

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
INFORMATIKOS FAKULTETAS
KOMPIUTERIŲ KATEDRA

Rolandas Gaudėšius

Mikrosensorinio tinklo optimalaus
maršrutizavimo sistemos sudarymas ir tyrimas

Magistro darbas

Darbo vadovas

prof. dr. E. Kazanavičius

Kaunas, 2007

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
INFORMATIKOS FAKULTETAS
KOMPIUTERIŲ KATEDRA

Rolandas Gaudėšius

Mikrosensorinio tinklo optimalaus
maršrutizavimo sistemos sudarymas ir tyrimas

Magistro darbas

Recenzentas:
doc. dr. Pranas Kanapeckas
2007-05-24

Vadovas:
prof. dr. E. Kazanavičius
2007-05-22

Atliko
IFM-1/1 gr. studentas
Rolandas Gaudėšius
2007-05-22

Kaunas, 2007

Turinys

SUMMARY	4
1. Įvadas	5
2. Analizės dalis	7
2.1. Veiksniai įtakojantys bevielių sensorinių tinklų modelius	7
2.2. Patikimumas	7
2.3. Keičiamo dydžio tinklas	7
2.4. Gamybos kaina	8
2.5. Sensorinio mazgo modelis	8
2.6. Pritaikymo aplinka	9
2.7. Energijos naudojimas	9
2.8. Standartai	9
2.8.1. Standartai ir „Zigbee“	9
2.8.2. Tinklo topologijos	11
2.9. Mikrosensorinio tinklo maršrutizavimo protokolų klasifikavimas	12
2.10. Mikrosensorinio tinklo maršrutizavimo kelio sudarymo algoritmai	13
2.11. Išvados	18
3. Projektinė dalis	19
3.1. Maršrutizavimo modelis	19
3.2. Maršrutizavimo algoritmas	20
3.3. Sensorinio mazgo energijos vartojimas	24
3.4. Teorinio modelio sudarymas ir tyrimas	27
3.4.1. Tinklo sudarymas ir mazgų informacijos surinkimas	27
3.4.2. Duomenų perdavimas sensoriniame bevieliame tinkle	28
3.4.3. Energijos atnaujinimas	30
3.4.4. Bevielio sensorinio tinklo palaikymas	30
4. Eksperimentinė dalis	31
4.1. Algoritmo prototipo eksperimentinis tyrimas	31
5. Išvados	35
6. Literatūros sąrašas	36
7. Terminų ir santraupų sąrašas	38
8. Priedai	39

SUMMARY

In this paper it is described a method of creation of the shortest path algorithm for wireless sensor networks. Algorithm computes optimal shortest path and works on any wireless sensor networks topology. One of the limitations of wireless sensor nodes is their inherent limited energy resource. The limited available energy of sensor nodes is mainly problem making communication and computational processing. An energy efficient routing protocol can limit the number of nodes transmissions and the computational complexity of finding the shortest routing path. In the experimental part, the correct functionality of the algorithm is evaluated and the results are analyzed.

1. Įvadas

Beveiliai mikrosensoriniai tinklai susideda iš daug mažų nepriklausomų baterijomis maitinamų įrenginių, kurių pagrindu yra mažos energijos sąnaudos, maža savikaina, bet su ribota atmintimi, skaičiavimo galia bei, svarbiausia, su ribotais energijos ištekliais. Baterijos energija įrenginyje eikvojama keliais būdais: pirma, skaičiavimo apdorojimui, antra, siunčiamiems ir gaunamiems duomenims. Taip pat didelę reikšmę įgyja mikrosensorinių tinklų projektavimas. Jame svarbiausia užduotis yra sudaryti kuo racionalesnę tinklo mazgų topologiją, kad tinklo mazgai naudotų kiek įmanoma mažiau energijos komunikuodami tarpusavyje ir sugebėtų pakankamai greitai atlikti realaus laiko skaičiavimus.

Maži, nebrangūs, mažai energijos naudojantys, sumanūs, vienkartinio naudojamo maitinami įrenginiai gali būti išdėstomi didžiuliais kiekiais ir įvairiais atstumais aplinkoje. Sudaryti tinklus su šiais mazgais galima tiek rankiniu išdėstymu, tiek atsitiktiniu būdu. Mazgai savyje turi vieną arba kelis sensorius, įmontuotą beveilę sistemą, duomenų apdorojimo komponentus ir ribotus energijos resursus. Tinklo gyvavimas priklauso nuo jame esančių mazgų sukauptos energijos.

Tyrimo sritis – plėtoti energijos našumą maršrutizavimo protokole, kuris lengvai realizuojamas egzistuojančiuose beveilio tinklo mazguose. Yra eilė siūlomų beveilio ryšio maršrutizavimo protokolų, algoritmų. Tačiau visi jų susiduria su ribotais energijos ištekliais, kurie gali prailginti tinklo egzistavimą, lengviau realizuoti mazgų naudojimo technologiją ir galiausiai naudoti įvairaus dydžio tinklus.

Tyrimo objektas - vystyti mikrosensorinio tinklo duomenų perdavimą racionalaus maršrutizavimo sistemoje. Minimizuoti perdavimų skaičių, sudarant beveilį mikrosensorinį tinklą. Taip pat, trumpinti skaičiavimo procesus, kai mazgai turi atlikti racionalų maršrutizavimą. Beveilio mikrosensorinio tinklo trumpiausio kelio radimas turi būti paprastai realizuojamas ir skaičiuojamas.

Tyrimo tikslas – sudaryti maršrutizavimo sistemos modelį ir patikrinti pasiūlyto modelio veikimą. Pagrindinis modelio uždavinys yra prailginti tinklo gyvavimą, kol palaikomas bendravimo vientisumas tarp sensorinių mazgų.

Tiriamąjį darbo metu yra sprendžiami tokie uždaviniai:

- Atlikti maršrutizavimo analizę beveilio tinklo mazguose.

- Parinkti algoritmą, kuris rastų trumpiausią kelią maršrutizuojamame tinkle.
- Ištirti energijos suvartojimą, kai mazgai komunikojasi tarpusavyje.
- Suprojektuoti bevielį mokrosensorinį tinklą ir atlikti skaičiavimo procesus, kai atliekamas racionalus maršrutizavimas.

Šiame darbe yra apžvelgiamas bevielių sensorinių tinklų maršrutizavimo modeliai literatūroje, suformuojamas apibendrintas duomenų perdavimas racionalaus maršrutizavimo sistemoje, jo pagrindu suformuojamas nuoseklios sistemos maršrutizavimas, kuri užrašomas Java programavimo kalba. Eksperimento metu analizuojami maršrutizavimo algoritmo rezultatai.

2. Analizės dalis

2.1. Veiksniai įtakoiantys bevielių sensorinių tinklų modelius

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

Pagrindinės bevielių sensorinių tinklų mazgų charakteristikos yra : patikimumas, keičiamo dydžio tinklas, gamybos kaina, sensorinio mazgo modelis, valdymo aplinka ir energijos sunaudojimas [1]. Šios charakteristikos yra būtinos norint projektuoti bevielius sensorinius tinklus.

2.2. Patikimumas

Aplinkos trikdžiai, fizinis sugadinimas ar išekvota energijos dalis gali nulemti sensorinio mazgo susilpnėjimą tinkle. Tačiau svarbiausia tai, kad atskiro mazgo susilpnėjimas tinkle neturėtų esminio poveikio visam tinklo darbui ar jo topologijai. Bevielių sensorinių tinklų patikimumas: užtikrina tinklo funkcionalumą, nepaisant išsekusių sensorinių mazgų. Hoblos [2] sumodeliavo patikimumą $R_k(t)$ sensoriniam mazgui naudojant Poisson pasiskirstymą. Tikimybė mazgui susilpnėti intervale $(0, t)$ apskaičiuojamas taip:

$$R_k(t) = e^{-\lambda_k t}, \quad (2.1)$$

kur λ_k yra susilpnėjusio mazgo k ciklas ir t yra laiko periodas.

2.3. Keičiamo dydžio tinklas

Bevielius sensorinius tinklus gali sudaryti šimtai tūkstančių ar netgi milijonai sensorinių mazgų. Šie didžiuliai BST modeliai turi pajėgti dirbti su šiais didžiuliais kiekiais mazgų. BST tankumas gali būti nuo kelių iki kelių šimtų sensorinių mazgų kvadratiname kilometre. Pagal [3], sorinių mazgų tankumas μ gali būti apskaičiuotas taip:

$$\mu(R) = \frac{(N \cdot \pi \cdot R^2)}{A}, \quad (2.2)$$

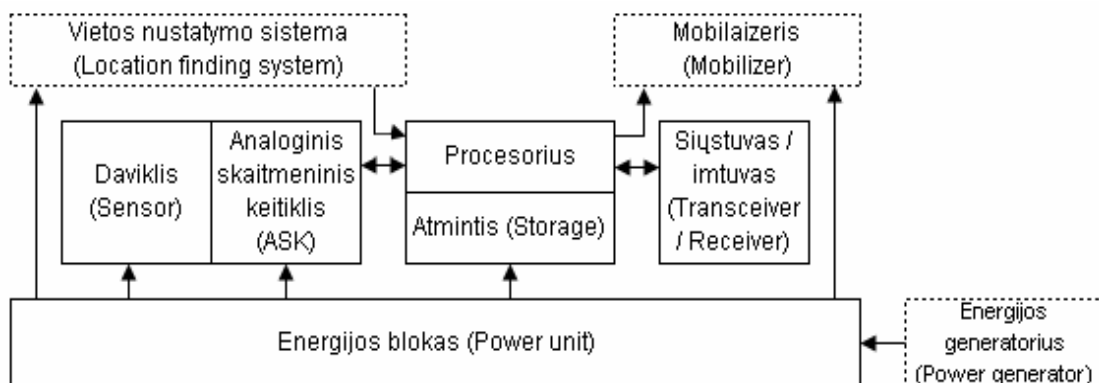
čia N yra skaičius mazgų srityje A (mat.: km^2), o transliuojama srities radiusas- R .

2.4. Gamybos kaina

Paprasto sensorinio mazgo gamybos kaina tapo labai aktuali problema BST. Dėl jų didžiulio kiekio mazgų bevieliose sensoriniuose tinkluose, vieno mazgo kaina, šių dienų rinkoje, kainuoja mažiau negu 1 JAV doleris [1].

2.5. Sensorinio mazgo modelis

Yra keturi pagrindiniai baziniai komponentai, kuriuos galime atrasti visuose mazguose. Sensorinis modelis susideda iš tokių komponentų: energijos blokas, apdorojimo modulis, jutiminė dalis ir siųstuvas-įmtuvas. Tačiau kartais pasitaiko tokių sensorinių mazgų, kurie turi nebūtinų komponentų, kaip vietos nustatymo sistema, mobilaizerį ar energijos generatorių. 1 paveikslas parodo sensorinio mazgo bazinius komponentus:



1 pav. Sensorinio mazgo modelis.

Energijos blokas yra labai svarbus sensoriniame mazge. Tai dalis, kuri atsako už visas kitas dalis susijusias su energijos naudojimu. Energijos generatorius ar energijos blokas sudaro vieną energijos komponentą. Vienas iš papildomų energijos gamintojų sensoriniame mazge gali būti saulės baterija.

Apdorojimo dalį sudaro procesorius su keletu atminčių. Ši dalis atsako užduočių įvykdymą sensorinėje dalyje. Jutiminė dalis bendrai susideda iš dviejų dalių: sensorių daviklių ir analoginio skaitmeninio keitiklio (toliau ASK). ASK pakeičia analoginius duomenis iš sensorių į skaitmeninius, kurie apdorojami procesoriuje. Siųstuvas-įmtuvas sujungia sensorinius mazgus į tinklą.

Kiti papildomi komponentai, kaip vietos nustatymo sistema ar mobilaizeris, gali pagerinti maršrutizavimą sensoriniame tinkle. Tokiu būdu, vietos nustatymo sistema gali nustatyti algoritmą, kurį realizuotų apdorojimo bloke. Taip pat, sensoriniai mazgai gali naudoti mobilaizerio komponentą, kada yra būtina atlikti pavestai užduočiai.

2.6. Pritaikymo aplinka

Bevielių sensorinių tinklų pritaikymas aplinkoje gali būti labai įvairus, nuo kelių iki keliasdešimties tūkstančių mazgų. Jie yra išdėstomi namuose, fabrikuose, įvairiausių mechanizmuose, karo laukuose ir kitose naudojimo vietose. Šių tinklų naudojimas įvairioje fizinėje aplinkoje reikalauja išdėstyti sensorinius mazgus taip, kad kiekvienas jų gebėtų komunikuotis tarpusavyje. Mazgai vienas su kitu bendrauja naudojant bevielio perdavimo priemones, t.y. sensorinius jutiklius ar kitas optines priemones, kurios naudojamos bevieliame ryšyje.

2.7. Energijos naudojimas

Sensorinio mazgo sunaudojimo energijos galia turi būti minimali, nes nuo jo priklauso sensorinio mazgo gyvavimo laikas. Bevelis sensorinis tinklas kiekvienam mazgui suteikia pradinis duomenis ir maršruto kelią. Mazgai, išsikvoję savo energijos resursus, pakeičia tinklo topologiją atsitiktinai. Sensorinio mazgo užduotys: suprasti gaunamus duomenis, atlikti jų apdorojimą ir juos ištransliuoti kitam mazgui. Energijos sunaudojimas mazge dalinamas į šias dalis: apdorojimas ir siųstuvas- imtuvas. Mazgas daugiausiai savo energijos išsikvoja siųstuvo-imtuvo bloke.

2.8. Standartai

2.8.1. Standartai ir „Zigbee“

Institute of Electrical and Electronic Engineer (toliau IEEE) sukūrė naują standartą 802.15.4 priklausančią fiziniam lygiui ir vidutiniam informacijos valdymo sublygiams su mažais greičiais beveliuose tinkluose, kurie palaiko paprastus prietaisus išsikvojant minimalias energijas ir tipiškai atlieka operacijas savo atstumu 10 metrų spinduliu ir mažiau. Pastarajam tinklui pasiekti šiame standarte atlieka „Zigbee“ bevelis tinklas [4, 13, 15].

Naujas „Zigbee“ standartas - vienintelė standartinė bevielė tinklo technologija realizuojanti tokius reikalavimus, kaip:

- *Patikimumas* (CRC klaidų kontrolė [4]);
- *Mažos energijos sąnaudos* (Naudojama energijos taupymo sistema, kuri „ZigBee“ tinklo įrenginius perveda į budintį režimą, kurio metu naudojama mažai energijos. Atsiradus poreikiui naudotis šiuo įrenginiu, jis „pažadinamas“ per 15 ms. [4, 14]);
- *Maža kaina* (kaina apie 1 JAV dolerį [4]);
- *Paprasta priežiūra, administravimas bei veiksmų stebėjimu;*
- *Integracija su kitais standartais* (palaikomas glaudus ryšys su IEEE standartais, kad būtų užtikrinta šio naujo standarto pritaikomumo galimybė [4]);
- *Saugumas* (128bitų asinchroninis kodas).

Šis standartas veikia 2.4GHz radijo dažniu, tačiau pasižymi sąlyginai maža perdavimo sparta, nuo 20 iki 250Kbps . Ši „ZigBee“ tinklo trūkumą kompensuoja mažos energijos sąnaudos, kas užtikrina nepertraukiamą ir taupų sistemos darbą gana ilgą laiką bei taupo sistemos administravimui skirtą laiką bei pinigus. Su tokiomis savybėmis „Zigbee“ sėkmingai konkuruoja su kitomis BST technologijomis.

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

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

2.8.2. Tinklo topologijos

Topologijos įvairumas ir priežiūra gali būti matoma trimis aspektais: pradinis išsidėstymas, pakitimai po išsidėstymo ir pakartotinas išsidėstymas. Pirmoji topologija yra sudaroma per mazgų išsidėstymą. Mazgai gali išsidėstyti vienas šalia kito arba dauguma jų išdėstomi atsitiktinai, pavyzdžiui: išmetant juos iš lėktuvo. Topologijos pakitimai po išsidėstymo yra susiję su mazgo pašalinimu ir topologijos pakitimais tinkle. Pakartotinas išsidėstymo arba naujas tinklo konfigūravimas yra pridėtiniai mazgai ar nauja tinklo topologija. Tai gali atsitikti bet koku laiku.

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

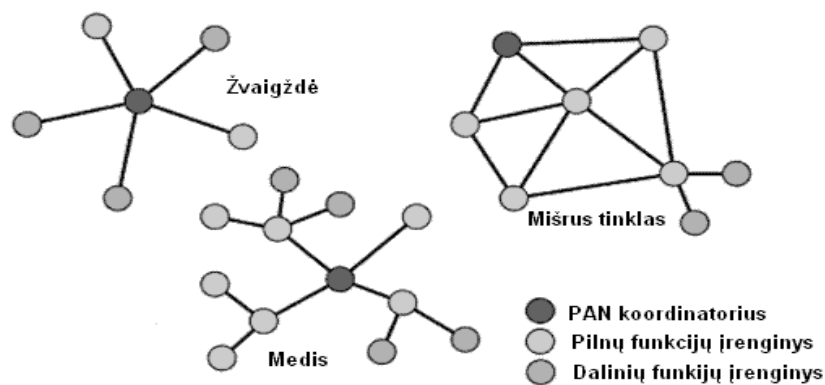
Žvaigždinis tinklas – žvaigždinėje topologijoje, ryšys yra kontroliuojamas unikalių koordinatorių, kurie veikia kaip tinklų savininkai, siųsdami sinchronizavimo signalus įrenginiams ir palaikydamos tarpusavio bendravimą. Šioje topologijoje, tinklo mazgai bendradarbiauja tikrai su koordinatoriumi (2 pav.); IEEE 802.15.4 valdymas žvaigždiniam tinkle gali būti gera alternatyva paprastam taškas-į-tašką (point-to-point) taikymui, kuris reikalauja ypač mažos kainos.

Peer-to-peer tinklas – peer-to-peer ryšio susisiekimas IEEE 802.15.4 standartu, leidžia sukurti daugybę įvairių tipų peer-to-peer tinklų, kur kiekvienas iš jų turi savo privalumų ir trūkumų.

Mišraus tinklo topologija – tai paprasta tinklo topologija. Tinklą sudaro daugybė sensorinių mazgų, tačiau ne visi mazgai gali komunikuoti tarpusavyje. Siunčiamus duomenis mazgai gauna iš artimiausio mazgo ir toliau siunčia į paskyrimo vietą per didžiulę mišraus tinklo topologiją.

Blokinė tinklo topologija - maršrutizavimo protokolas mišriojo tinklo topologijoje turi neišvengiamus apribojimus daugelyje pritaikymų, ir tai leidžia sudaryti tinklą, kuris maršrutizuoja algoritmus buvusius keliose vietose loginėse struktūrose tinkle, ypač kai mazgų skaičius tinkle būna didžiulis.

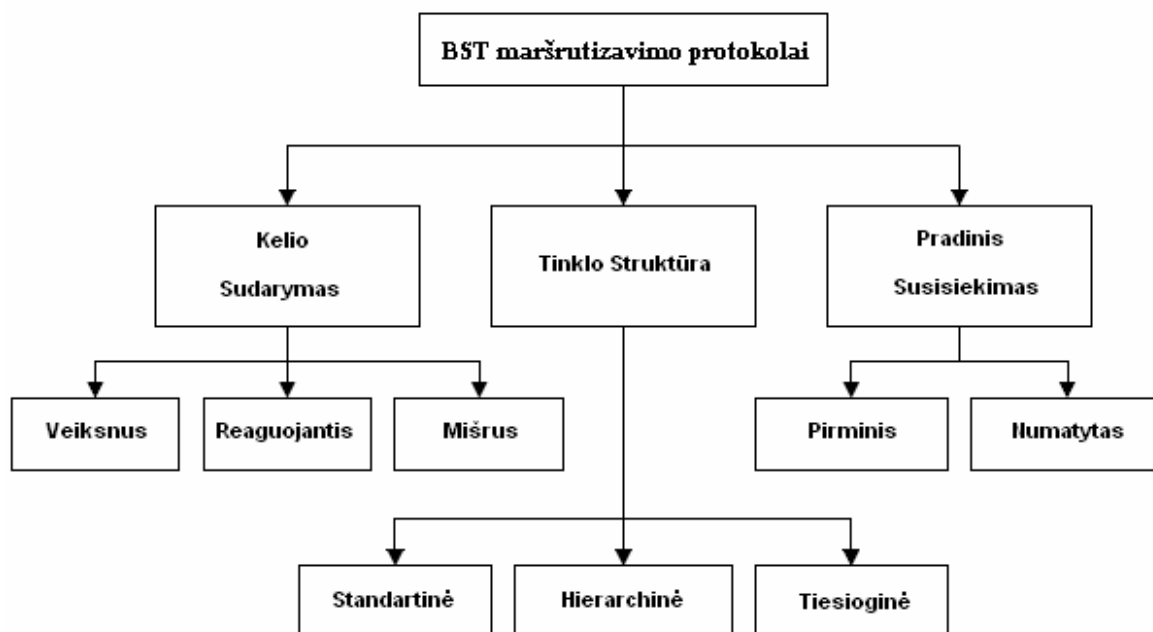
Visos anksčiau aptartos tinklo topologijos pavaizduotos 2 paveiksle.



2 pav. Tinklo topologijos.

2.9. Mikrosensorinio tinklo maršrutizavimo protokolų klasifikavimas

BST maršrutizavimo protokolai gali būti klasifikuojami [12] trim būdais: priklausomai nuo to ar maršrutizavimo kelias yra nustatytas [9], priklausomai nuo tinklo struktūros [8] ir priklausomai nuo susisiekimo pradžios. Schema (3 pav.):



3 pav. Maršrutizavimo protokolai.

Maršrutizavimo kelias gali būti nustatytas vienu iš trijų būdų: būtent veiksnus, reaguojantis ir mišrus. Veiksnūs protokolai įvertina visus maršrutus net jei nėra reikalingi, tada įrašo šiuos maršrutus į maršrutizavimo lentelę kiekviename mazge. Kada maršrutas

keičiasi, pasikeitimas persiduoda visame tinkle. Reaguojantys protokolai įvertina maršrutus tikrai tada kai jie reikalingi. Mišrūs protokolai naudoja šių dviejų idėjų kombinaciją.

Iš esmės gali būti trys BST tinklo struktūros. Jos yra: standartinė, hierarchinė ir tiesioginė. Tiesioginis perdavimas yra nepraktiškas BST, nes jisai reikalauja, kad visi mazgai pereitų per vieną šuolį. Standartiniuose protokoluose visi mazgai tinkle vienodi ir gali vienodai dalyvauti maršrutizavimo užduotyje. Artimiausi mazgai žemiausiajam lygyje dalyvauja daugiau negu tolimesni mazgai, kai visos numatytos žinutės žemesniajame lygyje išsiskirstomos aplink mazgą. Hierarchiniame arba grupiniuose protokoluose, tinklas yra padalinamas į mazgų grupes ir kiekviena grupė turi pagrindinį tašką. Mazgai savo grupėje siunčia žinutes tikrai pagrindiniam taškui. Pagrindinis taškas tuomet persiunčia visas žinutes, kurios gaunamos iš jo grupės, į žemiausiąjį mazgą.

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

Daugelis maršrutizavimo protokolų gali būti dalijami arba į standartinius arba į hierarchinius protokolus aukščiausiame lygyje ir tada jie gali būti dalijami į pirminius priimtus arba numatytus priimtus protokolus. Maršrutizavimo kelio nustatymas BST yra paprastai reaguojantis.

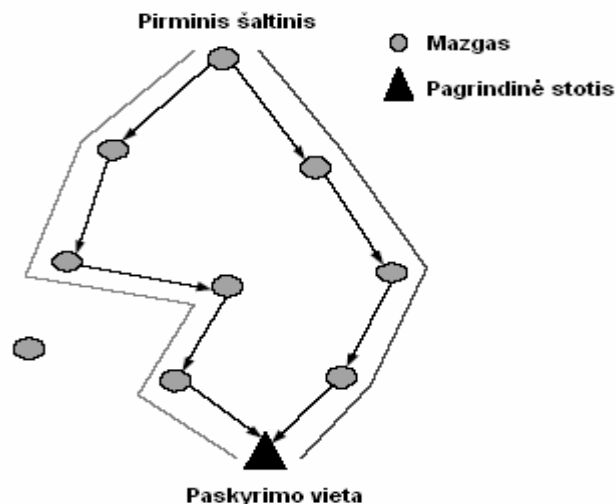
2.10. Mikrosensorinio tinklo maršrutizavimo kelio sudarymo algoritmai

Yra daugybė maršrutizuojamo kelio sudarymo algoritmų būdų [10, 11]. Visų išnagrinėti beveik neįmanoma dėl didelės jų įvairovės. Kiekvienas algoritmas turi sau būdingų savybių, tačiau nagrinėjamame darbe siūlomi algoritmai turi atitikti keliamus reikalavimus, kaip mažos energijos sąnaudos, trumpiausias ir optimaliausias atstumas, bei ištaisyti netikėtus praradimus ar netikėtus technikos gedimus. Projektuojant mikrosensorinius tinklus buvo pasirinkta keletas optimalaus kelio sudarymo algoritmų –

MPSR (Multi-path source routing protocols), MCFA (The minimum cost forwarding algorithm) ar BATR (Balanced Aggregation Tree Routing).

MPSR [5] yra reaguojantis maršrutizavimo protokolas mišrioje tinklo topologijoje, ir pritaikytas bevielams tinklams su bazine stotimi. MPSR turi būti veiksnus ir pasirengęs topologijų permainom, nes mazgai gali judėti, gali atsirasti įvairios techninės problemos, kaip energijos sąnaudų pasibaigimas, aukšta temperatūra ir kitos problemos, arba gali būti judamoje aplinkoje. Vadinas, tinklas turi būti ribojamas mazgų skaičiaus ir tokiu būdu šie tinklai yra didžiuliai, kuriuos galime lyginti su medžio tinklo topologijomis.

Maršrutizavimo keliai iki tikslo kūrimo, kuriame atėjusio mazgo duomenys yra išsaugomi pagrindinėje stotyje, yra daromi trim etapais. Pirmu žingsniu kelio transliavimas su pažymėtu paketu vadinamas RREQ (Route REQuest). Šie RREQ paketai yra transliuojami per visus tinklo mazgus, kol paketai yra išsaugomi paskyrimo vietoje. Paskutinis transliavimo taškas išsaugo keletą RREQ paketų iš įvairių mikrosensorinio tinklo kelių, nes siunčiamas paketas gali naudoti keletą maršrutų. Antru žingsniu, tiksliai įvertinama kaina kiekvienu atrastu maršrutu su kiekvienu RREQ išsaugojimu. Trečiu žingsniu, sukuriamas RREP kelias (Route REPLY). Šis RREP turi keletą maršrutų su atitinkama kelio kaina, ir atsitiktinai parinktu maršrutu perduodami duomenys (4 pav.).

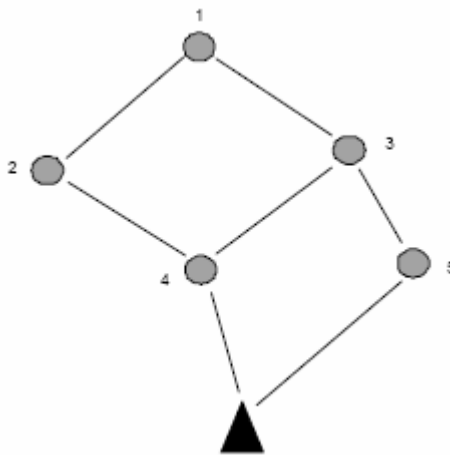


4 pav. Maršrutizavimo kelio nustatymas MPSR.

Mikrosensorinis tinklas turi trijų tipų paketus: maršruto kelio radimas (RREQ), surasto maršruto su atitinkama kaina parinkimas (RREP) ir duomenų paketai duomenims perduoti.

Maršruto nustatymas: RREQ paketai yra transliuojami visuose kaimyniniuose mazguose, šie siunčiami paketai transliuojami į juos tol, kol tikslas yra pasiekiamas. Kiekvienas ankstesnis mazgas palieka savo adresą paketo viduje. Tokiu būdu galinis mazgas ar paskyrimo vieta turi visų mazgų adresus tarp jų ir maršrutus. Po RREQ paketo priėmimo, paskyrimo vietoje atliekamas algoritmo kainos apskaičiavimas ir tada siunčiamas atsakas per pasirinktą RREP kelią. Duomenų paketas yra siunčiamas priešingu kelio maršrutu RREP.

Kelio kainos apskaičiavimo algoritmas: Pasiūlytu kelio kainos algoritmu apskaičiuosime mikrosensorinio tinklo maršrutą (5 pav.).



5 pav. MPSR maršrutizavimo kelio apskaičiavimas.

Pastarajam tikslui pasiekti įveskime žymėjimus:

- $\alpha_{i,j}$ kaina, j^{th} maršruto tarp mazgo i ir pasiekimo tikslo, siunčia didžiulius duomenis (tarkime, mes naudojame fiksuotus paketų ilgius), kurie turi būti siunčiami mazgams šiame maršrute. Šita kaina turi atitikti vykdomas sąlygas: $\sum_j \alpha_{i,j} = 1$;
- E_j : energijos suvartojimas mazge i perduodant siunčiamus duomenis.

Šis algoritmas įvertina optimalaus kelio konfigūraciją $\alpha_{i,j}$, kuri turi atitinkamą pasiskirstymo judėjimą ar duomenis, energijos suvartojimą tarp visų tinklo taškų. Taigi darant tai, mes minimizuojame skirtingus E_j : $\min(\text{Variance}(E_j(\alpha)))$ su $\alpha = \{ \alpha_{i,j} \}$.

Laidžiame spėti tinklo topologiją (5 pav.), kuri yra sudaryta iš penkių mazgų ir vienos bazinės stoties. Visi mazgai perduoda siunčiamus duomenis į bazinę stotį naudojant multišuolinius žingsnius:

Skirtingi maršrutai iš skirtingų mazgų:

- *Mazgas 1: maršrutas 1: 1-3-5-BS, maršrutas 2: 1-2-4-BS*
- *Mazgas 2: 2-4-BS*
- *Mazgas 3: maršrutas 1: 3-5-BS, maršrutas 2: 3-4-BS*
- *Mazgas 4: 4-BS*
- *Mazgas 5: 5-BS*
- *E_j mūsų skirtinguose mazguose paskaičiuojamas taip:*

$$\begin{cases} E_1 = \frac{\alpha_{11} + \alpha_{12}}{2} \\ E_2 = \frac{\alpha_2}{2} + \alpha_{12} \\ E_3 = \frac{\alpha_{31} + \alpha_{32}}{2} + \alpha_{11} \\ E_4 = \frac{\alpha_4}{2} + \alpha_{12} + \alpha_{32} + \alpha_2 \\ E_5 = \frac{\alpha_5}{2} + \alpha_{11} + \alpha_{31} \end{cases}$$

Pirmas mazgas siunčia savo duomenis į du galimus maršrutus: maršrutas pirmas ir maršrutas antras. E_1 yra mazgo 1 energijos suvartojimas, kur jis skaičiuojamas susumavus $\alpha_{1,j}$ visiems j ir dalijamas iš 2. Mazgas antras skaičiuojamas susumuojant $\alpha_2/2$ ir α_{12} . Šiame mazge α_{12} nėra išardomas į dvi dalis, kadangi mazgas antras saugo duomenis iš atsiųsto mazgo pirmo ir tik tuomet perduoda siunčiamus duomenis į mazgą ketvirtą. Taigi šitas mazgas suvartoja dvigubai daugiau energijos. Tokiu pačiu būdu paskaičiuojamas E_3 , kuris yra apskaičiuotas sumos $\alpha_{31} + \alpha_{32} / 2$ ir α_{11} . Tokie pat skaičiavimai taikomi ir E_4 , ir E_5 .

Po minimizuoto E_i skirtingumo, naudojame Lagražo metodą, kurio pagalba gauname laikinus rezultatus : $\alpha_{11} = \alpha_{12} = 0.5$, $\alpha_2 = \alpha_4 = \alpha_5 = 1$, $\alpha_{31} = 1$ ir $\alpha_{32} = 0$. Taigi iš čia matosi, kad nedarome antro maršruto mazgui trečiam ir mes naudojame vieną iš dviejų pirmų maršrutų mazgui pirmam ir vieną iš dviejų antram. Šitie rezultatai gali būti išvesti žiūrint į 5 paveikslą.

Siunčiami ir maršrutizuojami duomenys: po skirtingų mazgų apskaičiavimų, naudojame RREP, kuris turi visų maršrutų kainas α_{ij} . Vadinasi, kai maršrutas turi visų mazgų adresus bei žino kiekvieno kelio atitinkamas kainas, RREP gali parinkti atgalinį maršrutą su mažiausia siunčiamo paketo kaina.

MCFA [6] yra minimalių sąnaudų peradresavimo algoritmas, kurio maršrutizavimo kryptis yra visuomet žinoma. MCFA yra pirminis priimtas protokolas, kuris naudoja standartinio tinklo struktūrą ir veiksnius maršrutus. Mazgams nereikia turėti

unikalių ID's ir vietos palaikomų maršrutizavimo lentelių, nes mazgai palaiko mažiausią sąnaudų apskaičiavimą pagal mažiausiąjį mazgą. Mažiausias mazgas suformuoja mažiausių sąnaudų nulius, kol visi mazgai tinkle suformuoja jų pradinės sąnaudų begališkumą. Žemiausias taškas siunčia žinutę su savo sąnaudomis kitiems. Mazgas gauna taško transliavimą, kuris atnaujina savo sąnaudas. Jei naujos sąnaudos yra žemesnės, mazgas retransliuoja pranešimą, o priešingu atveju jis išmeta jį. Tai nustato minimalias sąnaudas kiekvienam mazgui tinkle. Kai pranešimas yra išsiųstas, mazgas siunčia jį visiems savo kaimynams. Mazgai, kurie gauna tokį pranešimą, patikrina ar jis yra mažiausių sąnaudų kelyje. Jeigu taip yra, jis persiunčia pranešimą visiems savo kaimynams. Tai yra kartojama tol, kol žinutė pasiekia žemiausią tašką. Viena iš MCFA problemų yra, kad mazgai išseikvoja energijos per būtiną kelią, kai minimalios sąnaudos nėra atnaujinamos reguliariai. Kita problema yra ta, kad perdavimo skaičiavimai yra naudojami kaip sąnaudos. Mazgai yra vienodai išplatinti ir energijos sunaudojimas yra naudojamas sąnaudoms, sudėtiniai mazgai bus apsvarstyti mažiausių sąnaudų kelyje ir protokolas yra priverčiamas plisti.

BATR (The balanced aggregation tree routing) - [7] maršrutizavimas nustato medžio pagrindą žemiausiame mazge. Maršrutizavimas „teigia“, kad žemiausias mazgas žino tikslią kiekvieno mazgo, esančio tinkle, vietą. Žemiausias mazgas apskaičiuoja maršrutizavimo medį ir tada siunčia kiekvieno mazgo, esančio tinkle, tikslią informaciją į mazgą. Informacija apima mazgo tėvą ir taip pat laiką, kuriame mazgas gali perduoti. Po tam tikro kiekio ratų, žemiausias taškas perskaičiuoja medį, įvertinant blogus mazgus į ataskaitą, ir siunčia naują maršrutizavimo informaciją kiekvienam mazgui. Pagrindinė BATR problema yra ta, kad mazgai tam tikruose keliuose išseikvoja jų energiją greičiau nei kiti tinklo mazgai.

Standartiniai mikrosensoriniai tinklai yra paprasto naudojimo, kadangi jie gali susikurti maršrutą be didesnio pagrindo ir nereikalauti pagrindinio taško optimaliausio kelio. Tačiau yra ir atvirkštinis panaudojimo būdas: visi mazgai iš mikrosensorinio tinklo gali būti sujungti per pagrindinį tašką ir tuomet nusiųsti optimaliausiu keliu siunčiamam mazgui. Trūkumas yra tas, kad mazgai turėtų daugiau energijos sąnaudų, kurie leistų mazgams daugiau laiko egzistuoti tinkle.

2.11. Išvados

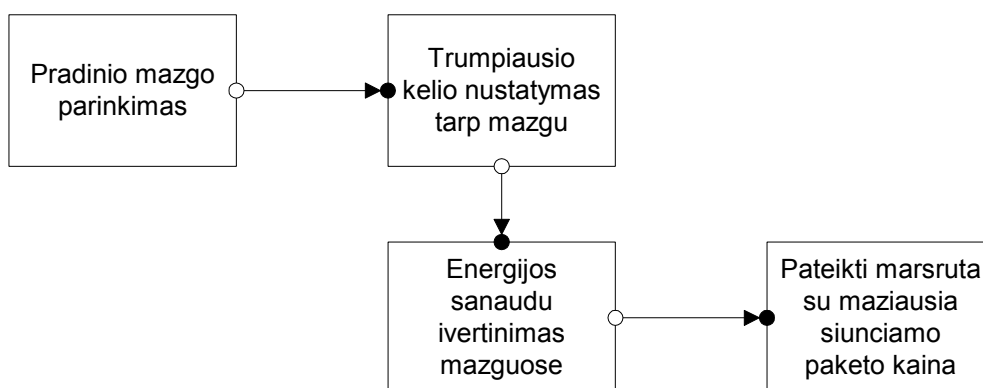
- Analizės metu buvo surastos jau sukurtos bevielių sensorinių tinklų maršrutizavimo algoritmų modeliai.
- Buvo išanalizuoti BST privalumai ir trūkumai. Šiuo pagrindu sudarytas maršrutizavimo protokolų klasifikavimas.
- Darbo metu buvo analizuojama sensorinių mazgų savybės, kurios leido sudaryti mazgo modelį orientuotą į trumpiausio kelio uždavinio sprendimą.
- Šios analizės metu buvo aptarta sensorinių mazgų parametrai, kurie turi būti naudojami racionalaus kelio maršrutizavimo modelyje.

3. Projektinė dalis

Šioje dalyje aprašoma mikrosensorinio tinklo realaus maršrutizavimo algoritmo realizacijos būdas. Pasiūlomas apibendrintas trumpiausio kelio radimo modelis. Remiantis juo suformuojamas nuoseklus matematinis maršrutizavimo modelis bei jo charakteristikos.

3.1. Maršrutizavimo modelis

Paskutiniaisiais dešimtmečiais sukurta daug maršrutizavimo modelių, besiskiriančių realizuotomis architektūromis, veikimo greičiu, energijos sunaudojimu ir kt. Šiame skyriuje pasiūlytas apibendrintas mikrosensorinio tinklo maršrutizavimo modelis atspindintis pagrindines racionalaus kelio radimą įvertinant kainą, energijos sąnaudas ir turimų mazgų siuntimo skaičių (6 pav.).



6 pav. Maršrutizavimo modelis.

Šiame modelyje maršrutizavimo procesai aprašyti panaudojant pagrindinius veiklos tikslus, kaip surasti artimiausią mazgą su mažesniu siuntimo skaičiumi negu turi siunčiamas sensorinis mazgas. Siunčiamasis sensorinis mazgas apsprendžia detalizuodamas detalesniais tikslais, kurie priklauso žemesniems mazgo lygiams. Taip visi tikslai einant į žemesnius lygius detalizuojami, kol gaunamas pasiektas tikslas.

Pagrindinis veiklos tikslas – racionalaus kelio radimas su mažiausiomis energijos sąnaudomis ir trumpiausiais keliais. Jis apima du svarbiausius tikslus. „Greitai rasti tinkamą mazgą, turintį mažesnę siuntimo skaičių negu jis pats“ – šis tikslas yra vienas iš svarbiausių ieškant trumpiausią kelio radimą, nes nagrinėjamas tinklas gali būti labai

didelis. Tikslas „Energijos pakankamumas“ reiškia, kad sensorinis mazgas prieš išsiunčiant duomenis pasitikrina savo energijos sąnaudas, taip užtikrindamas duomenų siuntimą, kurios suteikia galimybę sėkmingai nusiųsti duomenis į pagrindinę stotį ar kaimyninį sensorinį mazgą. Mazgai siuntime dalyvauja tik tie, kurie yra reikalingi šiam siuntimui.

3.2. Maršrutizavimo algoritmas

Mikrosensorinio tinklo trumpiausio kelio radimas pakankamai nesudėtingas (7 pav.). Nuo pasirinktos bevielio sensorinio tinklo struktūros dažnai priklauso maksimalus ir minimalus lygiagrečiai veikiančių sensorinių mazgų skaičius. Tai svarbu, nes pritaikius skirtingus BST mazgų perdavimo skaičius kinta. Kartais pasikeitus aplinkos parametrams taip pat reikalingas bevielio sensorinio tinklo struktūros keitimas, nenutraukiant sensorinių mazgų darbo jame. BST algoritmo lankstumą didina ir tai, kad jis gali apdoroti negriežtai nustatyto dydžio bevelius sensorinius tinklus. Mažas energijos suvartojimas komunikavimo metu leidžia prailginti bevielį sensorinį tinklą ir taip pat sensorinių mazgų egzistavimą jame.

Nagrinėjant bevielio sensorinio tinklo maršrutizavimo algoritmą, galima išskirti tokias pagrindines savybes:

- Visada tyrinėja mazgą su mažiausia atstumo žyme ir vienoje iteracijoje tyrinėjamas tik vienas mazgas.
- Mazgai turi atstumų žymes: pastovias arba laikinas.
- Pastovios žymės yra trumpiausio kelio ilgis ir nekinta.
- Laikinosios žymės yra laikini trumpiausio kelio įverčiai ir gali kisti.
- Kiekvienoje iteracijoje viena laikinoji žymė paverčiama pastoviaja.

Bevielį mikrosensorinį tinklą žymėsime $G = (V, E)$, kur V yra aibė sensorinių mazgų ir $n = |V|$ yra sensorinių mazgų skaičius. Aibei $E \subseteq V^2$ mazgų susisiekimas. Sakykime, kad aibė E sudaryta iš poros viršūnių $(u, v) \in E$, reiškiančių sensorinio mazgo u susijungimą į v , ir šis susijungimas visada yra teigiamas. Taip pat priimama, kad didžiausias atstumas tarp sensorinių mazgų žymimas R ir atstumas tarp mazgų u ir v žymimas $d(u, v)$. Todėl aibė E gali būti apibrėžta taip:

$$E = \{(u, v) - V^2 \mid d(u, v) < R\}. \quad (3)$$

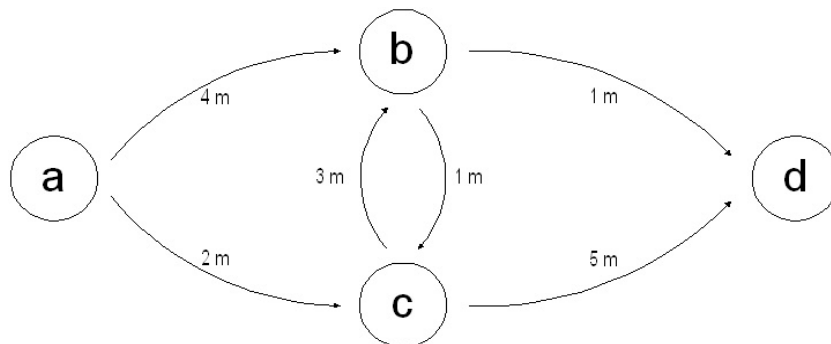
Algoritmas dirba turėdamas kiekvieno sensorinio mazgo u atstumą $d[u]$, ieškant trumpiausio kelio tarp u ir v . Pradžioje šis dydis yra 0 pradinio mazgo u ($d[u] = 0$), ir begalybė visiems kitiems mazgams, kuri vaizduoja nežinomą kelią $d[v] = \infty$ kiekviename mazge v aibėje V , išskyrus u . Kai algoritmas pasibaigia, $d[v]$ turi būti trumpiausias kelias iš u į v .

Pažymėkime algoritmo pradinį sensorinį mazgą a , o galinį z . Susisiekimas tarp mazgų (u, v) , kur $w(u, v) > 0$ yra neneigiamas judėjimas tarp sensorinių mazgų tinkle. Aibėje $L(x)$ yra priskiriami tinkami mazgai x . Pabaigoje $L(z)$ yra trumpiausio kelio ilgis iš mazgo a į z . Taigi, korektiškiau būtų prieš tai nagrinėtame algoritme aprašyti programos tekstu, kuris atrodytų taip:

1. Algoritmas (w, a, z, L)
2. $L(a) = 0$
3. **for** visi mazgai $x \neq a$ do
4. $L(x) = \infty$
5. $T =$ aibė mazgų, kurių trumpiausias atstumas iš a nėra atrastas
6. **while** $z \in T$ do
7. Pasirinkti $v \in T$ su mažiausiu $L(v)$
8. $T = T - \{v\}$
9. **for** kiekvienam $x \in T$ gretimam į v do
10. $L(x) = \min\{L(x), L(v) + w(v, x)\}$

šio algoritmo paleidimo greitis yra $O(m * \log n)$, kur m yra skaičius susisiekimų, o n yra skaičius mazgų.

Remiantis ankstesniu aprašytu algoritmu, išanalizuokime jį vaizdžiai. Tarkime, turime keturis mazgus $n = \{a, b, c, d\}$ (7 pav.). Pradinį sensorinį mazgą žymėsime $u = a$, o galinį $v = d$. Be to, šis algoritmas turi dvi aibių viršūnes S ir Q . Aibė S yra rinkinys nustatytų viršūnių, kurių trumpiausi atstumai iš šaltinio yra žinomas, o aibė Q - rinkinys iš dar nenustatytų viršūnių.



7 pav. Pradinis grafas.

Šiuo atveju aibėje Q yra visų nenustatytų viršūnių mazgai. Kadangi Q nėra tuščias, tai parenkame jo minimumą su mažiausiu dydžiu $d[u]$. Tuomet sensorinis mazgas a pridedamas į aibę S . Taip kiekviename žingsnyje vienas mazgas yra pašalinamas iš aibės Q ir pridedamas į aibę S . Šiuo būdu atlaisvinami jo artimiausi kaimynai gretimam mazgui a , tai b ir c . Algoritmas pirmiausiai apskaičiuoja trumpiausią kelią nuo mazgo a iki b . Kadangi $d(b)$ buvo beribėje, tai jį žymime 0, tuomet atstumas tarp mazgų a ir b apskaičiuojamas taip :

$$d(b) = d(a) + [a, b] = 0 + 4 = 4,$$

$\pi(b)$ (π - pirmas trumpiausias kelias) - susietas su a , ir b dedame į aibę Q . Taip pat, apskaičiuojamas atstumas su mazgu c , kur $d(c) = 2$, ir $\pi(c)$ į a .

Antru žingsniu, aibė Q talpina mazgus b ir c . Kadangi atstumas tarp mazgo a ir c yra trumpesnis, tai šis mazgas ištraukiamas iš aibės Q ir įdedamas į aibę S . Tokiu būdu atpalaiduojami kaimyniniai mazgai iš c , kurie yra b , d , ir a . Šiuo atveju, a yra nepaisomas, nes jis yra randamas nuolatiniam rinkinyje. Tačiau algoritmas nusprendžia, kad trumpesnis kelias iš a į b yra keliaujant per mazgą c , tuomet:

$$d(b) = 4 > d(c) + [c, b] = 2 + 1 = 3,$$

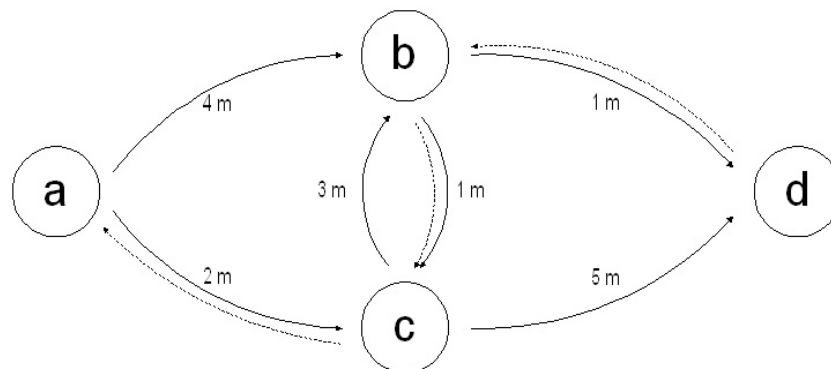
Kadangi trumpesnis kelias eina per mazgą c , tai $d(b)$ yra atnaujinamas į 3, ir $\pi(b)$ į c bei b pridedamas į aibę Q . Sekantis gretimas mazgas yra d , kurio atstumas tarp mazgo c yra lygus $d(d) = 7$, o $\pi(d)$ padedamas į c .

Tačiau trumpesnis kelias yra rastas keliaujant per mazgą b , tai:

$$d(d) = 7 > d(b) + [b, d] = 3 + 1 = 4,$$

dėl to atnaujinamas $d(d) = 4$ ir $\pi(d)$ į b .

Algoritmas baigtas. Galutiniai rezultatai yra parodyti apačioje grįžtamu keliu iš mazgo d į a (8 Pav.):



8 pav. Trumpiausias kelias tarp mazgų a ir d .

Apibendrinant maršrutizavimo algoritmo sudėtingumą ir teisingumą galima išskirti tokius atvejus:

Du pagrindiniai žingsniai:

- Mazgo pasirinkimas: rasti mazgą n su mažiausia žyme.
- Atstumo korekcija: tyrinėjamos briaunos išeinančios iš sensorinio mazgo n .

Sudėtingumo analizė:

- Mazgo parinkimas = $O(V^2)$.
- Atstumo korekcija = $O(\sum_{n \in E} |E(n)|) = O(E)$.

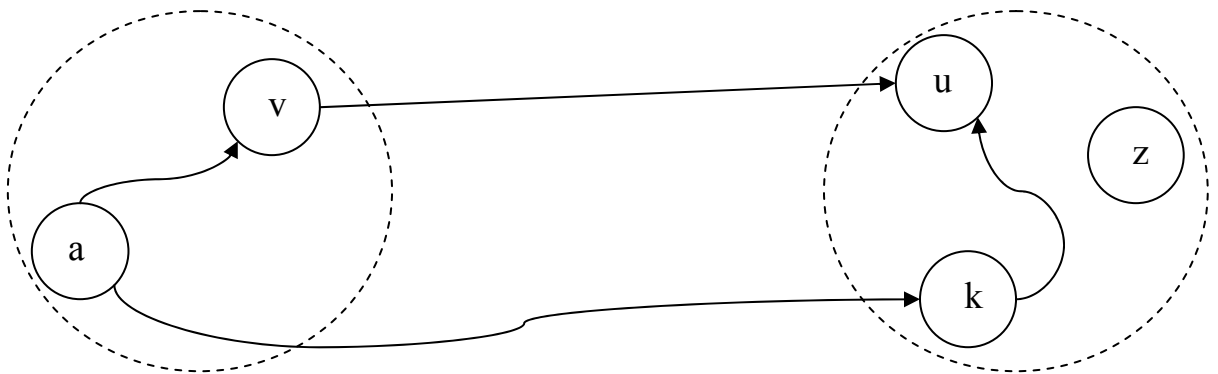
$$\text{Viso} = O(E + V^2) = O(V^2).$$

Algoritmo teisingumas:

- Pastovių žymių aibė S ir laikinių žymių aibė Q .

Indukcijos hipotezė:

- Žymė $d(u)$ kiekvienam mazgui u iš S trumpiausio kelio ilgis (9 pav.).
- Žymė $d(u)$ kiekvienam mazgui u iš Q trumpiausio kelio ilgis tarp visų kelių, turinčių vidinius mazgus iš S .



9 pav. Algoritmo teisingumas.

3.3. Sensorinio mazgo energijos vartojimas

Daugelis bevielio sensorinio tinklo mazgų turi ribotas energijos sąnaudas. Ši energija sensoriniame mazge tapatinama kaip didžiausia problema dėl to, kad sunku pakrauti tūkstančiais baterijomis maitinamų mazgų, nutolusių vienas nuo kito įvairiais atstumais. Tačiau visų sensorinių mazgų sąnaudos susideda iš jų išsidėstymo svorio ir sužadintos viršūnės tinkle.

Tokiu būdu energijos suvartojimą naudojamame algoritme galime išskirti tokius atvejus:

- *Sudaryti mazgų poras, kurios dar nėra susijungusios tarpusavyje, parenkant trumpiausią atstumą su minimaliu energijos suvartojimu.*
- *Įvertina energijos pakankamumą, susijungiant šiems dviems mazgams.*
- *Patikrinti susijungimų rezultatus tarp sensorinių mazgų tinkle, priešingu atveju, pradedama viskas iš pradžių.*

Šis energijos įvertinimas sumažina bei palengvina skaičiavimus naudojamo algoritmo srityje. Paprastai energijos suvartojimas bevieliam sensoriniame tinkle, kai yra siunčiamos žinutės mazgu u , apskaičiuojamas tokiu būdu:

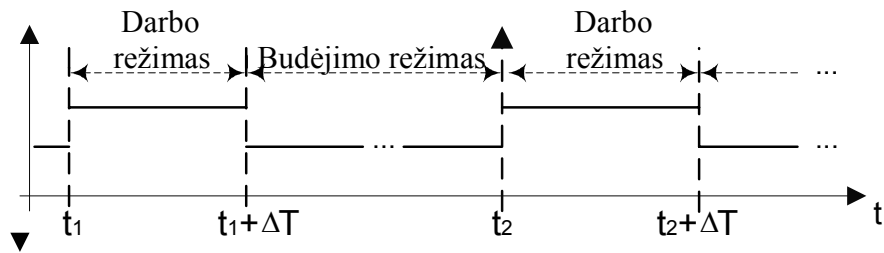
$$E(u) = r(u)^\alpha, \quad (4)$$

kur α yra konstanta didesnė už 2 ir mažesnė už 5, o $r(u)$ yra siunčiamo mazgo signalo sklidimo sritis. Iš tikrųjų, ši turima konstanta turi būti pridėta tam, kad būtų atsižvelgta į pridėtinius signalų procesus, kaip minimalios energijos poreikis sėkmingam susisiekimui ir žinučių siuntimui. Bendras energijos sunaudojimas randamas taip:

$$E(u) = \begin{cases} r(u)^\alpha + c, \\ 0 \end{cases}, \quad (5)$$

kai $r(u) \neq 0$, tada vykdoma pirma sąlyga, priešingu atveju - antra.

Energijos našumo sunaudojimą sensoriniame mazge galima sumažinti kontroliuojant mazgo darbo ir budėjimo būsenas. Kadangi sensorinis mazgas susideda iš skirtingų blokų, kur kiekvienas turi savo paskirtį mazge bei atitinkamą energijos sunaudojimą, tai toks valdymas yra efektyvus taupant mazgo energiją. Tačiau mazgo perėjimas iš darbinės būsenos į budėjimo režimą ir atvirkščiai, turi gaištis laiką ir papildomas energijos išlaidas (10 pav).



10 pav. Sensorinio mazgo energijos sunaudojimas laiko momentais.

Kiekvienu laiko momentu energijos sunaudojimą galima apskaičiuoti tokiu būdu (6 form.):

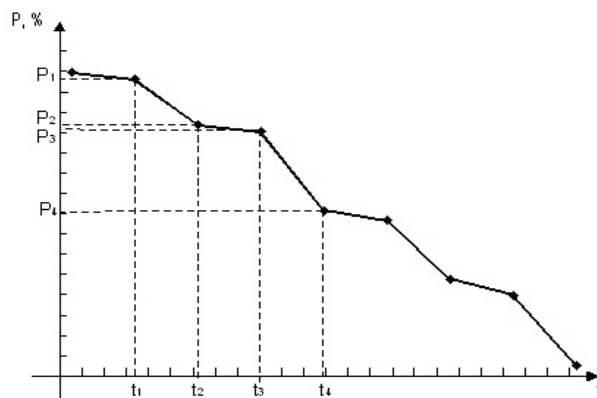
$$P_i(t_i) = P_{i-1}(t_{i-1}) - \Delta P, \quad (6)$$

kur $\Delta P = P_{i-1}(t_{i-1}) - P(t_{i-1} + \Delta t)$ ir $\Delta t = t_i - t_{i-1}$.

Pavyzdžiui:

$$P_2(t_2) = P_1(t_1) - \Delta P, \text{ kur } \Delta P = P_1(t_1) - P(t_1 + \Delta t) \text{ ir } \Delta t = t_2 - t_1.$$

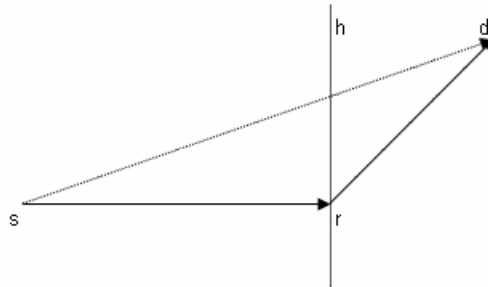
Energijos paskaičiavimas bei sunaudojimas skirtingu laiko momentu gaunama tokia kreivė (11 pav.). Grafikas gaunamas panaudojant n formulę, kai energijos P_i sunaudojimas laiko momentais yra lygus visiems sensoriniams mazgams.



11 pav. Energijos sunaudojimas skirtingais laiko momentais.

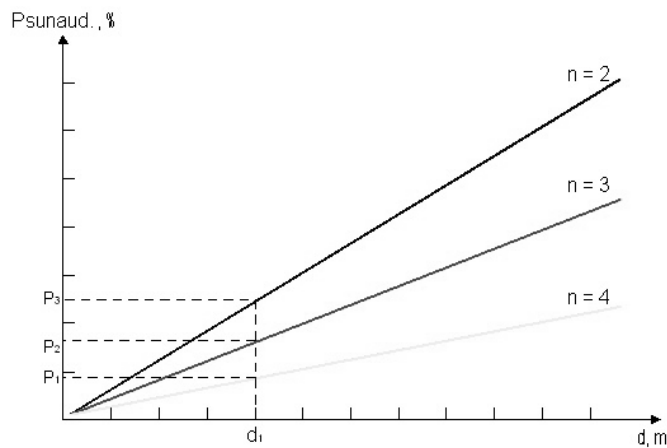
Sensoriniai mazgai sunaudoja nevienodai energijos jungdamiesi vieni su kitais skirtingais atstumais. Pastarajam tikslui pasiekti naudosime geometrini atvaizdavimą (12 pav.). Šiuo būdu parinksime tris mazgus s, r ir d. Tarkime, kad visi mazgai naudoja vienodai energijos siunčiamoms ir gaunamoms žinutėms, bei $\alpha = 2$. Vadinasi energijos perdavimas iš s į d būtų $\|sd\|^2$. Tačiau, jai naudosime trečią mazgą r perduodant žinutę tarp mazgo s ir d, tai bendras energijos sunaudojimas bus $E_n = \|sr\|^2 + \|rd\|^2$. Šis energijos sunaudojimas per mazgą r yra mažesnis, nei tiesiogiai siunčiant žinutę iš mazgo s į d.

Kitaip sakant, jai mazgas s nori persiųsti žinutę į mazgą d esantį dešinėje linijos h pusėje, tai perdavimas per mazgą r bus visuomet mažesnis negu tiesioginis perdavimas.



12 pav. Energijos perdavimas.

Didėjant mazgų skaičiui, kai $n = 2, 3, \dots$, n ir esant tam tikram pastoviam atstumui tarp mazgų $d = d_1, d_2, \dots, d_n$, energijos sąnaudos mažėja ($P_1 < P_2 < P_3$) (13 pav.).



13 pav. Energijos sunaudojimas didėjant mazgų skaičiui.

Manyti, kad energijos skaičiavimo efektyvumas priklauso nuo bevielio sensorinio tinklo mazgų struktūros. Kuo daugiau mazgų BST, tuo energijos sunaudojimas mažesnis.

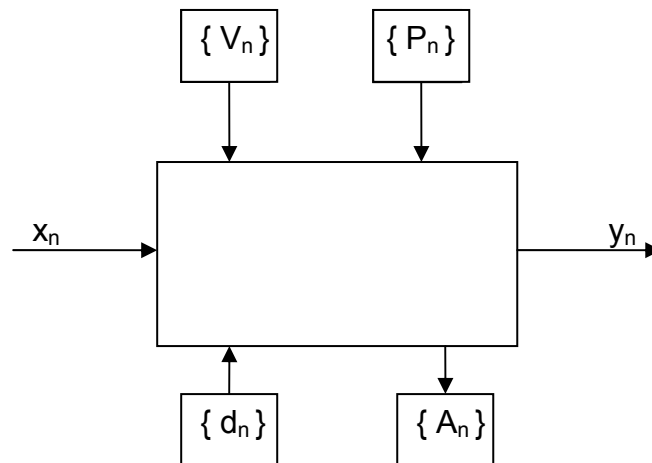
Sensorinio mazgo gyvavimas priklauso nuo suteiktos energijos ilgaamžiškumo. Mazgo ilgaamžiškumas žymimas l_n , kur mazgas $n \in V$ ir apibrėžiamas taip:

$$l_n = \frac{E_n(t)}{P_n(t)}, \quad (7)$$

kur $E_n(t)$ yra sensorinio mazgo n turima energija laiko momentu t , o $P_n(t)$ – sunaudojama energija laiko momentu t .

3.4. Teorinio modelio sudarymas ir tyrimas

Teorinio modelio išraiška pakankamai nesudėtinga (14 pav.). Aibės V_n sensoriniais mazgais gali būti komunikuojantys sensoriniame bevieliame tinkle bei jam nepriklausantys mazgai. Atstumas tarp sensorinių mazgų d_n gali būti pastovus arba laikinas. Pastovus atstumas žymi trumpiausio kelio ilgį ir jis yra nekintantis, o laikinas pažymi nepastovius trumpiausio kelio įverčius ir gali kisti. Kiekvieno siuntimo-gavimo metu eikvojama sensorinio mazgo turima energija P_n . Energijos suvartojimas skirtingais laiko momentais apskaičiuojamas pagal 6 formulę. Perdavimo atstumas priklauso nuo sensorinių mazgų skaičiaus A_n , kuris turi paskaičiuotą racionalaus trumpiausio kelio kainą.



14 pav. Teorinis sensorinio mazgo modelis.

Analizuojant BST algoritmo veikimą svarbu pažymėti tai, kad kiekvienas sensorinis mazgas turėtų kaimyninio mazgo lentelės naudojimo funkcijas. Kaimyninėje lentelėje turi būti įvesta artimiausių sensorinių mazgų atstumai, energijos kainos vienetas, sekos skaičius ir kiti parametrai reikalingi mazgo naudojimui. Visam modulio veikimui galima išskirti tokius pagrindinius realizavimo būdus.

3.4.1 Tinklo sudarymas ir mazgų informacijos surinkimas

Kada sensoriniai mazgai yra išdėstyti įvairiose fizinėse aplinkose, tada mazgai siunčia perduodamus paketus vieni kitiems, taip sudarydami bevielį sensorinį tinklą. Perduodamas paketas turi antraščių laukus, kurie pavaizduoti 1 lentelėje.

1 lentelė. Perduodamo paketo laukų dydžiai.

Laukas	Dydis (bitais)
Siuntėjo adresas	16
Gavėjo adresas	16
Sekos numeris	8
Šuolio atstumas	8
Energijos lygis	16
Suma	64

Siuntėjo ir gavėjo adresai yra 16 bitų adresai sudaryti iš 65536 (2^{16}) unikalių adresų. Kiekvienas mazgas bevieliame sensoriniame tinkle turi unikalius adresus jo viduje. 8 bitų sekos numeris yra naudojamas naujos siunčiamoms žinutėms numeruoti. Nuo perduodamos žinutės dydžio priklauso sekos numeris. Sekos numeris naudoja 8 bitus tam, kad garantuotų sugaištą laiką tinkle nereikalaujant mazgams klaidingai persiųsti senas perdavimo žinutes. 8 bitų šuolių atstumas garantuoja, kad mazgas gali atlikti 255 šuolius iš sensorinio mazgo.

Kada mazgas gauna siuntėjo perdavimo žinutes, jis patikrina ar turi įrašą kaimyninio mazgo lentelėje, kuris perduoda žinutę. Jeigu ne, jis prideda įrašą, kuris susideda iš kaimyninių adresų, šuolių atstumų ir energijos lygio. Tada sensorinis mazgas didina šuolių atstumų atsargas žinutėje ir papildo šiuos perėjimo rezultatus, kaip savo nuosavus šuolių atstumus. Vadinasi mazgas retransliuoja ryšį ir tuo pat metu pakeičia siuntėjo adresų laukus į savo turimą adresą ir energijos lygio laukus į savo likusį energijos lygį. Kiekvienas mazgas tinkle retransliuoja perduodamą žinutę kartą į savo visus kaimynus. Jeigu mazgas gauna perduodamą žinutę su mažesniu šuolių atstumu negu perdavimo atstumas, kurį jis turi tuo metu, tuomet sensorinis mazgas atsinaujina savo perdavimo atstumą. Kada siuntėjo adresas yra perduotas gavėjo adresui tinkle, kiekvienas mazgas žino savo turimą adresą, šuolio atstumą ir energijos lygį bei kiekvieno savo kaimynų turimus duomenis.

3.4.2 Duomenų perdavimas sensoriniame bevieliame tinkle

Sensoriniai mazgai gavę naujus duomenis, kaip aprašyta ankstesnėje dalyje, pradeda maršrutizavimo procesus. Fizinis sugadinimas, aplinkos trikdžiai ar išėikvota energijos dalis gali paveikti duomenų paketų siuntime. Todėl kiekvienas sensorinis mazgas turi būsenos vėliavėlę. Jei žinutė yra laikoma kritine, pavyzdžiui, kada aplinkos pakytis pasikeičia žymiai per labai trumpą laiką, būsenos vėliavėlė yra įtraukiamą į žinutę pažymint, kad mazgas yra kritinis. Sensorinis mazgas, kuris sukuria kritinę žinutę,

perduoda ją savo kaimynams. Laukai susidedantys iš duomenų žinučių vaizduojami 2 lentelėje.

2 lentelė. Duomenų paketo laukų dydžiai.

Laukas	Dydis (bitais)
Siuntėjo adresas	16
Gavėjo adresas	16
Kūrėjo adresas	16
Būsenos vėliavėlė	1
Šuolio atstumas	8
Energijos lygis	16
Suma	73

Mazgas pagrindžia maršrutizavimo sprendimą dviejose metrikose: būtent šuolius su įvertintu trumpiausiu atstumu tarp mazgų ir likusi energija. Sensorinis mazgas siųsdamas duomenų žinutę ieško artimiausio kaimyninio mazgo su mažesniu šuolių atstumu. Jeigu tikrai yra vienas surastas kaimynas, tuomet šis mazgas yra pažymimas kaip paskirties žinutė. Tačiau jei yra daugiau negu vienas mazgas su vienodu šuolių atstumu, tai mazgas pažymi kaimyną, kuris turi aukščiausią energiją, įrašytą į kaimyninę lentelę.

Kitais atvejais sensorinis mazgas neturintis kaimyno su mažesniu perdavimo šuoliu, suranda kaimyną su šuoliu atstumu, kuris yra toks pat kaip ir jo arba didesnis. Jeigu yra tikrai vienas toks kaimynas, jis yra pažymimas. Suradus daugiau negu vieną kaimyną turintį ta patį perdavimo šuolių atstumą yra pažymimas kaimyninis mazgas su didžiausia turima energija. Kitu atveju, sensorinis mazgas gali neturėti nė vieno kaimyno, tuomet žinutė yra pašalinama.

Prieš žinutės išsiuntimą, likusi energija įrašyta pažymėtame sensoriniame mazge yra sumažinama. Jeigu siunčiama žinutė yra kritinė žinutė, tai pažymėto mazgo procesas yra kartojamas ir žinutė yra siunčiama antram kaimynui. Naudojant šuolių atstumą, kaip maršrutizavimo metriką suteikia, kad žinutė yra visuomet siunčiama link gavėjo.

Sensorinis mazgas gavęs siunčiamą duomenų žinutę atnaujina kaimyninio mazgo likusią energijos kainą lentelėje. Mazgai, kurie persiunčia duomenų žinutes stebi tuos pačius procesus, išskyrus nedidelius skirtumus, kur pradžios mazgas naudoja pažymėti sekantį kaimyną maršrutizuojamame kelyje.

3.4.3 Energijos atnaujinimas

Sensoriniai mazgai duomenų siuntimui gali naudoti daugiau negu vieną kaimyninį mazgą maršrutui. Todėl, kiekvienas mazgas prieš išsiųsdamas duomenų žinutę turi būti visiškai tikras dėl turimų kaimyninių mazgų energijos kainos atsargų. Kada mazgų likusi energija nukrenta žemiau ribos, jis perduoda energijos žinutę į visus savo kaimynus, informuojant juos apie jo energijos lygį. Energijos žinutės antraštė parodyta 3 lentelėje. Energijos žinutė neturi apskritai duomenų.

3 lentelė. Energijos žinutė.

Laukas	Dydis (bitais)
Siuntėjo adresas	16
Gavėjo adresas	16
Šuolio atstumas	8
Energijos lygis	16
Suma	56

3.4.4 Bevielio sensorinio tinklo palaikymas

Sensoriniai mazgai periodiškai siunčia perduodamas žinutes per tinklą, todėl mazgai gali prisidėti naujus esamus kaimynus arba išmesti jau nebeegzistuojančius mazgus. Mazgai taip pat atnaujina likusias energijos kainos atsargas kaimyninėse lentelėse. Tai yra svarbus pastebėjimas, kai perduodama žinutė neturi nei vieno iš duomenų.

Bendras modulio veikimas gali būti apibendrinamas taip:

- *Sensorinis mazgas sudaro BST siunčiant perdavimo žinutę per visus mazgus.*
- *Mazgai su mažesniu šuolių atstumu yra pažymimi kaip paskyrimo vieta.*
- *Jei kaimyniniai mazgai turi vienodus perdavimo skaičius ir atstumus, tai pažymimas mazgas su likusia aukštesne energija.*
- *Sensorinių mazgų energijai nukritus žemiau tam tikros padėties yra išsiunčiama energijos žinutę pranešant savo kaimyniniams mazgams apie likusią energiją.*
- *Mazgas periodiškai siunčia perduodamas žinutes atsinaujinti ir palaikyti kaimynines mazgų lenteles tinkle.*

4. Eksperimentinė dalis

Eksperimento metu yra tiriamas bevielio sensorinio tinklo maršrutizuojamo algoritmo veikimo teisingumas, analizuojami modeliuojamo BST mazgų veikimas. Analizuojant BST veikimo teisingumą, yra lyginami teorinio modelio rezultatai, realizuota Java programavimo kalba.

Šio eksperimento tikslai yra šie:

- Išbandyti sistemos veikimą imituojant įvairius galimus bevielių sensorinių tinklų topologijas;
- Įvertinti energijos našumą maršrutizuojamame tinkle, kol palaikomas bendravimo vientisumas tarp sensorinių mazgų;
- Trumpinti skaičiavimo procesus, kai mazgai atlieka racionalų maršrutizavimą.

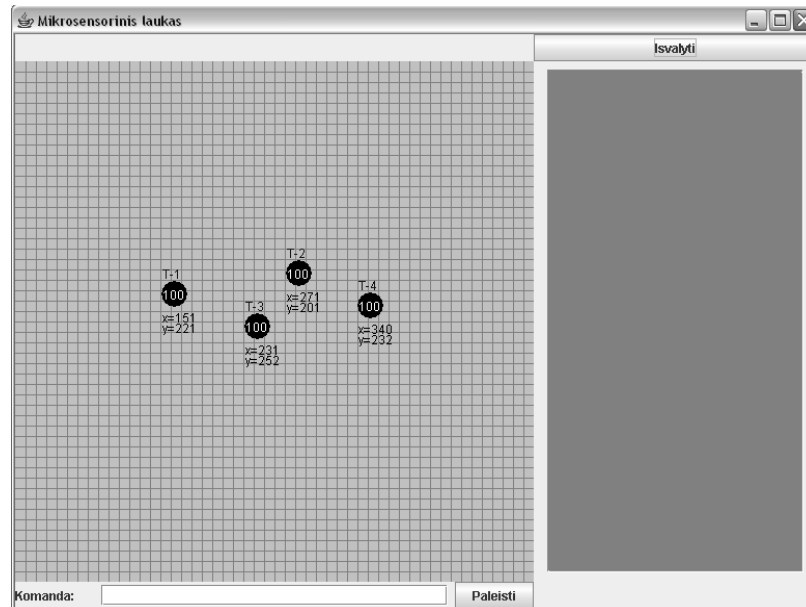
Bendrą modelio veikimą galima suskirstyti į šias pagrindines funkcines dalis:

- Sensorinių mazgų išdėstymas rankiniu būdu;
- Kaimyninių sensorinių mazgų suradimas sudarant bevielį sensorinį tinklą;
- Pradinio ir paskirties sensorinio mazgo parinkimas;
- Įvertinti atstumus ir energijos sąnaudas maršrutizuojamame tinkle.

4.1. Algoritmo prototipo eksperimentinis tyrimas

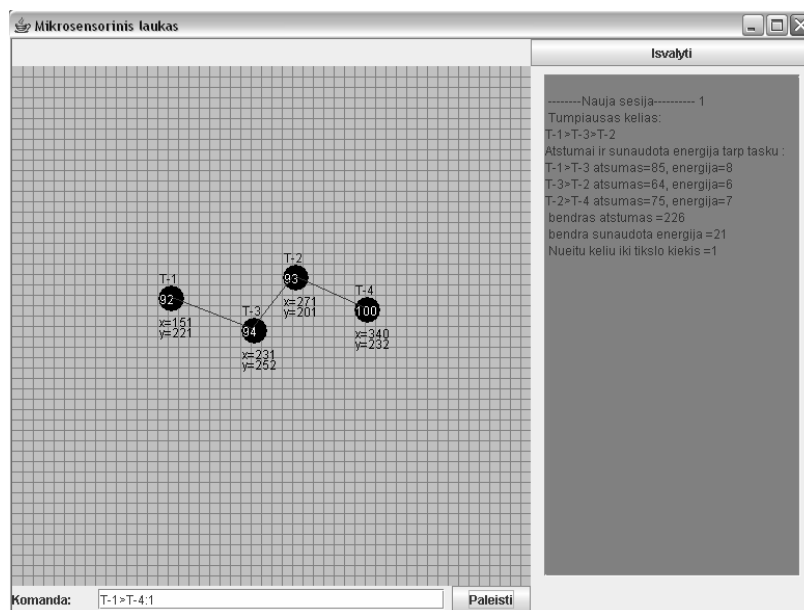
Preliminarus programos veikimas pavaizduotas prieduose (žr. Prieduose Nr. 1, 2, 3). Eksperimento metu mazgai išdėstomi rankiniu būdu atsitiktine tvarka. Komandinėje eilutėje įvedamas pradžios ir paskirties sensorinis mazgas su ciklų skaičiumi. Ciklų skaičius parodo, kiek žinutė gali būti siunčiama tuo pačiu keliu. Tai leidžia stebėti sunaudotą energiją siuntimo metu. Tuo pat metu gauti maršrutizavimo rezultatai išvedami į ekraną, kur parodomas surastas trumpiausias atstumas, atstumas ir sunaudota energija tarp sensorinių mazgų, bendras atstumas bei bendra sunaudota energija ir galimas skaičius kelių iki tikslo pasiekimo.

Algoritmo teorinis modelis buvo tikrinamas su sukurta Java programine įranga. Pagal teorinį algoritmo modelį programos mikrosensoriniame lauke buvo išdėstyti keturi sensoriniai mazgai – T-1, T-2, T-3 ir T-4 (15 pav.).



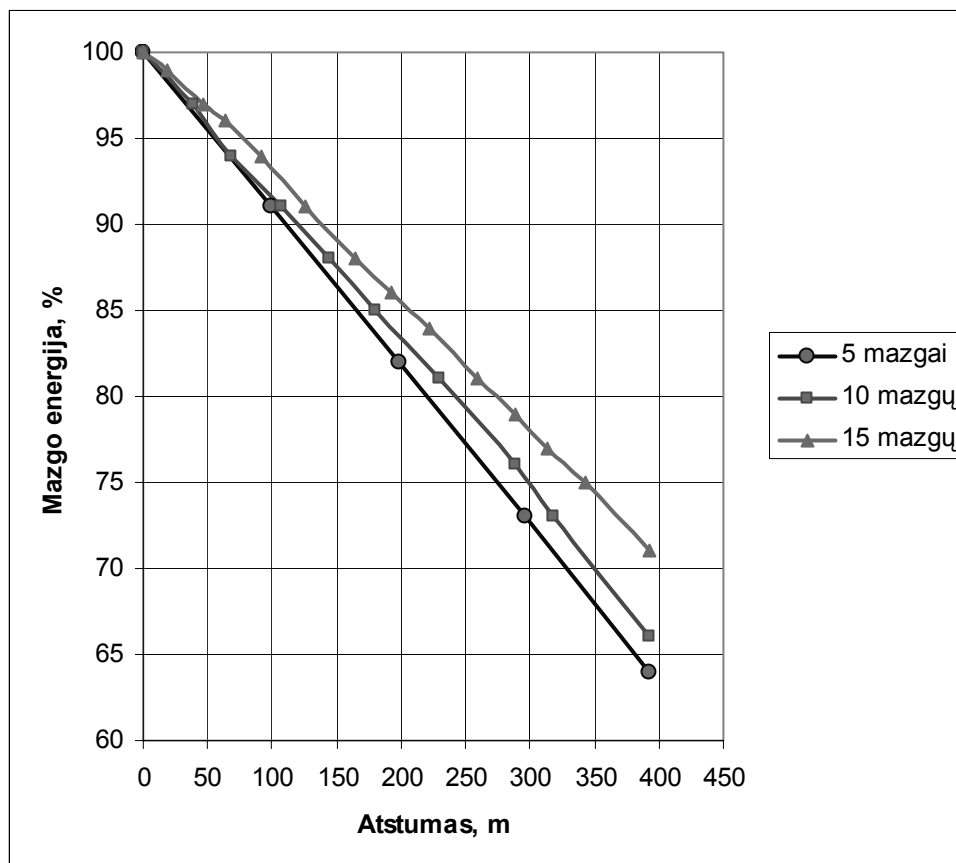
15 pav. Mazgų išdėstymas pagal teorinį modelį.

Sekančiu žingsniu, komandinėje eilutėje įvedamas pradžios sensorinis mazgas T-1 ir paskirties mazgas T-4. Paleidus programą pasirinktas pradžios mazgas suranda artimiausius kaimynus pasiekiamus savo perduodamoje srityje, t.y. T-1->T-3. Atitinkamai sekančiu žingsniu sensorinis mazgas T-3 analizuoja savo perdavimo srityje artimiausius kaimynus, taip mazgai keliaujama vieni per kitus, kol surandamas trumpiausias atstumas tarp T-1 ir T-4 (16 pav.). Pagal pasirinktą pavyzdį galime teigti, kad algoritmas veikia teisingai surasdamas trumpiausią atstumą tarp pasirinkto pradžios ir paskirties sensorinio mazgo.



16 pav. Surastas trumpiausias atstumas pagal teorinį modelį.

Atlikti eksperimentiniai skaičiavimai su skirtingoms tinklo topologijom ir mazgų kiekiais $n = 5, 10$ ir 15 , parodė teoriškai apskaičiuotą energijos sunaudojimą prie skirtingų mazgų skaičiaus (17 pav.).



17 pav. Energijos sunaudojimas prie skirtingų mazgų skaičiaus.

17 pav. grafike matote beveik tiesinę priklausomybę tarp atstumo ir mazgo energijos. Didinant skaičių n stebime gerėjančius vidutinius mazgų energijos sunaudojimo rodiklius. Tai galima būtų paaiškinti tuo, kad esant didesniam mazgų skaičiui yra didesnė galimybė suvartoti mažiau energijos taip prailginant sensorinio mazgo gyvavimą bevieliam sensoriniame tinkle.

5. Išvados

- Atlikus bevielių sensorinių tinklų maršrutizavimo analizę buvo sukurtas apibendrintas trumpiausio kelio algoritmas. Analizės metu išanalizuota sensorinių mazgų parametrai, savybės, privalumai bei trūkumai.
- Sudarytą algoritmo modelį galima taikyti įvairaus dydžio bevieliams sensoriniams tinklams.
- Išanalizavus eksperimentinius tyrimus su skirtingomis tinklų topologijomis buvo nustatyta, kad prie skirtingų mazgų skaičiaus energijos sunaudojimas skirtingas.
- Taip pat nustatyti bevielio sensorinio tinklo algoritmo prototipo modeliavimo rezultatai parodė, kad sukurto algoritmo funkcionalumas ieškant racionaliausio kelio atitinka sukurtą matematinį modelį.
- Didinant algoritme mazgų skaičių, gaunami geresni vidutiniai efektyvumo rodikliai ir ilgesni algoritmo skaičiavimo laikotarpiai.

6. Literatūros sąrašas

[1] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, Wireless sensor networks: a survey, Computer Networks 38 [interaktyvus]. [žiūrėta 2006-06-10]. Prieiga per internetą: <http://www.ece.gatech.edu/research/labs/bwn/sensornets.pdf>.

[2] G. Hoblos, M. Staroswiecki, A. Aitouche, Optimal design of fault tolerant sensor networks, IEEE International Conference on Control Applications, Anchorage, AK, September 2000, p. 467–472.

[3] N. Bulusu, D. Estrin, L. Girod, J. Heidemann, Scalable coordination for wireless sensor networks: self-configuring localization systems. Iš ISCTA. [interaktyvus]. 2001 [žiūrėta 2006-05-16]. Prieiga per internetą: <http://www.media.mit.edu/resenv/classes/MAS965/readings/bulusu2001.pdf>.

[4] Bob Heile, CES 2004. [interaktyvus] – V.: ZigBee Alliance Inc., 2005 – 50 p. Prieiga per internetą: www.zigbee.com.

[5] M. Achir, L. Ouvry, A Routing Protocol for Wireless Ad Hoc Sensor Networks : Multi-Path Source Routing Protocol, Electronics and Information Technology Laboratory Atomic Energy Commission, France, 2005, p. 442-453.

[6] F. Ye, A. Chen , S. Lu, L. Zhang ,A Scalable Solution to Minimum Cost Forwarding in Large Sensor Networks. Iš ICCCN. [interaktyvus]. 2001 [žiūrėta 2006-09-25]. Prieiga per internetą: <http://www.cs.ucla.edu/~alchemy/pubs/grab-iccn01.pdf>.

[7] H.-S. Kim and K.-J. Han, A Power Efficient Routing Protocol Based on Balanced Tree in Wireless Sensor Networks. Proceedings of the First International Conference on Distributed Frameworks for Multimedia Applications, France, 2005, p.138-143.

[8] J.N. Al-karaki and A.E. Kamal, Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey, IEEE Wireless Communication. [interaktyvus]. [žiūrėta 2006-05-05]. Prieiga per internetą: <http://www.ee.iastate.edu/~kamal/Docs/kk04.pdf>.

[9] Q. Jiang and D. Manivann, Routing protocols for sensor networks, in Proceedings of the 1st IEEE Consumer Communications and Networking Conference, 5-8 Jan. 2004, Las Vegas, USA, 2004, psl 93-98.

[10] Brian C. Dean, Continuous – Time Dynamic Shortest Path Algorithms, Massachusetts Institutes of Technology. [interaktyvus] 1999 [žiūrėta 2006-11-04]. Prieiga per internetą: http://www.cs.clemson.edu/~bcdean/bdean_masters_thesis.pdf.

- [11] G. Xing, C. Lu, Y. Zhang, Q.Huang, R.Pless, Minimum Power Configuration in Wireless Sensor Networks, ACM Mobihoc. [interaktyvus]. [žiūrėta 2006-12-10]. Prieiga per internetą: <http://www.cse.wustl.edu/~lu/papers/mobihoc05.pdf>.
- [12] C. Gui, P. Mohapatra, Scalable Multicasting in Mobile Ad Hoc Networks, Department of Computer Science. [interaktyvus]. [žiūrėta 2005-10-25]. Prieiga per internetą: http://www.ieee-infocom.org/2004/Papers/43_4.PDF.
- [13] D. Cox, E. Jovanov, A. Milenkovic, Time Synchronization for Zigbee Networks, Electrical and Computer Engineering Department. [interaktyvus]. [žiūrėta 2006-05-12]. Prieiga per internetą: http://www.ece.uah.edu/~milenska/docs/dc_ssst05_synch.pdf.
- [14] A. Viswanathan, Dr. Terence E. Boulton, Power Conservation in zigbee Networks using Temporal Control, Vision and security Technology Laboratory. [interaktyvus]. [žiūrėta 2006-12-14]. Prieiga per internetą: <http://vast.uccs.edu/~tboulton/PAPERS/ieee-iswpc07-viswanathan-boulton-power-conservation-in-zigbee.pdf>.
- [15] P. Kinney, Zigbee Technology – Wireless control that simply works. [interaktyvus]. [žiūrėta 2007-01-05]. Prieiga per internetą: www.zigbee.org.

7. Terminų ir santraupų sąrašas

BST – bevielis sensorinis tinklas.

ZigBee – tai nedidelių duomenų perdavimo, dvikrypčio tinklo standartas skirtas duomenų perdavimo tinklams realizuoti. Šis standartas naudoja nedidelius, mažai energijos naudojančius įrenginius.

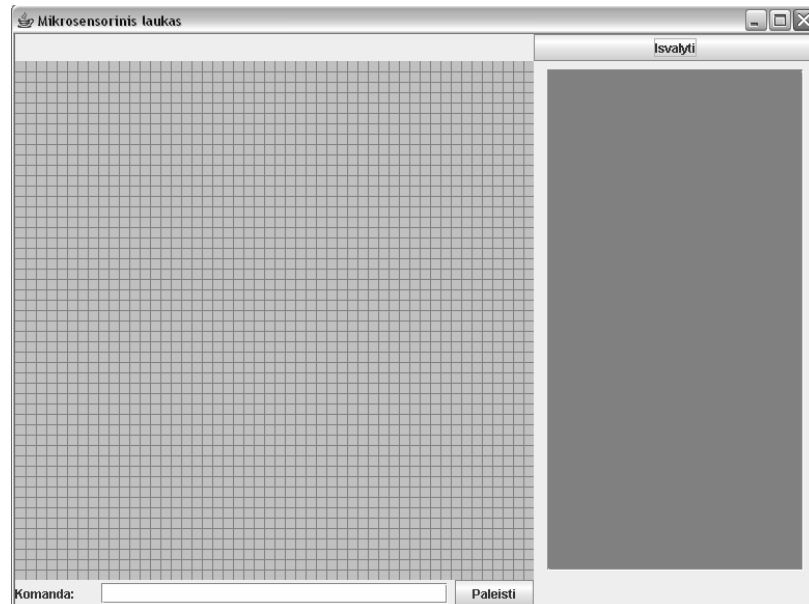
MPSR – tai reaguojantis maršrutizavimo protokolas mišrioje tinklo topologijoje, ir pritaikytas beveliams tinklams su bazine stotimi (angl. *Multi-path source routing protocols*).

MCFA – tai minimalių sąnaudų peradresavimo algoritmas, kurio maršrutizavimo kryptis yra visuomet žinoma (angl. *The minimum cost forwarding algorithm*).

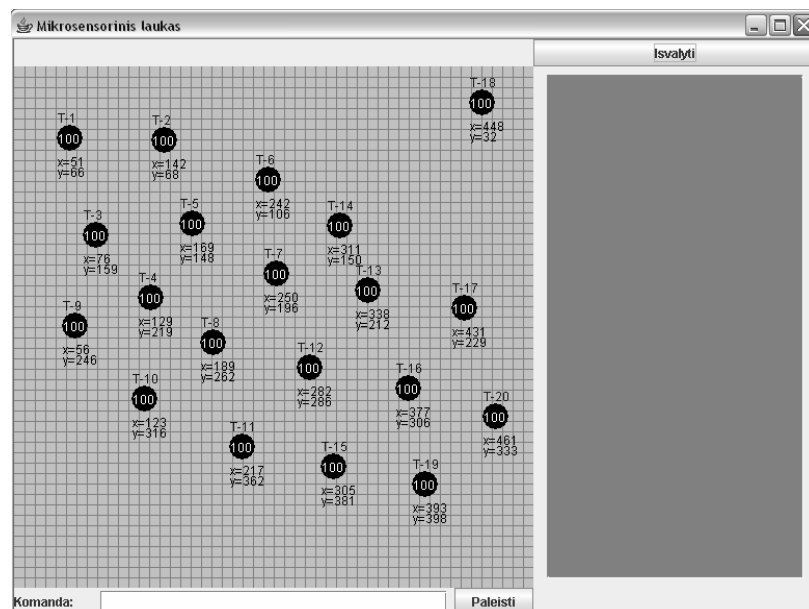
BATR – tai maršrutizavimas nustatyto medžio pagrindu (angl. *The balanced aggregation tree routing*).

8. Priedai

Priedas Nr.1 – Pagrindinis programos langas.



Priedas Nr.2 – Sensorinių mazgų išdėstymas, kai $n = 20$.



Priedas Nr.3 – Trumpiausias surastas kelias tarp pradinio mazgo T-2 ir paskirties T-16.

