

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY
ÚSTAV TELEKOMUNIKÁCIÍ

S T U • •
• • • • •
• F E I •
• • • • •

ING. JOZEF KENYERES

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

**NOVÉ TECHNIKY PODPORUJÚCE
KOMUNIKÁCIU V BEZDRÔTOVÝCH
SENZOROVÝCH SIEŤACH**

NA ZÍSKANIE AKADEMICKÉHO TITULU DOKTOR
PHILOSOPHIAE DOCTOR

V DOKTORANDSKOM ŠTUDIJNOM PROGRAME
5.2.15 TELEKOMUNIKÁCIE

BRATISLAVA, MÁJ 2014

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Ústave telekomunikácií FEI STU v Bratislave.

Predkladateľ: Ing. Jozef Kenyeres
Ústav telekomunikácií FEI STU Bratislava
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: prof. Ing. Peter Farkaš, DrSc.
Ústav telekomunikácií FEI STU Bratislava
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: prof. RNDr. Frank Schindler, PhD.
Ústav aplikovanej informatiky, Fakulta informatiky, PEVŠ v Bratislave
Tematínska 10, 851 05 Bratislava 5

Doc. RNDr. Eugen Ružický, PhD.
Ústav aplikovanej informatiky, Fakulta informatiky, PEVŠ v Bratislave
Tematínska 10, 851 05 Bratislava 5

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa 8.7.2014 o 14:00 hod.

v zasadacej miestnosti dekana FEI STU v Bratislave, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

.....
doc. RNDr. Gabriel Juhás, PhD.
dekan FEI STU Bratislava
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Obsah

ÚVOD	2
1 AKTUÁLNY STAVU PROBLEMATIKY	3
1.1 Problematika smerovania	4
1.2 Aktuálne trendy v rámci smerovania WSN	4
1.2.1 Geografické smerovanie	4
1.2.2 Samo-organizujúce súradnicové protokoly	5
2 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE	7
3 NÁVRH KOMUNIKAČNÉHO MODELU	7
3.1 Konektivita ako lokalizačná informácia	8
3.1.1 Fragmentácia siete a klasifikácia konektivity	9
3.2 Efektívna lokalizácia	13
3.2.1 Detekcia P_{Ref}	14
3.2.2 Detekcia Ω	15
3.2.3 Formovanie <i>segmentov</i>	16
3.2.4 Analýza výsledkov	18
3.3 Zhrnutie	21
4 PRÍNOSY PRE VEDU A PRAX	21
5 ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	24
PEDAGOGICKÁ ČINNOSŤ AUTORA	29

ÚVOD

Bezdrôtové senzorové siete (WSN) sú dlhodobo predmetom intenzívneho záujmu zo strany akademickej obce. Predstavujú totiž ojedinelé spojenie medzi svetom výpočtovej techniky a „skutočným“ svetom, keďže v sebe integrujú možnosť monitorovať fyzikálne veličiny a následne tieto údaje vyhodnocovať, spracovávať alebo zdieľať s ostatnými uzlami. Vzniká tak široké spektrum aplikácie nameraných dát, napríklad využiť ich ako vstupy pre riadiaci proces väčšieho systému a dynamicky reagovať na prípadné zmeny. Samozrejmosťou je integrácia WSN s inými, tradičnejšími informačnými systémami. Samotný koncept, predpokladajúci vytvorenie autonómnej siete z veľkej skupiny zariadení s obmedzenými schopnosťami, je však neustále predmetom výskumu. Pôvodne sa predpokladala vysoká mobilita zariadení, ktorá by umožnila dynamické monitorovanie predmetnej oblasti a fyzikálnej veličiny, resp. veličín. Vzhľadom na vidinu komerčne zaujímavých aplikácií sa však upúšťa od tohto konceptu. V praxi totiž našli WSN uplatnenie skôr v rámci monitorovania geograficky rozľahlej oblasti, kde by bolo budovanie infraštruktúry pre niektorý z tradičných informačných systémov príliš nákladné. Postupne sa preto celý koncept WSN presúva práve týmto smerom. WSN je tak v súčasnosti chápaná ako geograficky rozľahlá sieť pozostávajúca z veľkého množstva zariadení, pričom potreba ich mobility ustupuje do úzadia.

Zmena základného konceptu prináša aj nové požiadavky na fungovanie WSN. Hoci je aspekt mobility zatlačený do úzadia, prichádzajú nové, nemenej naliehavé výzvy. Vzhľadom na geografickú rozlohu a obmedzené možnosti napájania (keďže vo všeobecnosti sa očakáva napájanie batériami) sa do popredia dostáva najmä aspekt energetickej úspornosti. Súčasne, vzhľadom na veľký počet zariadení, je mimoriadne dôležitou požiadavkou optimalizácie komunikácie. Pre WSN sa tak stáva kľúčovou otázkou ako čo najlacnejšie (z pohľadu spotrebovanej energie) zorganizovať komunikáciu medzi potenciálne geograficky vzdialenými uzlami tak, aby bola WSN schopná plniť všetky svoje úlohy.

Jedným zo základných predpokladov, ktorý pre WSN ostáva nemenný, je požiadavka na čo najnižšiu cenu zariadení. S klesajúcou cenou ale ruka v ruke klesá aj funkcionálnosť. Preto majú zariadenia určené pre WSN pomerne limitované možnosti, či už čo sa týka dostupnej energie, komunikačného potenciálu alebo výpočtových kapacít. Je zrejmé, že takéto zariadenie nie je možné použiť na vyriešenie výpočtovo náročnej úlohy. No nedostatky samotných zariadení má vykompenzovať ich početnosť. Úzka spolupráca medzi jednotlivými zariadeniami umožňuje vyrovnáť sa s úlohami a podmienkami, ktoré by nezvládli ani podstatne sofistikovanejšie zariadenia. Podmienkou je však správne zladenie jednotlivých WSN zariadení tak, aby svoje obmedzené kapacity využívali čo najracionálnejšie v prospech celej siete ako celku.

Vo svojej práci som sa zamerlal práve na problematiku komunikácie medzi zariadeniami. Vzhľadom na dispozície zariadení sa jedná o kľúčový problém, ktorý je potrebné vyriešiť. Lebo bez možnosti efektívnej komunikácie medzi zariadeniami je komerčný potenciál WSN len veľmi ťažko využiteľný.

1 AKTUÁLNY STAVU PROBLEMATIKY

Podľa [1], WSN sú definované ako siete pozostávajúce z priestorovo distribuovaných, autonómnych zariadení, ktoré sú rozmiestnené v určitej oblasti za účelom monitorovania istej fyzikálnej veličiny (teplota, intenzita osvetlenia, tlak a pod.). Tieto zariadenia sú vybavené senzormi, pomocou ktorých sú schopné kvantifikovať predmetnú fyzikálnu veličinu. Zároveň sú vybavené bezdrôtovými komunikačnými modulmi, ktoré umožňujú ich vzájomnú komunikáciu. WSN majú potenciálne uplatnenie v rôznych odvetviach. Ich využitie sa očakáva hlavne v zdravotníctve, v environmentálnych aplikáciách, na vojenské účely a v domácnostiach, no do úvahy prichádza aj mnoho ďalších odvetví.

WSN patria do kategórie ad hoc sietí ([2]). Základným princípom ad hoc sietí je schopnosť zariadení vyhľadávať iné, kompatibilné zariadenia a nadväzovať s nimi komunikáciu. Skupina navzájom komunikujúcich zariadení vytvorí sieť, ktorá je následne schopná plniť rôznorodé požiadavky. Takto vytvorená sieť má vopred neurčenú topológiu, ktorá je vytváraná dynamicky. Rovnako dynamicky sa môže aj meniť, keďže jednotlivé zariadenia môžu do siete neustále pribúdať, ale aj z nej ubúdať. Čo sa týka základných vlastností ad hoc sietí, podľa [2] je ich možné charakterizovať nasledovne:

- **Topológia:** dynamická, umožňuje voľný pohyb zariadenia.
- **Komunikácia:** zariadenia komunikujú jednotným médiom.
- **Infraštruktúra:** zariadenia sú autonómne a fungujú v P2P móde, čo umožňuje zariadeniam vytvárať vlastné dáta a smerovať ich ostatným zariadeniam v rámci siete.
- **Smerovanie:** je využívané viacsokové smerovanie, ktoré umožňuje komunikáciu aj navzájom priamo nekomunikujúcich zariadení .
- **Energia:** zariadenia môžu disponovať iba obmedzenými zdrojmi energie.
- **Škálovateľnosť:** počet zariadení v sieti nemá ovplyvňovať kvalitu komunikácie.

K uvedeným vlastnostiam je potrebné priradiť niekoľko ďalších, ktoré špecificky charakterizujú samotné WSN ([1]):

- **Odolnosť voči chybám:** uzly môžu byť nasadené v rámci náročných podmienok, preto treba brať do úvahy aj komplikácie s tým súvisiace.
- **Rozšíriteľnosť:** WSN môžu pozostávať z veľkého množstva uzlov a je potrebné brať do úvahy aj hustotu rozmiestnenia.
- **Cena zariadení:** vzhľadom na spomenutú vysokú početnosť je žiaduce, aby cena jedného uzla bola čo najmenšia (rádovo na úrovni jedného amerického dolára).
- **Hardvérové obmedzenie:** vzhľadom na požiadavku čo najnižšej ceny sú možnosti uzlov obmedzené.
- **Prenosové médium:** najčastejšie sa jedná o rádiový signál v rozsahu 433 MHz až 2,4 GHz ([1]).
- **Spotreba energie:** veľmi významným faktorom je spotreba energie, keďže na napájanie sa najčastejšie využívajú batérie.

1.1 Problematika smerovania

Vo vzťahu ku komunikácii je kľúčovou problematikou smerovanie. Vzhľadom na jej mimoriadnu dôležitosť, problematike smerovania v oblasti WSN je venovaná patričná pozornosť. Nielen v rámci akademickej sféry, ale aj v rámci spoločností z rôznych priemyselných odvetví, ktoré vidia vo WSN výrazný komerčný potenciál. Výsledkom týchto snáh je okrem iného aj značné množstvo pokusov o štandardizáciu smerovania pre WSN [12] (IEEE 802.15.4, IETF, ROLL, IETF, 6LoWPAN, Wireless HART a iné). Ako naznačuje veľké množstvo rôznych štandardov, v súčasnosti neexistuje konsenzus ako optimálne definovať smerovacie protokoly. Očakáva sa totiž, že napriek obmedzeným zdrojom energie uzlov (keďže vo všeobecnosti sa očakáva napájanie pomocou klasických batérií) umožní smerovací protokol autonómne fungovať v horizonte rokov. Sformovanie a manažment siete má taktiež prebiehať autonómne bez potreby administrácie. Dizajn smerovacieho protokolu musí byť navyše veľmi robustný, pretože existuje veľké množstvo potenciálnych scenárov (čo sa týka intenzity dátovej prevádzky, rôznorodosti aplikácií a pod.), s ktorými sa musí vyrovnáť.

1.2 Aktuálne trendy v rámci smerovania WSN

Postupným vývojom prišlo k odklonu od tradičných smerovacích techník. Ako už bolo spomenuté, pre WSN je kľúčová energetická efektivita. Zároveň sa predpokladá, že objem dát je menší než v ad hoc sieťach a je smerovaný do istého počtu konečných bodov. Všeobecná predstava o WSN však taktiež prechádza vývojom. Kým spočiatku bola WSN definovaná ako sieť pozostávajúca z menšieho počtu vysoko mobilných uzlov, v súčasnosti sa pod pojmom WSN chápe sieť pozostávajúca z veľkého počtu uzlov, ktoré sú staticky umiestnené. Keďže smerovanie je kľúčovým problémom WSN, podobne ako predstava o WSN sa zmenila aj predstava o optimálnom smerovaní v rámci WSN.

1.2.1 Geografické smerovanie

Smerovanie na základe geografických informácií patrí medzi novšie riešenia v rámci problematiky smerovania WSN. V rámci tejto skupiny protokolov sú smerovacie rozhodnutia prijímané na základe znalosti presnej geografickej polohy zdroja aj adresáta správy. To umožňuje zohľadniť požiadavky na zostavenie trás s minimálnym oneskorením, optimalizáciou spotreby energie, prípadne iné požiadavky. Znalosť polohy umožňuje zjednodušenie smerovania, pretože je možné realizovať smerovacie rozhodnutia na úrovni susediacich uzlov. Najväčším problémom je určenie polohy uzla. Vzhľadom na obmedzené možnosti uzlov je ťažko predstaviteľné, že uzol dokáže určiť svoju polohu autonómne. Preto sa uvažuje o externom zdroji, ktorý by uzlu priradil polohu. To však znižuje dynamiku takéhoto riešenia, keďže v prípade zmeny polohy potrebuje uzol informáciu aktualizovať, a zároveň sťažuje pridávanie nových uzlov do siete.

Príkladom aplikácie, ktorá by dokázala plne využiť výhody geografického smerovania je monitorovanie divo žijúcich zvierat v národnom parku. Keďže sa jedná o aplikáciu realizovanú vo voľnom priestranstve, na určenie polohy by bolo možné využiť GPS súradnice. V tomto prípade je topológia známa a nie je dôvod na jej zmenu, pokiaľ

pokrýva požadované územie. Každý uzol teda pozná svoju polohu a taktiež polohu svojich susedov, čo mu umožňuje prijať správne rozhodnutie ako smerovať prijatú správu ďalej. Keďže je vybavený všetkými potrebnými údajmi, nie je nutné prenášať ich v hlavičke správy. Na doručenie správy do bázovej stanice tak stačí zvoliť suseda, ktorý je k nej geograficky bližšie. Ten urobí to isté, pokiaľ s báзовou stanicou priamo nekomunikuje. Týmto spôsobom je správa doručená až do báзovej stanice bez potreby ďalších smerovacích informácií. Existuje viacero definícií blízkosti. Najintuitívnejšia definícia sa vzťahuje na fyzickú vzdialenosť, t.j. uzol hľadá suseda ktorý je od neho najvzdialenejší a najbližší k cieľu. Vzhľadom na to, že kvalita komunikácie sa zo zvyšujúcou vzdialenosťou klesá (bez ohľadu na uvažovaný model kanála, vzdialenosť je vždy parameter, ktorý negatívne ovplyvňuje kvalitu komunikácie). Vyberanie tých najhorších liniek preto nebude dobrou stratégiou. Preto sú implementované mechanizmy, ktoré okrem prekonanej vzdialenosti smerom k cieľu zvažujú aj kvalitu linky [24]. Konkrétna realizácia závisí od samotného protokolu. Bez ohľadu na definíciu blízkosti a aplikovaný mechanizmus, hrozí pri tomto type prístupu problém takzvanej prázdnej oblasti („void area“). Táto situácia nastáva, keď uzol nemá suseda, ktorý by bol k cieľu bližšie než je on sám. Napriek tomu, medzi ním a uzlom je stále priveľká vzdialenosť na to, aby komunikovali priamo. Hoci trasa k cieľu existuje, uzol ju nedokáže odhaliť, pretože by musel poslať správu uzlu, ktorého vzdialenosť k cieľu je väčšia než jeho vlastná. Podľa [12], v prípade siete s menšou hustotou uzlov môže byť v dôsledku tohto problému nedoručených až 20% správ. Pomocou sofistikovanejších mechanizmov je však možné tento problém vyriešiť, hoci sa tak proces smerovania stáva komplexnejším.

Príkladom aplikácie geografického smerovania sú protokoly End-to-End routing process“ (EtE) z [25] alebo „Beaconless Greedy Routing“ (BGR) z [26].

1.2.2 Samo-organizujúce súradnicové protokoly

Najnovšia skupina protokolov, ktorá sa snaží prekonať najväčší problém protokolov využívajúcich geografické smerovanie: potrebu určenia presnej polohy. Súradnice pritom nemusia kopírovať fyzickú polohu uzlov, ale môžu priamo zohľadňovať požiadavky, na základe ktorých majú byť realizované smerovacie rozhodnutia. Práve táto skupina protokolov je v súčasnosti považovaná za najperspektívnejšiu. Skupina IETF plánuje práve na tomto princípe vybudovať budúci štandard pre smerovanie v WSN.

V súčasnosti existuje viacero riešení, ako jednotlivým uzlom priradiť súradnice. Prvým a najjednoduchším riešením je využitie takzvaných kotvových („anchor“) uzlov. Jedná sa o skupinu referenčných uzlov, ktoré poznajú svoju geografickú polohu. Na základe vzdialenosti od kotvových uzlov sú ostatné uzly, ktoré svoju polohu nepoznajú, schopné svoju polohu určiť. Jedná sa vlastne o ten istý princíp, ktorý sa využíva v rámci GPS systémov. V prípade využitia v rámci WSN je jeho hlavným nedostatkom absencia spoľahlivej a presnej metódy, ktorá by uzlom umožnila určenie vzájomnej vzdialenosti. V praxi sa používa viacero metód (RSSI, TOA, AOA a pod.), no žiadna z nich nedosahuje požadovanú presnosť a spoľahlivosť. Protokol „GPS-Free-Free“ ([27]) využíva na určenie polohy uzla metódu označovanú ako multilaterácia. Jedná sa o lokalizačnú metódu vyvinutú na vojenské účely, ktorá umožňuje určenie polohy lietadla na základe odozvy lietadla na signály, ktoré vysielajú

strategicky rozmiestnené pozemné stanice. Využitie v rámci WSN má obmedzenú presnosť, keďže autori z [27] dosiahli presnosť s toleranciou rádovo 40 m.

V prípade, ak sa v rámci WSN uvažuje o P2P prevádzke, využíva sa metóda virtuálnych súradníc. V prípade siete, ktorá obsahuje N kotvových uzlov je virtuálna súradnica uzla i definovaná ako vektor $\{V_1, V_2, \dots, V_N\}$, pričom V_N definuje vzdialenosť uzla i od kotvového uzla N vyjadrenú ako počet hop-ov. Súradnice jednotlivých uzlov nie sú jednoznačné a celé skupiny uzlov môžu mať presne tie isté súradnice. Napriek tomu, pomocou virtuálnych súradníc je možné dosiahnuť veľmi dobrú priepustnosť. Protokol „Beacon Vector Routing“ (BVR) [29] je pokladaný za priekopníka v tejto oblasti, keďže ako jeden z prvých protokolov využil virtuálne súradnice a experimentálne dokázal životaschopnosť tohto konceptu. V rámci BVR, kotvové uzly sú náhodne zvolené. Na základe vzdialenosti od nich určia uzly svoju polohu a smerovanie je následne realizované ako v prípade konceptu lakomého smerovania prezentovaného pri popise geografických protokolov v kapitole 4.3.1. Následne bol tento koncept vylepšený pridaním procedúry, ktorá optimalizuje výber kotvových uzlov ([30]). Iný prístup k priradeniu virtuálnych súradníc predstavuje protokol LTP prezentovaný v [31]. Uzly majú priradené súradnice hierarchicky na základe vzdialenosti od bázovej stanice. Tým vzniká stromová štruktúra, ktorej stredom je práve bázová stanica. Smerovanie je realizované hierarchicky, pretože správa od uzla sa najprv posieľa smerom k bázovej stanici. Keď dorazí do uzla, kde sa trasa do bázovej stanice z cieľového a zdrojového uzla stretáva, smeruje od bázovej stanice do cieľového uzla. V prípade LTP je garantované doručenie správy, dĺžka trasy však môže byť podstatne väčšia než by mohla byť v ideálnom prípade. V súčasnosti najaktuálnejším protokolom z tejto oblasti je „Small State and Small Stretch“ (S4) protokol prezentovaný v [33]. V rámci tohto protokolu je v sieti vytvorená štruktúra podobná zhlukovacím protokolom, ktorá zjednodušuje proces smerovania. V rámci protokolu S4 boli definované následne ďalšie protokoly, ktoré špecifikujú komunikáciu v rámci zhluku a takisto komunikáciu medzi susednými zhlukmi.

Vo všeobecnosti je možné povedať, že koncept virtuálnych súradníc je veľkým prísľubom pre riešenie P2P komunikácie medzi uzlami. Najväčšou nevýhodou ostáva neoptimálna dĺžka trasy medzi cieľom a adresátom a zároveň náročnosť voľby optimálnych kotvových bodov. Vzhľadom na to, že v rámci WSN však prišlo vo všeobecnosti k odklonu od P2P prevádzky smerom k MP2P, aj v rámci súradnicových protokolov vznikla skupina protokolov optimalizovaná na tento typ prevádzky. Medzi predstaviteľov tejto skupiny protokolov patria napríklad „Gradient-Based Routing“ (GBR) z [34], „GRAdient Broadcast“ (GRAB) [35] a viacero ďalších. Hlavným rozdielom je najmä to, že v tomto prípade je súradnicový systém sústredný okolo bázovej stanice. Bázová stanica je centrom súradnicového systému, pričom ostatným uzlom je súradnica pridelená hierarchicky, v závislosti od ich vzdialenosti od bázovej stanice (vyjadrenej ako počet hop-ov).

Súradnicové protokoly predstavujú momentálne špičku v rámci smerovacích protokolov pre WSN. Umožňujú efektívnu aplikáciu konceptov geografického smerovania, pričom odstraňujú jeho najväčšiu slabinu, ktorou je potreba znalosti presnej geografickej polohy uzla. Navyše, pomocou správne zvolených virtuálnych súradníc je dokonca možné

dosiahnuť lepšiu priepustnosť siete než pri fyzických súradniciach. Preto sa koncept virtuálnych súradníc javí ako najperspektívnejšie riešenie otázky smerovania v rámci WSN.

2 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Na základe podrobného štúdia problematiky a praktických znalostí nadobudnutých pri práci s predmetným WSN riešením som dospel k záveru, že je v rámci optimalizácie komunikácie nevyhnutné premýšľať v prvom rade nad efektívnym smerovacím protokolom. Ten by sa mohol stať základným pilierom, na ktorom by bolo možné vytvoriť skutočne optimálnu komunikačnú stratégiu. Preto som si stanovil tieto ciele dizertačnej práce:

- 1) Určenie aspektov, charakteristík a parametrov, ktoré sú významné a špecifické z hľadiska fúzie údajov.
- 2) Návrh a realizácia generátora sietí WSN.
- 3) Návrh komunikačného modelu, ktorý by optimalizoval smerovanie v WSN.
- 4) Vykonanie experimentov s navrhnutým modelom. V rámci možností verifikovať model porovnaním niektorých získaných výsledkov s experimentálnymi výsledkami.
- 5) Návrh možného smerovania ďalšieho výskumu v tejto oblasti.

3 NÁVRH KOMUNIKAČNÉHO MODELU

Ako som uviedol v kapitole 1.2.2, samo-organizujúce súradnicové protokoly sú v rámci smerovania v WSN vnímané ako aktuálne riešenie. Aplikácia princípov geografického smerovania, ktorých hlavnou výhodou je jednoduchosť a schopnosť efektívne fungovať aj pri sieťach pozostávajúcich z veľkého počtu zariadení, je mimoriadne lákavá. No ako som naznačil, aplikácia geografického smerovania implikuje dostupnosť geografických dát, na základe ktorých je možné realizovať smerovacie rozhodnutia. Druhým zásadným problémom je rozmiestnenie „kotvových“ uzlov. Vzhľadom na silne distributívny charakter WSN, prítomnosť nejakej „autority“, ktorá by vykonávala zásadné rozhodnutia, je vylúčená. Na strane druhej, realizovať takýto proces plne distribuovaným spôsobom predstavuje taktiež pomerne náročnú úlohu. Lepším riešením sa preto javí použitie takzvaných virtuálnych súradníc. V prípade týchto riešení sa upustilo od snahy čo najvernejšie reprodukovat fyzickú topológiu. Na vyjadrenie vzdialenosti sa môže použiť počet hopov, čo je podstatne jednoduchšie ako určenie fyzickej vzdialenosti. Naďalej však ostáva aktuálnou potreba určiť „kotvové“ uzly, vo vzťahu ku ktorým bude vzdialenosť určovaná.

Je preto potrebné skonštatovať, že procesy lokalizácie zohrávajú kľúčovú úlohu pri aplikácii geografického smerovania. Preto v rámci tejto kapitoly predstavím vlastný návrh riešenia, ako je možné lokalizovať „kotvové“ uzly a na základe ich polohy následne určiť polohu všetkých uzlov v sieti tak, aby bolo možné efektívne aplikovať princípy geografického smerovania. Samotné riešenie prešlo niekoľkými vývojovými fázami, ktoré sú v kapitole chronologicky obsiahnuté.

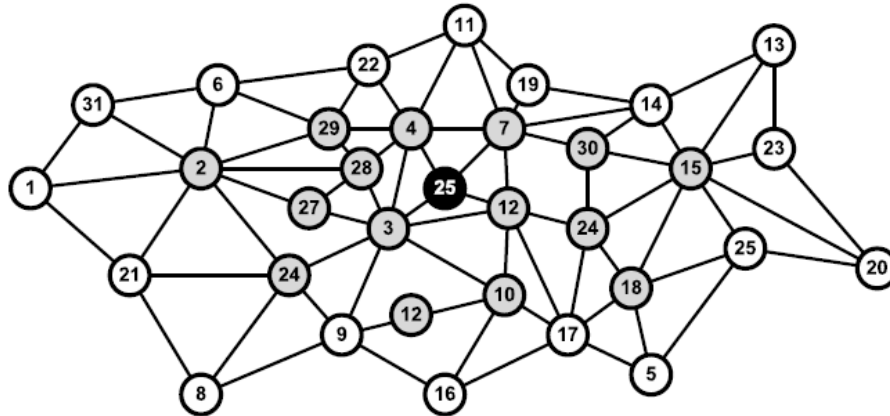
Na začiatok uvediem niekoľko predpokladov, ktoré budú platiť pre všetky nasledujúce úvahy. Predpokladáme, že sieť WSN je homogénna a pozostáva z množiny uzlov N , kde $N = \{n_1, n_2, \dots, n_{|N|}\}$ a $|N|$ je počet uzlov. Uzly sú rozmiestnené v rovine ρ , ktorá pozostáva z XxY

bodov, a ich poloha je v rámci tejto roviny náhodná. Poloha je zároveň jednoznačne určená usporiadanou dvojicou súradníc (x_i, y_i) v prípade uzla n_i . Predpokladáme, že uzly sú vybavené všesmerovou anténou a pokrývajú svojím signálom istý časť roviny, ktorá je kruhového tvaru a má rovnaký polomer r pre všetky uzly. Predpokladáme, že dva uzly sú navzájom susedné, ak ich vzájomná Euklidovská vzdialenosť je menšia, nanajvýš rovná ako r . Nateraz sa obmedzím na konštatovanie, že kvalitou linky sa ďalej zaoberať nebudem. Ak sú uzly susedné, znamená to že sú schopné prijímať správy vyslané druhým uzlom bez ďalších obmedzení. Predpokladám, že uzly nemajú k dispozícii nijakú informáciu o svojej lokalite. Znamená to, že skupina uzlov je rozmiestnená náhodne v rámci istého priestoru bez akejkolvek informácie o tom, kde by sa mohol nachádzať. Keďže predpokladám homogénnu WSN, všetky uzly sú rovnocenné a nevyskytuje sa v sieti nijaký špecifický bod ako napríklad bázová stanica. Tento fakt súvisí aj s problematikou lokalizácie, keďže nie je možné preddefinovať akési pomyselné oporné body, vo vzťahu ku ktorým by bolo možné definovať polohu jednotlivých uzlov. No na strane druhej sa jedná o najrealistickejší scenár, keďže WSN sú vo svojej podstate definované ako siete silne homogénne ([1]). Druhým obmedzujúcim faktorom je absencia metódy na odhad vzdialenosti. Hlavným dôvodom na tento predpoklad je najmä univerzálnosť navrhovaného riešenia. Pokiaľ nebude vyžadovaná akákoľvek hardvérová funkcionálna mimo absolútne základných funkcií ako posielanie, resp. prijímanie správ, je možné navrhnuté riešenie považovať za skutočne univerzálne.

V nasledujúcej kapitole predstavím základný koncept môjho riešenia problematiky lokalizácie v WSN.

3.1 Konektivita ako lokalizačná informácia

Vzhľadom na obmedzenie uvedené v predchádzajúcej kapitole, uzlom ostáva k dispozícii veľmi málo prostriedkov na určenie ich polohy. V mojom chápaní je pojem konektivita uzla synonymom k počtu susedov, t.j. stupňa uzla ([50]) d_i v prípade uzla n_i . Otázkou je, ako môže byť takáto informácia užitočná pri určovaní polohy uzla. Pre názornosť uvažujme príklad znázornený na Obr. 3-1. Sieť WSN je znázornená ako graf, ktorého vrcholy predstavujú jednotlivé uzly a hrany grafu predstavujú linky medzi nimi. Vrcholy spojené hranou tak predstavujú susedné uzly. Uzly sú zároveň znázornené tromi farbami. Čierny uzol predstavuje geografický stred siete, no podstatnejšie je rozdelenie medzi bielymi a sivými uzlami. Uzly na znázornené bielou sú umiestnené na periférii siete, spoločne predstavujú pomyselnú reťaz ohraničujúcu sieť. Inak povedané, svojim signálom čiastočne pokrývajú plochu, kde sa nenachádza žiadny ďalší uzol. Tento fakt musí zákonite ovplyvniť konektivitu uzla, keďže v porovnaní s uzlami nachádzajúcimi sa v prostriedku siete musí byť jeho konektivita v priemere slabšia. Inak povedané, uzly znázornené bielou farbou majú v priemere menej susedných uzlov ako uzly sivé.



Obr. 3-1 Spojitosť konektivity a polohy uzla v prípade pravidelnej topológie.

3.1.1 Fragmentácia siete a klasifikácia konektivity

Je zrejmé, že analýza konektivity jednotlivých uzlov je mimo kompletne pravidelných topológií nedostatočným vstupným údajom pre lokalizačný algoritmus. Situácia sa mení v prípade, ak by bolo možné odhadnúť konektivitu väčšieho fragmentu siete, ktorý by odzrkadľoval istý všeobecnejší trend. Ich vzájomné porovnanie by následne mohlo odhaliť oblasti s nižšou konektivitou, ktoré by v prípade sietí s vysokou konektivitou predstavovali zároveň aj perifériu siete. Porovnanie vlastných charakteristík s inými, v blízkosti sa nachádzajúcimi fragmentmi, by zároveň obmedzilo potrebu komunikácie so vzdialenými uzlami.

Proces fragmentácie bol definovaný v rámci [54], pričom výlučným kritériom je konektivita uzla. Aby bolo možné sledovať konektivitu v širšom zmysle, rozdelíme sieť na menšie elementy, v [54] označené ako *Packs*. Každý *Pack* je element siete spĺňajúci nasledovné podmienky:

- Obsahuje jeden uzol označený ako *hlava*, ktorý je zvolený na základe svojej konektivity.
- Môže obsahovať ďalšie uzly, takzvaných *potomkov*, ktorí sú susedmi *hlavy* (t.j. existuje hrana spájajúca tieto dva vrcholy).

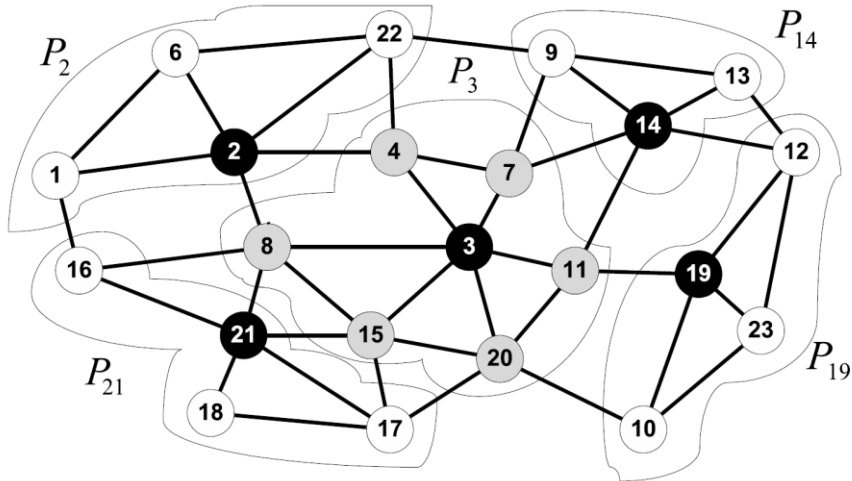
V nasledujúcich odstavoch podrobne popíšem proces fragmentácie. Keďže jediným kritériom je konektivita, postup pri detekcii *hláv* je opäť postavaný výlučne na tomto údaji. Cieľom je detekcia akýchsi „lokálnych centier“, t.j. uzlov s vyššou konektivitou. Relatívne znejúce pomenovanie vyššia používam zámerne. Najelementárnejšou informáciou o konektivite je prevedení počet susedných uzlov. V rámci terminológie typickej pre teóriu grafov hovoríme aj o stupni vrcholov grafu ([50]). Pre označenie tohto pojmu budem používať symbol d_i pre uzol (vrchol) n_i . V rámci inicializačnej fázy predpokladám, že každý uzol touto informáciou disponuje, resp. je schopný ju získať. Keďže na jej získanie postačuje schopnosť poslať, resp. prijímať správy, nepokladám tento predpoklad za problematický. Ako som spomenul, zaujímate sa o uzly s vyššou konektivitou. Problémom je, že tento parameter je výrazne ovplyvnený konektivitou okolitých uzlov. Definujem preto parameter *relatívne konektivita*, ktorý je definovaný nasledovne:

$$r_i = d_i - \frac{1}{d_i} \sum_{n_j | a_{ij}=1} d_j \quad (5-1)$$

Symbol r_i používam na označenie *relatívnej konektivity* uzla n_i . Označenie $n_j | a_{ij}=1$ znamená, že berieme do úvahy iba uzly susediace s uzlom n_i , keďže prvok a_{ij} matice susednosti \mathbf{A} je rovný 1 vtedy a len vtedy, ak sú uzly n_i a n_j susedné. Hodnota r_i má teda nasledujúci význam: v prípade, ak je konektivita uzla vyššia, než je priemer hodnôt susedných uzlov, je jeho hodnota vyššia ako 0. V opačnom prípade, keď je jeho konektivita nižšia, bude hodnota r_i menšia ako 0. V prípade, ak je konektivita uzla presne priemerná, bude hodnota r_i rovná 0. Následná fragmentácia siete na *Packs* je postavená na hodnote r_i . Cieľom je vytvorenie elementov, ktorých konektivita by mala odzrkadľovať isté trendy v rámci konektivity v danej oblasti siete. Inak povedané, či je daná oblasť v rámci siete skôr dominantná alebo naopak zaostáva za oblasťami vo svojom okolí. Preto vytvárame *Pack* okolo uzla n_i s lokálne najvyššou hodnotou r_i , ktorý sa stane *hlavou*. Pre takýto *Pack* budeme používať označenie P_i . Voľba nie je realizovaná samotným uzlom, ale niektorým z uzlov $n_j | a_{ij}=1$, ktorý zvolí n_i ako svoju *hlavu* a stane sa jeho *potomkom*. Ostatné susediace uzly, ktoré nie sú žiadnym iným uzlom zvolené za *hlavy*, sa taktiež stanú jeho *potomkami*. Pribudli dve pomocné premenné: B_i a H_i . Premenná B_i indikuje, či už je uzol n_i súčasťou nejakého P_j . Hodnota 1 indikuje, že $\exists P_j | n_i \in P_j$, pričom hodnota 0 má opačný význam. Premenná H_i obsahuje identifikátor P_j , t.j. j v tomto prípade. Za povšimnutie stojí fakt, že v prípade ak uzol n_i susedí s P_j a zároveň aj s P_k , ako svoju *hlavu* zvolí tú s vyššou konektivitou ($P_j | r_j > r_k$). Skôr než sa budem venovať samotnému popisu konektivity, ostáva definovať ešte jeden faktor. Ako som už uviedol v úvode tejto kapitoly, mojím cieľom je vytvoriť riešenie decentralizované a distribuované. Keďže nepredpokladám prítomnosť centrálnej autority (napr. bázevej stanice) a ani sa ju nepokúsim nijakým spôsobom detegovať, dosiahnuť decentralizované riešenie nie je problém. Distributívny charakter je už o niečo náročnejšou podmienkou. Aby bolo možné označiť moje riešenie za distributívne, je potrebné zdôrazniť rozsah informácií o svojom okolí, ktoré bude každý P_i vyžadovať na kvantifikáciu svojej konektivity. Definujem preto pojem *komunikačný dosah* P_i ($R(P_i)$) ktorý definujem nasledovne:

$$R(P_i) = \{\forall P_j | \exists n_l \in P_i \cup \exists n_k \in P_j; a_{lk} = 1\} \quad (3-2)$$

Pojem $R(P_i)$ označuje množinu všetkých P_j , ktoré sú umiestnené v rámci komunikačného dosahu P_i . Inak povedané, všetky P_j budeme označovať ako susedov P_i . Podmienka je pomerne jednoduchá, keďže hovorí že P_i a P_j sú susedmi vtedy a len vtedy, ak existuje aspoň jeden uzol patriaci P_i , ktorý je susedný s aspoň jedným uzlom patriacim P_j . Význam pojmu susedný tak nadobúda dve úrovne. Popri susednosti dvoch uzlov, budeme používať označenie susedný aj pre *Pack*. V prípade príkladu znázorneného na Obr. 3-2, platí pre P_2 nasledovné: $R(P_2) = \{P_{14}, P_3, P_{21}\}$, čiže P_{14} , P_3 a P_{21} sú susedmi P_2 .



Obr. 3-2 Príklad fragmentácie siete.

Hlavným významom pojmu $R(P_i)$ je obmedzenie geografického rozsahu, v rámci ktorého je potrebné disponovať údajmi o konektivite. Využívajúc predchádzajúci príklad, výlučne konektivita P_{14} , P_3 a P_{21} ovplyvní výslednú konektivitu P_2 . Vzhľadom na charakter WSN sa jedná o veľmi výhodný prístup. Pokiaľ by bolo možné obmedziť sa výlučne na informácie dostupné v rámci relatívne blízkeho geografického okolia, celkový objem komunikácie by sa tým mohol výrazne znížiť. Prenos dát v rámci celej siete, ktorá môže byť geograficky veľmi rozsiahla, je totiž v prípade WSN s ohľadom na ich obmedzené možnosti pomerne nežiaduci. Preto som nasledujúce parametre navrhol tak, aby údaje dostupné v rámci geografického rozsahu $R(P_i)$ postačovali na kvantifikáciu konektivity P_i . Je potrebné si uvedomiť, že aj počet $n_i \in P_i$ môže poskytnúť cennú informáciu o lokalite P_i . Na označenie počtu uzlov patriacich P_i budem používať symbol $|P_i|$ a pomenovanie kardinalita P_i . Ako som už naznačil, kardinalita P_i je ďalšou zaujímavou informáciou. Keďže uzly si za svoju hlavu vyberajú uzol s najvyššou konektivitou, vo všeobecnosti je veľmi silný predpoklad, že väčšie P_i budú vznikať mimo periférie. Preto budem pri definícii konektivity P_i zohľadňovať aj tento aspekt. Ako prvý krok pri určení konektivity P_i , každý $n_k \in P_i$ spočíta parameter nazvaný *väzobný koeficient* (c_i pre n_i), ktorý je definovaný nasledovne:

$$c_i = \frac{\sum_{\forall n_j | a_{ij}=1} c_{ij}}{d_i + 1} \quad (3-3)$$

Parameter c_{ij} označuje takzvanú *väzobnú váhu*, ktorá sa definuje pre dvojicu uzlov a ktorej hodnota závisí od toho, či sú tieto dva uzly súčasťou toho istého P_i alebo nie. Tento vzťah definujeme nasledovne:

$$c_{ij} = \begin{cases} 0; & n_i \in P_k \cup n_j \in P_k \\ 1; & n_i \in P_k \cup n_j \notin P_k \end{cases} \quad (3-4)$$

Inak povedané, každý uzol n_i prideli všetkým susedným uzlom váhu 1 alebo 0 v závislosti od toho, či sa jedná o uzly patriace tomu istému P_k alebo nie. Následne spočíta priemernú hodnotu, keďže sčíta hodnoty c_{ij} pre všetky $n_j | a_{ij}=1$ a vydeli ich svojou kardinalitou d_i ku ktorej pripočíta 1. Uzol n_i nepočíta hodnotu c_{ii} , keďže je vždy rovná 0, no v rámci výpočtu priemeru počíta aj sám so sebou. Hodnota c_i je vždy z intervalu $(0;1)$, pričom $c_i=0$ vtedy a len vtedy, ak sú všetky susedné uzly súčasťou $P_j | n_i \in P_j$. V ostatných prípadoch rastie hodnota c_i k 1 v závislosti od počtu $n_i \notin P_j | n_i \in P_j$. Je ešte vhodné vysvetliť, prečo je súčasťou výpočtu aj pripočítanie 1 k d_i . Hlavným dôvodom je snaha o dosiahnutie akejsi informačnej pridanej hodnoty. V prípade, ak sa jedná o uzol s nízkou kardinalitou, pripočítanie 1 výsledok ovplyvní pomerne výrazne a výslednú hodnotu c_i zníži. V prípade uzla s vyššou kardinalitou je efekt podstatne menší, čím sa zdôrazní lepšia konektivita tohto uzla.

Následne sú hlavy jednotlivých P_i schopné spočítať parameter označený ako *prilnavosť*, ktorý definuje ich súhrnnú konektivitu. Budem používať označenie O_i pre P_i , pričom parameter je definovaný nasledovne:

$$O_i = |P_i| \frac{c_i + \sum_{\forall n_j | n_j \in P_i} c_j}{|P_i|} = c_i + \sum_{\forall n_j | n_j \in P_i} c_j \quad (3-5)$$

Je zrejmé, že n_i ako hlava P_i potrebuje poznať c_j všetkých $n_j \in P_i$. Keďže sa však jedná o susedné uzly, akvizícia nie je v tomto prípade problém. Keďže sa vlastne jedná len sčítanie všetkých c_j , hodnota O_i je tým vyššia, čím viac $n_j \in P_i$ susedí s aspoň jedným $n_i \notin P_i$. V konečnom dôsledku je tak v jednom čísle obsiahnutá informácia o miere prepojenia P_i s $P_j \in R(P_i)$ a zároveň aj $|P_i|$. V nasledujúcej kapitole podrobne popíšem proces detekcie, ktorý je naviazaný na hodnotu O_i .

Hoci majú v tomto momente predstavu o svojej vlastnej konektivite, neprináša táto informácia sama o sebe možnosť porovnania. Na to sú potrebné isté znalosti o konektivite svojich susedov, v prípade P_i sú to teda $P_j \in R(P_i)$. Preto definujem takzvanú *komparačnú bázu* θ_i pomocou nasledovného vzorca:

$$\theta_i = \frac{O_i + \sum_{P_j | P_j \in R(P_i)} O_j}{|R(P_i)| + 1} \quad (3-6)$$

Ako je zo vzťahu zrejmé, jedná sa o priemernú hodnotu O_i a všetkých O_j takých, že $P_j \in R(P_i)$. Keďže sa jedná o geograficky blízke P_j , akvizícia je opäť pomerne ľahko realizovateľná. Hodnota θ_i poskytuje P_i obsiahlu informáciu.

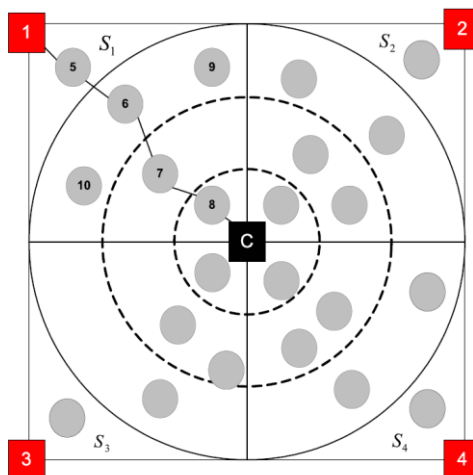
3.2 Efektívna lokalizácia

Je zrejmé, že mojím zámerom je vytvorenie organizovanej štruktúry, v rámci ktorej by malo byť čo najjednoduchšie určiť trasu medzi cieľom a adresátom. Samotný proces výberu trasy je samozrejme lokalizovaný, t.j. adresát vyberie adresu ďalšieho hopu, ten adresu ďalšieho až kým nie je dosiahnutý adresát. V snahe o čo najvyššiu efektivitu by bolo vhodné, aby priamo zo samotnej súradnice bolo zjavné, ktorý zo susedných uzlov by mohol byť vhodným nasledujúcim hopom. To je možné dosiahnuť obsiahnutím informácie o vzdialenosti od určitého referenčného bodu. Ak je destinácia bližšie k tomuto bodu ako aktuálny hop, ako ďalší hop je logicky vybraný sused s menšou vzdialenosťou k referenčnému bodu. Z tohto dôvodu bude v rámci lokalizácie identifikovaný referenčný uzol, ktorý bude slúžiť ako referencia vzdialenosti. Vzhľadom na absenciu mechanizmov na získanie geografickej vzdialenosti, pod pojmom vzdialenosť je vždy myslená výlučne vzdialenosť v hopoch. Samotná vzdialenosť je však isto nedostatočná metrika pre prijímanie smerovacích rozhodnutí. Pre lepšiu predstavu, v rovine by to znamenalo posun smerom „vpred“ k cieľovému bodu. Lenže týmto spôsobom je možné maximálne dosiahnuť uzly s rovnakou vzdialenosťou ako má destinácia, doručenie priamo cieľovému uzlu len na základe vzdialenosti je nerealizovateľné. Okrem pohybu „vpred“ je v rámci roviny potrebné posúvať sa aj smerom „vľavo“ alebo „vpravo“. Ako najjednoduchšie riešenie sa javí možnosť rozdeliť sieť do niekoľkých kvadrantov a definovať pohyb od zdroja ako „vľavo vpred“ a podobne. Týmto spôsobom je teoreticky možné dosiahnuť ľubovoľný cieľový bod. Teoreticky sa takéto riešenie zdá byť prosté, no jeho úprava do formy vhodnej pre plne distribuovaný systém je výrazne zložitejšie. Hlavným problémom je absencia centrálného elementu, ktorý by jasne určil, kde sa jednotlivé uzly nachádzajú, ako interpretovať posun do ľavej alebo pravej strany a pod.

V rámci predchádzajúcich úvah som už vlastne pomerne presne načrtol hlavné myšlienky, ktoré charakterizujú moje výsledné riešenie. Kombinácia informácie o vzdialenosti od špecifického referenčného bodu spolu s informáciou o umiestnení v rámci vyššieho organizačného celku sa javí ako veľmi výhodná. Teoreticky, týmto predstavám zodpovedá koncept znázornený na obr. 3-4, ktorý som zrealizoval a v nasledujúcich kapitolách podrobne popíšem. V tomto momente predstavím základné pojmy, ktoré budú v rámci lokalizačného konceptu zohrávať kľúčovú úlohu:

- Predpokladáme, že sieť je rozdelená na jednotlivé P_i , t.j. $N = \{ P_i, P_j, \dots \}$. Na obrázku sú znázornené ako sivé kruhy.
- Ako referenčný bod definujem tzv. *referenčný* P_i , ktorý označíme ako P_{Ref} . Je znázornený ako čierny štvorec a snahou bude detegovať P_{Ref} tak, aby sa jednalo o pomyselné „centrum konektivity“ celej siete. V rámci siete existuje vždy jediný P_{Ref} .
- V rámci siete detegujeme množinu P_i , ktoré sa nachádzajú na periférii siete. Miesto spojitého podgrafu sa jedná o špecifickú podskupinu, ktorú označíme ako *roh*. Na označenie tejto množiny použijeme symbol Ω . V rámci obrázku sú P_{Ref} znázornené ako štvorce.
- Sieť rozdelíme do niekoľkých útvarov, ktoré budeme označovať ako *segment*. *Segment* je útvar vytvorený $P_i \in \Omega$ a jedná sa o samotný P_i a množinu prislúchajúcich P_j . V tomto

prípade použijem označenie S_i . Presné podmienky definujem v príslušnej kapitole. Na obrázku sa jedná množinu P_i umiestnených v rámci niektorého z vpísaných štvorcov. Konkrétne $S_I = \{P_5, P_6, P_7, P_8, P_9, P_{10}\}$.



Obr. 3-3 Koncept lokalizácie pre sieť $N = \{S_i, S_j, \dots\}$.

Presný význam jednotlivých pojmov a ich presné definície uvediem postupne v nasledujúcich kapitolách. Ako prvé sa budem zapodievať detekciou P_{Ref} .

3.2.1 Detekcia P_{Ref}

Prvou úlohou, od ktorej sa bude pomerne výrazne odvíjať všetko nasledujúce, je detekcia P_{Ref} . Ako som už naznačil, súčasťou informácie o polohe uzlu bude vzdialenosť od referenčného bodu. V našom prípade je referenčným bodom P_{Ref} , čiže skupina uzlov. Preto skôr, než prejdem k samotnému procesu detekcie, definujem spôsob akým budem vyjadrovať vzdialenosť. Hoci som už spomenul, že pod pojmom vzdialenosť budem vždy rozumieť počet hopov, v prípade vzájomnej vzdialenosti medzi ľubovoľným párom P_i a P_j budem používať inú metriku. Keďže sa jedná o skupiny uzlov, miesto obyčajného určenia vzdialenosti ako počtu hopov medzi *hlavami* definujeme ich vzájomnú vzdialenosť $d(P_i, P_j)$ nasledovne:

$$d(P_i, P_j) = \begin{cases} 1; & P_j \in R(P_i) \\ m; & m = |W(P_i, P_j)| - 1 \end{cases} \quad (3-7)$$

Inak povedané, pokiaľ sa jedná o susedov, ich vzájomná vzdialenosť je rovná 1. Pokiaľ nie, ich vzdialenosť je rovná počtu P_k , ktoré ich „oddeľujú“. Význam $W(P_i, P_j)$ je preto nasledovný: jedná sa o množinu P_k , ktorá tvorí najkratšiu trasu medzi P_i a P_j . Využijúc príklad z obr. 5-13, $d(P_5, P_8) = 3$ keďže $W(P_5, P_8) = \{P_5, P_6, P_7, P_8\}$.

Samotná detekcia P_{Ref} je z teoretického hľadiska pomerne jednoduchá. Keďže sa jedná o uzol, vzdialenosť ku ktorému je súčasťou lokalizačnej informácie jednotlivých uzlov, je

výhodné aby bol umiestnený strategicky. V tomto prípade to znamená, aby mal dobré prepojenie s čo najväčším podielom uzlov. Logicky je teda v prípade pravidelnej siete možné povedať, že poloha v geografickom prostriedku siete by bola najvýhodnejšia. Keďže nedisponujem inou informáciou ako je tá o konektivite, zameriam sa detekciu výhodne umiestneného P_i z pohľadu jeho prepojenia na $P_j \in R(P_i)$. Keďže je potrebné detegovať unikátny P_i , vyberiem P_{Ref} nasledovne:

$$P_{Ref} = P_i | \theta_i = \max\{\theta_j\}_{\forall P_j \in N} \quad (3-8)$$

Keďže θ_i vyjadruje mieru interakcie P_i a $P_j \in R(P_i)$, výber P_i s jeho maximálnou hodnotou je pomerne očividná voľba. Keďže pri nepravidelných sieťach je voľba geografického stredu nepodstatná, nebudem sa zaoberať analyzovaním súvislosti medzi P_{Ref} a geografickým stredom. P_{Ref} je centrom siete v zmysle konektivity, čo je pre daný účel absolútne vyhovujúce.

3.2.2 Detekcia Ω

Po úspešnej detekcii P_{Ref} je potrebné detegovať množinu *rohov*, t.j. $P_i \in \Omega$. Ako som už uviedol, cieľom je detekcia špecifickej podmnožiny hraničných uzlov, ktoré poslúžia ako základ pre vytvorenie *segmentov*. Ako vyplýva zo samotného názvu a ako je naznačené na obr. 5-13, ideálne by bolo v prípade pravidelnej topológie detegovať skutočné rohy siete. Takto by bolo možné dosiahnuť rozdelenie siete na *segmenty*, ktorých veľkosť by bola jednotná a ktorých počet by reflektoval tvar siete (v prípade štvorca je rozdelenie na štyri časti podvedome najprirodzenejšie). Uniformná veľkosť by zároveň pri viac menej pravidelnej sieti zároveň znamenala približne rovnaký počet uzlov v jednotlivých *segmentoch*. Keďže sa nebudem špecificky zaoberať pravidelnými sieťami, je potrebné realizovať celý koncept dynamicky a autonómne, aby bol schopný fungovať v akejkoľvek sieti (z pohľadu topológie) a nepotreboval nijaké špecifické počiatkové nastavenia.

Aby bolo možné tieto požiadavky splniť, je pri detekcii $P_i \in \Omega$ do úvahy braná $d(P_i, P_{Ref})$. Proces detekcie tak síce stráca lokalizáciu, keďže každý P_i potrebuje poznať túto hodnotu bez ohľadu na svoju vzdialenosť od P_{Ref} . Ako som však už spomínal, v prípade systému garantujúceho unikátnu adresovateľnú polohu každému $n_i \in N$, nie je možné uvažovať iba v lokálnych súvislostiach. Vrátim sa teda k samotnej detekcii $P_i \in \Omega$. Identifikátor, ktorý $P_i \in \Omega$ odlišuje od $P_j \notin \Omega$, je absencia susediaceho P_k , ktorý by bol vzdialenejší od P_{Ref} ako samotný P_i . Inak povedané, keďže sieť v tomto bode ďalej nepokračuje, nie je možné aby $P_i \in \Omega$ susedil s takým P_j , že platí $d(P_i, P_{Ref}) < d(P_j, P_{Ref})$. Takáto podmienka zároveň nie je splniteľná pre väčšinu *hraničných* uzlov, keďže umiestnenie na periférii znamená, že sieť v tomto bode nepokračuje v niektorom konkrétnom smere. Aby však podmienka platila, sieť nesmie pokračovať v žiadnom smere, čo je výrazne špecifickejšia okolnosť. Vzhľadom na tieto úvahy definujeme $P_i \in \Omega$ nasledovne:

$$P_i \in \Omega \mid d(P_i, P_{Ref}) = \max\{d(P_j, P_{Ref})\}_{\forall P_j \in R(P_i)} \quad (3-9)$$

Takáto definícia by bola plne postačujúca pre siete s pravidelnou topológiou. No v prípade výrazne nepravidelných topológií nie je možné garantovať, že vzhľadom na nepravidelný tvar periférie nenastane situácia, keď $d(P_i, P_{Ref}) = d(P_j, P_{Ref})$, hoci je predchádzajúca podmienka splnená. Preto definujem dodatočnú podmienku, ktorá vylúči takúto duplicitu:

$$P_i \notin \Omega \mid \exists d(P_j, P_{Ref}) = d(P_i, P_{Ref}) = \max\{d(P_k, P_{Ref})\}_{\forall P_k \in R(P_i)} \wedge \theta_i > \theta_j \quad (3-10)$$

Pokiaľ teda splňajú podmienku susediace P_i a P_j , vybraný je iba P_i ak platí $\theta_i < \theta_j$. Inak povedané, vyberiem P_i , pretože jeho konektivita je nižšia, čo je logickejší predpoklad pri detekcii rohu siete. V tomto prípade sa istá izolácia od zvyšku siete očakáva. Zhrnuté, množinu Ω definujeme nasledovne:

$$\Omega = \left\{ \forall P_i \mid d(P_i, P_{Ref}) = \max\{d(P_j, P_{Ref})\}_{\forall P_j \in R(P_i)} \wedge \theta_i < \theta_j \mid \exists d(P_j, P_{Ref}) = d(P_i, P_{Ref}) \right\} \quad (3-11)$$

3.2.3 Formovanie segmentov

Poslednou časťou lokalizačného algoritmu je vytvorenie *segmentov*. Ako som uviedol, *segment* S_i je vytvorený $P_i \in \Omega$ a okrem samotného P_i je to množina pozostávajúca z prislúchajúcich P_j . Presnú definíciu uvediem neskôr v rámci tejto kapitoly, najskôr zhrniem hlavné myšlienky v pozadí tohto procesu. Vytvorenie *segmentu*, využívajúce terminológiu vysvetľujúcu pohyb v rámci roviny využitú na začiatku tejto kapitoly, umožní definovať spomenutý pohyb do ľavej, resp. pravej strany. Samotná $d(P_i, P_j)$ postačuje na definovanie pohybu v smere vpred, resp. vzad. Inak povedané, pokiaľ je cieľ správy vzdialenejší od P_{Ref} ako adresát, pohyb vpred samozrejme stráca zmysel. Pohyb do strán je však na základe takejto informácie nerealizovateľný. Preto je potrebné rozšíriť lokalizačnú informáciu tak, aby bolo možné realizovať aj posun do strán. V rámci distribuovaného systému však riešenie tejto úlohy nie je také jednoduché, ako by sa teoreticky mohlo javiť. Absencia centrálnej autority, resp. informácie o absolútnych polohách uzlov neumožňuje definovať pohyb v rámci roviny jednoznačne v rámci štyroch smerov. Preto aplikujem odlišnú stratégiu, ako je znázornené na obr. 7-13. Rozdelením siete na niekoľko *segmentov* umožní adresovať uzly nielen na základe $d(P_j, P_{Ref})$, ale aj na základe príslušnosti k *segmentu*, t.j. $P_j \in S_i$.

Vzhľadom na dôležitosť *segmentov* explicitne definujem ich vlastnosti. Niektoré už boli spomenuté v rámci tejto kapitoly, teraz ich doplním zvyšnými detailmi:

- Segment S_i je množina P_j , t.j. $S_i = \{ P_i, P_j, \dots \}$.
- S_i je vytvorený $P_i \in \Omega$.
- Existuje unikátna trasa $W^U(P_i, P_{Ref})$.
- Elementmi S_i sú okrem samotného P_i aj $P_j \in W^U(P_i, P_{Ref})$.
- Elementmi S_i sú aj príslušné P_k .

Jednotlivé body v rámci tejto kapitoly postupne zadefinujem. Prvé dva body sú pomerne zjavné. Ako som už konštatoval, S_i je definovaný „nad“ úrovňou P_i , čiže sa jedná o zoskupenie týchto útvarov. Keďže je vytvorený $P_i \in \Omega$, $|\Omega|$ by mala definovať počet *segmentov*. Vzhľadom na tretí bod tomu však tak nutne byť nemusí. Ako som už naznačil, v prípade sietí s pravidelnou topológiou, resp. s pravidelným tvarom periférie, by podmienku pre $P_i \in \Omega$ spĺňali len uzly ležiace v rohoch siete. Keďže predpokladám ľubovoľné siete, je pravdepodobné že ako $P_i \in \Omega$ budú detegované nielen geografické rohy siete. Keďže zmyslom *segmentov* je vytvorenie štruktúry použiteľnej v rámci procesu smerovania, nemá zmysel vytvárať izolované, navzájom nesúvisiace útvary. Preto predpokladám, že *segment* je útvar spájajúci centrálny bod siete s jej rohmi. Centrálny bod je tak miestom, kde sa všetky *segmenty* stretnú. Tento aspekt budem podrobnejšie analyzovať v kapitole pojednávajúcej o smerovaní, v tomto momente je podstatné si uvedomiť význam počtu *segmentov*. Nie je nevyhnutné a z pohľadu efektivity ani výhodné, rozdeliť sieť na priveľké množstvo *segmentov*, ktoré by pozostávali z niekoľkých P_i . Na strane druhej je však pomerne ťažké definovať všeobecne platný vzorec na výpočet optimálneho počtu *segmentov*, ktorý by platil pre všetky siete bez ohľadu na topológiu. Navyše, bolo ešte náročnejšie definovať takýto vzťah tak, aby zohľadňoval aplikáciu v silne distribuovanom systéme. Preto budem postupovať inak. Miesto toho, aby počet *segmentov* zodpovedal $|\Omega|$, je potrebné aby existovala $W^U(P_i, P_{Ref})$, ktorú definujeme nasledovne:

$$W^U(P_i, P_{Ref}) = W(P_i, P_{Ref}) \setminus \{ P_j \in W(P_i, P_{Ref}) \} \quad (3-12)$$

$$\wedge P_j \in W(\{ P_k \}_{P_k \in \{\Omega/P_i\}}, P_{Ref})$$

Zjednodušene povedané, $W^U(P_i, P_{Ref})$ je taká trasa, ktorá neobsahuje taký P_j , ktorý by bol súčasťou trasy spájajúcej iný $P_k \in \Omega$ (t.j. Ω/P_i) s P_{Ref} . Význam tohto mechanizmu spočíva v zabezpečení optimálneho (samozrejme v kontexte mimoriadne obmedzených informácií) počtu *segmentov*. Keďže v prípade sietí s vyššou koncentráciou uzlov existuje väčší počet P_j , je pravdepodobnejšie sformovanie $W^U(P_i, P_{Ref})$ pre väčší počet $P_i \in \Omega$ ako v prípade siete s menšou koncentráciou. Takto je možné dosiahnuť adekvátny počet *segmentov* vo vzťahu k veľkosti, resp. k hustote siete aj bez explicitnej znalosti týchto informácií. Zároveň je potrebné si uvedomiť, že definovať optimálny počet *segmentov* je i z teoretického uhľa pohľadu pomerne náročná úloha. V rámci svojho konceptu predpokladám, že je výhodnejšie vytvárať väčšie *segmenty*. Hlavným motívom je opäť silne distributívny charakter WSN. Keďže je informácia o *segmente* zamýšľaná ako súčasť lokalizačnej informácie, nebolo by vhodné vytvárať priveľa útvarov, o vzájomnej polohe ktorých by bolo nevyhnutné udržiavať pomerne obsiahlu informáciu. Navzdory tomu, pri štyroch *segmentoch* je potrebné rozlíšiť iba

to, či navzájom susedia, alebo je potrebné využiť spojenie cez P_{Ref} . Týmito aspektmi sa budem zaoberať obšírnejšie v nasledujúcej kapitole. V rámci týchto úvah je však podstatné vysvetliť, prečo pokladám nižší počet geograficky rozľahlejších *segmentov* za výhodnejšie riešenie. Ako výsledok týchto úvah definujem podmienku pre vytvorenie S_i :

$$\exists S_i | \exists P_i \in \Omega \wedge \exists W^U(P_i, P_{Ref}) \quad (3-13)$$

Týmto spôsobom vytvorím základ S_i , keďže jeho súčasťou je v tomto momente samotný P_i a všetky $P_j \in W^U(P_i, P_{Ref})$. Takto je zaradená istá časť z $\forall P_i \in N$. Keďže cieľom je zabezpečiť lokalizačnú informáciu všetkým P_i (a tým pádom aj všetkým n_i), je potrebné zaradiť aj doteraz nezaradené P_j do niektorého z existujúcich S_i . V tomto prípade je samotná logika pomerne prostá. Keďže je cieľom vytvoriť adresovateľné útvary, je automaticky očakávané, že sa bude jednať o útvary geograficky kompaktné. Preto nemá zmysel uvažovať nad niečím iným než zaradiť ich na základe vzdialenosti od S_i . Inak povedané, každý $P_k \notin S_i$ vyberie taký S_i , ktorý je od neho geograficky najbližší. V praxi to znamená, že hľadá už zaradený P_j (t.j. $P_j \in S_i$) s minimálnou $d(P_k, P_j)$. V prípade viacerých možností slúži ako pomocné kritérium θ_i , čo je možné definovať nasledovne:

$$P_j \in S_i | \exists P_k \in S_i \wedge d(P_j, P_k) = \min\{d(P_j, \{P_l\}_{\exists S_i | P_l \in S_i})\} \quad (3-14)$$

3.2.4 Analýza výsledkov

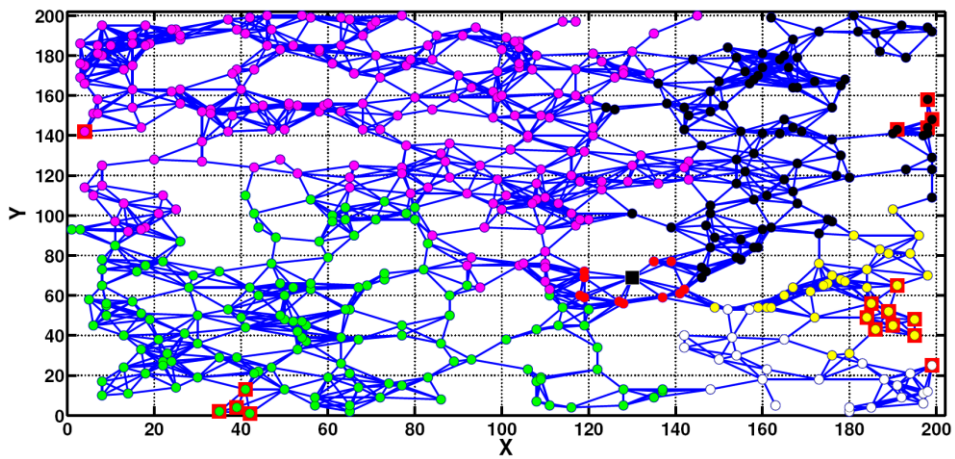
V rámci tejto kapitoly sa podrobnejšie zameriam na dosiahnuté výsledky. Ako som uviedol, hlavným cieľom je vytvorenie takého systému lokalizácie, ktorý nevyžaduje explicitné informácie o sieti (napr. $|N|$, topológia, hustota a pod.) na vstupe a ktorý je na výstupe schopný poskytnúť aplikovateľný výsledok. Vzhľadom na obmedzenú možnosť definovať optimálne riešenie vo všeobecnosti, hlavným predpokladom je vytvorenie takej štruktúry, v rámci ktorej je definovaný unikátny centrálny bod (v tomto prípade P_{Ref} , čiže pod pojmom bod sa rozumie skupina $n_i \in P_{Ref}$) a ktorá pridelí všetkým ostatným bodom zaradenie v rámci vyšších organizačných štruktúr (čiže $\forall P_i \in \{S_j\}$), *segmentov*. Čo sa týka *segmentov*, hlavným úlohou je vytvorenie geograficky približne rovnako veľkých útvarov spájajúcich perifériu siete s centrálnym uzlom, pričom ich počet by mal zodpovedať charakteristikám siete aj bez ich explicitnej znalosti.

Schopnosť splniť tieto predpoklady v sieťach s rôznorodými charakteristikami som sa rozhodol experimentálne overiť. Keďže som nedefinoval presné očakávania, t.j. optimálne riešenie, v rámci analýzy sa zameriam na tri rôzne simulačné scenára. Overím funkčnosť riešenia na troch rôznych sieťach, ktoré majú rovnaké $|N|$, no výrazne sa odlišujú čo sa týka koncentrácie uzlov a miery ich vzájomného prepojenia.

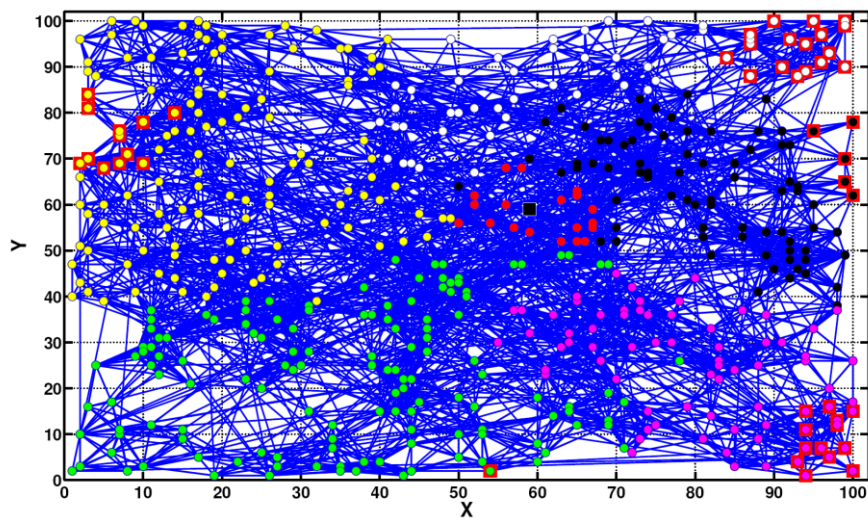
V prvom prípade sa zameriam na sieť charakterizovateľnú ako sieť riedku, t.j. s pomerne nízkou mierou prepojenia jednotlivých n_i . Výsledok je prezentovaný na Obr. 3-4

Výsledok lokalizácie dosiahnutý pre sieť. Všetky $n_i \in P_{Ref}$ sú znázornené ako červené kruhy, pričom hlava P_{Ref} je znázornená ako čierny štvorec. Je zaujímavé, že súvislosť medzi polohou P_{Ref} a polohou geografického stredu siete je výrazná. Hoci to nie je priamo zámerom, vzhľadom na topológiu tejto konkrétnej siete je P_{Ref} detegovaný v blízkosti geografického stredu (bodu so súradnicami (100,100)). Ďalším predmetom záujmu sú $P_i \in \Omega$, ktoré sú znázornené ako červené štvorce. Je zrejmé, že $|\Omega|=5$. Keďže každý z $P_i \in \Omega$ bol v tomto prípade schopný nájsť $W^U(P_i, P_{Ref})$, sieť je tak rozdelená do piatich *segmentov*. V rámci obrázku sú jednotlivé n_i priradené do *segmentov* farebne rozlíšené. Keďže bolo vytvorených päť *segmentov*, okrem červenej sú na obrázku jednotlivé kruhy reprezentujúce n_i zafarbené v piatich rôznych farbách- v bielej, žltej, zelenej, fialovej a čiernej. V rámci tejto analýzy nebudem jednotlivé *segmenty* klasifikovať inak ako pomocou ich farebného rozlíšenia. Čo sa týka očakávaných vlastností, je možné skonštatovať že spĺňajú očakávané podmienky. Všetky P_i sú súčasťou niektorého zo *segmentov* a *segment* vždy spája perifériu s centrálnym bodom. Čo sa týka ich veľkostí, nie je možné skonštatovať, že by bola v tomto prípade uniformná. K tomuto faktu iste výrazne prispieva nerovnomerné rozdelenie uzlov, keďže v časti siete umiestnenej „nad“ P_{Ref} (t.j. s vyššou hodnotou súradnice x_i) sa nachádza výrazne väčší počet uzlov ako v časti siete umiestnenej „pod“. Ďalším faktorom je aj pravidelnosť periférie, ktorá ovplyvňuje $|\Omega|$. V pravej časti siete (t.j. pre $y_i \in \langle 180; 200 \rangle$) je periféria výrazne nepravidelnejšia, čo vedie k tomu že na relatívne malom úseku sú detegovaný tri z piatich $P_i \in \Omega$. To vedie k zaujímavému záveru. Pravidelnejšia časť siete je rozdelená na relatívne rovnomerné *segmenty* (zelený a fialový), zatiaľ čo menej pravidelná časť je rozdelená na tri pomerne nerovnomerné. Kým čierny *segment* je výrazne väčší ako zvyšné dva, biely a žltý sú výrazne menšie ako zvyšok *segmentov* a je zjavné, že sa mohlo jednať o jeden spoločný *segment*. Takéto konštatovanie je však možné uskutočniť iba z pozície, kedy máme úplnú informáciu ako siete ako v prípade tejto analýzy. Vzhľadom na obmedzenosť vstupných informácií a absenciu centrálnej autority nie je možné jednoduchým spôsobom zahrnúť takéto rozhodnutie do samotného algoritmu.

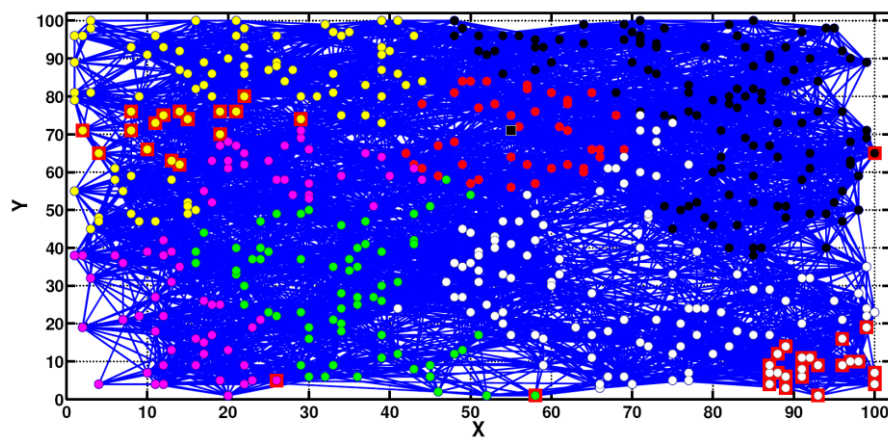
V druhom prípade sa zameriam na výrazne pravidelnejšiu sieť s vyšším stupňom prepojenia jednotlivých uzlov. V porovnaní s prvým prípadom je teda hustota siete takmer dvojnásobná. Dosiahnuté výsledky sú znázornené na Obr. 3-5 Výsledok lokalizácie dosiahnutý pre sieť. Je zjavné, že v tomto prípade je P_{Ref} umiestnený v podstate priamo v geografickom prostriedku (t.j. v súradnici (50,50)). Hlavným dôvodom je najmä fakt, že uzly sú v tomto prípade rozmiestnené pomerne pravidelne a z hustoty liniek je aj vizuálne zrejmé, že najväčšia hustota prepojení je práve v tejto oblasti. Hoci nezdôrazňujem potrebu detegovať P_{Ref} ako geografické centrum, v prípade pravidelnej siete je jeho poloha v blízkosti skutočného stredu akýmsi potvrdením správnosti metódy jeho detekcie. Podobne ako v prípade prvom, aj v tomto prípade je sieť rozdelená do piatich *segmentov*. V porovnaní s predchádzajúcim prípadom sú však, čo sa veľkosti týka, rovnomernejšie. Je zaujímavé, že vyššia hustota nemá žiadny vplyv na $|\Omega|$. Ako som už naznačil a ako potvrdzujú aj tieto dva príklady, $|\Omega|$ je závislé od tvaru periférie.



Obr. 3-4 Výsledok lokalizácie dosiahnutý pre sieť s malou konektivitou.



Obr. 3-5 Výsledok lokalizácie dosiahnutý pre sieť s priemernou konektivitou.



Obr. 3-6 Výsledok lokalizácie dosiahnutý pre sieť s výraznou konektivitou.

V treťom prípade sa zameriam na ešte hustejšiu a pravidelnejšiu sieť ako v prípade druhom. Výsledok dosiahnutý pre túto sieť je obdobný ako v prípade predchádzajúcom. P_{Ref} sa opäť nachádza v blízkosti geografického stredu a sieť je opäť rozdelená do piatich *segmentov* s pomerne uniformnými veľkosťami. Výsledok je znázornený na obr. 3-7.

3.3 Zhrnutie

V rámci tejto kapitoly som prezentoval časť svojej práce, ktorá bola úzko spätá s témou lokalizácie. Keďže je pri smerovaní v rámci WSN výhodné disponovať istou formou geografickej informácie, zameril som sa na jednoduché algoritmy, ktoré dokážu poskytnúť istú základnú informáciu o polohe uzlov v rámci siete. Vzhľadom na mimoriadne obmedzujúce vstupné predpoklady, z ktorých je najvýznamnejšou absencia akýchkoľvek vstupných geografických dát. Na strane druhej, riešenie nevyžadujúce špecifické hardvérové vybavenie je v rámci filozofie WSN, zdôrazňujúce minimálnu cenu a tým pádom aj čo najminimalistickejší dizajn, je istým spôsobom logické a prirodzené.

V rámci svojich snáh v tejto oblasti som vytvoril koncept opierajúci sa výlučne o informácie o konektivitě. Aj bez náročných analýz je intuitívne jasné, že od tohto konceptu nie je možné očakávať dokonalú presnosť porovnateľnú s komplexnými lokalizačnými algoritmami. Na strane druhej, jej jednoduchosť, výpočtová nenáročnosť a aplikovateľnosť na v podstate akejkolvek platforme vyvažujú vo väčšine prípadov tieto nedostatky.

Koncept je navrhnutý tak, aby pridelil lokalizačnú informáciu všetkým uzlom. Zároveň je navrhnutý tak, aby dynamicky reagoval na topológiu, resp. hustotu siete. Hlavnou úlohou je však zabezpečenie lokalizačnej informácie pre všetky uzly v sieti, čo je v prípade môjho konceptu garantované pre všetky siete s akoukoľvek spojitou topológiou. Keďže nespojitě nie sú z pohľadu smerovania zaujímavé, nejedná sa v tomto prípade o obmedzenie. Návrh zároveň priamo počíta s aplikáciou v oblasti smerovania, keďže štruktúra pozostávajúca z centrálného bodu a útvarov spájajúcich tento unikátny bod s perifériou siete evokuje predstavu jednoliateho, pevného útvaru. V rámci takéhoto útvaru je vzájomná súvislosť jednotlivých jeho častí pomysleným motorom poháňajúcim logiku smerovania. Cenná lekcia, aplikovaná aj v rámci mojich nasledujúcich úvah je, že akceptovaním istej miery nepresnosti, resp. neistoty je možné dosiahnuť solídne výsledky aj pri výrazne obmedzených podmienkach. Na strane druhej, správnosť riešenia je za každých okolností garantovaná. Výsledné riešenie preto zodpovedá takejto požiadavke.

4 PRÍNOSY PRE VEDU A PRAX

Hlavnou úlohou mojej práce bolo hľadanie metód pre podporu komunikácie v sieťach WSN. Po analýze aktuálneho stavu vyplynulo, že neexistuje štandardizovaný, všeobecne akceptovaný spôsob smerovania. Preto sa sústredila moja pozornosť najmä na túto oblasť. Mojim cieľom bolo vytvorenie komunikačného modelu zohľadňujúceho špecifické vlastnosti WSN, najmä čo sa týka silne distributívneho charakteru a obmedzených možností hardvéru. Ako som uviedol v kapitole 1.8, súčasné trendy v smerovaní sa uberajú cestou geografického smerovania. To samozrejme vytvorilo potrebu zabezpečiť také geografické informácie, aby

bolo možné na ich základe realizovať rozhodnutia o smerovaní. Vzhľadom na distributívny charakter siete je prirodzene vhodné, aby takéto rozhodnutie mohol realizovať každý uzol individuálne. Súčasťou mojej práce je preto návrh lokalizačného algoritmu, ktorého cieľom však nie je snaha čo najvernejšie imitovať geografické rozmiestnenie uzlov, ale vytvoriť logickú štruktúru evokujúcu potenciálny smer komunikácie. Tým pádom nie je potrebné realizovať žiadne ďalšie merania alebo náročné výpočty, keďže z porovnania geografickej informácie odosielateľa, adresáta a uzla, ktorý chce správu ďalej smerovať, by malo byť zrejmé, ako postupovať ďalej. Sieť je preto zorganizovaná do hierarchického usporiadania s lokálnymi riadiacimi bodmi, ktoré koordinujú svoje okolie. Ako som naznačil v kapitole 3, plne distribuované riešenie by mohlo priniesť zásadné problémy, najmä čo sa týka spoľahlivosti riešenia. K jednotlivým cieľom som pristúpil nasledovne:

- 1) V rámci úlohy definovanej ako určenie aspektov, charakteristík a parametrov, ktoré sú významné a špecifické z hľadiska fúzie údajov som sa zameril na problematiku distributívnych výpočtov. Implementáciou známeho, pomerne jednoduchého algoritmu som získal veľmi dobrý prehľad o tom, aké sú obmedzenia čisto distributívnych riešení bez zabudovaných kontrolných mechanizmov a akým spôsobom podliehajú nepriaznivým vplyvom, ako napríklad strata správ alebo zlyhanie uzla. Vzhľadom na obmedzené možnosti hardvéru sa jedná o skutočnosti, ktorých výskyt v praktických realizáciách nie je možné vylúčiť. Získané závery ma viedli k potrebe istej miery centralizácie, keďže tak kritická oblasť ako komunikácia v sieti nemôže ostať napospas nepredvídateľným okolnostiam. Zároveň ma priviedli k potrebe navrhnúť riešenie čo najjednoduchšie, tak aby potrebné výpočty bolo možné zrealizovať čo najrýchlejšie a s čo najmenšími nákladmi. Prítomnosť istej autority a silnej spolupráce okolitých uzlov má zároveň prispieť k zvýšenej robustnosti, ktorá je v prípade tak kritickej záležitosti ako je komunikácia, nevyhnutná.
- 2) V ďalšom ciele som mal za úlohu navrhnúť a realizovať generátor siete WSN. Z pohľadu overenia navrhnutého modelu sa jedná o mimoriadne dôležitú záležitosť, keďže prílišné zjednodušenie generovania siete by mohlo viesť ku generovaniu topológií s podobným charakterom, ktoré by v konečnom dôsledku priniesli nespoľahlivé výsledky. Preto som sa zameril na vytvorenie generátora v prostredí Matlab, ktorý produkuje výsledok popísaný jedinou maticou. Pomocou vstupných parametrov je možné vygenerovať široké spektrum sietí, čo sa hustoty konektivity a topológie týka. Pomocou jednoduchého mechanizmu je zároveň garantovaná spojitosť siete. Zároveň ponúka možnosť rozšírenia o kvalitu linky, keď by sa či už náhodne alebo na základe deterministického mechanizmu pridelovala váha jednotlivým linkám medzi uzlami.
- 3) V rámci ďalšieho cieľa som realizoval návrh komunikačného modelu, ktorého cieľom je optimalizácia smerovania v WSN. Vzhľadom na to, že som v súlade s aktuálnymi trendmi presvedčený o výhodnosti geografického smerovania, samotný návrh komunikačného modelu je úzko spojený s istou formou lokalizácie uzlov. Hlavným cieľom riešenia je zabezpečiť pre všetky uzly v sieti takú informáciu o ich polohe, na

základe ktorej môžu komunikovať s každým uzlom v sieti za predpokladu, že poznajú jeho polohu. Fragmentácia siete na väčšie celky zároveň umožňuje koordináciu uzlov v geografickej blízkosti, čo umožňuje ich užšiu kooperáciu a implementáciu mechanizmov zvyšujúcich robustnosť riešenia. Analýza ukázala aplikovateľnosť riešenia na širokej škále rôznych topológií, pričom kvalita dosiahnutého výsledku ostáva konzistentná. Jedná o riešenie silne distribuované, s výnimkou detekcie centrálného bodu (P_{Ref}), kde je nevyhnutná koordinácia naprieč celou sieťou. Existencia unikátneho bodu však prináša ďalšie výhody, ktoré výrazne zjednodušujú proces smerovania. Dosiahnuť takýto cieľ čisto by inak nebol možný. Náklady plynúce z tejto operácie sú vynahradené zjednodušením smerovacích procesov a keďže sa predpokladá, že typická WSN operuje po dobu rádovo merateľnú v rokoch, z dlhodobého pohľadu sa nejedná o zásadný problém.

- 4) Následne som realizoval ďalší cieľ, konkrétne vykonanie experimentov s navrhnutým modelom. Analýza ukázala, že experimentálne výsledky sú v súlade s definovanými očakávaniami bez ohľadu na veľkosť, resp. topológiu siete. Priame porovnanie s „konkurenčným“ modelom nie je celkom možné, keďže cieľom lokalizačných algoritmov je imitácia reálnej, geografickej topológie. Na strane druhej, systémy s virtuálnymi súradnicami sa zameriavajú na vytvorenie štruktúry vo vzťahu k istej skupine uzlov, vybraných či už náhodne alebo deterministicky. Porovnanie presnosti lokalizácie, t.j. miery imitácie geografických súradníc nemá zmysel, keďže ani v jednom prípade to nie je cieľom. Zameral som sa preto na porovnanie výsledkov v oblasti smerovania dosiahnuteľných pomocou jednoduchých smerovacích mechanizmov, ktoré rozoberiem podrobnejšie v nasledujúcom bode.

- 5) Čo sa týka posledného cieľu, návrhu možného smerovania ďalšieho výskumu v tejto oblasti, zameral som sa na vytvorenie konceptu smerovanie, ktorý by čo najefektívnejšie využíval výhody prezentovaného komunikačného modelu. Predstavil som možnosti, ako realizovať smerovanie v režime prevádzky bod-bod tak i bod-mnohobod. Zároveň som predstavil dva koncepty, ktoré sa výrazne líšia čo sa týka potreby aplikácie ďalších mechanizmov a porovnal ich výsledky s ideálnymi a s výsledkami dosiahnuteľnými čistým geografickým smerovaním. Z porovnaní vyplýva viacero zaujímavých námetov pre ďalší výskum- má zmysel proces smerovania komplikovať a dosiahnuť tak čo najefektívnejšie trasy, prípadne umožniť optimalizáciu redundantného posielania správ pomocou sofistikovanejších smerovacích mechanizmov a využitím prítomnosti lokálnych centrálnych bodov? Alebo je efektívnejšie obetovať optimalizáciu v prospech jednoduchosti a pokúsiť sa drobnými vylepšeniami dosiahnuť čo najlepší výsledok?

Základným prínosom pre prax je predstavenie riešenia, ktoré na základe svojich praktických skúseností s WSN jednoznačne považujem za realizovateľné. Z programátorského hľadiska nepoznám žiadnu prekážku, ktorá by bránila implementácii na

reálne zariadenia. Riešenie je zároveň dostatočne komplexné na to, aby si poradilo v zásade s každou realistickou situáciou. Na druhej strane je dostatočne jednoduché na to, aby nebolo obmedzené nadmernými požiadavkami na hardvér.

Z vedeckého hľadiska je zaujímavý novátorský prístup v oblasti lokalizácie, keďže systém virtuálnych súradníc je vytvorený výlučne na základe počtu susedov a sady aritmeticky nenáročných výpočtov. Keďže umožňuje aplikáciu pomerne jednoduchých smerovacích algoritmov, ktorých činnosť bola experimentálne overená, pokladám ho zároveň za plne konkurencie schopný. Z pohľadu smerovania sa taktiež jedna o nové myšlienky, no ich naviazanosť na konkrétny komunikačný model z nich robí skôr nadstavbu.

5 ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] AKYILDIZ I. F. – SU W. - SANKARASUBRAMANIAM Y. – CAYIRCI E.: Wireless Sensor Networks: A Survey. In: Computer Networks Elsevier Journal, roč. 38, č. 4 (2002), s. 393-422.
- [2] RAMANATHAN R. - REDI J.: A brief overview of ad hoc networks: challenges and directions. In: *Communications Magazine*, roč. 40, č. 5 (2002), s. 20-22.
- [3] The Bluetooth Special Interest Group (SIG). *About the technology*. [online] [cit. 14.10.2011]. Dostupné na internete: <<http://www.bluetooth.com/>>.
- [4] IEEE. *802.11 standard*. [online] [cit. 15.10.2011]. Dostupné na internete: <<http://standards.ieee.org/about/get/802/802.11.html/>>
- [5] IEEE. *802.15 standard*. [online] [cit. 15.10.2011]. Dostupné na internete: <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.15.html>.
- [6] MEMSIC: *WSN datasheets*. [online] [cit. 16.10.2011]. Dostupné na internete: <<http://www.memsic.com/>>.
- [7] STEEL D.: *Smart dust*. [online] [cit. 15.10.2011]. Dostupné na internete: <http://www.bauer.uh.edu>.
- [8] GAY D. - LEVIS P. - VON BEHREN R. - WELSH M. - BREWER E. - CULLER D.: The nesC Language: A Holistic Approach to Networked Embedded Systems. In: *Proceedings of Programming Language Design and Implementation (PLDI) 2003*, jún 2003.
- [9] LEVIS P.: *TinyOS Programming*. [online] [cit. 18.10.2011] Dostupné na internete: <csl.stanford.edu/pal/pubs/tinyosprogramming.pdf>.
- [10] TALZI I. – HASLER A. - GRUBER S. - TSCHUDIN, C.: PermaSense: Investigating Permafrost with a WSN in the Swiss Alps. In: *Fourth Workshop on Embedded Networked Sensors: Zborník príspevkov*. Cork, Ireland. 2007. s. 8-12.
- [11] MEMSIC: *WSN datasheets*. [online] [cit. 18.10.2011] Dostupné na internete: <<http://www.memsic.com/>>. – zlati, toto je dvojmo kuk na číslo 6
- [12] WATTEYNE T. – MOLINARO A. – RICHICHI M. G. – DOHLER M.: From MANET To IETF ROLL Standardization: A Paradigm Shift in WSN Routing Protocols. In: *IEEE Communications Surveys & Tutorials*.

- [13]MIN R. – BHARDWAJ M. - SEONG-HWAN CH. - SHIH E. - A.SINHA - WANG A. – CHANDRAKASAN A.: Low-power wireless sensor networks. In: *Fourteenth International Conference on VLSI Design (VLSI Design 2001)* : Zborník príspevkov. Bangalore, India, 3.-7. január, 2001.
- [14]IETF MANET. [online] [cit. 24.10.2011]. Dostupné na internete: <<http://www.ietf.org/html.charters/manetcharter.html>>.
- [15]IETF ROLL. [online] [cit. 24.10.2011]. Dostupné na internete: <<http://www.ietf.org/html.charters/roll-charter.html>>.
- [16]LEVIS P. – TAVAKOLI A. – DAWSON-HAGGERTY S.: Overview of Existing Routing Protocols for Low Power and Lossy Networks. In: *IETF ROLL*, IETF draft, 14 February 2009, draft-ietf-roll-protocols-survey-06 (work in progress).
- [17]AL-KARAKI J. N. – KAMAL A. E.: Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey. In: *IEEE Wireless Commun*, roč. 11, č. 6 (december 2004), s. 6–28.
- [18]JOHNSON D. B. – MALTZ D. A. – BROCH J.: *Ad Hoc Networking*. Charles E. Perkins, December 2000, ch. DSR: The Dynamic Source Routing Protocol for Multihop Wireless Ad Hoc Networks, s. 139–172.
- [19]HEINZELMAN W. B. – CHANDRAKASAN A. P. – BALAKRISHNAN H.: An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks. In: *IEEE Trans. Wireless Commun.*, roč. 1, č. 4 (október 2002), s. 660–670.
- [20]YOUNIS O. – FAHMY S.: HEED: A Hybrid, Energy-Efficient, Distributed Clustering Approach for Ad Hoc Sensor Networks. In: *IEEE Trans. Mobile Comput.*, roč. 3, č. 4 (október-december 2004), s. 366–379.
- [21]MANJESHWAR A. - AGRAWAL D. P.: TEEN: A Routing Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks. In: *Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing*, roč. 3, apríl 2001, s. 2009–2015.
- [22]MANJESHWAR A. - AGRAWAL D. P.: APTEEN: A Hybrid Protocol for Efficient Routing and Comprehensive Information Retrieval in Wireless Sensor Networks Source. In: *International on Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS)*, Fort Lauderdale, FL, USA. 15.-19. apríl 2002, s. 195–202.
- [23]DOHLER M. – WATTEYNE T. – VALOIS F. – LU J.-L.: Kumar's, Zipf's and Other Laws: How to Structure a Large-Scale Wireless Network? In: *Annals of Telecommunications*, roč. 63, č. 5-6 (jún 2008), s. 239–251.
- [24]ROSSI M. – ZORZI M. – RAO R.: Cost efficient routing strategies over virtual coordinates for wireless sensor networks. In: *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, St Louis, MO, USA. 28. november – 2. december 2005, s. 2975–2980.
- [25]ELHAFSI E. – MITTON N. – SIMPLOT-RYL D.: End-to-End Energy Efficient Geographic Path Discovery With Guaranteed Delivery in Ad Hoc and Sensor Networks. In: *19th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. Cannes, Francúzsko: IEEE. 15.-18. september 2008, s. 1–5.

- [26] KALOSHA H. – NAYAK A. – RHRUP. S. – STOJMENOVIC I.: Select-and-Protect-based Beaconless Georouting with Guaranteed Delivery in Wireless Sensor Networks. In: *27th Conference on Computer Communications (INFOCOM)*. Phoenix, AZ, USA: IEEE. 13.-18. apríl 2008, s. 346–350.
- [27] BENBADIS T. – FRIEDMAN M. – DIAS DE AMORIM M. – FDIDA S.: GPS-Free Positioning System for Wireless Sensor Networks. In: *Second IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN)*. Dubai, Spojené arabské emiráty: IEEE. 6.-8. marec 2005, s. 541–545.
- [28] CAO Q. – ABDELZAHER T.: A Scalable Logical Coordinates Framework for Routing in Wireless Sensor Networks. In: *25th IEEE International Real-Time Systems Symposium (RTSS)*. Lisabon, Portugalsko: IEEE. 5.-8. december 2004, s. 349–358.
- [29] FONSECA R. – RATNASAMY S. – ZHAO J. – EE C. T. – CULLER. D. – SHENKER S. – STOICA I.: Beacon Vector Routing: Scalable Point-to-Point Routing in Wireless Sensornets. In: *2nd Symposium on Networked Systems Design & Implementation (NSDI)*. Boston, MA, USA: ACM. 2.-5. máj 2005, s. 329–342.
- [30] CARUSO A. – CHESSA S. – DE S. – URPI A.: GPS Free Coordinate Assignment and Routing in Wireless Sensor Networks. In: *Annual Joint Conference of the Computer and Communication Societies (INFOCOM)*. Barcelona, Španielsko: IEEE. 23.-29. apríl 2006, s. 150–160.
- [31] CHAVEZ E. – MITTON N. – TEJEDA H.: Routing in wireless networks with position trees. In: *AdHoc-NOW*. Morelia, Mexico. 24.-26. september 2007, s. 32–45.
- [32] RAO A. – RATNASAMY S. – PAPADIMITRIOU C. – SHENKER S. – STOICA I.: Geographic Routing without Location Information. In: *MobiCom*. San Diego, California, USA: ACM. 14.-19. september 2003, s. 96–108.
- [33] MAO Y. – WANG F. – QIU L. – LAM S. S. – SMITH J. M.: S4: Small State and Small Stretch Routing Protocol for Large Wireless Sensor Networks. In: *4th USENIX Symposium on Networked System Design and Implementation (NSDI)*. Cambridge, MA, Veľká Británia. 11.-13. apríl 2007, s. 133–144.
- [34] SCHURGERS C. – SRIVASTAVA M. B.: Energy Efficient Routing in Wireless Sensor Networks. In: *Military Communications Conference (MILCOM)*, roč. 1. McLean, VA, USA: IEEE. 28.-31. október 2001, s. 357–361.
- [35] YE F. – ZHONG G. – LU S. – ZHANG L.: GRAdient Broadcast: A Robust Data Delivery Protocol for Large Scale Sensor Networks, In: *ACM Wireless Networks*, roč. 11 (máj 2005), s. 285–298.
- [36] OLFATI-SABER R. - FAX J. A. – MURRAY R. M.: Consensus and Cooperation in Networked Multi-Agent Systems. In: *Proceedings of the IEEE*. roč. 95 (január 2007, č. 1, s. 215-233.
- [37] SLUCIAK O. - HILAIRE T. - RUPP M.: A General Formalism for the Analysis of Distributed Algorithms. In: *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP 2010)*. Dallas, TX, USA, marec 2010, s. 2890 - 2893.
- [38] SLUCIAK O. - RUPP M.: Steady-State Analysis of a Quantized Average Consensus Algorithm Using State-Space Description. In: *Proc. of Eusipco*. Aalborg, august 2010.

- [39]REYES C. – HILAIRE T. – MECKLENBRUKER C. F.: Distributed Projection Approximation Subspace Tracking based on Consensus Propagation. In: *IEEE 3rd International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing (CAMSAP 2009)*. Aruba, Holandské Antily, december 2009.
- [40]REYES C. – HILAIRE T. – PAUL S. - MECKLENBRUKER C. F.: Evaluation of the Root Mean Square Error Performance of the PAST-Consensus Algorithm. In: *Proceedings of workshop on smart antennas (WSA)*. Bremen, február 2010.
- [41]HLINKA O. - SLUCIAK O. – HLAWATSCH F. – DJURIC P. M. – RUPP M.: Likelihood Consensus: Principles and Application to Distributed Particle Filtering. In: *Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*. Pacific Grove CA, USA, november 2010.
- [42]HLINKA O. - SLUCIAK O. – HLAWATSCH F. – DJURIC P. M. – RUPP M.: Distributed Gaussian particle filtering using likelihood consensus. In: Proc. of ICASSP 2011. Česká republika, máj 2011.
- [43]PARK H. - SRIVASTAVA M. B. - BURKE J.: Design and Implementation of a Wireless Sensor Network for Intelligent Light Control. In: *Proc. IPSN 07*. Cambridge, MA, USA, 2007.
- [44]PAKZAD S. N. - FENVES G. L. – KIM S. - CULLER D. E.: Design and Implementation of Scalable Wireless Sensor Network for Structural Monitoring. In: *Journal of infrastructure systems ASCE*, marec 2008, s. 89-101.
- [45]KENYERES J. - KENYERES M. - RUPP M. – FARKAS P: WSN implementation of the average consensus algorithm. In: *Proc. of 17th European Wireless Conference*. Viedeň, Rakúsko, 27-29 apríl 2011.
- [46]KENYERES J. - KENYERES M. - RUPP M.: Experimental node failure analysis in WSNs. In: Proc. of IWSSIP 2011. Sarajevo, Bosna a Hercegovina, 16-18 jún 2011.
- [47]MATHWORKS. *Documentation Center* [online] [cit. 15.11.2011]. Dostupné na internete: <<http://www.mathworks.com/help/simulink/slref/float.html>>.
- [48]MOSS E. B.: Nested transactions: an approach to reliable distributed computing. In: *Massachusetts Institute of Technology*. Cambridge, MA, 1981
- [49]SLUCIAK O. - RUPP M.: Reaching Consensus in Asynchronous WSNs: Algebraic Approach. In: *Proc of ICASSP 2011*. Praha, Česká republika, máj 2011.
- [50]DIESTEL R.: *Graph Theory (3rd ed.)*. Berlin, New York: Springer-Verlag, ISBN 978-3-540-26183-4
- [51]TINYOS DOCUMENTATION WIKI. [online] [cit. 15.11.2011]. Dostupné na internete: <http://docs.tinyos.net/tinywiki/index.php/Main_Page>
- [52]GAY D. – LEVIS P. – VON BEHREN R. – WELSH M. – BREWER E. – CULLER D: The nesC Language: A Holistic Approach to Networked Embedded Systems. In: *Proceedings of Programming Language Design and Implementation (PLDI) 2003*, jún 2003.

- [53]ELSON J. - ROMER K.: Wireless sensor networks: A new regime for time synchronization. In: *First Workshop on Hot Topics in Networks*. Princeton, USA, 28-29 október 2002.
- [54]KENYERES J. - KENYERES M. - RUPP M. – FARKAS P: Localized algorithm for border nodes detection in WSNs. In: *Wireless Telecommunications Symposium 2012 (WTS'12)*. Londýn, Veľká Británia, 18-20 apríl, 2012.
- [55]CARCIA-HERNANDEZ C. F. – IBARGUENGOYTIA-GONZALEZ P. H – GARCIA-HERNANDEZ J. – PEREZ-DIAZ J. A.: Wireless Sensor Networks and Applications: a Survey. In: *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*. Electric Research Institute,(IIE), ITESM. Cuernavaca Campus, Mexiko, roč.7, č. 3, marec 2007.
- [56]GUPTA P. - KUMAR P.: The capacity of wireless networks. In: *IEEE Transactions on Information Theory*. roč. 46, č. 2, 2000, s. 388 – 404.
- [57]WOLFRAM MATHWORLD. *Distance*. [online] [cit. 16.11.2011]. Dostupné na internete: <<http://mathworld.wolfram.com/Distance.html>>.
- [58]WOLFRAM MATHWORLD. *Discrete Uniform Distribution* [online] [cit.16.11.2011]. Dostupné na internete: <<http://mathworld.wolfram.com/DiscreteUniformDistribution.html>>.
- [59]SKIENA S.: Adjacency Matrices. In: §3.1.1 in *Implementing Discrete Mathematics: Combinatorics and Graph Theory with Mathematica*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1990, s. 81-85.
- [60]BOLLOBAS B.: *Modern Graph Theory*. New York: Springer-Verlag, 1998.
- [61]HUSEN B.: *Markov Chains*. [online] [cit. 12.6.2013] Dostupné na internete: <http://www.math.osu.edu/~husen.1/teaching/571/markov_1.pdf>.
- [62]LEVIN D. A.- PERES Y. - WILMER E. L.: *Markov Chains and Mixing Times*. AMS, 2009
- [63]KENYERES J. - KENYERES M. - RUPP M. – FARKAS P.: An Algorithm for Central Point Estimation in WSNs. In: *35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*. Praha, Česká republika, 3-4 júl, 2012.

PUBLIKÁCIE AUTORA

ADC Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

- [1] ADC1 J. Kenyeres, M. Kenyeres, M. Rupp, P. Farkaš, “Connectivity-based Self-localization in WSNs“, *Radioengineering*, 22(3), p. 818 - 827, 2013.

ADF Vedecké práce v domácich nekarentovaných časopisoch

- [2] ADF1 J. Kenyeres, M. Kenyeres, “Jednoduchá metrika na podporu smerovania v bezdrôtových senzorových sieťach, (Simple routing metric for WSN applications)” in *EE (ELOSYS) Mimoriadne číslo časopisu pre elektrotechniku a energetiku*, vol. 16, pp.76-80, Sep.,2010.

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- [3] AFC1 J. Kenyeres, M. Kenyeres, M. Rupp and P. Farkaš, "An Algorithm for Central Point Estimation in WSNs," 35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), Prague, Czech Republic, Jul 3-4, 2012.
- [4] AFC2 J. Kenyeres, M. Kenyeres, M. Rupp and P. Farkaš, "Localized algorithm for border nodes detection in WSNs," Wireless Telecommunications Symposium 2012 (WTS'12), London, UK, Apr 18-20, 2012.
- [5] AFC3 J. Kenyeres, M. Kenyeres, M. Rupp, P. Farkaš, "Iterative Timing for Wireless Sensor Networks," 19th International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP'12), Vienna, Austria, Apr. 11-13, 2012.
- [6] AFC4 J. Kenyeres, M. Kenyeres, M. Rupp, "Experimental node failure analysis in WSNs," *IWSSIP 2011*, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina Republic, June 16-18, 2011.
- [7] AFC5 J. Kenyeres, M. Rupp, M. Kenyeres, and P. Farkaš, "WSN implementation of the average consensus algorithm," 17th European Wireless Conference, Vienna, Austria, Apr. 27-29, 2011.
- [8] AFC6 J. Kenyeres, Š. Šajban, P. Farkaš, M. Rakús, "Indoor experiment with WSN application," MIPRO 2010: 33rd international convention on information and communication technology, electronics and microelectronics, Opatija, Croatia, May 24-28, 2010.

PEDAGOGICKÁ ČINNOSŤ AUTORA

- cvičenia z predmetu Digitálne komunikácie
- cvičenia z predmetu Mobilné a satelitné komunikácie I
- cvičenia z predmetu Mobilné a satelitné komunikácie II
- vedúci bakalárskej práce
- vedúci dvoch diplomových prác