. Heidemann, Scalable coordination for wireless sensor networks: self-configuring localization systems. Iš ISCTA. 2001 [žiūrėta 2006-05-16]. Prieiga per internetą: http://www.media.mit.edu/resenv/classes/MAS965/readings/bulusu2001.pdf.

56. J. Ben-Othman, B. Yahya. Energy efficient and QoS based routing protocol for wireless sensor networks. Journal of Parallel and Distributed Computing, Nr. 70 (8), 2010, p. 849-857
57. S. Kajioka, N. Wakamiya, H. Satoh, K. Monden, M. Hayashi, S. Matsui, M. Murata. A QoS-aware routing mechanism for multi-channel multi-interface ad-hoc networks. Ad Hoc Networks, Nr. 9 (5), 2011, p. 911-927
58. J.L. Chen, M.C. Chen, Y.R. Chian. QoS management in heterogeneous home networks. Computer Networks, Nr. 51 (12), 2007, p. 3368-3379
59. L. Lin, N.B. Shroff, R. Srikant. Energy-aware routing in sensor networks: A large system approach. Ad Hoc Networks, Nr. 5 (6), 2007, p. 818-831
60. Z. Zhou, X. Xiang, X. Wang, J. Pan. A holistic sensor network design for energy conservation and efficient data dissemination. Computer Networks, Nr. 55 (1), 2011, p. 131-146
61. Q. Gao, K.J. Blow, D.J. Holding, I.W. Marshall, X.H. Peng. Radio range adjustment for energy efficient wireless sensor networks. Ad Hoc Networks, Nr. 4 (1), 2006, p. 75-82
62. Y.H. Zhu, W.D. Wu, J. Pan, Y.P. Tang. An energy-efficient data gathering algorithm to prolong lifetime of wireless sensor networks. Computer Communications, Nr. 33 (5), 2010, p. 639-647
63. J. Deng, Y.S. Han, W.B. Heinzelman, P.K. Varshney. Balanced-energy sleep scheduling scheme for high-density cluster-based sensor networks. Computer Communications, Nr. 28 (14), 2005, p. 1631-1642
64. K. Lin, M. Chen, S. Zeadally, J.J.P.C. Rodrigues. Balancing energy consumption with mobile agents in wireless sensor networks. Future Generation Computer Systems, In Press, Corrected Proof, 2011
65. M.Y. Hsieh, Y.M. Huang, H.C. Chao. Adaptive security design with malicious node detection in cluster-based sensor networks. Computer Communications, Nr. 30 (11-12), 2007, p. 2385-2400
66. N. Boudriga, M.S. Obaidat. Mobility, sensing, and security management in wireless ad hoc sensor systems. Computers & Electrical Engineering, Nr. 32 (1-3), 2006, p. 266-276
67. M. Goyal, D. Rohm, W. Xie, S.H. Hosseini, K.S. Trivedi, Y. Bashir, A. Divjak. A stochastic model for beaconless IEEE 802.15.4 MAC operation. Computer Communications, In Press, Corrected Proof, 2010
68. E.J. Kim, M. Kim, S.K. Youm, S. Choi, C.H. Kang. Priority-based service differentiation scheme for IEEE 802.15.4 sensor networks. AEU - International Journal of Electronics and Communications, Nr. 61 (2), 2007, p. 69-81

69. F. Eady. A Look at the ZMD 900-MHzIEEE 802.15.4/ZigBee-Ready Radio. Hands-On ZigBee, 2007, p. 43-61
70. M. Martalò, S. Busanelli, G. Ferrari. Markov Chain-based performance analysis of multihop IEEE 802.15.4 wireless networks. Performance Evaluation, Nr. 66 (12), 2009, p. 722-741
71. H.B. Cheng, G. Yang, S.J. Hu. NHRPA: a novel hierarchical routing protocol algorithm for wireless sensor networks. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, Nr. 15 (3), 2008, p. 75-81
72. C. Torres, P. Glösekötter. Reliable and Energy Optimized WSN Design for a Train Application. Journal of Systems Architecture, In Press, Accepted Manuscript, 2011
73. B.A. Attea, E.A. Khalil. A new evolutionary based routing protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks. Applied Soft Computing, In Press, Corrected Proof, 2011
74. E. Stavrou, A. Pitsillides. A survey on secure multipath routing protocols in WSNs. Computer Networks, Nr. 54 (13), 2010, p. 2215-2238
75. T.A. Babbitt, C. Morrell, B.K. Szymanski, J.W. Branch. Self-selecting reliable paths for wireless sensor network routing. Computer Communications, Nr. 31, (16), 2008, p. 3799-3809
76. M. Liu, S. Xu, S. Sun. An agent-assisted QoS-based routing algorithm for wireless sensor networks. Journal of Network and Computer Applications, In Press, Corrected Proof, 2011
77. M. Saleem, G.A. Di Caro, M. Farooq. Swarm intelligence based routing protocol for wireless sensor networks: Survey and future directions. Information Sciences, In Press, Corrected Proof, 2010
78. W. Yang, X. Yang, S. Yang, D. Yang. A greedy-based stable multi-path routing protocol in mobile ad hoc networks. Ad Hoc Networks, Nr. 9 (4), 2011, p. 662-674
79. N. Meghanathan. A location prediction based routing protocol and its extensions for multicast and multi-path routing in mobile ad hoc networks. Ad Hoc Networks, In Press, Corrected Proof, 2011
80. M. Khan, G. Pandurangan, B. Bhargava. Energy-Efficient Routing Schemes for WSN. [Žiūrėta 2011-05-02]. Internetinė prieiga: http://staff.vbi.vt.edu/maleq/papers/routing.pdf
81. J. Al-Jaroodi, I. Jawhar, A. Al-Dhaheri, F. Al-Abdouli, N. Mohamed. Security middleware approaches and issues for ubiquitous applications. Computers & Mathematics with Applications, Nr. 60(2), 2010. p. 187-197
82. M. Sher, T. Magedanz. A vulnerabilities analysis and corresponding middleware security extensions for securing NGN applications. Computer Networks, Nr. 51(16), 2007, p. 4697-4709

83. J. Blumenthal, F. Reichenbach, D. Timmermann. Minimal Transmission Power vs. Signal Strength as Distance Estimation for Localization in WSN. [Žiūrėta 2011-05-02]. Internetinė prieiga: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.72.8233
84. D. Adomaitis, V. Bulbenkienė, S. Jakovlev, G. Pridotkas, A. Andziulis. Mobile Services Providing Devices Rating Based on Priority Settings in Wireless Communication Systems. Communications in Computer & Information Science. The International Conference on Digital Information Processing and Communications. Ostrava, Czech Republic, July 7-9, 2011 (ICDIPC'11), Part I, CCIS 188, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. pp. 1–8.
85. A. Andziulis; S. Jakovlev; D. Adomaitis; R. Steponavicius; M. Kurmis; V. Pareigis. Integration of Information system Models in Intermodal Container Transportation Systems. Proceeding of the 14th International Conference. Transport Means 2010. Kaunas, Lithuania, October 21-22, 2010. p. 127-130.
86. A. Andziulis; S. Jakovlev; D. Adomaitis; D. Dzemydiene. Integration of Mobile Control Systems into Intermodal Container Transportation Management. Transport. Taylor&Francis, In Press, Corrected Proof, 2011. pp. 8.
87. A. Andziulis; R. Plestys; S. Jakovlev; D. Adomaitis; K. Gerasimov; M. Kurmis; V. Pareigis. Priority Based Tag Authentication and Routing Algorithm for Intermodal Containers RFID Sensor Network. Transport. Taylor&Francis, In Press, Corrected Proof, 2011. pp. 10.