

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
INFORMATIKOS FAKULTETAS
KOMPIUTERIŲ KATEDRA

Vitalijus Martusevičius

**Mikrosensorinio tinklo autolokacijos sistemos
sudarymas ir tyrimas**

Magistro darbas

Darbo vadovas

prof. habil. dr. Egidijus Kazanavičius

Kaunas, 2007

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
INFORMATIKOS FAKULTETAS
KOMPIUTERIŲ KATEDRA

Vitalijus Martusevičius

**Mikrosensorinio tinklo autolokacijos sistemos
sudarymas ir tyrimas**

Magistro darbas

Recenzentas

doc. dr. Pranas Kanapeckas
2007-05-

Vadovas

prof. habil. dr. Egidijus Kazanavičius
2007-05-

Atliko

IFM-1/1 gr. stud.
Vitalijus Martusevičius
2007-05-

Kaunas, 2007

TURINYS

SUMMARY	5
1 ĮVADAS	6
2 EGZISTUOJANČIŲ SISTEMŲ ANALIZĖ	8
2.1 Klasifikavimas	8
2.2 Centralizuoti metodai.....	9
2.2.1 Padėties įvertinimas remiantis iškilia ryšio zona.....	9
2.2.2 Lokalizavimo metodas MDS-MAP	11
2.3 Vieno šuolio padėties nustatymo metodai	13
2.3.1 Padėties nustatymo sistema „Lighthouse“	13
2.4 Paskirstyti metodai.....	16
2.4.1 Sistema AhLOS	16
2.4.2 Padėties nustatymo sistemos APS	18
2.5 Santykinis padėties nustatymas	21
2.5.1 Lokalios padėties nustatymo sistema.....	21
3 ANALIZĖS IŠVADOS.....	24
4 AUTOLOKACIJOS SISTEMOS MODELIS	25
4.1 Lokali mazgo koordinacių sistema	25
4.2 Tinklo koordinacių sistema.....	28
4.2.1 Mazgo koordinacių sistemos kryptis	28
4.2.2 Tinklo koordinacių sistemos formavimas.....	31
4.2.3 Tinklo koordinacių sistemos centras.....	32
4.2.3.1 Pagrindinės mazgų grupės identifikavimas	33
4.2.3.2 Pagrindinės mazgų grupės tikslinimas.....	34
4.2.4 Tinklo koordinacių sistemos kryptis.....	34
4.2.5 Koordinacių sistemos ryšys	36
4.3 Mazgų padėties nustatymo klaidos	36
4.3.1 Klaidų įvertinimas.....	37
4.4 Informacijos perdavimo kaštai.....	38
5 EKSPERIMENTINĖ DALIS	40
5.1 Mazgo signalo stiprumo įtaka tinklo ryšiui	41
5.2 Tinklo koordinacių sistemos centro stabilumas.....	43
5.3 Tinklo koordinacių sistemos krypties kitimas	44

6	IŠVADOS	46
7	TERMINŲ SANTRUMPŲ ŽODYNAS	48
8	NAUDOTA LITERATŪRA.....	49
9	PRIEDAI.....	51

SUMMARY

Development and analysis of a positioning system for wireless sensor networks

Wireless sensor networks are composed by a large set of small independent battery-powered devices, where low cost and low power consumption are basic requirements. In such networks, where the number of nodes may be in order of thousands, creation of network coordinate system is very complicated task. The main issues are large amount of nodes, their mobility and demand to reduce communication costs.

In this thesis we review positioning problem and propose a distributed, infrastructureless positioning system model that does not rely on landmarks. Instead, the algorithm uses distances and angles between nodes to build a relative coordinate system.

1 ĮVADAS

Mikrosensoriniais vadinami tinklai, kurie sudaryti iš daug mažų nepriklausomų baterijomis maitinamų įrenginių, kurių pagrindiniai reikalavimai yra nedideli energijos suvartojimo resursai ir maža savikaina. Kai tinklo mazgų skaičius siekia tūkstančius, egzistuojančios GPS (*angl.* global positioning system) sistemos tampa nepriimtinos, nes įdiegti į kiekvieną tinklo mazgą GPS imtuvą būtų labai brangu ir nepraktiška.

Vis didesnę reikšmę įgyja mikrosensorinių tinklų projektavimas, kuriuose bene svarbiausia užduotis yra sudaryti metodiką kuo paprastesnių tinklo mazgų projektavimui, kad mazgai naudotų kiek įmanoma mažiau galios ir sugebėtų pakankamai greitai atlikti realaus laiko skaičiavimus. Kadangi mikrosensorinio tinklo mazgai turi suvartoti nedaug baterijos energijos, taip prailgindami savo tarnavimo laiką, reikalingi alternatyvūs objekto pozicijos nustatymo algoritmai, paremti nesudėtingais ir greitais skaičiavimais, kurie leistų pakankamai greitai ir tiksliai apskaičiuoti mazgų koordinates.

Dėl minėtų priežasčių, reikia, kad mazgai patys susikonfigūruotų į tinklą, t.y. įvertintų savo padėtis tinklo koordinačių sistemoje. Tai vadinama mikrosensorinio tinklo autolokacija, kuri realizuojama kiekvienam mazgui apskaičiuojant atstumus ir kampus iki kaimyninių mazgų.

Autolokacijos uždavinys yra komplikotas dėl daugelio priežasčių, kurių pagrindinės yra šios:

- mazgai nepasižymi dideliais skaičiavimo pajėgumais;
- reikia taupyti baterijos energiją;
- ribotas mazgų tarnavimo laikas;
- mazgai nėra stacionarūs.

Mikrosensoriniai tinklai suformuojami įvairiose fizinėse terpėse, kuriose sunku atlikti pakankamai tikslius atstumų matavimus tarp mazgų. Atstumai tarp mazgų gali būti klaidingai apskaičiuoti dėl tinkle esančio triukšmo ar netiesioginio matomumo (*angl.* NLOS – non line of sight) problemos. Todėl autolokacijos algoritmas turi būti atsparus netikslių arba trūkstančių duomenų atžvilgiu.

Pagrindinis darbo tikslas yra sudaryti mikrosensorinio tinklo autolokacijos sistemos modelį, kuriame mazgai patys susikonfigūruotų į tinklą, t. y. suformuotų santykinę viso tinklo koordinačių sistemą ir joje apskaičiuotų savo koordinates. Pastarajam tikslui pasiekti iškeliami tokie uždaviniai:

- išanalizuoti egzistuojančias mikrosensorinių tinklų autolokacijos sistemas;

- egzistuojančių sprendimų pagrindu sudaryti paskirstytą bei nuo tinklo infrastruktūros nepriklausomą autolokacijos sistemos modelį;
- ištirti modelio veikimą keičiant specifinius sistemos parametrus.

Sudaromas paskirstytais skaičiavimais besiremiantis modelis, kai tarpusavyje komunikuodami mazgai apskaičiuoja savo ir kaimyninių mazgų koordinates. Kadangi nenaudojama GPS ar jai alternatyvi technologija, tai tinklo mazgai negali apskaičiuoti savo geografinių koordinatų, todėl remiantis tinklo topologija sudaromos lokalsios koordinatų sistemos, kurios vėliau apjungiamos į bendrą santykinę viso tinklo koordinatų sistemą.

Taigi mikrosensorinio tinklo autolokacijos sistemos sudarymas ir tyrimas atliekamas remiantis tokia metodika:

- kiekvieno mazgo lokalsios koordinatų sistemos sudarymas;
- santykinės tinklo koordinatų sistemos centro ir krypties parinkimas;
- santykinės tinklo koordinatų sistemos centro ir krypties stabilumo tyrimas;
- matavimų netikslumų šaltiniai bei jų įtaka nustatant mazgų koordinates;
- modelio tyrimas keičiant specifinius sistemos parametrus.

Darbo struktūra:

- analizės dalis, kurioje pateikta esamų lokalizavimo sistemų analizė ir įvertinimas;
- teorinė dalis, kurioje sudarytas autolokacijos sistemos modelis;
- eksperimentinė dalis, kurioje ištirtas modelio funkcionalumas.

Šio darbo tema skaitytas pranešimas 12-oje tarpuniversitetinėje magistrantų ir doktorantų konferencijoje „Informacinė visuomenė ir universitetinės studijos (IVUS'07)“. Pranešimo medžiaga atspausdinta konferencijos leidinyje.

2 EGZISTUOJANČIŲ SISTEMŲ ANALIZĖ

2.1 Klasifikavimas

Objekto-mazgo vietos nustatymo problema susideda iš daug inžinerinių sprendimų, tokių kaip mazgų tarpusavio matomumas, signalų perdavimo būdas, jungimosi į tinklą galimybės. Dauguma literatūroje pateikiamų sprendimų remiasi kertiniais tinklo mazgais [1], [5] (dažniausiai pasižyminčiais didesnėmis techninėmis bei skaičiavimo galimybėmis) su iš anksto žinomomis koordinatėmis. Šie atraminiai tinklo mazgai nustato atstumą ir kampą iki visų tinklo mazgų. Tokie sprendimai vadinami vieno šuolio (*angl.* one-hop), kadangi atraminiai tinklo mazgai visus kitus mikrosensorinio tinklo mazgus pasiekia tiesiogiai. Kita algoritmų klasė remiasi daugelio šuolių (*angl.* multihop) skaičiavimais, kai tik maža dalis tinklo mazgų turi tiesioginį ryšį su kertiniais tinklo mazgais [7], [13].

Algoritmai gali būti klasifikuojami pagal mazgų technines galimybes – gebėjimą nustatyti gretimų mazgų koordinates, kai atskaitos taškas yra pats mazgas. Kita vertus, skaičiavimai gali būti atliekami remiantis vien tik ryšio informacija, gauta iš tinklo grafo topologijos.

Jei naudojami mazgai su padėties nustatymo galimybėmis, tai koordinatės gali būti randamos matuojant atstumą ir kampą iki kaimyninių mazgų arba panaudojant lokalizavimo įrankius: kompasus, akselerometrus. Radijo ryšiu veikiančiuose mikrosensoriniuose tinkluose, atstumas tarp kaimyninių mazgų nustatomas remiantis signalo stiprumu, tačiau šis metodas yra labai netikslus. Kitas būdas atstumui tarp mazgų nustatyti – tai garso sklidimo laiko matavimas. Šiuo atveju tinklo mazguose turi būti įmontuoti ultragarso siųstuvai ir imtuvai. Nors atstumai gaunami centimetrų tikslumu, tačiau naudojant tokią technologiją reikia, kad tarp mazgų būtų tiesioginis matomumas (*angl.* LOS – line of sight).

Pozicijos nustatymo algoritmus galima klasifikuoti ir pagal tai, kokia naudojama koordinačių sistema: lokali, santykinė ar absoliuti. Absoliuti koordinačių sistema yra patogiausia, kadangi ji susieta globaliu ryšiu naudojamu komerciniuose ir kariniuose standartuose. Populiariausias tokios sistemos pavyzdys – tai GPS tinklas. Tokio tipo sistemos pasižymi dideliais komunikacijos reikalavimais, o jų veikimas paremtas kertiniais tinklo mazgais, kurių koordinatės yra žinomos. Santykinės lokalizacijos algoritmu suformuojama santykinė tinklo koordinačių sistema, kurioje apskaičiuojamos mazgų koordinatės. Lokali koordinačių sistema paremta vien tik lokaliu ryšiu, kai komunikuojantys mazgai nustato savo padėtį kaimyninių mazgų atžvilgiu.

Algoritmo efektyvumas ir pritaikymas priklauso nuo to, ar jis yra centralizuotas, ar paskirstytas, ar lokalizuotas. Centralizuoto algoritmo atveju numatoma galimybė panaudoti globalią informaciją, kuri gali žymiai padidinti mazgo padėties nustatymo tikslumą. Tokiu atveju visa mikrosensorinio tinklo topologija turi būti saugoma viename centriniame mazge, kurio dėka ir atliekamas tinklo mazgų padėties nustatymas. Pastarojo algoritmo trūkumas yra tas, kad pagrindinis mazgas turi atlikti skaičiavimus su didelėmis duomenų struktūromis, kurioms reikia daug centrinio mazgo skaičiavimo ir energijos resursų. Paskirstytas algoritmas naudoja keletą skaičiavimo ir komunikacijos veiksmų, kai vieno centrinio mazgo problema sprendžiama skaičiavimo apkrovą padalinant tarp kelių tinklo mazgų. Lokalizuotas algoritmas remiasi dar didesniu apkrovos paskirstymu, nes skaičiavimai atliekami visuose tinklo mazguose.

2.2 Centralizuoti metodai

2.2.1 Padėties įvertinimas remiantis iškilia ryšio zona

L. Doherty ir kiti autoriai lokalizavimo problemą pasiūlė spręsti naudojant tiesinį ir dalinai apibrėžtą programavimą [5]. Tiesinio programavimo uždavinys sprendžiamas minimizuojant išraišką $c^T x$, kai $Ax < b$. Geometriškai tai atitinka tiesinės funkcijos minimizavimą pagal briaunainį (daugiasienį).

Dalinai apibrėžtas programavimas (*angl.* SDP – semi-definite programming) apibendrina tiesinio programavimo atvejį įvertinant tiesinių matricių nelygybes (*angl.* LMIs – linear matrix inequalities), kai minimizuojama išraiška $c^T x$, esant $F(x) = F_0 + x_1 F_1 + \dots + x_n F_n < 0$, $Ax < b$, $F_i = F_i^T$. SDP pasirodė kaip labai geras algoritmas tiesinio programavimo uždaviniams spręsti siekiant skaičiavimų efektyvumo. Nagrinėjama dvimatė erdvė, kurioje kiekvieno mazgo pozicija įvertinama koordinatėmis (x, y) . Koordinačių saugojimui formuojamas vektorius $x = [x_1 y_1 \dots x_m y_m \dots x_{m+1} y_{m+1} \dots x_n y_n]^T$. Pirmi m įrašai yra duomenys, o likę $(n-m)$ apskaičiuojami pagal algoritmą.

Bendru atveju, tokio tipo problemoms spręsti egzistuoja efektyvūs skaičiavimo metodai. Geometrinio požiūriu, iškili sritis yra tokia, kurioje bet kuriuos du taškus sujungus tiesė, tie taškai priklauso iškiliai sričiai.

Autoriai mazgų koordinačių skaičiavimo uždavinį sprendė sudarydami iškiluosius ryšio modelius panaudojant spindulinio ryšio ir optinės komunikacijos sistemas. Mikrosensorinio tinklo mazgas modeliuojamas priimant, kad jo ryšio zona – tai taisyklingas

apskritimas (1 paveikslas). Nors realiuose fiziniuose modeliuose taisyklingo apskritimo ryšio zona neegzistuoja, pateikiami metodai tinka ir elipsės pavidalo ryšio zonas turintiems tinklo mazgams.

Taisyklingo apskritimo modelyje ryšys tarp dviejų mazgų įvertinamas sudarant tiesinių matricių nelygybes (LMI):

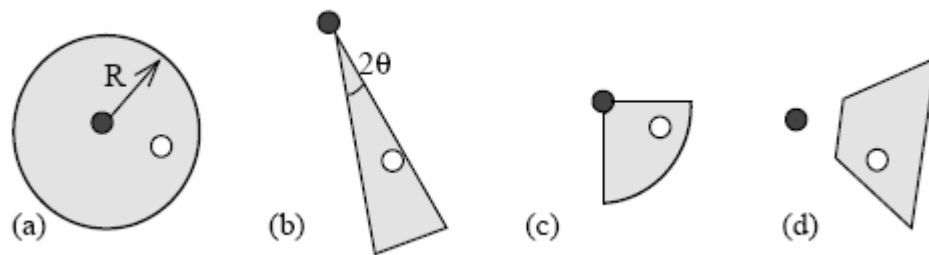
$$\|a - b\|_2 \leq R \Rightarrow \begin{bmatrix} I_2 R & a - b \\ (a - b)^T & R \end{bmatrix} \geq 0, \quad (2.1)$$

kur I_2 – dvimatės erdvės identifikatorius, R – maksimalus spindulys, a, b – mazgų koordinatės.

Tiesinių matricių nelygybės saugomos blokais iš kurių formuojama viso tinklo struktūra, kai kiekvienas dvikryptis ryšys vaizduojamas iškilia tiesinių matricių nelygybe.

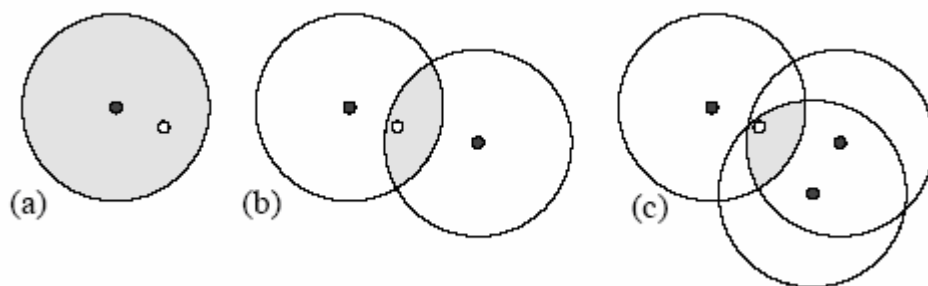
Optinio ryšio atveju tinklo skenavimui tam tikru kampu mazgai naudoja lazerinius imtuvus ir siųstuvus. Imtuvas suka ratu detektorius, kol pagaunamas signalas, tuomet nustatomas maksimalus signalo stiprumas. Suradus kampą, ties kuriuo gaunamas signalas aiškiausias, įvertinamas santykinis kampas iki kaimyninio mazgo ir maksimalus galimas atstumas tarp mazgų. Dvimateje erdvėje grafiškai tai vaizduojama trikampiui (1b paveikslas), kuris atitinka aptikto mazgo galimų padėčių aibę. Kampas tarp šoninių trikampio kraštinių atitinka siųstuvo signalo kampą, o šoninių kraštinių ilgis – tai maksimalus signalo spindulys.

Taigi įvairios SDP ir LP apribojimų kombinacijos naudojamos apibrėžti kiekvieno individualaus mazgo galimą pozicijų aibę. Projekto autoriai taip pat pateikia kvadratinę aptikimo schemą (1c paveikslas) apimančią vieną LMI ir du skaliarinius tiesinius ryšius. Taip pat aptartas ir bendriausias atvejis, kai mazgo pozicijų aibę apibrėžiama trapecijos plotu (1d paveikslas).



1 pav. Mazgo padėties nustatymo geometrinė interpretacija: „juodas“ mazgas aptinka „balta“ mazgą, kai pilka zona nurodo „balto“ mazgo galimų pozicijų aibę (paimta iš [5])

Mazgų padėtys tinkle dažniausiai nustatomos remiantis ryšiais tarp kelių mazgų. Kai keli „juodi“ mazgai aptinka „balta“ mazgą, „balto“ mazgo pozicijų aibę sudaro „juodų“ mazgų ryšio zonų persidengimo sritis (2 paveikslas).



2 pav. Ryšio zonų sankirta: pilka zona vaizduoja galimą „balto“ mazgo pozicijų aibę, kurią suformuoja „juodų“ mazgų ryšio zonų persidengimo sritis (paimta iš [5])

Taigi kuo daugiau „juodų“ mazgų aptinka „balto“ mazgą, tuo tiksliau įvertinama pastarojo padėtis. Be to, iškilių sričių sankirta taip pat iškili sritis, todėl mazgo lokalizavimui galima taikyti iškilius skaičiavimo metodus, kai kiekvieno mazgo padėtis randama naudojant vieną globalią (centralizuotą) programą.

Iškiliaji skaičiavimo metodai pasižymi programinės ir techninės realizacijos privalumais. Taip yra todėl, kad nesudėtinga modeliuoti techninę įrangą, kuri palaiko atstumų ir kampų matavimą bei apdoroja ryšio informaciją. Kita vertus, realizacijai reikalingi centralizuoti skaičiavimai ir didelių duomenų struktūrų apdorojimas, todėl dideliems ir tankiems mikrosensoriniams tinklams šis sprendimas netinka.

2.2.2 Lokalizavimo metodas MDS-MAP

MDS-MAP – tai lokalizavimo metodas, kuriam pakanka vien ryšio informacijos, kad nustatytų tinklo mazgų padėtis. Be to, skaičiavimams nebūtini atraminiai tinklo mazgai. MDS-MAP metodas remiasi klasikiniu daugiamačiu matavimu MDS (*angl.* multidimensional scaling), kai mazgų rinkinys, charakterizuojamas tarpusavio atstumais, lokalizuojamas dvimatėje bei trimatėje erdvėje [4].

MDS-MAP metodo funkcionalumas nagrinėjamas trimis etapais:

1. Skaičiuojami mažiausi atstumai tarp visų galimų tinklo mazgų porų ir sudaroma MDS atstumų matrica.
2. Atliekami daugiamačiai skaičiavimai (MDS) su pirmame etape sudaryta matrica ir išsaugomos pirmos dvi arba trys didžiausios tikrinės reikšmės ir du arba trys didžiausi tikriniai vektoriai tam, kad būtų galima sudaryti dvimatį arba trimatį santykinį žemėlapi.
3. Turint pakankamai atraminių mazgų (3 arba daugiau 2D atveju, 4 arba daugiau 3D atveju), remiantis kertinių tinklo mazgų absoliutinėmis koordinatėmis, lokalios mazgų koordinatės perskaičiuojamos į globalias.

Pirmame žingsnyje suformuojamas ryšio grafas, kurio briaunos atitinka atstumus. Kai atstumas tarp kaimyninių mazgų yra žinomas, atitinkama grafo kraštinės reikšmė lygi išmatuotam atstumui tarp kaimyninių mazgų. Kai naudojama vien tik ryšio informacija, visoms grafo kraštinėms priskiriama reikšmė lygi 1. Tuomet taikomas klasikinis visų porų trumpiausio atstumo algoritmas, pavyzdžiui, Dijkstro arba Floido. Gaunama $O(n^3)$ laiko sudėtingumo funkcija, kai n atitinka mazgų skaičių.

Antrame žingsnyje klasikinis daugiamačio matavimo algoritmas (MDS) tiesiogiai taikomas atstumų matricai. Klasikinis MDS algoritmas remiasi pavienių reikšmių skaidymu, kurio sudėtingumas yra $O(n^3)$. MDS algoritmo rezultatas – tai santykinis žemėlapis, kuriame žinoma kiekvieno mazgo santykinė padėtis.

Trečiame žingsnyje santykinis žemėlapis koreguojamas panaudojant tiesines transformacijas: mastelio keitimą, pasukimą, atspindį. Pagrindinis tikslas – minimizuoti klaidų skaičių tarp kertinių mazgų tikrų koordinatų ir jų transformuotų koordinatų MDS žemėlapyje. Transformavimo parametrų skaičiavimas atliekamas per $O(m^3)$ laiką, kai m yra atraminių mazgų skaičius. Viso santykinio žemėlapio transformavimo laikas lygus $O(n)$.

Daugumos metodų veikimas remiasi atraminiais tinklo mazgais, o MDS metodui šis apribojimas negalioja, nes sudaromas santykinis žemėlapis, kurio formavimui atraminiai tinklo mazgai nebūtini. Trijų ar daugiau kertinių tinklo mazgų reikia tik jei norima santykinį tinklo žemėlapi transformuoti į absoliutinį, kad būtų galima apskaičiuoti geografinės mazgų koordinatas.

MDS-MAP metodo atveju centralizuotų skaičiavimų problema išsprendžiama sudalinant tinklą į potinklius ir taikant lokalizavimo algoritmą kiekvienam potinklui atskirai. Kadangi sudarant santykinį žemėlapi atraminiai tinklo mazgai nereikalingi, lokalizavimo algoritmas gali būti taikomas visiems potinklams lygiagrečiai. Vėliau gretimi potinklų žemėlapiai apjungiami į vieną bendrą santykinį tinklo žemėlapi. Jei tinkle yra trys ar daugiau atraminių mazgų, suformuojamas absoliutinis tinklo žemėlapis.

MDS-MAP metodas gali būti praplėstas pritaikant pažangesnes MDS technologijas, pavyzdžiui, vietoj klasikinio metrinio MDS, gali būti naudojamas MDS metodas su trūkstamais duomenimis arba MDS su vietos nurodymu. Tai būtų naudinga apdorojant nevienodą radijo signalų sklidimą bei matavimų paklaidas. Atlikti eksperimentai [4] parodė, kad, kai tarp mazgų yra silpnas ryšys, MDS su vietos nurodymu yra geresnis nei klasikinis MDS. Kai tarp mazgų ryšys yra stiprus – pranašesnis klasikinis MDS.

Nagrinėjamo metodo trūkumai pasireiškia, kai tinkle yra daug atraminių mazgų. Tokiu atveju iškilieji skaičiavimo metodai [5] yra pranašesni. Taip yra todėl, kad klasikinis MDS-MAP metodas nenaudoja informacijos, kurią suteikia kertiniai tinklo mazgai. Pastaroji

informacija naudojama tik trečiame žingsnyje, kai bendra struktūra ir santykiniai atstumai tarp mazgų jau žinomi. Todėl požiūris, kai santykinis žemėlapis sudaromas neatsižvelgiant į kertinių tinklo mazgų koordinates, yra dvigubas uždavinys. Toks metodas veikia puikiai, kai tinkle nėra kertinių tinklo mazgų, bet yra neefektyvus esant dideliame atraminių mazgų skaičiui. Vienas šios problemos sprendimo būdų yra naudoti pažangesnes MDS technologijas [12].

Kombinuojant MDS-MAP algoritmą su kitais žinomais metodais, galima rasti gerą tinklo mazgų autolokacijos mechanizmą. Pavyzdžiui, MDS-MAP gali būti sėkmingai naudojamas pradinių tinklo mazgų padėčių įvertinimui, po kurio sektų tikslinimo fazė [6], [11]. Lyginant su kitais lokalizavimo algoritmais, MDS-MAP pasižymi bene geriausiomis charakteristikomis, kai tinkle yra nedaug kertinių mazgų. Todėl galima tikėtis gerų rezultatų kombinuojant MDS-MAP ir tikslinimo metodus.

MDS-MAP metodo nepriklausomumas nuo kertinių mazgų yra didžiausias jo privalumas. Kitiems metodams, siekiant užtikrinti pakankamą padėties nustatymo kokybę, reikalingas didelis kertinių mazgų kiekis tinkle ar net tam tikras specifinis jų išdėstymas. Pavyzdžiui, koordinačių skaičiavimas, remiantis iškilia ryšio zona [5], veikia gerai tik kai kertiniai mazgai išsidėstę tinklo pakraščiuose, o hiperbolinio vietos nustatymo algoritmui [6] reikalingas tolygus ir tankus kertinių mazgų išdėstymas tinkle.

Pastarasis metodas turi plačias pritaikymo galimybes, nes, skaičiuojant santykinės bei absoliutines mazgų koordinates, gali būti naudojama tiek ryšio, tiek atstumų matavimų informacija. Be to, priešingai iškiliems skaičiavimo metodams, MDS-MAP metodo sudėtingumas turi teorinę ribą.

2.3 Vieno šuolio padėties nustatymo metodai

Vieno šuolio padėties nustatymo metodai pasižymi centralizuotu veikimu. Visi tinklo mazgai turi tiesioginį ryšį su centrine tinklo stotimi. Sėkmingiausiai įdiegta ir labiausiai paplitusi šio tipo metodų realizacija – tai GPS sistema (*angl.* Global Positioning System). Tokio tipo tinkluose turi būti užtikrinamas visų mazgų tiesioginis matomumas (*angl.* LOS – line of sight) su bazine stotimi.

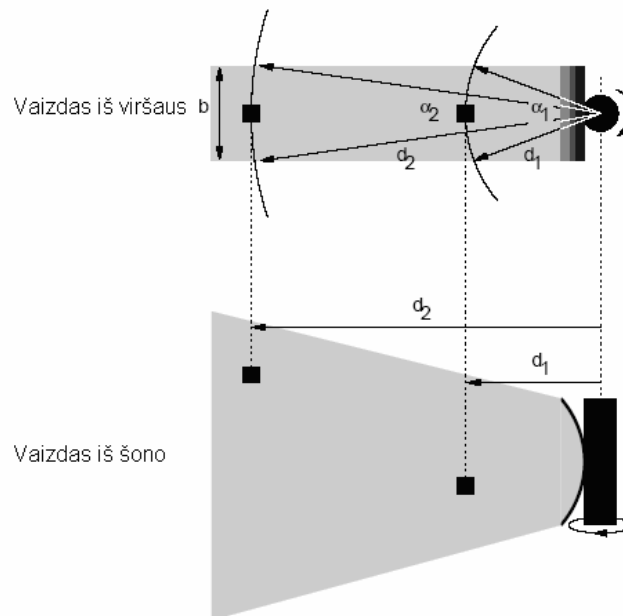
2.3.1 Padėties nustatymo sistema „Lighthouse“

Projekto „Lighthouse“ autoriai sukūrė antros kartos sensorinius mazgus, kurie dėl labai mažo dydžio (1mm^3) pavadinti „Smart Dust“ [1]. Ši technologija pristato naujus

lokalizavimo sistemos principus. Tradicinės sistemos, kurios remiasi radijo bangomis ar ultragarsu, pripažintos netinkamomis dėl didelio energijos suvartojimo ir santykinai didelių mazgų.

Projekto autoriai „Lighthouse“ padėties nustatymo sistemą vadina ateities mikrosensorinių tinklų technologija. Komunikuodami su bazine stotimi „Smart Dust“ mazgai labai tiksliai nustato savo fizinę padėtį. Lokalizavimas atliekamas panaudojant cilindrinį vėlinimo metodą. Priešingai tradiciniams sferiniams metodams, cilindriniam vėlinimo metodui nereikia patenkinti tiek daug pradinių sąlygų.

„Smart Dust“ mazgų padėties nustatymas atliekamas panaudojant vieną bazinę stotį, kuri turi tiesioginį matomumą su visais tinklo mazgais. 3 paveiksle vaizduojamas idealizuotas metodo veikimo principas, kai specialus šviesos šaltinis vertikalės atžvilgiu spinduliuoja lygiagrečių b pločio šviesos srautą. Horizontalės atžvilgiu tam tikru kampu spinduliuojamas šviesos srautas, kuris yra pakankamas, kad būtų užfiksuojamas daugelio erdvėje išsidėsčiusių mazgų.



3 pav. Idealistinis „Lighthouse“ modelis su lygiagrečiu šviesos srautu (paimta iš [1])

Kai šviesos srautas pasiekia mazgą, gaunamas šviesos efektas, kuris tęsiasi tam tikrą laiką t_{beam} . t_{beam} priklauso nuo atstumo d , kuris nurodo mazgo atstumą iki šviesos šaltinio sukimosi ašies. Jei šviesos šaltinis apsisuka aplink ašį per laiką t_{turn} , kampą α , kuriuo mazgas „mato“ šviesos srautą, galima išreikšti taip:

$$\alpha = 2\pi \frac{t_{beam}}{t_{turn}} \quad (2.2)$$

3 paveiksle pavaizduoti du mazgai nutolę nuo šviesos šaltinio atstumais d_1 ir d_2 bei atitinkamais kampais α_1 ir α_2 . Atstumą d galima išreikšti per kampą α ir srauto plotį b :

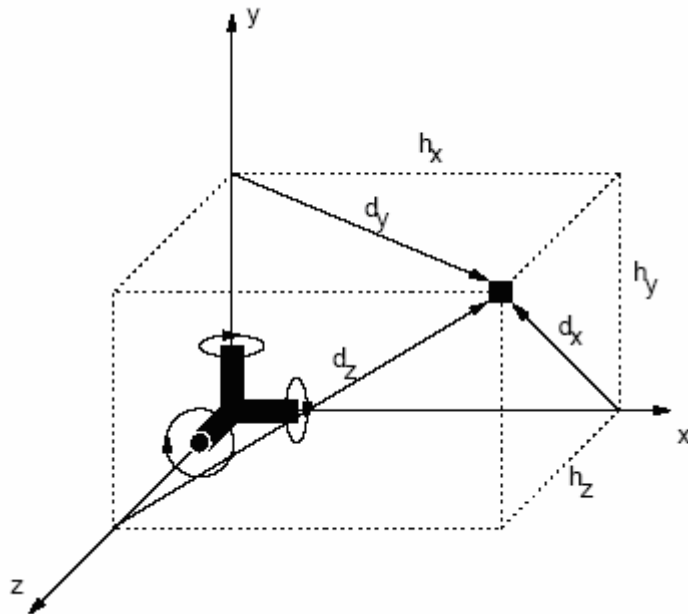
$$d = \frac{b}{2\sin(\alpha/2)} \quad (2.3)$$

Apjungus 2.2 ir 2.3 formules, atstumą d galima išreikšti per b , t_{beam} ir t_{turn} :

$$d = \frac{b}{2\sin(\pi t_{beam} / t_{turn})} \quad (2.4)$$

Remiantis minėtais principais naudojama atstumo nustatymo sistema, kurią sudaro šviesos šaltinis „Lighthouse“ ir „Smart Dust“ mazgas. „Smart Dust“ mazgas turi laikrodį ir foto indikatorį. Kai foto indikatorius „pamato“ šviesą, užfiksuoja laiko momentą t_1 , o kai šviesa dingsta – užfiksuoja laiką t_2 , kai šviesą pamato dar kartą, vėl užfiksuoja laiką t_3 . Tuomet $t_{beam} = t_2 - t_1$, $t_{turn} = t_3 - t_1$. Pritaikius 2.4 formulę, mazgas apskaičiuoja atstumą d , kuriuo jis yra nutolęs nuo šviesos šaltinio sukimosi ašies.

Remiantis tokiais atstumo matavimais, buvo sukurtas 4 paveiksle pavaizduotas sistemos modelis, kai kiekvienas mazgas apskaičiuoja savo koordinates 3D erdvėje. Sistemos bazinė stotis sudaryta iš trijų tarpusavyje statmenų šviesos šaltinių, kuriuos naudojant „Smart Dust“ mazgai matuoja atstumus d_x , d_y , ir d_z , o po to taikant MMSE (*angl.* Minimum mean square error) metodus apskaičiuoja savo koordinates.



4 pav. 3D lokalizavimo sistema sudaryta iš trijų tarpusavyje statmenų šviesos srautų (paimta iš [1])

Taigi bendrą lokalizavimo sistemos modelį sudaro viena bazinė stotis, kurią sudaro trys tarpusavyje statmeni šviesos srautai, ir daug tinklo mazgų. Pradžioje bazinė stotis visiems tinklo mazgams perduoda tam tikrus parametrus, o pastarieji remiantis šia informacija apskaičiuoja savo koordinates bazinės stoties atžvilgiu.

Svarbus „Lighthouse“ lokalizavimo sistemos privalumas yra tas, kad naudojami labai maži 1mm^3 dydžio tinklo mazgai, kai tuo tarpu kitos lokalizavimo sistemos naudoja kelių

dešimčių kubinių milimetrų dydžio mazgus. Be to, „Smart Dust“ mazgai, remiantis iš bazinės stoties gauta informacija, labai tiksliai nustato savo koordinates dideliu atstumu nenaudojant kalibravimo (patikrinimo) mechanizmų.

Kita vertus, kai mazgai tinkle juda, jie turi atnaujinti savo koordinates pakankamai dažnai ir greitai, kad būtų gaunama realaus laiko mazgų padėties informacija. Be to, mazgų judėjimas, kai atliekami bazinės stoties perduodamų parametrų matavimai, yra svarus klaidų šaltinis nustatant mazgų koordinates.

Viso tinklo veikimas priklauso nuo vienos nejudančios bazinės stoties – tai „Lighthouse“ lokalizavimo sistemos trūkumas. Be to, bazinė stotis turi būti apsaugota nuo neigiamo aplinkos poveikio, taip pat turi būti užtikrintas nuolatinis jos funkcionalumas.

Dar vienas trūkumas susijęs su tiesioginio matomumo problema, kadangi visi „Smart Dust“ mazgai privalo nuolat turėti tiesioginį matomumą (*angl.* LOS – Line of sight) su bazine stotimi. Net ir laikini LOS trukdžiai gali įtakoti neteisingą mazgo koordinačių apskaičiavimą, kai negaunamas bent vienas bazinės stoties perduodamas parametras. Kita vertus, tokių klaidų tikimybė gali būti sumažinta lyginant dvi ar daugiau iš eilės nustatytas to paties mazgo koordinates. Jei koordinačių skirtumas viršija tam tikrą ribinę reikšmę, tuomet mazgo koordinatės perskaičiuojamos.

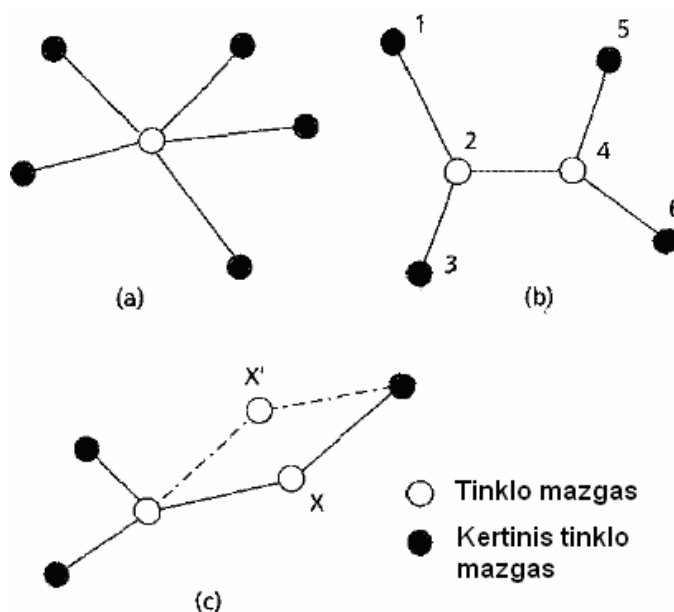
2.4 Paskirstyti metodai

2.4.1 Sistema AhLOS

Padėties nustatymo sistema AhLOS (*angl.* Ad-hoc Localization System) [13] apibrėžia keletą hiperbolinio vietos nustatymo (mazgo koordinačių radimas remiantis bent trimis išmatuotais atstumais iki kertinių tinklo mazgų) tipų: atominį, iteratyvų (pasikartojantį) ir bendrą.

Atominio hiperbolinio vietos nustatymo atveju (5a paveikslas), reikalingas pakankamas kertinių tinklo mazgų tankis, kad mazgas, kuriam reikia nustatyti koordinates, turėtų bent tris gretimus kertinius tinklo mazgus. Kai randami bent trys atstumai iki atraminių mazgų, mazgas gali apskaičiuoti savo koordinates.

Iteratyvaus hiperbolinio vietos nustatymo atveju mazgai, kurie apskaičiuoja savo koordinates, tampa kertiniais tinklo mazgais. Nors šiuo atveju ir sumažėja apskaičiuojamų tinklo mazgų koordinačių tikslumas, tačiau taip pat sumažėja reikalavimai kertinių mazgų kiekiui bei pasiskirstymui tinkle.



5. pav. AhLOS vietos nustatymas (paimta iš [13])

Net ir naudojantis abiem minėtais metodais, tinkle gali atsirasti mazgų, kurie negalės apskaičiuoti savo koordinatų. Toks atvejis pavaizduotas 5b paveiksle, kai nei antras, nei ketvirtas mazgai negali apskaičiuoti savo koordinatų, nes tam reikalingi bent trys atraminiai tinklo mazgai. Ši problema išsprendžiama panaudojant bendradarbiavimo (*angl. collaborative*) algoritmą. 5b paveiksle pavaizduotu atveju, kai atstumai tarp mazgų yra žinomi, naudojant kiekvienos kraštinės lygtį, suformuojama netiesinė lygčių sistema su keturiais nežinomaisiais (2 ir 4 mazgų koordinatės). Išsprendus lygčių sistemą, randamos antro ir ketvirto mazgų santykinės koordinatės. 6 paveiksle pavaizduotas metodas, kuriuo nustatoma, ar reikia mazgo lokalizavimui naudoti bendradarbiavimo algoritmą.

```

boolean isCollaborative (node, callerId, isInitiator)
  if isInitiator==true limit ← 3
  else limit ← 2
  count ← beaconCount(node)
  if count ≥ limit return true
  for each unknown neighbor i not previously visited
    if isCollaborative (i, node, false) count++
    if count == limit return true
  return false

```

6 pav. Metodos bendradarbiavimo algoritmo atvejui nustatyti (paimta iš [13])

Parametras „*node*“ nurodo mazgo, nuo kurio pradedama bendradarbiavimo atvejų paieška, identifikacinį numerį. Parametras „*callerID*“ – tai identifikatorius mazgo, kuris iškviečia tam tikrą funkcijos atvejį. „*isInitiator*“ yra loginis kintamasis, kuriam priskiriama „*true*“ reikšmė, jei mazgas inicijavo bendradarbiavimo procesą. Priešingu atveju priskiriama reikšmė „*false*“. Tai naudojama nustatyti „*limit*“ vėliavėlę, kuri valdo rekursiją. „*beaconCount*“ funkcija grąžina mazgui gretimų atraminių mazgų skaičių.

Net ir tam tikras lygčių ir nežinomųjų skaičius nėra pakankamas mikrosensorinio tinklo mazgų autolokacijos rodiklis. 5c paveiksle pavaizduotas mazgų išsidėstymas, kai išsprendus keturių lygčių su keturiais nežinomaisiais sistema, negalima nustatyti mazgo x tikslų koordinatų – gaunama dviprasmybė mazgo x atžvilgiu.

Taigi, siekiant užtikrinti pakankamą autolokacijos kokybę, didelį tinklo mazgų skaičių turi sudaryti kertiniai mazgai, tolygiai pasiskirstę visame tinkle. Tai pagrindinis AhLOS sistemos trūkumas. Kitaip tariant, kuo didesnę tinklo mazgų dalį sudarys atraminiai mazgai, tuo daugiau bus nustatyta nežinomų mazgų koordinatų. Be to, nuo kertinių mazgų kiekio mikrosensoriniame tinkle priklauso ir nustatytų koordinatų tikslumas.

2.4.2 Padėties nustatymo sistemos APS

Padėties nustatymo sistema APS (*angl.* Ad-hoc Positioning System) [7] apjungia dvi pagrindines idėjas: atstumo vektoriaus (*angl.* DV – Distance Vector) maršrutizavimą ir kertiniais tinklo mazgais paremtą koordinatų nustatymą (*angl.* GPS – Global Positioning System). APS panašumas į DV maršrutizavimą pasireiškia šuolišku informacijos perdavimu tarp mazgų neatsižvelgiant į kertinius tinklo mazgus. Panašumas į GPS atsispindi tame, kad ilgainiui kiekvienas mazgas įvertina savo poziciją pagal informaciją gautą iš kertinių tinklo mazgų.

APS sistemoje informacijos persiuntimui realizuotas orientacijos-atstumo metodas (šiuo kontekste orientacija reiškia ryšį arba kampą tarp mazgų). Ši informacija padeda mazgams, neturintiems tiesioginio ryšio su atraminiais tinklo mazgais, nustatyti savo padėtį.

Visi informacijos persiuntimo metodai veikia tokiu principu:

- mazgai, gretimi kertiniam tinklo mazgui, savo orientaciją-atstumą nustato tiesiogiai;
- jei mazgas turi kelis kaimynus, kurie „žino“ savo orientaciją-atstumą kartinio tinklo mazgo atžvilgiu, tai jis taip pat gali apskaičiuoti savo orientaciją-atstumą.

APS algoritmas turi keletą informacijos persiuntimo metodų, kurie taikomi atsižvelgiant į tinklo mazgų galimybes. Be to, jei dėl tam tikrų priežasčių mazgas negali gauti pakankamai informacijos, kad nustatytų savo orientaciją-atstumą, jis laukia, kol ši informacija bus prieinama iš kaimyninių mazgų.

Bene paprasčiausias metodas, naudojantis vien tik ryšio informaciją atstumams iki kertinių tinklo mazgų įvertinti, yra DV-hop. Tai bendriausia schema, kurioje objektai šuolinių atstumų iki atraminių tinklo mazgų skaičiavimui naudoja klasikinį atstumų vektoriaus

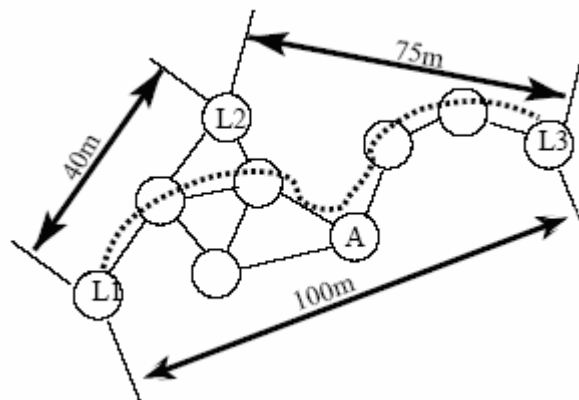
apsikeitimo būdą. Kiekvienas mazgas saugo informaciją lentelėje $\{X_i, Y_i, h_i\}$, o atnaujintais duomenimis keičiasi tik su kaimyniniais mazgais. Kai tik kartinis tinklo mazgas sužino atstumą iki kito atraminio mazgo, jis apskaičiuoja vidutinį vieno šuolio atstumą, kuris perduodamas visiems tinklo mazgams atstumo reikšmių tikslinimui. Kai mazgas gauna tikslinimo reikšmę, jis gali įvertinti atstumą iki atraminių tinklo mazgų ir atlikti trianguliaciją. Tikslinimo reikšmę (X_i, Y_i) atraminis tinklo mazgas skaičiuoja pagal formulę:

$$c_i = \frac{\sum \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2}}{\sum h_i}, \quad i \neq j \quad (2.5)$$

7 paveiksle mazgai L_1, L_2 ir L_3 yra kartiniai, be to mazgas L_1 žino Euklidinį (40m, 100m) ir šuolinį (2, 6 šuoliai) atstumus iki mazgų L_2 ir L_3 . Tuomet L_1 apskaičiuoja pataisą:

$$\frac{100 + 40}{6 + 2} = 17.5, \text{ kuri yra vidutinis vieno šuolio atstumas. Analogiškai } L_2 \text{ ir } L_3 \text{ apskaičiuoja}$$

$$\text{pataisas: } \frac{40 + 75}{2 + 5} = 16.42 \text{ ir } \frac{75 + 100}{6 + 5} = 15.90.$$



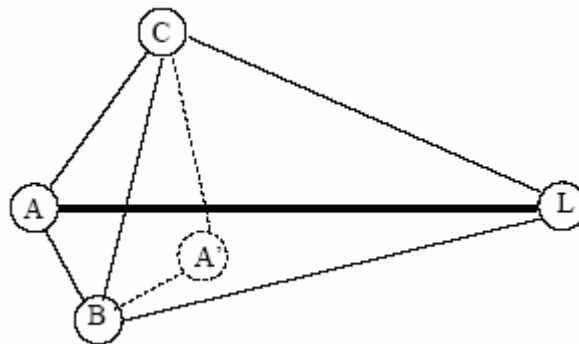
7 pav. DV-Hop reikšmių tikslinimas (paimta iš [7])

Nežinantis savo koordinatų mazgas atnaujinimo informaciją gauna iš vieno (dažniausiai arčiausiai esančio) kartinio tinklo mazgo. Atnaujinimo informacija perduodama į tinklą kontroliuojamuoju srautu, kai mazgas, gavęs tikslinimo reikšmę, visas kitas reikšmes, atėjusias iš kitų atraminių mazgų, ignoruoja. Šis metodas užtikrina, kad mazgas gautų tik vieną tikslinimo reikšmę iš arčiausiai jo esančio kartinio tinklo mazgo. Pavyzdžiui, 7 paveiksle mazgas A tikslinimo reikšmę gauna iš L_2 ir pagal ją apskaičiuoja atstumus iki visų atraminių mazgų: $L_1, 3 \cdot 16.42$; $L_2, 2 \cdot 16.42$; $L_3, 3 \cdot 16.42$. Tuomet pagal šias reikšmes mazgas A apskaičiuoja savo koordinates naudojant trianguliacijos procedūrą.

Taigi DV-hop privalumas glūdi jo paprastume. Be to, naudojant šį metodą, mazgo padėties radimui neturi įtakos matavimo klaidos. Pagrindinis trūkumas – metodas veikia tik izotopinėje aplinkoje, t. y. tinklo mazgų išsidėstymas ir tankis visomis kryptimis turi būti tolygus.

Kitas metodas DV-distance skiriasi nuo pastarojo tuo, kad atstumai tarp kaimyninių mazgų matuojami naudojant radijo signalo stiprumą ir išreiškiami metrais (DV-hop atveju atstumai buvo matuojami šuoliais). Šis metodas nėra toks grubus kaip DV-hop, nes atstumai tarp mazgų yra nevienodi. Kita vertus, labai padidėja jautrumas matavimo paklaidoms.

Trečias būdas – tai tiesioginio (euklidinio) atstumo iki kertinių tinklo mazgų skaičiavimas. Šis metodas pagal veikimo principą yra panašiausias į GPS. Bet kuriam mazgui A reikia turėti bent du kaimynus (B ir C), kurie žinotų savo atstumus iki kartinio mazgo L (8 paveikslas).



8 pav. Euklidinio atstumo įvertinimo metodas (paimta iš [7])

Mazgas A išmatuoja atstumus AB ir AC . Kadangi B ir C yra mazgo A kaimynai, tai jie yra kaimynai ir tarpusavyje. Taigi mazgas A žino atstumą BC , nes gali gauti informaciją iš visų kaimyninių mazgų. Todėl žinant visus keturkampio $ABLC$ kraštinių ilgius bei įstrižainės BC ilgį, galima apskaičiuoti AL , kuris ir yra euklidinis mazgo A atstumas iki kartinio mazgo L . Kita vertus, mazgas A gali būti dviejose padėtyse: toje pačioje BC atkarpos pusėje kaip ir L arba priešingoje (A arba A'). Šią dviprasmybę panaikina pats mazgas A arba tirdamas visas savo kaimyninių mazgų poras, žinančias atstumus iki L , arba ištyrėdamas B ir C mazgų kaimynus. Panaikinus dviprasmybę, atstumas AL apskaičiuojamas pagal apibendrintą Pitagoro teoremą. Euklidiniam metodui galima dar pritaikyti klaidų tikrinimo ir šalinimo procedūrą, o DV-hop ir DV-distance metodams šios procedūros taikyti negalima [7].

Apibendrinant galima išskirti APS metodų pagrindines savybes:

- paskirstyti skaičiavimai;
- apskaičiuojamos globalios koordinatės;
- perskaičiavimai reikalingi tik judantiems mazgams.

Taigi APS metodais išsprendžiamos riboto mobilumo ir kintamo našumo problemos, taip pat išnaudojamos įvairios tinklo mazgų galimybės: pradedant vien tik ryšio informaciją naudojančiais mazgais ir baigiant mazgais galinčiais matuoti atstumus, kampus bei naudotis integruotais kompasais.

Pagrindiniai trūkumai:

- reikalingas vienodas kertinių mazgų pasiskirstymas tinkle;
- didėjant tinklo mobilumui, smarkiai didėja atstumų matavimo kaštai.

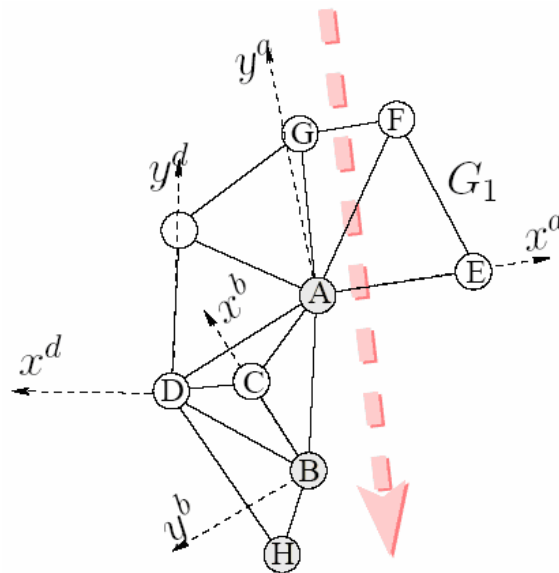
2.5 Santykinis padėties nustatymas

Santykiniai padėties nustatymo metodai pasižymi didžiausiu apkrovos paskirstymu tarp tinklo mazgų. Kiekvienas mazgas suformuoja savo lokalią koordinacijų sistemą, kurioje apskaičiuoja visų kaimyninių mazgų koordinates. Vėliau, remiantis tam tikrais kriterijais, lokalių koordinacijų sistemų apjungiamos į bendrą santykinę tinklo koordinacijų sistemą. Tokio tipo sistemos yra visiškai autonomiškos, nes, vietoj iš anksto fiksuotų tinklo koordinacijų, naudojama santykinė koordinacijų sistema, kurios formavimas yra autolokacijos algoritmo dalis.

2.5.1 Lokalios padėties nustatymo sistema

Mazgų lokalių koordinacijų sistemų formavimo ir jų apjungimo į tinklo koordinacijų sistemą idėjas ir principus aprašo [8] straipsnio autoriai. Lokalioje mazgo koordinacijų sistemoje apskaičiuojamos kaimyninių mazgų koordinatės panaudojant atstumo matavimo, AOA (*angl.* angle of arrival) bei integruotų kompasų galimybes. Kai mazgai suformuoja savo lokalias koordinacijų sistemas, vykdomas registracijos procesas.

Registracija tarp dviejų lokalių koordinacijų sistemų – tai procesas, kuris apskaičiuoja transformacijų matricą koordinacijų sistemų apjungimui. Registracijos proceso duomenis sudaro mazgai, kurių koordinatės yra nustatytos abiejose apjungiamose koordinacijų sistemose. Jei du mazgai, pavyzdžiui, A ir B pavaizduoti 9 paveiksle, apjungia savo koordinacijų sistemas, jie naudoja registracijos procedūrą.



9 pav. Lokalios mazgų koordinatinių sistemų (paimta iš [8])

Lokalios padėties nustatymo sistema (*angl.* LPS – local positioning system) naudoja metodą, kuriuo nustatomos tik mazgų, dalyvaujančių duomenų persiuntime, koordinatės. Kitaip tariant, kiekvienas mazgas, esantis trajektorijos kelyje (9 paveiksle trajektorija pažymėta stora brūkšnine rodykle), apskaičiuoja savo koordinates pirminio paketo koordinatinių sistemos atžvilgiu. Toks mechanizmas yra daug efektyvesnis energijos suvartojimo požiūriu lyginant su AhLOS [13] algoritmu.

Lokalios padėties nustatymas gali būti naudojamas centralizuotame mikrosensoriname tinkle, kai komunikuojančios mazgų grupės sudaro bendrą koordinatinių sistemą. Projekto autoriai LPS apibūdina trajektorija paremtą persiuntimo (*angl.* TBF – trajectory based forwarding) kontekste [14], nes TBF algoritmu sukuriama mazgų komunikavimo grupė, kurios sąveikauja pagal trajektorijos kryptį.

LPS palaiko tiek AOA, tiek ir atstumo nustatymo metodus sudarant lokalias koordinatinių sistemas. Taip pat sėkmingai išnaudojamos ir mazgų su integruotais kompasais galimybės. 1 lentelėje pateikiamos visos mazgų galimybių ir jų transformacijų kombinacijos (T – transliavimas, R – sukimas, S – mastelio nustatymas, M – atspindys).

1 lentelė. Mazgų techninės galimybės ir atitinkamos jų transformacijos naudojamos registracijos procese (paimta iš [8])

Galimybės	Transformacijos
Atstumo nustatymas	T, R, M
AoA	T, R, S, (M)
AoA + Kompasas	T, S, (M)
AoA + Atstumo nustatymas	T, R, (M)
AoA + Atstumo nustatymas + Kompasas	T, (M)

Jei transformacijų stulpelyje atspindys parašytas skliausteliuose, tai jis gali būti naudojamas tik kai mazgas yra apverstas. Kai naudojamas vien tik atstumo matavimas, atspindys gali būti taikomas tik įvertinus mazgo padėtį (priklausomai nuo mazgų, kurie pasirinkti kaip lokalsios koordinačių sistemos ašys). Visais kitais atvejais, naudojant kampų matavimus (AOA), atspindys tarp dviejų lokalių koordinačių sistemų gali būti naudojamas tik jei vienas iš mazgų yra apverstas. Tam, kad nustatyti ar mazgas yra apverstas, ar ne, naudojamas skaitmeninis akselerometras. Bendra transformacijos matricos išraiška, skirta perskaičiuoti mazgo koordinates iš vienos koordinačių sistemos į kitą, užrašoma taip:

$$M_{b,a} = \begin{bmatrix} sr_1 & sr_2 & t_x \\ sr_3 & sr_4 & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

kai $\{r_*\}$ – sukimosi transformacija ir galimas atspindys; s – mastelio nustatymo faktorius; $\{t_*\}$ – perskaičiavimas. $\{r_*\}$ – tai ortonormuota matrica su tokiomis savybėmis:

$$\begin{cases} |r_1| = |r_4| \\ |r_2| = |r_3| \\ \det\{r_*\} = -1, \text{ kai naudojamas atspindys, } 1 \text{ kitu atveju} \end{cases} \quad (2.7)$$

LPS metodas unikalus tuo, kad skaičiavimus atlieka tik mazgai, kurie įraukti į komunikacinę grupę. Todėl LPS neieško papildomų energijos išteklių viso tinklo mazgų padėties nustatymui, o užregistruoja tik tas lokalias koordinačių sistemas, kurios reikalingos komunikavimui.

Esant statiniam tinklui, kiekvieno mazgo koordinačių sistemos registravimo išvengiama panaudojant išankstinio apdorojimo procedūrą, kai visi mazgai užregistruoja savo kaimyninius mazgus ir sudaro individualias transformacijų matricas. Kiekvienas mazgas išsaugo savo transformacijų matricą ir taip taupo tiek procesoriaus, tiek ir paketų persiuntimo resursus.

Taigi metodo privalumas yra sumažinta bendra viso mikrosensorinio tinklo apkrova, kuri labai aktuali esant dideliame tinklo mazgų judėjimui, kai dėl tam tikrų priežasčių negalima įdiegti globalios koordinačių sistemos.

3 ANALIZĖS IŠVADOS

Išanalizuotos sistemos naudoja specifinius algoritmus autolokacijos problemai spręsti. Todėl kiekvienas sprendimas turi savo privalumų ir trūkumų, o palyginimai ir vertinimai atlikti remiantis:

- lokalizavimo algoritmu, kai naudojamas atstumų matavimas arba gretimų kaimyninių mazgų informacija;
- skaičiavimų apkrovos padalinimu taikant centralizuotus arba paskirstytus metodus;
- naudojama koordinatų sistema – geografinė arba santykinė;
- tinklo infrastruktūros reikalavimais: autolokacijos sistemos gali būti nuo infrastruktūros priklausomos arba nepriklausomos (nuo infrastruktūros priklausomose sistemose yra nustatyti apribojimai mazgų išsidėstymui tinkle);
- apskaičiuojamų mazgų koordinatų tikslumu;
- kaštais, kurie reikalingi įdiegti autolokacijos sistemą.

Iš to seka, kad nėra universalios autolokacijos algoritmo, kuris tiktų daugeliu atvejų. Taigi, nagrinėjant mikrosensorinius tinklus, paskirstytos bei nuo infrastruktūros nepriklausomos autolokacijos sistemos sudarymas ir tyrimas yra labai aktuali problema.

4 AUTOLOKACIJOS SISTEMOS MODELIS

4.1 Lokali mazgo koordinacijų sistema

Sudaromas autolokacijos sistemos modelis pasižymi tokiomis savybėmis:

- tinklas nepriklausomas nuo infrastruktūros;
- visi mazgai turi vienodas technines galimybes;
- mazgai nėra stacionarūs.

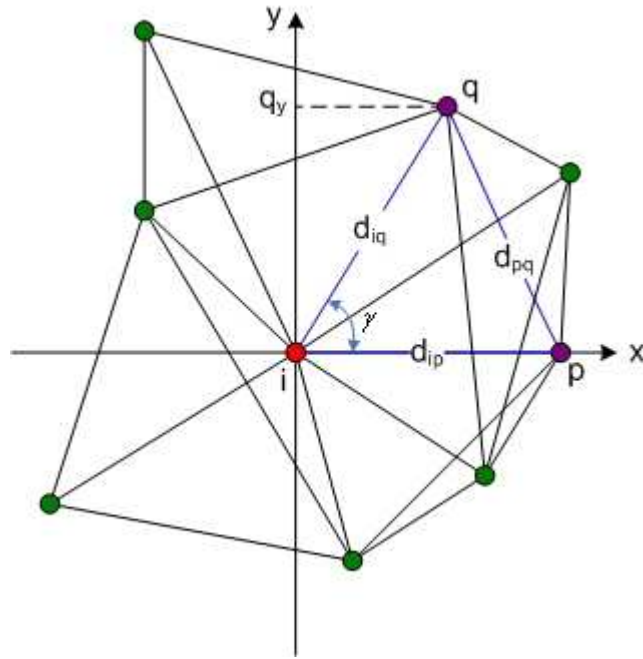
Remiantis minėtomis savybėmis, sudaroma metodika kiekvieno mazgo lokali koordinacijų sistemos suformavimui. Mazgas, kurio atžvilgiu sudaroma lokali koordinacijų sistema, tampa centriniu su koordinatėmis $(0,0)$, tuomet apskaičiuojamos kaimyninių mazgų koordinatės. Vėliau lokali koordinacijų sistemos apjungiamos į santykinę viso tinklo koordinacijų sistemą.

Jei mazgas j gali tiesiogiai komunikuoti su mazgu i , tuomet j vadinamas tiesioginiu mazgo i kaimynu. Tarkime, kad N yra visų mikrosensorinio tinklo mazgų rinkinys. Tuomet $\forall i \in N$, apibrėžiamas K_i kaip mazgo i tiesioginių kaimyninių mazgų rinkinys. Taip pat $\forall i \in N$, apibrėžiamas D_i , kaip atstumų rinkinys tarp mazgo i ir visų jo tiesioginių kaimynų $j \in K_i$.

Kiekviename mazge atliekami tokie veiksmai:

- aptinkami visi kaimyniniai vieno šuolio mazgai;
- apskaičiuojami atstumai iki šių mazgų;
- pastaroji informacija perduodama visiems vieno šuolio kaimyniniams mazgams.

Taip kiekvienas mazgas žino kaimyninių mazgų, nutolusių per vieną ir du šuolius, padėtis bei kai kuriuos atstumus tarp vieno ir dviejų šuolių kaimynų. Atstumų skaičius, dėl mazgų energijos ribotų resursų, nežinomas. Lokali koordinacijų sistemos sudarymas grafiškai pavaizduotas 10 paveiksle.



10 pav. Lokali mazgo koordinatų sistemos sudarymas

Ištisinės linijos vaizduoja žinomus atstumus tarp mazgų, o nežinomi atstumai tarp mazgų – linijomis nesujungti.

Bet kuriam mazgui i lokali koordinatų sistema sudaroma pasirenkant du kaimyninius mazgus q ir p , kai $p, q \in K_i$ tokius, kad

- tarp jų atstumas d_{pq} yra žinomas ir didesnis už nulį;
- mazgai i, p ir q nėra vienoje tiesėje;
- mazgas p priklauso teigiamai x ašies daliai;
- mazgo q projekcija q_y priklauso teigiamai y pusašiai.

Taip gaunama mazgo i lokali koordinatų sistema gali būti išreikšta kaip i, p ir q funkcija. Tuomet mazgų i, p ir q koordinatės yra tokios:

$$\begin{aligned} i_x &= 0; \quad i_y = 0; \\ p_x &= d_{ip}; \quad p_y = 0; \\ q_x &= d_{iq} \cos \gamma; \quad q_y = d_{iq} \sin \gamma \end{aligned} \tag{4.1}$$

kai γ yra kampas $\angle(p, i, q)$, kuris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\gamma = \arccos \frac{d_{iq}^2 + d_{ip}^2 - d_{pq}^2}{2d_{iq}d_{ip}} \tag{4.2}$$

Mazgų $j \in K_i$, kai $j \neq p, q$, tarp kurių atstumai d_{ij} , d_{qj} ir d_{pj} yra žinomi, koordinatės apskaičiuojamos pagal trianguliacijos algoritmą. Taigi galima užrašyti, kad

$$\begin{aligned}
j_x &= d_{ij} \cos \alpha_j \\
\text{if } \beta_j &= |\alpha_j - \gamma| \\
j_y &= d_{ij} \sin \alpha_j \\
\text{else} \\
j_y &= -d_{ij} \sin \alpha_j
\end{aligned} \tag{4.3}$$

kai α_j yra kampas $\angle(p, i, j)$, o β_j yra kampas $\angle(j, i, q)$. Praktiškai, dėl klaidų atsirandančių matuojant atstumus tarp mazgų, β_j niekuomet nebus lygus $|\alpha_j - \gamma|$. Šiuo algoritmu nustatoma kurioje x ašies pusėje yra mazgas j . Be to, nedidelės paklaidos tarp β_j ir $|\alpha_j - \gamma|$ turi būti toleruojamos.

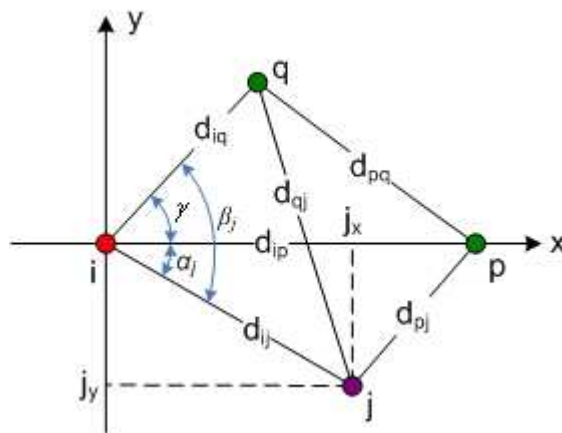
α_j ir β_j reikšmės apskaičiuojamos pagal kosinuso teoremą:

$$\alpha_j = \arccos \frac{d_{ij}^2 + d_{ip}^2 - d_{pj}^2}{2d_{ij}d_{ip}} \tag{4.4}$$

$$\beta_j = \arccos \frac{d_{iq}^2 + d_{ij}^2 - d_{qj}^2}{2d_{iq}d_{ij}} \tag{4.5}$$

Kampai α_j , β_j ir γ yra išsidėstę atitinkamai trikampiuose (p, i, j) , (j, i, q) ir (p, i, q) , o skaičiavimams reikia tik šių kampų absoliutinių reikšmių. Kampų kryptys šiuo atveju nesvarbios.

Mazgui j atliekami skaičiavimai pavaizduoti 11 paveiksle. Mazgų $k \in K_i$, kai $k \neq p, q$, kurie nėra p ir q kaimynai, koordinatės gali būti apskaičiuojamos naudojant mazgo i koordinates bei dar bent du kitus mazgus, kurių koordinatės ir atstumai iki mazgo k jau yra žinomi.



11 pav. Mazgo i lokaliajoje koordinačių sistemoje apskaičiuojamos mazgo j koordinatės

Ribotas tinklo mazgų galios intervalas smarkiai apriboja mazgo skaičiavimo galimybes, todėl skaičiuojamos tik vieno šuolio kaimyninių mazgų padėtys. Visi mazgai,

kurių padėtųys apskaičiuojamos lokalias koordinatų sistemos atžvilgiu, sudaro lokalių mazgų koordinatų rinkinį ($LMKR$).

Pavyzdžiui, mazgui i $LMKR$ galima apibrėžti kaip mazgų rinkinį $LMKR_i(p, q) \subseteq K_i$, kai $\forall j \in LMKR_i$, mazgas i gali apskaičiuoti mazgo j koordinates savo lokaliuoje koordinatų sistemoje.

4.2 Tinklo koordinatų sistema

Kai visi mazgai sukuria savo lokalias koordinatų sistemas, jie tampa savo lokalių koordinatų sistemų atskaitos taškais, t.y. su koordinatėmis $(0,0)$. Be to, visos lokalias koordinatų sistemos turi skirtingai orientuotas x ir y ašis. Šiame skyriuje suformuosime metodiką, visų lokalių koordinatų sistemų apjungimui į bendrą viso tinklo koordinatų sistemą. Galime išskirti tokias sudedamąsias dalis:

- lokalių koordinatų sistemų orientavimas viena kryptimi;
- algoritmas tinklo koordinatų sistemos centro parinkimui;
- mazgų koordinatų skaičiavimas tinklo koordinatų sistemoje.

4.2.1 Mazgo koordinatų sistemos kryptis

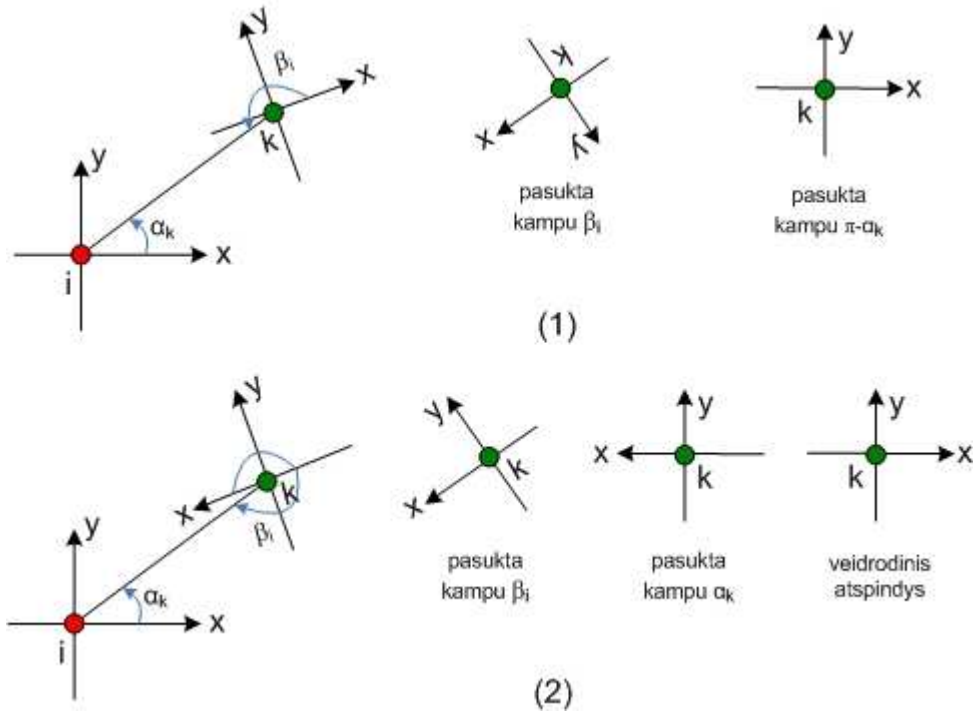
Tiriami du mazgai i ir k . Tam, kad perorientuoti mazgo k koordinatų sistemą taip, kad jos kryptis sutaptų su mazgo i koordinatų sistema, mazgo k koordinatų sistema turi būti paskukta, o jei reikia, tai ir padarytas jos veidrodinis atspindys. Atliekant koordinatų sistemos pasukimo operaciją, turi būti patenkinamos tokios sąlygos:

- $i \in LMKR_k$ ir $k \in LMKR_i$
- $\exists j \neq i, k$ toks, kad $j \in LMKR_k$ ir $j \in LMKR_i$

Taigi koordinatų sistemų orientavimui viena kryptimi gali reikėti vieno arba dviejų žingsnių:

- mazgo k koordinatų sistemą pasukti tam tikru kampų;
- po pasukimo operacijos, mazgo k koordinatų sistemai padaromas veidrodinis atspindys vienos iš koordinatų ašių atžvilgiu.

Vieno ir dviejų žingsnių koordinatų sistemų krypties suderinimo variantai grafiškai pavaizduoti 12 paveiksle.



12 pav. Mazgo k koordinačių sistemos orientavimo operacijos

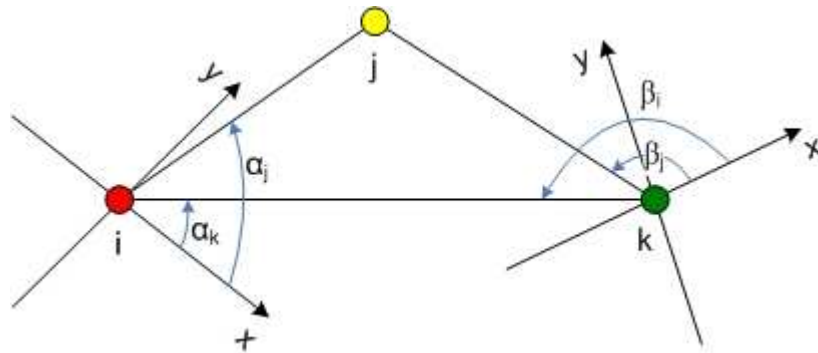
Pirmu atveju reikia pasukti mazgo k koordinačių sistemą kampu $\beta_i - \alpha_k + \pi$. Antru atveju atliekamas mazgo k koordinačių sistemos pasukimas kampu $\beta_i + \alpha_k$ ir veidrodinis atspindys y ašies atžvilgiu. α_k – tai kampas tarp vektoriaus $\vec{ik}$ ir mazgo i koordinačių sistemos x ašies. β_i – tai kampas tarp vektoriaus $\vec{ki}$ ir mazgo k koordinačių sistemos x ašies. Visi mazgo k koordinačių sistemos pasukimai atliekami teigiama kryptimi.

Prieš atliekant mazgo k koordinačių sistemos korekciją, naudojamas specifinis algoritmas, kuriuo nustatoma mazgo k koordinačių sistemos kryptis. Tam panaudojamas mazgas j .

$$\begin{aligned}
 & \text{if } (\alpha_j - \alpha_k < \pi \text{ and } \beta_j - \beta_i > \pi) \\
 & \text{or } (\alpha_j - \alpha_k > \pi \text{ and } \beta_j - \beta_i < \pi) \\
 & \quad \text{veidrodinio atspindžio nereikia} \\
 & \quad \text{reikiamas pasukimo kampas yra } (\beta_i - \alpha_k + \pi) \\
 & \text{if } (\alpha_j - \alpha_k < \pi \text{ and } \beta_j - \beta_i < \pi) \\
 & \text{or } (\alpha_j - \alpha_k > \pi \text{ and } \beta_j - \beta_i > \pi) \\
 & \quad \text{reikia veidrodinio atspindžio} \\
 & \quad \text{reikiamas pasukimo kampas yra } (\beta_i + \alpha_k)
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

Naudojant šį algoritmą, tiriama mazgo j padėtis mazo i ir mazgo k koordinačių sistemų atžvilgiu. α_j – tai kampas tarp vektoriaus $\vec{ij}$ ir mazgo i koordinačių sistemos x ašies. β_j – tai

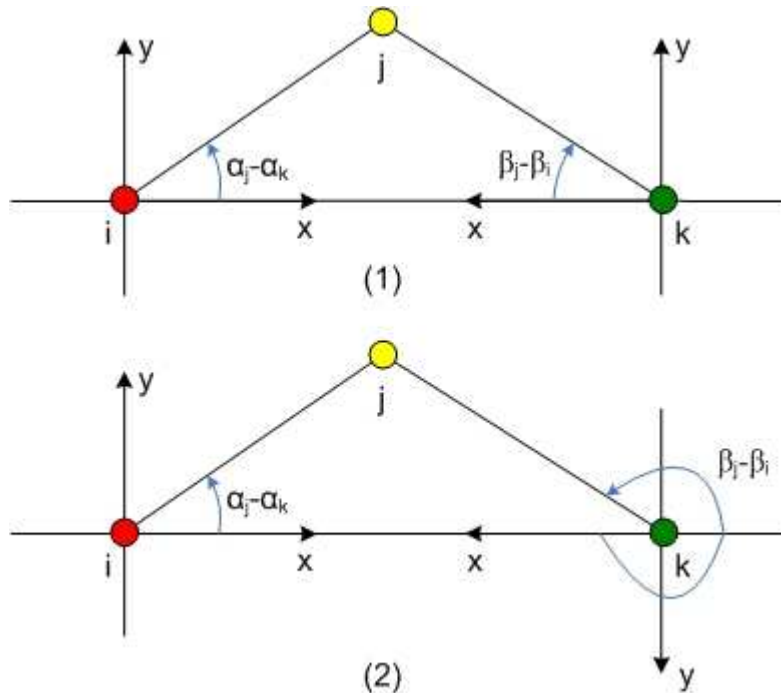
kampas tarp vektoriaus $\vec{kj}$ ir mazgo k koordinatinių sistemos x ašies. Ši metodika grafiškai pavaizduota 13 paveiksle.



13 pav. Mazgo j padėtis i ir k lokalių koordinatinių sistemų atžvilgiu

Jei pasukamos mazgų i ir k koordinatinių sistemos atitinkamai kampais α_k ir β_i , tai vektorių $\vec{ij}$ ir $\vec{kj}$ kampai pasikeičia atitinkamai į $\alpha_j - \alpha_k$ ir $\beta_j - \beta_i$.

Mazgo j padėtis, i ir k lokalių koordinatinių sistemų atžvilgiu, mazgui k suteikia informaciją apie tai, ar reikia atlikti tik pasukimo, ar ir pasukimo, ir veidrodinio atspindžio operacijas. Grafiškai tai pavaizduota 14 paveiksle.



14 pav. Koordinatinių sistemų transformavimo operacijų identifikavimas

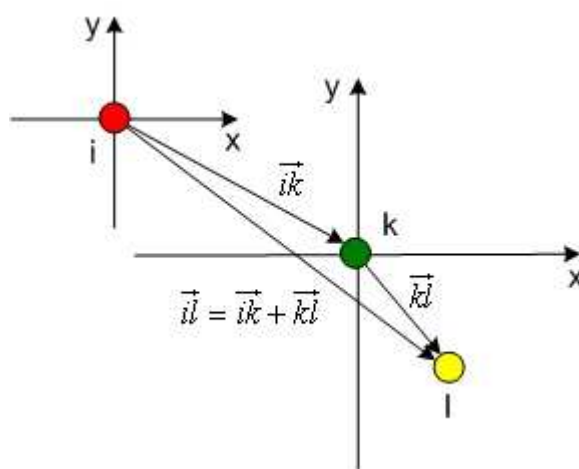
Kai mazgas k atlieka savo lokalsios koordinatinių sistemos pasukimą bei, jei reikia, veidrodinį atspindį, gaunamos vienodai orientuotos mazgų i ir k lokalsios koordinatinių sistemos.

Taikant tokią metodiką visiems tinklo mazgams, gausime vienodai orientuotas visų tinklo mazgų lokalias koordinatines sistemas.

4.2.2 Tinklo koordinatinių sistemos formavimas

Sudaryta metodika kiekvieno mazgo lokalsios koordinatinių sistemos suformavimui bei visų lokalių mazgų koordinatinių sistemų orientavimui viena kryptimi. Tačiau, pagrindinis tikslas yra suformuoti bendrą viso tinklo koordinatinių sistemą. Tinklo koordinatinių sistemos atskaitos tašku pasirenkama viena iš lokalių mazgų koordinatinių sistemų, pavyzdžiui, mazgo i lokali koordinatinių sistema. Tuomet visi tinklo mazgai turi koreguoti savo lokalių koordinatinių sistemų kryptį pagal mazgo i koordinatinių sistemą. Po to visi mazgai apskaičiuoja savo koordinates mazgo i koordinatinių sistemoje.

Taigi kitas etapas yra sudaryti metodiką, kaip tinklo mazgai gali apskaičiuoti savo koordinates mazgo i koordinatinių sistemoje. Tam pasirenkame mazgą l , kuris yra nutolęs dviejų šuolių atstumu nuo mazgo i ir priklauso mazgo k *LMKR* grupei. Mazgas i žino mazgo l koordinates mazgo k lokalsioje koordinatinių sistemoje ir mazgo k koordinates savo (t.y. mazgo i) lokalsioje koordinatinių sistemoje. Kadangi mazgų i ir k lokalsios koordinatinių sistemos yra vienodai orientuotos (x ir y ašių kryptys sutampa), tai mazgo l koordinatės mazgo i koordinatinių sistemoje gali būti apskaičiuojamos pritaikant vektorių sudėties operaciją (15 paveikslas) $\vec{il} = \vec{ik} + \vec{kl}$.



15 pav. Mazgo l koordinatinių apskaičiavimas mazgo i koordinatinių sistemoje

Analogiška metodika taikoma ir per kelis šuolius nuo mazgo i nutolusiems tinklo mazgams. Pavyzdžiui, tarkime, kad tam tikri mazgai nutolę nuo mazgo i per tris šuolius ir priklauso mazgo l *LMKR* grupei, be to, mazgo l lokali koordinatinių sistema yra vieodai orientuota kaip ir mazgų i ir k lokalsios koordinatinių sistemos. Tuomet šie mazgai gaus mazgo l koordinates mazgo i koordinatinių sistemoje, o pridėję šį vektorių prie savo vektoriaus lokalsioje koordinatinių sistemoje (mazgo l koordinatinių sistemoje), apskaičiuos savo padėties įvertį mazgo i (tinklo) koordinatinių sistemoje. Taikant tokią metodiką, visi mazgai apskaičiuos savo koordinates mazgo i (tinklo) koordinatinių sistemoje.

Mazgai, kurie nepajėgia sudaryti savo lokalsios koordinatų sistemos, bet turi tiesioginį ryšį bent su trimis mazgais, kurie jau yra apskaičiavę savo koordinates santykinėje tinklo koordinatų sistemoje, gali įvertinti savo padėtį tinklo koordinatų sistemoje panaudojant trianguliacijos algoritmą [8].

4.2.3 Tinklo koordinatų sistemos centras

Ankstesniame skyriuje tinklo koordinatų sistemos pagrindu pasirinkta atsitiktinio mazgo *i* lokali koordinatų sistema. Tuomet kiti mazgai perorientuoja savo koordinatų sistemas pagal mazgo *i* koordinatų sistemą ir suranda savo pozicijas mazgo *i* koordinatų sistemoje. Toks požiūris atrodo paprastas ir nesunkiai realizuojamas, tačiau nagrinėjant mikrosensorinį tinklą, kuriame visi mazgai nėra stacionarūs, ši metodika yra komplikauta. Taip yra todėl, kad mazgo *i* judėjimo intensyvumas lemia, kaip dažnai visi tinklo mazgai turi perskaičiuoti savo koordinates tinklo koordinatų sistemoje. Tai įtakoja dideles paklaidas tarp realių ir apskaičiuotų mazgų koordinatų. Be to, mazgas *i* tampa kritiniu viso tinklo faktoriumi, nes praradus mazgą *i*, prarandama ir visa tinklo koordinatų sistema. Todėl toks požiūris gali būti naudojamas tik nedideliuose mikrosensoriniuose tinkluose, kuriuose mazgai nepasižymi dideliu judėjimo intensyvumu bei mazgų praradimo tikimybė yra labai maža.

Stabilumui pagerinti, tinklo koordinatų sistemos centrą galima pasirinkti sudarius mazgų padėčių funkciją. Šiuo atveju gauname stabilesnį centrą, tačiau mazgai turi dažniau keistis informacija ir todėl padidėja viso tinklo duomenų srautai. Kitaip tariant, mikrosensorinio tinklo centru tampa nuo tinklo topologijos priklausantis geometrinis centras.

Kadangi nagrinėjamas mikrosensorinis tinklas, kuriame mazgai nėra stacionarūs, lokalių koordinatų sistemų apjungimui naudojamas metodas, kuriuo remiantis gaunamas stabilesnis tinklo koordinatų sistemos centras.

Taigi tinklo centrui naudojama mazgų grupė, kuri pasižymi stabilumu ir nedidele praradimo tikimybe. Daroma prielaida, kad tokius reikalavimus geriausiai tenkina didžiausiu mazgų tankumu pasižyminti tam tikra tinklo dalis. Taigi tinklo centras susiejamas ne su vienu mazgu, bet su tam tikros mazgų grupės santykinė padėtimi, kuri priklauso nuo mazgų grupės topologijos. Kai mazgai juda, mazgų grupės centras atitinkamai perskaičiuojamas. Pagrindinis privalumas yra tas, kad vidutinis mazgų grupės centro judėjimo greitis yra daug mažesnis už pavienių mazgų judėjimo greitį. Tokiu būdu pasiekiamas tinklo centro stabilumas bei sumažinamos paklaidos tarp realių ir apskaičiuotų mazgų koordinatų. Tinklo koordinatų sistemos kryptis apskaičiuojama suvidurkinant mazgų grupei priklausančių mazgų lokalių

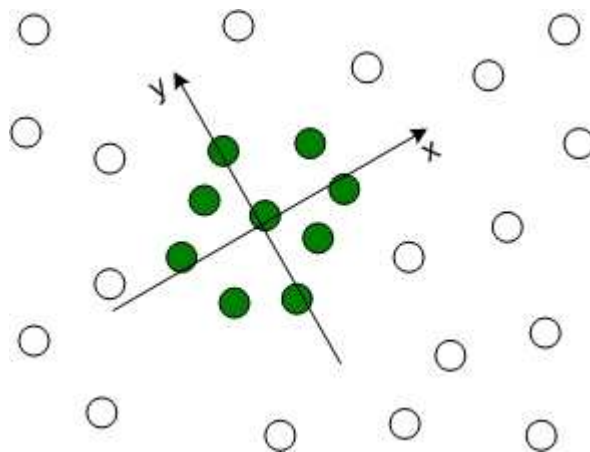
koordinačių sistemų kryptis. Taigi kuo didesnė mazgų grupė, tuo stabilesnis tinklo centras. Kita vertus, didėjant mazgų grupei, didėja ir tinklo centro bei krypties skaičiavimų kaštai.

4.2.3.1 Pagrindinės mazgų grupės identifikavimas

Mazgų grupių formavimui reikia, kad kiekvienas tinklo mazgas atliktų tokias operacijas:

- siųstų pasisveikinimo paketus visiems per n šuolių nutolusiems kaimyniniams mazgams, kad gautų jų identifikatorius, tarpusavio atstumus ir lokalių koordinačių sistemų kryptis;
- apskaičiuotų per n šuolių nutolusių mazgų koordinates savo lokaliaje koordinačių sistemoje;
- apskaičiuotų mazgų grupės, kurią sudaro visi per n šuolių nutolę mazgai, centrą pagal formules: $c_x = \frac{\sum j_x}{m}$, $c_y = \frac{\sum j_y}{m}$, kai m yra grupei priklausančių mazgų skaičius, j_x ir j_y – tai atitinkamos x ir y mazgų koordinatės;
- apskaičiuotų mazgų grupės kryptį suvidurkinant visų grupei priklausančių mazgų lokalių koordinačių sistemų kryptis;
- apskaičiuotų mazgų grupės tankio koeficientą (funkcija, kurios parametrai yra mazgų skaičius ir atstumai tarp jų).

Kiekvienas tinklo mazgas atlikęs pastarąsias operacijas, persiunčia visiems kaimyniniams mazgams savo mazgų grupės tankio koeficientą, centro ir koordinačių ašių krypties informaciją. Mazgai, turintys mažesnį tankio koeficientą, perskaičiuoja savo koordinačių sistemos kryptį, o po to ir savo koordinates didesnį tankio koeficientą turinčio mazgo koordinačių sistemoje.



16 pav. Pagrindinė mazgų grupė ir jos koordinačių sistema

Taigi mazgo, kurio tankio koeficientas didžiausias, grupė vadinama pagrindine, o šios grupės koordinačių sistema tampa viso tinklo koordinačių sistema (16 paveikslas). Mazgas turintis didžiausią tankio koeficientą vadinamas pagrindiniu.

4.2.3.2 Pagrindinės mazgų grupės tikslinimas

Dėl mazgų judėjimo pagrindinės mazgų grupės nariai keičia savo padėtį, todėl keičiasi ir grupės centras. Šią informaciją reikia reguliariai atnaujinti, todėl kiekvienas pagrindinės mazgų grupės mazgas turi atlikti tokius veiksmus:

- siųsti pasisveikinimo paketus visiems per n šuolių nutolusiems kaimyniniams mazgams, kad gautų jų identifikatorius, tarpusavio atstumus ir lokalių koordinačių sistemų kryptis;
- palyginti naują (per n šuolių nutolusių) kaimynų sąrašą su pagrindinės mazgų grupės sąrašu.

Mazgas, nutolęs nuo pagrindinio mazgo per n šuolių, ir turintis didžiausią kaimyninių mazgų skaičių, tampa nauju pagrindiniu mazgu. Taigi naujas pagrindinis mazgas ir per n šuolių nuo jo nutolę kaimynai sudaro naują pagrindinę mazgų grupę, kurios koordinačių sistema tampa nauja viso tinklo koordinačių sistema. Tokia procedūra kartojama fiksuotais laiko intervalais.

Kiekvienas mazgas, kuris priklausė pagrindinei grupei, o po tam tikro laiko nepasiekia pagrindinio mazgo per n šuolių, paleidžia taimerį. Jei per tam tikrą laiką šis mazgas negauna informacijos apie naują padėtį iš pagrindinio mazgo, jis pradeda vykdyti pagrindinės mazgų grupės identifikavimo procedūrą (3.2.3.1. skyrius). Šią procedūrą gali vykdyti kiekvienas mazgas, kuris per tam tikrą fiksuotą laiko tarpą negauna informacijos apie naują pagrindinį mazgą.

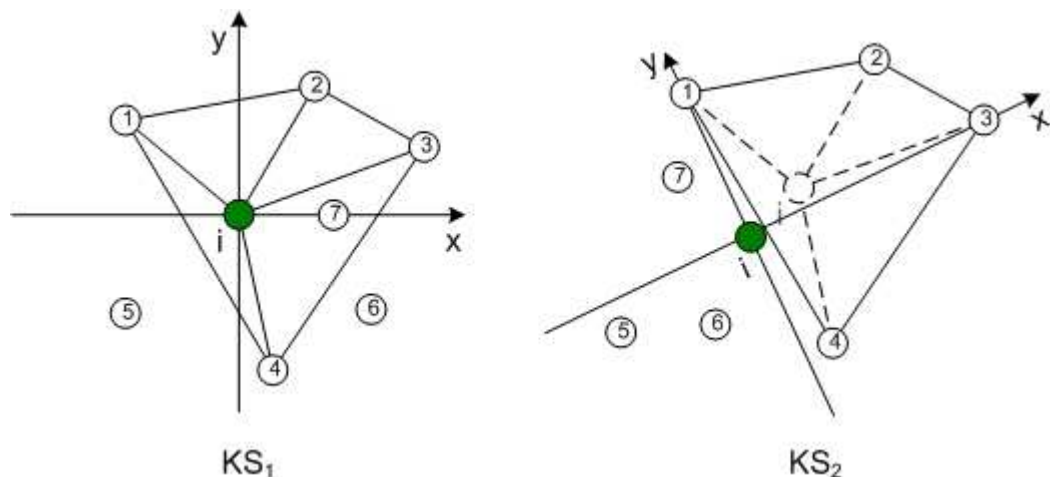
Taigi, naudojant pagrindinės mazgų grupės tikslinimo algoritmą, tinklo centras juda daug lėčiau nei mazgai, todėl skaičiavimų paklaidos dėl tinklo centro judėjimo yra žymiai sumažinamos.

4.2.4 Tinklo koordinačių sistemos kryptis

Parodyta kaip sukuriamos mazgų lokalsios koordinačių sistemos bei kaip iš jų gaunama viso tinklo koordinačių sistema. Taip pat sudaryta metodika tinklo koordinačių sistemos centrui stabilizuoti. Toliau nagrinėjama tinklo koordinačių sistemos krypties stabilizavimo problema.

Mazgų p ir q , o dėl to ir lokalios koordinačių sistemos krypties, parinkimas yra atsitiktinis. Iš to seka, kad viso tinklo koordinačių sistemos kryptis taip pat atsitiktinė, nes ji priklauso nuo pagrindinės mazgų grupės koordinačių sistemų krypčių. Tinklo koordinačių sistemos krypties stabilizavimui naudojamas algoritmas, kurį turi vykdyti kiekvienas pagrindinės mazgų grupės mazgas:

- Suformuojama mazgo lokali koordinačių sistema KS_1 , kurios kryptis priklauso nuo p ir q parinkimo.
- Kai iš naujo vykdomas lokalios koordinačių sistemos formavimo algoritmas, parenkama nauja (p, q) pora. Nauja koordinačių sistema pažymima KS_2 . Mazgų padėtys pasikeitė dėl jų judėjimo, todėl pora (p, q) gali būti kita.
- Mazgas lygina kitų mazgų padėtis dviejose koordinačių sistemose ir ieško maksimalaus mazgų rinkinio (mažiausiai trijų), kurie turi tokią pat topologiją KS_1 ir KS_2 koordinačių sistemose. Jei toks mazgų rinkinys aptinkamas, daroma prielaida, kad šie mazgai nepajudėjo per laiko tarpą, kol algoritmas buvo įvykdytas abu kartus. Ši prielaida gali būti klaidinga, tačiau yra labai didelė tikimybė, kad ji teisinga.
- Mazgas naudoja šį mazgų rinkinį ir jų atstumus perskaičiuoti KS_1 centrą KS_2 koordinačių sistemoje (17 paveikslas). Tuomet galima pakoreguoti KS_2 kryptį pagal KS_1 kryptį. Jei mazgas negali pertvarkyti KS_1 koordinačių sistemos, tuomet KS_2 tampa nauja lokalia mazgo koordinačių sistema.



17 pav. Koordinačių sistemos koregavimas

Šis algoritmas leidžia kiekvienam mazgui, priklausančiam pagrindinei mazgų grupei, stabilizuoti savo lokalios koordinačių sistemos kryptį. Pagrindinės mazgų grupės pagrindinis mazgas apskaičiuoja tinklo koordinačių sistemos kryptį suvidurkindamas visų grupės lokalių koordinačių sistemų kryptis. Tokiu būdu stabilizuojama viso tinklo koordinačių sistemos

kryptis. Tankiausiose tinklo srityse tikimasi mažiausio mazgų judėjimo, nes tai yra pagrindinis veiksnys lemiantis sėkmingą algoritmo panaudojimą.

4.2.5 Koordinačių sistemos ryšys

Jei mazgas negali pasikeisti informacija apie savo koordinačių sistemą su kitais mazgais, jis negali apskaičiuoti savo padėties tinklo koordinačių sistemoje. Todėl N mikrosensorinio tinklo mazgų yra susijungę į tinklo koordinačių sistemą, jei informacija apie tinklo koordinačių sistemą gali būti perduota visiems N mazgų. Koordinačių sistemos ryšys nagrinėjamas lokaliaje mazgo koordinačių sistemoje ($LMKR$). Tam naudojami du grafai:

- ryšio grafas $G(N, E)$, čia N – viršūnės, E – kraštinės, kai $\forall i, j \in N$ yra tokie, kad $e_{ij} \in E$, o mazgai i ir j yra tiesioginiai kaimynai;
- tinklo koordinačių sistemos (TKS) grafas $G_{TKS}(N, E_{TKS})$, čia N – viršūnės, E_{TKS} – kraštinės, kai $\forall i, j \in N$ yra tokie, kad $e_{ij} \in E_{TKS}$, o mazgas $i \in LMKR_j$, mazgas $j \in LMKR_i$ ir $\exists m \in N$, toks, kad $m \in LMKR_i \cap LMKR_j$.

Remiantis suformuotais grafais nustatoma, tarp kurių mazgų porų gali būti atliekama lokalių koordinačių sistemų apjungimo operacija.

$\lambda(G)$ – tai minimalus kraštinių skaičius, kai iš grafo G pašalinus tiek kraštinių, grafas G suyra [15]. Ne visi kaimyniniai mazgai gali perduoti informaciją apie tinklo koordinačių sistemą, todėl $LMKR_i \subseteq K_i, \forall i \in N$. Dėl šios priežasties yra teisinga tokia nelygybė: $\lambda(G_{TKS}) \leq \lambda(G)$.

Pastaroji nelygybė rodo, kad norint pasiekti gerą $LMKR$ ryšį, reikalingas pakankamai stiprus ryšys tarp mazgų. Ryšys abiejuose grafuose priklauso nuo mazgų signalų stiprumo bei nuo mazgų tankio mikrosensoriniame tinkle. Esant mazgų judėjimui tinkle, pakankamai stiprus ryšys tarp mazgų užtikrina, kad mazgai priklausantys $LMKR$ grupei, išlaikys tarpusavio ryšį.

4.3 Mazgų padėties nustatymo klaidos

Algoritmai, aprašyti ankstesniuose skyriuose, santykinės tinklo koordinačių sistemos suformavimui naudoja atstumus tarp mazgų. Todėl atstumų matavimų tikslumas įtakoja mazgų padėties nustatymo tikslumą. Atstumų matavimui tarp mazgų gali būti naudojama signalo priėmimo laiko (*angl.* TOA – time of arrival) technologija ir trianguliacijos

algoritmas. Tuomet matavimų tikslumui neigiamą įtaką daro matavimų ir netiesioginio matomumo (*angl.* NLOS – non line of sight) klaidos.

Kai kuriuose literatūros šaltiniuose [16], [17] įvertintos netiesioginio matomumo klaidos, tačiau juose nagrinėjami tinklai yra infrastruktūriniai (egzistuoja specifinis mazgų išdėstymas), taip pat naudojamos bazinės stotys su iš anksto žinomomis koordinatėmis. Remiantis [16] straipsniu daroma prielaida, kad netiesioginio matomumo klaidų apdorojimas galimas ir nuo infrastruktūros nepriklausomuose mikrosensoriniuose tinkluose, kuriuose nenaudojamos bazinės stotys (kartiniai mazgai su iš anksto žinomomis koordinatėmis) ir mazgai nėra stacionarūs. Tiriant mazgo padėties nustatymo tikslumą lokaliaje koordinatinių sistemoje taikomas toks algoritmas:

- mazgų padėtys lokaliaje koordinatinių sistemoje apskaičiuojamos nenaudojant tiriamo mazgo;
- tiriamo mazgo koordinatės apskaičiuojamos panaudojant bent trijų jo kaimynų koordinates;
- klaidų sušvelninimui gali būti taikomi [16], [17] straipsniuose aprašyti metodai.

Egzistuoja klaidų sušvelninimo analogija tarp narvelinės struktūros ir mikrosensorinių tinklų, nes abiem atvejais mazgų koordinatinių apskaičiavimui naudojami atstumų matavimai. Jei išmatuota atstumų daugiau nei minimaliai reikia, klaidos gali būti sušvelnintos. Narvelinės struktūros sistemose atliekama mažiau atstumų matavimų nei mikrosensoriniuose tinkluose, nes judantis objektas dažniausiai apsuptas santykinai nedidelio skaičiaus bazinių stočių. Tuo tarpu mikrosensoriniuose tinkluose vidutinis kaimyninių mazgų skaičius gali būti daug didesnis. Be to, narvelinės struktūros sistemose bazinės stotys turi fiksuotas padėties ir jų tarpusavio atstumai nesukelia klaidų.

4.3.1 Klaidų įvertinimas

Šioje dalyje nagrinėjama, kaip didėja padėties įvertinimo klaidos, didėjant mazgo atstumui nuo tinklo koordinatinių sistemos centro. Jei mazgas nutolęs n šuolių atstumu nuo tinklo koordinatinių sistemos centro, jo padėtis apskaičiuojama sumuojant padėčių vektorius kelyje nuo centro į tiriamą mazgą. Tuomet mazgo padėties įvertinimo klaida lygi klaidų vektorių sumai tame pačiame kelyje.

Vertinant klaidas, remiamasi tokiomis prielaidomis:

- klaidų vektorių krypčių pasiskirstymas yra tolygus;
- klaidų vektoriaus ilgis ir kryptis yra tarpusavyje nepriklausomi;

- visų mikrosensorinio tinklo mazgų signalo stiprumas yra vienodas (todėl tikimasi, kad klaidų vektorių ilgiai yra vienodai pasiskirstę).

Tikėtina suminė klaidų vektoriaus reikšmė yra:

$$E(\vec{X}) = E(\vec{x}_1) + \dots + E(\vec{x}_{n-1}) = (n-1)E(\arg(\vec{x}_1))E(\cos \alpha_1 + i \sin \alpha_1) = 0, \quad (4.7)$$

kai $\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_{n-1}$ yra klaidų vektoriai lokaliuose koordinačių sistemose, naudojami apskaičiuojant tiriamo mazgo padėtį, o α_1 yra tinklo koordinačių sistemos centro vieno šuolio kaimynų klaidų vektoriaus kryptis.

Taigi klaidų vektoriaus tikėtina reikšmė mazge, kuris nutolęs nuo tinklo koordinačių sistemos centro per n šuolių, bus lygi nuliui. Nepaisant to, manoma, kad klaidų vektoriaus standartinis nuokrypis didėja, didėjant atstumui tarp mazgo ir tinklo koordinačių centro. Tai reiškia, kad algoritmo taikymą riboja tinklo dydis.

4.4 Informacijos perdavimo kaštai

Šioje dalyje analizuojami tarp mazgų vykdomi duomenų srautai, kurie užtikrina tinklo funkcionalumą. Duomenų srautai nėra kryptiniai, t. y. mazgas informaciją siunčia visiems kaimyniniams mazgas, o ne kažkuriam konkrečiam kaimynui.

Vidutinis kiekis žinučių, kurias reikia išsiųsti kiekvienam mazgui, kad būtų suformuotos lokalių koordinačių sistemos, yra k -tos eilės, kai k yra vidutinis vieno šuolio kaimynų skaičius tinkle. Atstumų tarp mazgo ir jo kaimynų apskaičiavimui, apsieikiama k žinučių. Kad perduotų šią informaciją, kiekvienas mazgas išsiunčia vieną papildomą žinutę savo vieno šuolio kaimynams. Taigi iš viso kiekvienas mazgas turi išsiųsti $k+1$ žinučių.

Suformavus lokalias koordinačių sistemas, mazgai skaičiuoja savo tankio koeficientus. Žinučių kiekis, kurį reikia išsiųsti kiekvienam mazgui, kad apskaičiuotų tankio koeficientą, priklauso nuo srities, kuriai skaičiuojamas tankio koeficientas, dydžio. Vidutinis kiekis žinučių, kurias išsiunčia mazgas, kad apskaičiuotų tankio koeficientą, yra k^{n-1} eilės, kai k yra vidutinis vieno šuolio kaimynų skaičius visame tinkle, o n parodo, kad tankio koeficientas skaičiuojamas per n šuolių nutolusių mazgų plote.

Žinučių siuntimas visiems tinklo mazgams – tai daug resursų reikalaujanti operacija. Mazgo išsiųstų žinučių kiekis yra k^{l-1} eilės, kai l yra vidutinis šuolių skaičius, reikalingas pasiekti grafo kraštą.

Formuoti lokalią koordinačių sistemą ir skaičiuoti tankio koeficientą nėra labai daug resursų reikalaujančios operacijos. Tačiau šios operacijos atliekamos kiekviename mazge

labai dažnai, todėl tinklo koordinacių sistemos formavimas yra daug resursų reikalaujanti operacija. Kaip dažnai tinklo koordinacių sistema turi būti performuota, priklauso nuo algoritmų, realizuojančių tinklo koordinacių sistemos centro ir krypties priežiūrą bei nuo algoritmų, stabilizuojančių kiekvieno mazgo lokalią koordinacių sistemą.

5 EKSPERIMENTINĖ DALIS

Pagal sudarytą mikrosensorinio tinklo autolokacijos sistemos modelį, įvertinama:

- mazgų signalo stiprumo įtaka tinklo koordinačių sistemos formavimui;
- tinklo koordinačių sistemos centro judėjimas (kaip kinta centro greitis didinant pagrindinę mazgų grupę sudarančių mazgų skaičių, kai į skaičiavimus įtraukiami per vieną, du ir tris šuolius nuo centro nutolę mazgai);
- tinklo koordinačių sistemos krypties kitimas.

Pirmiausia įvertinama mazgų signalo stiprumo įtaka tinklo koordinačių sistemos formavimui. Po to tiriamas dėl mazgų mobilumo egzistuojantis tinklo koordinačių sistemos centro judėjimas bei tinklo koordinačių sistemos krypties kitimas.

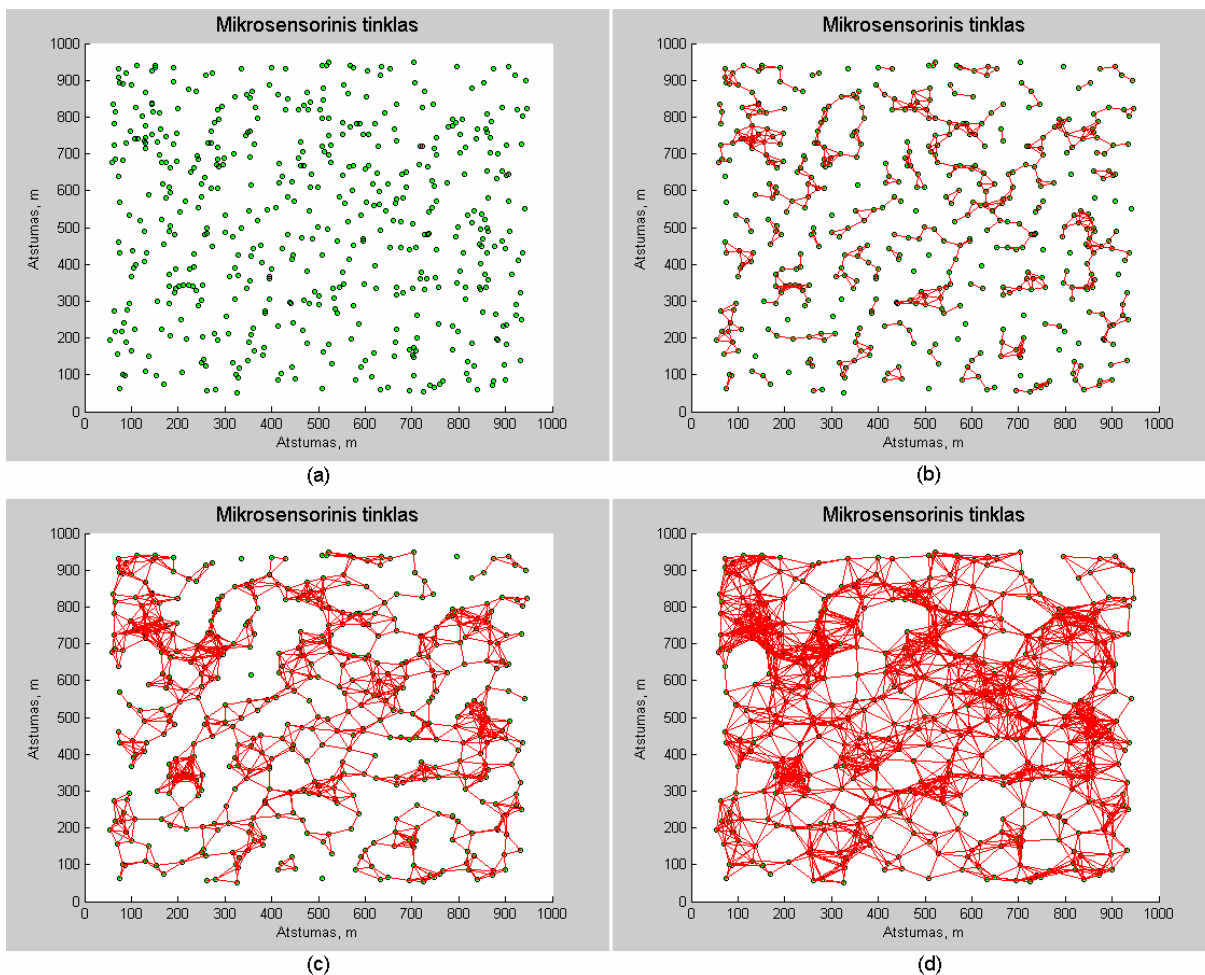
Mazgų padėtys modeliuojamos trim skirtingais būdais:

- vartotojas nurodo kiek mazgų turi būti tinkle ir koks mazgų signalo stiprumas, o sistema atsitiktinai parenka mazgų padėtis tinkle;
- vartotojas nurodo kiekvieno mazgo vietą pelės spragtelėjimu;
- mazgų koordinatės ir signalo stiprumas nuskaitomi iš tekstinio failo – šis būdas naudojamas, kai norima kelis kartus iš eilės modeliuoti tokią pačią tinklo topologiją.

Tinklo mazgai nėra stacionarūs, o jų judėjimas yra atsitiktinis. Modeliuojant, mazgai atsitiktinai pasirenka plokštumos tašką ir greitį, kuriuo judės į pasirinktą tašką. Maksimalus ir minimalus greičio intervalas nustatomas prieš programos vykdymą. Kai mazgas atvyksta į pasirinktą tašką, jis laukia fiksuotą laiko intervalą, tuomet vėl pasirenkami nauji atsitiktiniai parametrai (greitis ir vieta). Darome prielaidą, kad visi mazgai pasižymi vienodu signalo stiprumu.

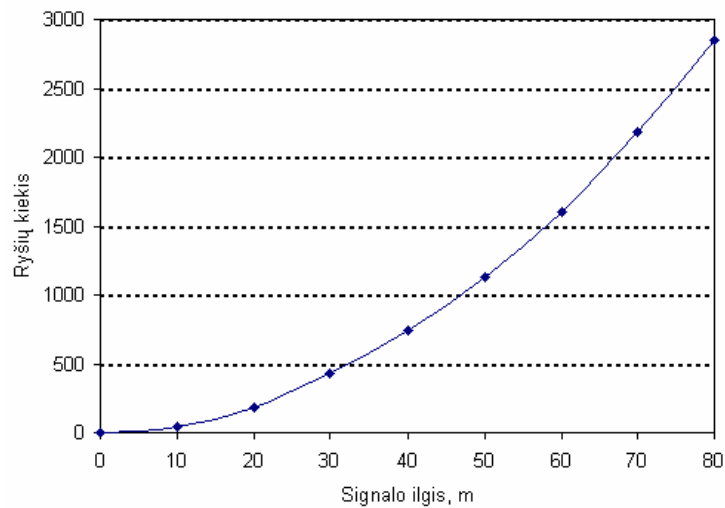
5.1 Mazgo signalo stiprumo įtaka tinklo ryšiui

Šioje dalyje įvertinama mazgo signalo stiprumo įtaka mikrosensorinio tinklo susiformavimui. Tiriamas 1km^2 tinklas, kuriame atsitiktinai išdėstyta 500 identiškų mazgų (18 paveikslas).



18 pav. Tinklo topologija ir ryšys

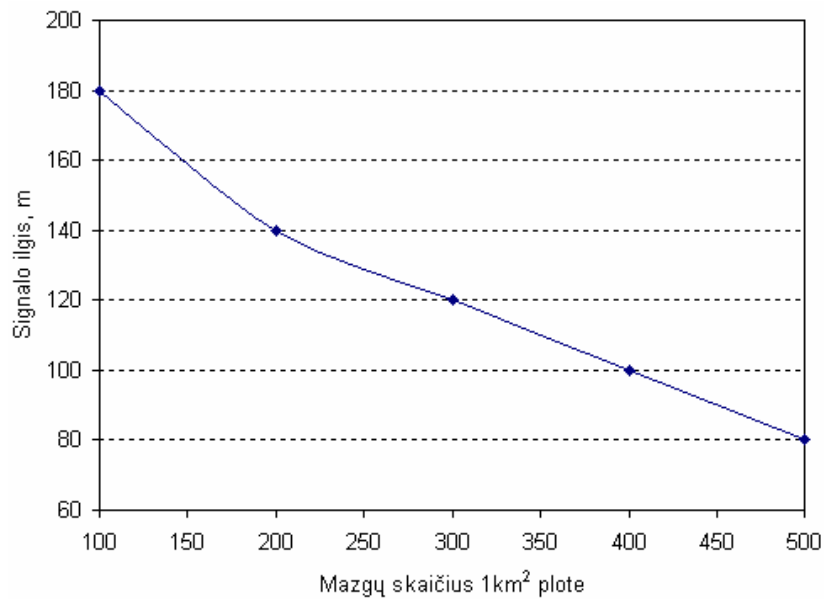
18a paveiksle pavaizduota vien tik tinklo topologija, o kitais trimis atvejais (b,c,d) – tinklo ryšys (ryšys tarp mazgų pažymėtas ištisine linija). 18b paveiksle pavaizduotas tinklo ryšys, kai mazgo signalo ilgis siekia 40m, 18c – 60m, o 18d – 80m. Pastebėta, kad modeliujamam atvejui, visų mazgų padėties tinklo koordinatčių sistemoje gali būti įvertintos tik esant 80m signalo ilgiui. Kaip kinta tinklo ryšys, didinant mazgo signalo ilgį, pavaizduota 19 paveiksle.



19 pav. Tinklo ryšio priklausomybė nuo mazgo signalo ilgio

Taigi, modeliujamu atveju, didinant mazgo signalo ilgį, tinklo ryšys stiprėja eksponentiškai. Eksponentinis augimas būdingas ir esant mažesniai tinklo mazgų skaičiui.

Akivaizdu, kad minimalus mazgo signalo ilgis, reikalingas tinklo ryšiui užtikrinti, priklauso nuo mazgų tankio tiriamame plote.

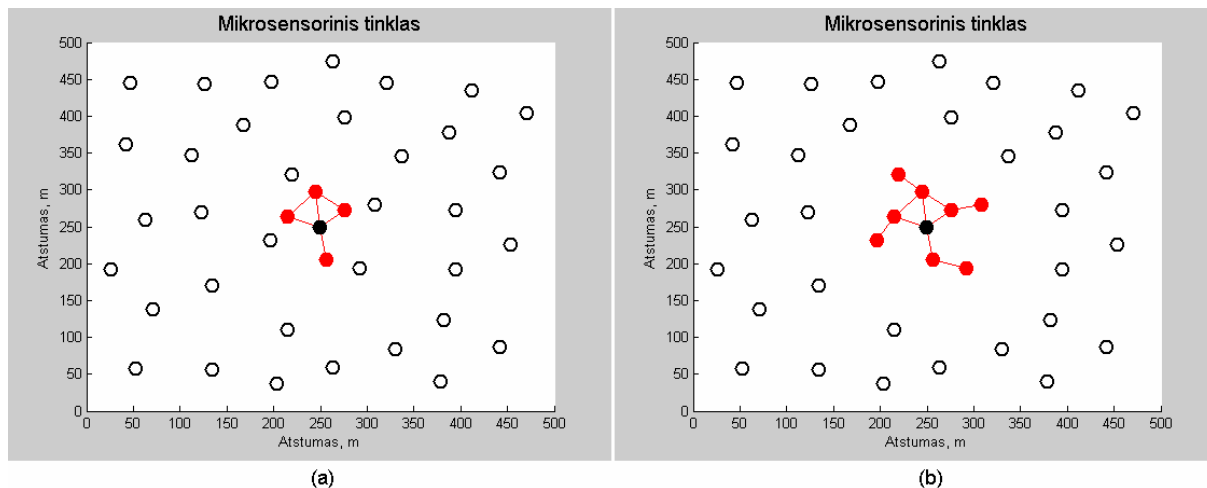


20 pav. Mazgų kiekio ir signalo ilgio sąryšis

Atlikti eksperimentai parodė, kad tinklo ryšiui užtikrinti reikalingas mazgo signalo ilgis beveik tiesiškai priklauso nuo mazgų kiekio, kai mazgai maždaug tolygiai pasiskirstę 1km^2 plote (20 paveikslas).

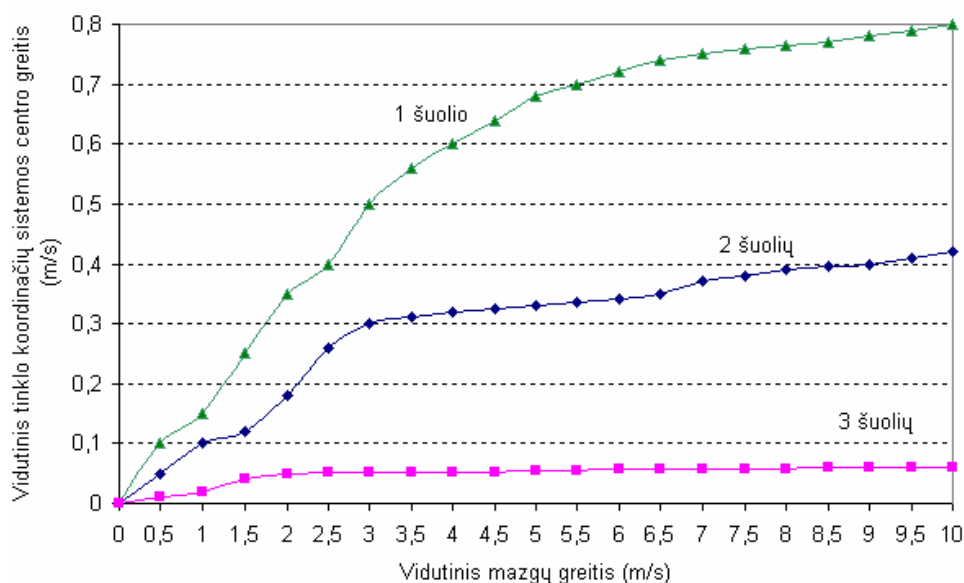
5.2 Tinklo koordinatinių sistemos centro stabilumas

Sudarytame autolokacijos modelyje, tinklo koordinatinių sistemos centras siejamas su pagrindine mazgų grupe, kuriai būdingas didžiausias tinklo mazgų tankis. Pagrindinės mazgų grupės dydis gali būti parenkamas atsižvelgiant į tinklo mobilumą. 21 paveiksle pavaizduotos vienos (21a) ir dviejų (21b) šuolių pagrindinės mazgų grupės.



21 pav. Pagrindinė mazgų grupė

Problema yra parinkti tokį mazgų grupės dydį, kad tinklo koordinatinių sistemos centro judėjimas būtų kuo mažesnis. Kuo didesnė pagrindinė mazgų grupė, tuo daugiau skaičiavimų turi būti atliekama jos palaikymui. Tačiau esant dideliame tinklo mobilumui, didesnė mazgų grupė užtikrina centro stabilumą. 22 paveiksle palyginamas koordinatinių sistemos centro judėjimas naudojant vienos, dviejų ir trijų šuolių pagrindinės mazgų grupės dydį.

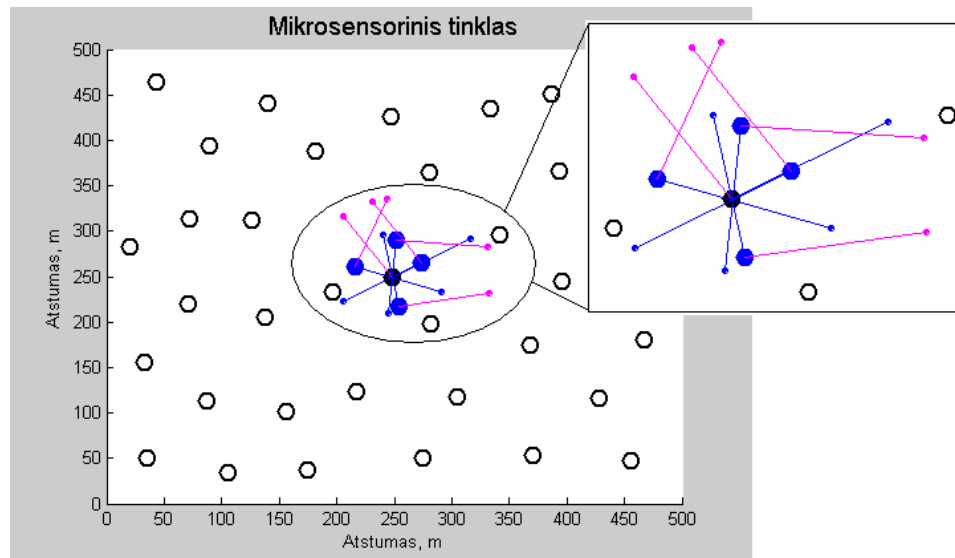


22 pav. Tinklo koordinatinių sistemos centro judėjimas

Taigi, tiriamu atveju, kai mazgų greičio vidurkis yra nuo nulio iki 10m/s ir naudojama trijų šuolių dydžio pagrindinė mazgų grupė, gaunamas stabilus koordinacių sistemos centro judėjimas (apie 0.05m/s). Naudojant dviejų šuolių dydžio pagrindinę mazgų grupę, centro judėjimas šiek tiek stabilizuojasi, kai vidutinis mazgų greitis viršija 3m/s. Vieno šuolio pagrindinė mazgų grupė stabilumu nepasižymi.

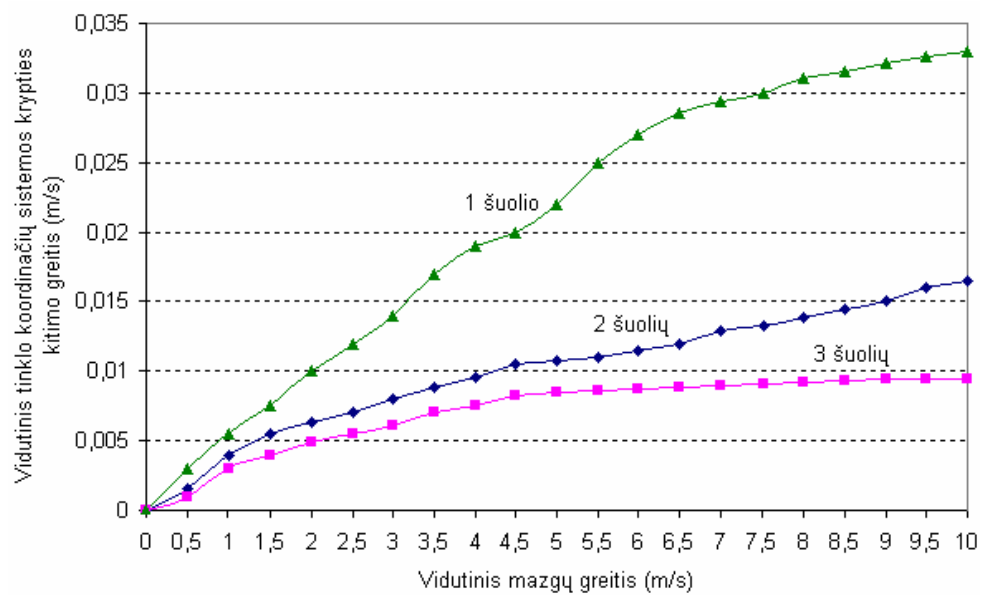
5.3 Tinklo koordinacių sistemos krypties kitimas

Toliau tiriamas tinklo koordinacių sistemos krypties kitimas. Sudarytame autolokacijos modelyje tinklo koordinacių sistemos kryptis gaunama suvidurkinant pagrindinės mazgų grupės lokalių koordinacių sistemų kryptis. Modeliuojamos vieno šuolio pagrindinės mazgų grupės lokals koordinacių sistemos pavaizduotos 23 paveiksle.



23 pav. Pagrindinės mazgų grupės lokals koordinacių sistemos

Tinklo koordinacių sistemos krypties kitimo priklausomybė nuo vidutinio mazgų judėjimo greičio, kai naudojama vieno, dviejų ir trijų šuolių pagrindinė mazgų grupė, pateikta 24 paveiksle.



24 pav. Tinklo koordinacių sistemos krypties kitimas

Šiuo atveju taip pat įsitikinama, kad kuo didesnė pagrindinė mazgų grupė, tuo mažiau kinta tinklo koordinacių sistemos kryptis didėjant vidutiniam mazgų judėjimo greičiui.

6 IŠVADOS

Atlikta išsami literatūros analizė, kurioje aptarti mikrosensoriniuose tinkluose naudojami autolokacijos algoritmai, jų specifika. Kiekvienas sprendimas turi savo privalumų ir trūkumų, o palyginimai ir vertinimai atlikti remiantis:

- lokalizavimo algoritmu, kai naudojamas atstumų matavimas arba gretimų kaimyninių mazgų informacija;
- skaičiavimų apkrovos padalinimu taikant centralizuotus arba paskirstytus metodus;
- naudojama koordinačių sistema – geografinė arba santykinė;
- tinklo infrastruktūros reikalavimais;
- apskaičiuojamų mazgų koordinačių tikslumu;
- kaštais, kurie reikalingi įdiegti autolokacijos sistemą.

Egzistuojantys sprendimai pritaikyti specifiniams uždaviniams spręsti ir nėra universalaus autolokacijos algoritmo, kuris tiktų daugeliu atvejų. Todėl sudarytas daug platesnės pritaikymo galimybes turintis autolokacijos sistemos modelis, kuriame

- nėra tinklo infrastruktūros apribojimų;
- nėra mazgų judėjimo apribojimų;
- naudojamas pilnas skaičiavimų apkrovos paskirstymas tarp tinklo mazgų;
- suformuojama santykinė tinklo koordinačių sistema nenaudojant centralizuotų žinių apie tinklo topologiją.

Modelio funkcionalumui patikrinti sudaryta „Matlab“ programa. Tyrimas atliktas modeliuojant mikrosensorinį tinklą, kai 1km^2 plote atsitiktine tvarka išdėstyta 500 mazgų. Pagal sudarytą modelį, keičiant specifinius sistemos parametrus, įvertinta:

- mazgų signalo stiprumo įtaka tinklo koordinačių sistemos formavimui;
- tinklo koordinačių sistemos centro judėjimas;
- tinklo koordinačių sistemos krypties kitimas.

Modeliuojamu atveju nustatyta, kad visų mazgų padėtys tinklo koordinačių sistemoje gali būti įvertintos tik esant ne mažesniai kaip 80m signalo ilgiui (6.1 skyrius). Tuo tarpu norint sumažinti tinklo koordinačių sistemos centro ir krypties judėjimą, reikia didinti pagrindinę mazgų grupę (6.2, 6.3 skyriai).

Ateityje planuojama:

- plačiau tyrinėti klaidų šaltinius ir ieškoti sprendimų pagerinti atstumų matavimo tikslumą;

- pagerinti centro ir krypties stabilumui užtikrinti naudojamus heuristinius metodus;
- ištestuoti sudarytą mikrosensorinio tinklo autolokacijos sistemos modelio funkcionalumą realiose fizinėse terpėse.

Šio darbo tema skaitytas pranešimas 12-oje tarpuniversitetinėje magistrantų ir doktorantų konferencijoje „Informacinė visuomenė ir universitetinės studijos (IVUS’07)“. Pranešimo medžiaga atspausdinta konferencijos leidinyje (2007m. gegužės 16d.)

7 TERMINŲ SANTRUMPŲ ŽODYNAS

- AhLOS (*Ad hoc localization system*) - Ad hoc padėties nustatymo sistema
- AOA (*Angle of arrival*) – signalo priėmimo kampas
- APS (*Ad hoc positioning system*) - Ad hoc koordinacijų nustatymo sistema
- DV (*Distance vector*) - atstumo vektorius
- GPS (*Global positioning system*) – globali padėties nustatymo sistema
- LBS (*Location based system*) – sistema paremta padėties nustatymu
- LGR (*Location reference group*) – vietos nustatymo grupė
- LMI (*Linear matrix inequality*) – tiesinių matricių nelygybės
- LOS (*Line of sight*) – tiesioginis matomumas
- LP (*Linear programming*) – tiesinis programavimas
- LPS (*Local positioning system*) – lokali padėties nustatymo sistema
- LVS (*Local view set*) – lokalaus vaizdo rinkinys
- MDS (*Multidimensional scaling*) – daugiamatis matavimas
- MDS-MAP – daugiamatės matavimo žemėlapis
- MMSE (*Minimum mean square error*) – mažiausia vidutinė kvadratinė paklaida
- NLOS (*Non line of sight*) – netiesioginis matomumas
- RF (*Radio frequency*) – radijo dažnis
- RSS (*Radio signal strength*) – radijo signalo stiprumas
- RSSI (*Received signal strength indication*) – priimto signalo stiprumo matavimas
- SDP (*Semi-definite programming*) – dalinai apibrėžtas programavimas
- TBF (*Trajectory based forwarding*) – trajektorija paremtas persiuntimas
- TDOA (*Time difference of arrival*) – laiko skirtumas tarp signalų priėmimo
- TOA (*The time of arrival*) – signalo gavimo laikas

8 NAUDOTA LITERATŪRA

- [1] **K. Römer.** The lighthouse location system for smart dust. *ACM/USENIX Conf. Mobile Sys., Apps., and Svcs., San Francisco, CA*, May 2003, pp. 15-30.
- [2] **R. Iyengar, B. Sikdar.** Scalable and distributed GPS free positioning for sensor networks. *Proc. of IEEE ICC 2003, Anchorage, Alaska*, vol.1, May 2003, pp. 338-342.
- [3] **N. Patwai, A. O. Hero, M. Perkins, N. S. Correal, and R. J. O’dea.** Relative location estimation in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 51, August 2003, pp. 2137-2148.
- [4] **Y. Shang, W. Ruml, Y. Zhang, M. P. J. Fromherz.** Localization from mere connectivity. *ACM MobiHoc, Annapolis, MD*, June 2003, pp. 201-212.
- [5] **L. Doherty, K. S. J. Pister, P. E. Ghaoui.** Convex position estimation in wireless sensor networks. *IEEE InfoCom, Anchorage, AK*, vol. 3, April 2001, pp. 1655-1663.
- [6] **A. Savvides, H. Park, and M. B. Srivastava.** The bits and flops of the n-hop multilateration primitive for node localization problems. *MobiCom*, September 2002, pp. 112-121.
- [7] **D. Niculescu and B. Nath.** Ad hoc positioning system (APS). *IEEE GlobeCom, San Antonio*, November 2004.
- [8] **D. Niculescu and B. Nath.** Localized positioning in ad hoc networks. *Elsevier Ad Hoc Networks*, vol. 1, no. 2-3, September 2003, pp. 47-59.
- [9] **D. Niculescu and B. Nath.** Position and orientation in ad hoc networks. *Elsevier Ad Hoc Networks*, vol. 2, no. 2, April 2004, pp. 33-51.
- [10] **J. Hightower and G. Borriello.** Location systems for ubiquitous computing. *IEEE Comp.*, vol. 34, no. 8, August 2001, pp. 57-66.
- [11] **C. Savarese, J. Rabaey, K. Langendoen.** Robust positioning algorithms for distributed ad-hoc wireless sensor networks. *Monterey, CA*, June 2002, pp. 317-327.
- [12] **A. Buja, D. F. Swayne, M. Littman, N. Dean, and H. Hofmann.** Interactive data visualization with multidimensional scaling. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 2001.
- [13] **A. Savvides, C.-C. Han, and M. B. Srivastava.** Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors. *ACM MobiCom, Rome, Italy*, July 2001, pp. 166-179.
- [14] **D. Niculescu and B. Nath.** Trajectory based forwarding and its applications. *Rutgers University, Tech. Rep. DCS-TR-488*, May 2002.
- [15] **H. Whitney.** Congruent graphs and the connectivity of graphs. *Amer. J. Math.* 54, 1932.
- [16] **P.-C. Chen.** A non-line-of-sight error mitigation algorithm in location estimation. *IEEE Wireless Communications and Networking Conf.*, September 1999, pp. 316-320.
- [17] **M. P. Wylie and J. Holtzman.** The non-line of sight problem in mobile location estimation. *Proceedings of the International Conference on Universal Personal Communications, Cambridge, MA*, September 1996, pp. 827-831.
- [18] **S.-S. Wang, K.-P. Shih, C.-Y. Chang.** Distributed direction-based localization in wireless sensor networks. *IEEE Computers and Communications*, June 2005, pp. 373-378.
- [19] **K. Liu, S. Wang, F. Zhang, F. Hu, C. Xu.** Efficient localized localization algorithm for wireless sensor networks. *Fifth International Conference on Computer and Information Technology (CIT’05)*, September 2005, pp. 517-523.

- [20] **Y. Shang, W. Ruml, Y. Zhang, M. Fromherz.** Localization from connectivity in sensor networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 15, no. 11, November 2004, pp. 961-974.
- [21] **S. Srirangarajan and A. H. Tewfik.** Localization in wireless sensor networks under non line-of-sight propagation. *IEEE GlobeCom*, vol. 6, November 2005, pp. 3477-3481.
- [22] **M. L. Sichitiu and V. Ramadurai.** Localization of wireless sensor networks with a mobile beacon. *IEEE International Conference*, October 2004, pp. 174-183.
- [23] **N. Patwari, J. Ash, S. Kyperountas, A. O. Hero, R. Moses, and N. S. Correal.** Locating the nodes: cooperative localization in wireless sensor networks. *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 22, July 2005, pp. 54-69.
- [24] **X. Ji and H. Zha.** Sensor positioning in wireless ad-hoc sensor networks using multidimensional scaling. *IEEE InfoCom*, vol. 4, March 2004, pp. 2652-2661.
- [25] **R. Peng and M. L. Sichitiu.** Robust, probabilistic, constraint-based localization for wireless sensor networks. *IEEE Secon, Santa Clara, CA*, September 2005, pp. 541-550.
- [26] **L. Lazos, R. Poovendran, and S. Capkun.** ROPE: Robust position estimation in wireless sensor networks. *In the Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks*, April 2005, pp. 324-331.

9 PRIEDAI

1 Priedas. Straipsnis paskelbtas konferencijoje „Informacinė visuomenė ir universitetinės studijos (IVUS‘07)“

MIKROSENSORINIO TINKLO AUTOLOKACIJOS SISTEMOS SUDARYMAS IR TYRIMAS

Vitalijus Martusevičius

Kauno technologijos universitetas, Studentų g. 50

Mikrosensoriniai tinklai sudaryti iš daug mažų nepriklausomų baterijomis maitinamų įrenginių, pasižyminčių nedideliu energijos suvartojimu ir maža savikaina. Tokio tipo tinkluose koordinačių nustatymas yra sudėtingas uždavinys, nes mikrosensoriniai tinklai sudaromi išdėstant daug santykinai pigių mazgų, kurie nepasižymi dideliais skaičiavimo pajėgumais. Taigi didelis mazgų kiekis, jų mobilumas ir poreikis mažinti mikrosensorinio tinklo kaštus, labai komplikuoja autolokacijos uždavinį.

Straipsnyje aprašoma mikrosensorinio tinklo mazgų autolokacijos problema, ir šios problemos sprendimui pasiūlomas paskirstytas bei nuo infrastruktūros nepriklausomas autolokacijos algoritmo modelis.

1 Įvadas

Nagrinėjant mikrosensorinius tinklus, labai svarbi yra mazgų autolokacijos problema. Tokio tipo tinklai sudaryti iš daug mažų nepriklausomų baterijomis maitinamų įrenginių, kurių pagrindiniai reikalavimai yra nedideli energijos suvartojimo resursai ir maža savikaina. Kai tinklo mazgų skaičius siekia tūkstančius, egzistuojančios GPS (angl. global positioning system) sistemos tampa nepriimtinos, nes įdiegti į kiekvieną tinklo mazgą GPS imtuvą būtų labai brangu ir nepraktiška.

Vis didesnę reikšmę įgyja mikrosensorinių tinklų projektavimas, kuriuose bene svarbiausia užduotis yra sudaryti metodiką kuo paprastesnių tinklo mazgų projektavimui, kad mazgai naudotų kiek įmanoma mažiau galios ir sugebėtų pakankamai greitai atlikti realaus laiko skaičiavimus.

Kadangi mikrosensorinio tinklo mazgai turi suvartoti nedaug baterijos energijos, taip prailgindami savo tarnavimo laiką, reikalingi alternatyvūs objekto pozicijos nustatymo algoritmai, paremti nesudėtingais ir greitais skaičiavimais, kurie leistų pakankamai greitai ir tiksliai apskaičiuoti mazgų koordinates.

Dėl minėtų priežasčių, reikia, kad mazgai patys susikonfigūruotų į tinklą, t.y. apskaičiuotų savo koordinates tinklo atžvilgiu. Tai vadinama mikrosensorinio tinklo autolokacija, kuri realizuojama kiekvienam mazgui įvertinant atstumus ir kampus iki kaimyninių mazgų.

Autolokacijos uždavinys yra ganėtinai komplikotas dėl daugelio priežasčių, kurių pagrindinės yra šios:

- mazgai nepasižymi dideliais skaičiavimo pajėgumais;
- reikia taupyti baterijos energiją;
- ribotas mazgų tarnavimo laikas;
- mazgai nėra stacionarūs.

Mikrosensoriniai tinklai suformuojami įvariose fizinėse terpėse, kuriose sunku atlikti pakankamai tikslus atstumų matavimus tarp mazgų. Atstumai tarp mazgų gali būti klaidingai apskaičiuoti dėl tinkle esančio triukšmo ar tiesioginio matavimo (angl. LOS – line of sight) problemos. Todėl autolokacijos algoritmas turi būti atsparus netiksliai arba trūkstamų duomenų atžvilgiu.

Pagrindinis darbo tikslas yra sudaryti tokį mikrosensorinio tinklo autolokacijos sistemos modelį, kuriame mazgai patys susikonfigūruotų į tinklą, suformuotų santykinę viso tinklo koordinačių sistemą ir joje apskaičiuotų savo koordinates. Pastarajam tikslui pasiekti iškeliami tokie uždaviniai:

- išanalizuoti egzistuojančias mikrosensorinių tinklų autolokacijos sistemas;
- egzistuojančių sprendimų pagrindu sudaryti paskirstytą bei nuo tinklo infrastruktūros nepriklausomą autolokacijos sistemos modelį;
- ištirti modelio veikimą keičiant specifines sistemos charakteristikas.

Sudaromas paskirstytas skaičiavimais besiremiantis modelis, kai tarpusavyje komunikuodami mazgai apskaičiuoja savo ir kaimyninių mazgų koordinates. Kadangi nenaudojama GPS ar jai alternatyvi technologija, tai tinklo mazgai negali apskaičiuoti savo geografinių koordinačių, todėl remiantis tinklo topologija sudaromos lokalios koordinačių sistemos, kurios vėliau apjungiamos į bendrą santykinę viso tinklo koordinačių sistemą.

2 Autolokacijos sistemų analizė

Objekto-mazgo vietos nustatymo problema susideda iš daug inžinerinių sprendimų, tokių kaip mazgų tarpusavio matomumas, signalų perdavimo būdas, jungimosi į tinklą galimybės. Dauguma literatūroje pateikiamų sprendimų remiasi kertiniais tinklo mazgais (dažniausiai pasižyminčiais didesnėmis techninėmis bei skaičiavimo galimybėmis) su iš anksto žinomomis koordinatėmis. Šie atraminiai tinklo mazgai nustato atstumą ir kampą iki visų tinklo mazgų. Tokie sprendimai vadinami vieno šuolio, kadangi atraminiai tinklo mazgai visus kitus mikrosensorinio tinklo mazgus pasiekia tiesiogiai. Kita algoritmų klasė remiasi daugelio šuolių skaičiavimais, kai tik maža dalis tinklo mazgų turi tiesioginį ryšį su kertiniais tinklo mazgais.

Algoritmai gali būti klasifikuojami pagal mazgų technines galimybes – gebėjimą nustatyti gretimų mazgų koordinates, kai atskaitos taškas yra pats mazgas. Kita vertus, skaičiavimai gali būti atliekami remiantis vien tik ryšio informacija, gauta iš tinklo grafo topologijos.

Jei naudojami mazgai su padėties nustatymo galimybėmis, tai koordinatės gali būti randamos matuojant atstumą ir kampą iki kaimyninių mazgų arba panaudojant lokalizavimo įrankius: kompasus, akselerometrus. Radijo ryšiu veikiančiuose mikrosensoriniuose tinkluose, atstumas tarp kaimyninių mazgų nustatomas remiantis signalo stiprumu, tačiau šis metodas yra labai netikslus. Kitas būdas atstumui tarp mazgų nustatyti – tai garso sklidimo laiko matavimas. Šiuo atveju tinklo mazguose turi būti įmontuoti ultragarso siųstuvai ir imtuvai. Nors atstumai gaunami centimetrų tikslumu, tačiau naudojant tokią technologiją reikia, kad tarp mazgų būtų tiesioginis matomumas.

Pozicijos nustatymo algoritmus galima klasifikuoti pagal tai, kokia naudojama koordinačių sistema: lokali, santykinė ar absoliuti. Absoliuti koordinačių sistema yra patogiausia, kadangi ji susieta globaliu ryšiu naudojamu komerciniuose ir kariniuose standartuose. Populiariausias tokios sistemos pavyzdys – tai GPS tinklas. Tokio tipo sistemos pasižymi dideliais komunikacijos reikalavimais, o jų veikimas paremtas kertiniais tinklo mazgais, kurių koordinatės yra žinomos. Santykinės lokalizacijos algoritmu suformuojama santykinė tinklo koordinačių sistema, kurioje apskaičiuojamos mazgų koordinatės. Lokali koordinačių sistema paremta vien tik lokaliu ryšiu, kai komunikuojantys mazgai nustato savo padėtį kaimyninių mazgų atžvilgiu.

Algoritmo efektyvumas ir pritaikymas priklauso nuo to, ar jis yra centralizuotas, ar paskirstytas, ar lokalizuotas. Centralizuoto algoritmo atveju numatoma galimybė panaudoti globalią informaciją, kuri gali žymiai padidinti mazgo padėties nustatymo tikslumą. Tokiu atveju visa mikrosensorinio tinklo topologija turi būti saugoma viename centriniame mazge, kurio dėka ir atliekamas tinklo mazgų padėties nustatymas. Pastarojo algoritmo trūkumas yra tas, kad pagrindinis mazgas turi atlikti skaičiavimus su didelėmis duomenų struktūromis, kurioms reikia daug centrinio mazgo skaičiavimo ir energijos resursų. Paskirstytas algoritmas naudoja keletą skaičiavimo ir komunikacijos veiksmų, kai vieno centrinio mazgo problema sprendžiama skaičiavimo apkrovą padalinant tarp kelių tinklo mazgų. Lokalizuotas algoritmas remiasi dar didesniu apkrovos paskirstymu, nes skaičiavimai atliekami visuose tinklo mazguose.

2.1 Autolokacijos sistemų ypatumai

Autolokacijos sistemose naudojami specifiniai algoritmai mazgų koordinačių skaičiavimui. Todėl kiekvienas sprendimas turi savo privalumų ir trūkumų, o palyginimai ir vertinimai atliekami remiantis:

- lokalizavimo algoritmu, kai naudojamas atstumų matavimas arba gretimų kaimyninių mazgų informacija;
- skaičiavimų apkrovos padalinimu taikant centralizuotus arba paskirstytus metodus;
- naudojama koordinačių sistema – geografinė arba santykinė;
- tinklo infrastruktūros reikalavimais: autolokacijos sistemos gali būti nuo infrastruktūros priklausomos arba nepriklausomos (nuo infrastruktūros priklausomose sistemose yra nustatyti apribojimai mazgų išsidėstymui tinkle);
- apskaičiuojamų mazgų koordinačių tikslumu;
- kaštais, kurie reikalingi įdiegti autolokacijos sistemą.

Iš to seka, kad nėra universalaus autolokacijos algoritmo, kuris tiktų daugeliu atvejų. Taigi, nagrinėjant mikrosensorinius tinklus, paskirstytos bei nuo infrastruktūros nepriklausomos autolokacijos sistemos sudarymas ir tyrimas yra labai aktuali problema.

3 Autolokacijos sistemos modelis

Sudaromas autolokacijos sistemos modelis pasižymi tokiomis savybėmis:

- tinklas nepriklausomas nuo infrastruktūros;
- visi mazgai turi vienodas technines galimybes;
- mazgai nėra stacionarūs.

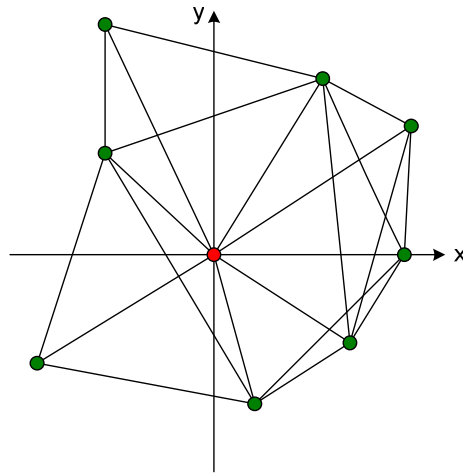
Remiantis minėtomis savybėmis, sudaryta metodika kiekvieno mazgo lokalsios koordinačių sistemos suformavimui. Algoritmas, lokalsios koordinačių sistemos sudarymui kiekviename mazge, remiasi tuo, kad mazgas, kurio atžvilgiu sudaroma lokali koordinačių sistema, tampa centriniu. Tuomet apskaičiuojamos

kaimyninių mazgų koordinatės. Vėliau lokalių koordinatinių sistemų apjungiamos į santykinę viso tinklo koordinatinių sistemą.

Kiekviename mazge atliekami tokie veiksmai:

- aptinkami visi kaimyniniai vieno šuolio mazgai;
- apskaičiuojami atstumai iki šių mazgų;
- pastaroji informacija perduodama visiems vieno šuolio kaimyniniams mazgams.

Taip kiekvienas mazgas žino kaimyninių mazgų, nutolusių per vieną ir du šuolius, padėtis bei kai kuriuos atstumus tarp vieno ir dviejų šuolių kaimynų. Atstumų skaičius, dėl mazgų energijos ribotų resursų, nežinomas. Mazgo lokali koordinatinių sistema ir joje esantys vieno šuolio kaimyniniai mazgai pavaizduoti 1 paveiksle.



1 pav. Lokali mazgo koordinatinių sistema.

Kai visi mazgai sukuria savo lokalias koordinatinių sistemas, jie tampa savo lokalių koordinatinių sistemų atskaitos taškais. Be to, visos lokalių koordinatinių sistemų turi skirtingai orientuotas x ir y ašis. Tuomet taikomas algoritmas, visų lokalių koordinatinių sistemų apjungimui į bendrą viso tinklo koordinatinių sistemą. Galime išskirti tokias sudedamąsias dalis:

- lokalių koordinatinių sistemų orientavimas viena kryptimi;
- tinklo koordinatinių sistemų centro ir krypties nustatymas;
- mazgų koordinatinių skaičiavimas tinklo koordinatinių sistemoje.

Vieno mazgo koordinatinių sistemos orientavimas pagal kito mazgo koordinatinių sistemą gali būti atliktas vienu arba dviem žingsniais: koordinatinių sistemą pasukant tam tikru kampų, o jei reikia, tai ir padarant jos veidrodinį atspindį vienos iš koordinatinių ašių atžvilgiu.

Tinklo koordinatinių sistemos centru pasirenkant atsitiktinio mazgo lokalią koordinatinių sistemą, kiti mazgai turi perorientuoti savo koordinatinių sistemas pagal pasirinkto mazgo koordinatinių sistemą. Toks požiūris atrodo paprastas ir nesunkiai realizuojamas, tačiau nagrinėjant mikrosensorinį tinklą, kuriame visi mazgai nėra stacionarūs, ši metodika yra komplikauta. Taip yra todėl, kad centrinio mazgo judėjimo intensyvumas lemia, kaip dažnai visi tinklo mazgai turi perskaičiuoti savo koordinates tinklo koordinatinių sistemoje. Tai įtakoja didelės paklaidas tarp realių ir apskaičiuotų mazgų koordinatinių. Be to, centrinis mazgas tampa kritiniu viso tinklo faktoriumi, nes praradus centrinį mazgą, prarandama ir visa tinklo koordinatinių sistema. Todėl toks požiūris gali būti naudojamas tik nedideliuose mikrosensoriniuose tinkluose, kuriuose mazgai nepasižymi dideliu judėjimo intensyvumu bei mazgų praradimo tikimybė yra labai maža.

Stabilumui pagerinti, tinklo koordinatinių sistemos centrą galima pasirinkti sudarius mazgų padėčių funkciją. Šiuo atveju gauname stabilesnį centrą, tačiau mazgai turi dažniau keistis informacija ir todėl padidėja viso tinklo duomenų srautai. Kitaip tariant, mikrosensorinio tinklo centru tampa nuo tinklo topologijos priklausantis geometrinis centras.

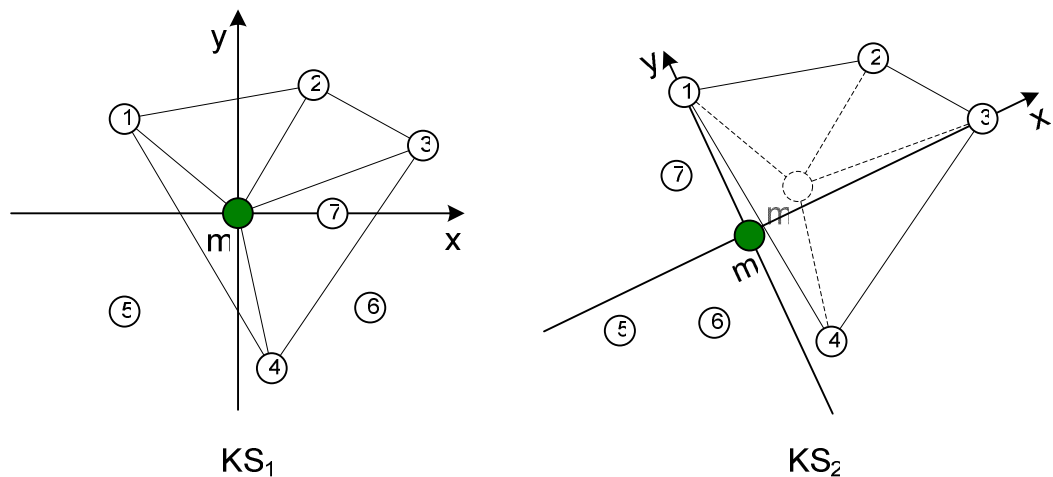
Kadangi nagrinėjame mikrosensorinį tinklą, kuriame mazgai nėra stacionarūs, lokalių koordinatinių sistemų apjungimui naudojamas metodas, kuriuo remiantis gaunamas stabilesnis tinklo koordinatinių sistemos centras.

Taigi tinklo centrui naudojama mazgų grupė, kuri pasižymi stabilumu ir nedidele praradimo tikimybe. Daroma prielaida, kad tokius reikalavimus geriausiai tenkina didžiausiu mazgų tankumu pasižyminti tam tikra tinklo dalis. Taigi tinklo centras susiejamas ne su vienu mazgu, bet su tam tikros mazgų grupės santykinę padėtimi, kuri priklauso nuo mazgų grupės topologijos. Kai mazgai juda, mazgų grupės centras atitinkamai perskaičiuojamas. Pagrindinis privalumas yra tas, kad vidutinis mazgų grupės centro judėjimo greitis yra daug

mažesnis už pavienių mazgų judėjimo greitį. Tokiu būdu pasiekiamas tinklo centro stabilumas bei sumažinamos paklaidos tarp realių ir apskaičiuotų mazgų koordinatų.

Lokalių koordinatų sistemos krypties parinkimas yra atsitiktinis. Iš to seka, kad viso tinklo koordinatų sistemos kryptis taip pat atsitiktinė, nes ji priklauso nuo pagrindinės mazgų grupės lokalių koordinatų sistemų kryptų. Tinklo koordinatų sistemos krypties stabilizavimui naudojamas algoritmas, kurį turi vykdyti kiekvienas pagrindinės mazgų grupės mazgas:

- Suformuojama mazgo lokali koordinatų sistema KS_1 .
- Mazgų padėtys kinta dėl jų judėjimo, todėl naujai įvykdžius lokalių koordinatų sistemos formavimo algoritmą, gaunama nauja koordinatų sistema KS_2 .
- Mazgas lygina kitų mazgų padėtis dviejose koordinatų sistemose ir ieško bent trijų mazgų, kurie turi tokią pat topologiją abiejose koordinatų sistemose. Jei toks mazgų rinkinys aptinkamas, daroma prielaida, kad šie mazgai nepajudėjo, per laiko tarpą, kol algoritmas buvo įvykdytas abu kartus. Ši prielaida gali būti klaidinga, tačiau yra labai didelė tikimybė, kad ji teisinga.
- Mazgas naudoja šį mazgų rinkinį ir jų atstumus perskaičiuoti KS_1 centrą KS_2 koordinatų sistemoje (2 paveikslas). Tuomet galima pakoreguoti KS_2 kryptį pagal KS_1 kryptį.
- Jei mazgas negali pertvarkyti KS_1 koordinatų sistemos, tuomet KS_2 tampa nauja lokalia mazgo koordinatų sistema.



2 pav. Koordinatų sistemos korekcija.

Šis algoritmas leidžia kiekvienam mazgui, priklausančiam pagrindinei mazgų grupei, stabilizuoti savo lokalių koordinatų sistemos kryptį. Pagrindinės mazgų grupės pagrindinis mazgas apskaičiuoja tinklo koordinatų sistemos kryptį suvidurkindamas visų grupės lokalių koordinatų sistemų kryptis. Tokiu būdu stabilizuojama viso tinklo koordinatų sistemos kryptis. Tankiausiose tinklo srityse tikimasi mažiausio mazgų judėjimo, nes tai yra pagrindinis veiksnys lemiantis sėkmingą algoritmo panaudojimą.

4 Išvados

Sudarytas paskirstytas ir nuo infrastruktūros nepriklausomas autolokacijos sistemos modelis, kai

- mazgai atsitiktinai išdėstomi tam tikrame plote;
- mazgams atliekant autolokacijos funkcijas, suformuojama santykinė koordinatų sistema;
- tinklo koordinatų sistemos kryptis ir centras nustatomi panaudojant heuristinius metodus;
- skaičiuojamų mazgų koordinatų tikslumą lemia atstumų matavimo klaidos.

Realizuojant šią autolokacijos sistemą, susiduriama su keletu sunkumų:

- mazgų signalo galios intervalas turi būti pakankamas, kad užtikrintų lokalių koordinatų sistemos ryšį, nes ryšys tarp mazgų neužtikrina, kad bus apskaičiuotos visų mazgų padėtys.
- pagrindinės mazgų grupės dydis turi būti pasirinktas taip, kad padidintų tinklo koordinatų sistemos centro ir krypties stabilumą, bet per daug neapkrautų tinklo. Tai sumažina paklaidas tarp realių ir apskaičiuotų tinklo centro koordinatų.

Viena svarbiausių šio sprendimo charakteristikų yra ta, kad mazgai nežino fizinės tinklo koordinatų sistemos krypties. Mazgai žino, kur kaimyniniai mazgai išdėstyti santykinėje koordinatų sistemoje, bet

nenaudojamas joks metodas susieti tinklo koordinacijų sistemos su geografinė koordinacijų sistema. Tai būtų įmanoma realizuoti apjungiant šį algoritmą su GPS galimybėmis pasižyminčiais įrenginiais.

Taigi pasiūlytas autolokacijos sistemos modelis leidžia įvertinti mazgų padėtis remiantis tik kiekvieno mazgo turima informacija ir mazgų techninėmis galimybėmis. Parodėme, kad galima suformuoti koordinacijų sistemą nenaudojant centralizuotų žinių apie tinklo topologiją.

Ateityje planuojama plačiau tyrinėti klaidų šaltinius ir ieškoti sprendimų pagerinti atstumų matavimo tikslumą. Taip pat pagerinti centro ir krypties stabilumui užtikrinti naudojamus heuristinius metodus. Ištestuoti sudarytą mikrosensorinio tinklo autolokacijos sistemos modelio funkcionalumą realiomis sąlygomis.

Literatūros sąrašas

- [1] **A. Savvides, C.-C. Han, and M. B. Srivastava.** Dynamic Fine-grained Localization in Ad-hoc Networks of Sensors. *ACM MOBICOM, Rome, Italy*, Jul. 2003.
- [2] **A. Savvides, H. Park, and M. B. Srivastava.** The Bits and Flops of the n-Hop Multilateration Primitive for Node Localization Problems. *Mobicom*, Sep. 2002.
- [3] **C. Savarese, J. Rabaey, K. Langendoen.** Robust Positioning Algorithms for Distributed Ad-Hoc Wireless Sensor Networks. *Monterey, CA*, Jun 2002.
- [4] **D. Niculescu and B. Nath.** Ad Hoc Positioning System (APS). *IEEE Globecom, San Antonio*, Nov. 2004.
- [5] **D. Niculescu and B. Nath.** Localized Positioning in Ad Hoc Networks. *Elsevier Ad Hoc Networks*, vol. 1, no. 2-3, Sep. 2003, pp. 47-59.
- [6] **D. Niculescu and B. Nath.** Position and Orientation in Ad Hoc Networks. *Elsevier Ad Hoc Networks*, vol. 2, no. 2, Apr. 2004, pp. 33-51.
- [7] **Y. Shang, W. Ruml, Y. Zhang, M. P. J. Fromherz.** Localization from Mere Connectivity. *ACM MOBIHOC, Annapolis, MD*, June 1-3 2003.
- [8] **J. Hightower and G. Borriello.** Location Systems for Ubiquitous Computing. *IEEE Comp.*, vol. 34, no. 8, 2001, pp. 57-66.
- [9] **K. Römer.** The Lighthouse Location System for Smart Dust. *ACM/USENIX Conf. Mobile Sys., Apps., and Svcs., San Francisco, CA*, May 2003, pp. 15-30.
- [10] **L. Doherty, K. S. J. Pister, P. E. Ghaoui.** Convex Position Estimation in Wireless Sensor Networks. *IEEE Infocom, Anchorage, AK*, Apr. 2001.
- [11] **N. Patwai, A. O. Hero, M. Perkins, N. S. Correal, and R. J. O'dea.** Relative Localization Estimation in Wireless Sensor Network. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 51, Aug. 2003.
- [12] **S.-S. Wang, K.-P. Shih, C.-Y. Chang.** Distributed direction-based localization in wireless sensor networks. *Comput. Commun., Taiwan*, Jan. 2007.
- [13] **X. Ji and H. Zha.** Sensor Positioning in Wireless Ad-hoc Sensor Networks Using Multidimensional Scaling. *IEEE Infocom, Pennsylvania, USA*, Mar. 2004.

Development and Analysis of a Positioning System for Wireless Sensor Networks

Wireless sensor networks are composed by a large set of small independent battery-powered devices, where low cost and low power consumption are basic requirements. In such networks, where the number of nodes may be in order of thousands, creation of network coordinate system is very complicated task. The main issues are large amount of nodes, their mobility and demand to reduce communication costs.

In this article we review positioning problem and propose a distributed, infrastructureless positioning algorithm that does not rely on landmarks. Instead, the algorithm uses distances and angles between nodes to build a relative coordinate system.