

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/260002717>

# Data Fusion in Wireless Sensor Networks

Thesis · September 2013

---

CITATIONS  
0

READS  
255

**1 author:**



[Biljana Risteska Stojkoska](#)

Ss. Cyril and Methodius University in Skopje

75 PUBLICATIONS 1,541 CITATIONS

SEE PROFILE

УНИВЕРЗИТЕТ „СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ“ - СКОПЈЕ

ФАКУЛТЕТ ЗА ИНФОРМАТИЧКИ НАУКИ  
И КОМПЈУТЕРСКО ИНЖЕНЕРСТВО - СКОПЈЕ

Билјана Л. Ристеска Стојкоска

**ПОДАТОЧНА ФУЗИЈА КАЈ  
БЕЗЖИЧНИ СЕНЗОРСКИ МРЕЖИ**

- докторска дисертација –

СКОПЈЕ, 2013

Комисија за оцена и одбрана:

Вонр. проф. д-р Андреа Кулаков, претседател  
Факултет за информатички науки и компјутерско инженерство - Скопје

Проф. д-р Данчо Давчев, ментор  
Факултет за информатички науки и компјутерско инженерство - Скопје

Вонр. проф. д-р Владимир Трајковиќ, член  
Факултет за информатички науки и компјутерско инженерство - Скопје

Доц. д-р Дејан Спасов, член  
Факултет за информатички науки и компјутерско инженерство - Скопје

Доц. д-р Игор Мишковски, член  
Факултет за информатички науки и компјутерско инженерство - Скопје

Датум на одбрана:

Датум на промоција:

ТЕХНИЧКИ НАУКИ



Biljana L. Risteska Stojkoska

Data fusion in Wireless Sensor Network

**ABSTRACT:** Following the latest developments in computer and communication technologies, everyday objects are becoming smarter, as ubiquitous connectivity and modern sensors allow them to communicate with each other. The deployment of sensors and actuators everywhere around us adds a new dimension to the world of information and communication, which enables the creation of new and enriched services widely applied in different industrial and civilian application areas.

The aim of this thesis is to develop data fusion strategies for Wireless Sensor Networks (WSN) that remove temporal or spatial redundancies between sensor measurements in order to decrease the network load. In context of spatial data fusion, nodes localization appears as the first problem to be solved in order to find spatial correlation between data from neighboring nodes. In this thesis two approaches were purposed, implemented and evaluated for solving three dimensional WSN localization problems. In context of temporal data fusion, different techniques for data reduction based of time series forecasting were analyzed, implemented and evaluated. From the evaluation of the algorithms it can be concluded that star network is the most suitable network topology by means of energy saving. If sensors are not within each other radio range, cluster-based topology could be used. Additionally, if data aggregation is applied at cluster head, this topology can achieve even greater data reduction in scenarios where loosing data precision is affordable.

**KEY WORDS:** data fusion, wireless sensor networks, nodes localization, multidimensional scaling, data prediction, energy saving

Билјана Л. Ристеска Стојкоска

Податочна фузија кај безжични сензорски мрежи

**РЕЗИМЕ:** Развојот на компјутерските и комуникациските технологии, како и сеприсутната поврзаност и модерните сензори кои меѓусебно комуницираат овозможува појава на интелигентни уреди како дел од нашето секојдневие. Сензорите и актуаторите поставени насекаде околу нас даваат нов поглед кон светот од информации и комуникации кој овозможува создавање на нови и збогатување на постоечките сервиси применливи во голем број индустриски и комерцијални апликации.

Цел на оваа дисертација е развој на стратегии за податочна фузија кај безжични сензорски мрежи (БСМ) со кои би се отстранила просторната и временската редундантност помеѓу сензорските отчитувања и би се намалило оптеретувањето на самата мрежа. Од аспект на просторна податочна фузија, локализацијата на јазлите е првиот проблем што треба да се реши за да може да се одреди просторна корелација помеѓу податоците кои се измерени од соседни јазли. Во оваа теза се предложени, имплементирани и евалуирани два пристапи за решавање на проблемот на тридимензионална локализација кај БСМ. Од аспект на временска податочна фузија се анализирани, имплементирани и евалуирани различни техники за редукација на податоци базирани на предвидување на временски серии. Евалуацијата на алгоритмите покажа дека свезда-базирани мрежна топологија е најдобро решение од аспект на заштеда на енергија. Ако сензорите не се во меѓусебен радио опсег, тогаш кластер-базирани мрежна топологија во комбинација со агрегација на податоци може да постигне најголема редукација на податоците доколку е дозволена намалена прецизност на отчитаните податоци.

**КЛУЧНИ ЗБОРОВИ:** податочна фузија, безжични сензорски мрежи, локализација на јазли, мултидимензионално скалирање, предикција на податоци, заштеда на енергија

# Содржина

<b>ЛИСТА НА СЛИКИ.....</b>	<b>VIII</b>
<b>ЛИСТА НА ТАБЕЛИ.....</b>	<b>XI</b>
<b>ЛИСТА НА КРАТЕНКИ.....</b>	<b>XII</b>
<b>ГЛАВА 1    ВОВЕД.....</b>	<b>1</b>
1.1    МОТИВАЦИЈА ЗА ИЗРАБОТКА НА ДОКТОРСКАТА ДИСЕРТАЦИЈА .....	1
1.2    ПРИДОБИВКИ ОД ДОКТОРСКАТА ДИСЕРТАЦИЈА .....	3
1.3    СТРУКТУРА НА ДОКТОРСКАТА ДИСЕРТАЦИЈА .....	4
1.4    ЛИСТА НА ОБЈАВЕНИ ТРУДОВИ ПОВРЗАНИ СО ДОКТОРСКАТА ДИСЕРТАЦИЈА .....	5
<b>ГЛАВА 2    ЛОКАЛИЗАЦИЈА НА ЈАЗЛИ КАЈ БСМ.....</b>	<b>7</b>
2.1    ПОТРЕБА ОД ЛОКАЛИЗАЦИЈА КАЈ БСМ .....	7
2.1.1    ПРЕСМЕТУВАЧКИ МОДЕЛ .....	8
2.1.2    РАСТОЈАНИЕ ПОМЕЃУ ЈАЗЛИТЕ .....	8
2.1.3    МОБИЛНОСТ НА ЈАЗЛИТЕ .....	11
2.1.4    ПОТРЕБА ОД АНХОР ЈАЗЛИ .....	11
2.2    ЛОКАЛИЗАЦИЈА НА ЈАЗЛИ КАЈ ТРИДИМЕНЗИОНАЛНА БСМ .....	11
2.3    МУЛТИДИМЕНЗИОНАЛНО СКАЛИРАЊЕ .....	13
2.3.1    МУЛТИДИМЕНЗИОНАЛНО СКАЛИРАЊЕ (МДС) КАЈ 2Д-БСМ .....	15
2.3.2    МУЛТИДИМЕНЗИОНАЛНО СКАЛИРАЊЕ (МДС) КАЈ 3Д-БСМ .....	21
2.3.3    ПОДОБРЕНО МУЛТИДИМЕНЗИОНАЛНО СКАЛИРАЊЕ ЗА ЛОКАЛИЗАЦИЈА НА ЈАЗЛИ (ПМДС) .....	25
2.4    ЕВАЛУАЦИЈА НА ПМДС .....	35
2.4.1    МОДЕЛ НА БЕЗЖИЧНА СЕНЗОРСКА МРЕЖА .....	36
2.4.2    СПОРЕДБА НА МДС-МАПА И ПМДС КАЈ 2Д-БСМ .....	37
2.4.3    СПОРЕДБА НА МДС-МАПА И ПМДС КАЈ 3Д-БСМ .....	41
2.4.4    СПОРЕДБА НА МДС-МАПА И ПМДС КАЈ ПОВРШИНСКА 3Д-БСМ .....	48
2.5    ЗАКЛУЧОК И НАСОКИ ЗА ИДНА РАБОТА .....	51
2.5.1    ИДНИ ИСТРАЖУВАЊА КАЈ ТРИДИМЕНЗИОНАЛНИ МРЕЖИ .....	52
2.5.2    ИДНИ ИСТРАЖУВАЊА КАЈ ТРИДИМЕНЗИОНАЛНИ ПОВРШИНСКИ МРЕЖИ .....	53
<b>ГЛАВА 3    ПРЕДИКЦИЈА НА ПОДАТОЦИ КАЈ БСМ.....</b>	<b>55</b>
3.1    ПРЕГЛЕД НА СРОДНИ ИСТРАЖУВАЊА.....	58
3.2    ОПИС НА АЛГОРИТМИТЕ ЗА ПРЕДИКЦИЈА.....	60
3.2.1    АЛГОРИТАМ НА МИНИМАЛНА СРЕДНА КВАДРАТНА ГРЕШКА .....	60
3.2.2    LMS СО ПРОМЕНЛИВ ПАРАМЕТАР .....	63

3.2.3	МОДЕЛ НА ДВИЖЕЧКИ ПРОСЕЦИ.....	65
3.2.4	АВТОРЕГРЕСИВЕН МОДЕЛ .....	66
3.2.5	МОДЕЛ НА АВТОРЕГРЕСИВНИ ДВИЖЕЧКИ ПРОСЕЦИ .....	66
3.3	ЕВАЛУАЦИЈА НА АЛГОРИТМИТЕ .....	67
3.3.1	ТОПОЛОГИЈА НА МРЕЖАТА .....	67
3.3.2	ПОДАТОЧНИ МНОЖЕСТВА .....	67
3.3.3	СПОРЕДБА НА АЛГОРИТМИТЕ ЗА ПРЕДИКЦИЈА КАЈ СВЕЗДА-БАЗИРАНА МРЕЖНА ТОПОЛОГИЈА .....	68
3.3.4	СПОРЕДБА НА АЛГОРИТМИТЕ ЗА ПРЕДИКЦИЈА КАЈ КЛАСТЕР БАЗИРАНА МРЕЖНА ТОПОЛОГИЈА .....	71
3.4	ЗАКЛУЧОК.....	72
<b>ГЛАВА 4 ПОДАТОЧНА ФУЗИЈА КАЈ БСМ .....</b>		<b>74</b>
4.1	ДЕТЕКЦИЈА НА ПОЖАР СО ПРИМЕНА НА НЕПРЕЦИЗНА ЛОГИКА .....	76
4.1.1	НЕПРЕЦИЗНАТА ЛОГИКА .....	77
4.1.2	ДИЗАЈН НА БСМ СИСТЕМ БАЗИРАН НА НЕПРЕЦИЗНА ЛОГИКА .....	78
4.1.3	РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА .....	80
4.2	ДЕТЕКЦИЈА НА ПОДВИЖНИ ОБЈЕКТИ СО ВИДЕО БСМ.....	84
4.2.1	ДВОСЛОЈНА АРХИТЕКТУРА ЗА ВИДЕО НАДЗОР КАЈ БСМ .....	86
4.2.2	АЛГОРИТАМ ЗА ДЕТЕКЦИЈА НА ДВИЖЕЊЕ КОЈ КОРИСТИ ДИСТИБУЦИЈА НА N КРАЛИЦИ .....	88
4.2.3	ЕВАЛУАЦИЈА .....	91
<b>ГЛАВА 5 РАЗВОЈ НА АПЛИКАЦИИ ЗА ПОДАТОЧНА ФУЗИЈА КАЈ БСМ ...</b>		<b>93</b>
5.1	ПРЕГЛЕД НА ПОСТОЕЧКИ АПЛИКАЦИИ .....	94
5.2	ПРЕДИЗВИЦИ ПРИ ДИЗАЈН НА БСМ .....	97
5.3	ОПИС НА АРХИТЕКТУРА НА СИСТЕМ ЗА МОНИТОРИНГ .....	99
5.4	ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА НА АПЛИКАЦИЈАТА.....	101
5.5	ФУНКЦИОНАЛНОСТИ НА БСМ .....	103
5.6	ЕВАЛУАЦИЈА .....	105
<b>ГЛАВА 6 ЗАКЛУЧОК.....</b>		<b>107</b>
<b>КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА .....</b>		<b>110</b>
<b>ПРИЛОЗИ .....</b>		<b>120</b>
	Прилог А .....	120
	Прилог Б.....	124



# Листа на слики

Слика 2.1. Релативни позиции на јазли распоредени во GRID (ГОРЕ) и на произволни позиции (ДОЛУ) .....	18
Слика 2.2. Комуникација меѓу јазли кај мрежа без пречки и кај мрежа со пречки .....	26
Слика 2.3. Апроксимација на растојание .....	27
Слика 2.4. Грешка кај матрицата на растојанија генерирана со алгоритмот на Џикстра .....	31
Слика 2.5. Грешка кај матрицата на растојанија генерирана со EAMP .....	31
Слика 2.6. Споредба на грешките кај матриците на растојанија генерирани со Џикстра и EAMP за $ER=0\%R$ и $ER=10\%R$ .....	32
Слика 2.7. Споредба на грешките кај матриците на растојанија генерирани со Џикстра и EAMP за $ER=20\%R$ и $ER=25\%R$ .....	32
Слика 2.8. Точно и пресметано растојание помеѓу јазли со RSSI .....	34
Слика 2.9. Грешка на локализација во функција од бројот на јазли .....	36
Слика 2.10. Споредба на МДС-МАПА и ПМДС кај топологија I и $ER=0\%R$ .....	38
Слика 2.11. Споредба на МДС-МАПА и ПМДС кај топологија I со $ER=5\%R$ (ЛЕВО) и $ER=10\%R$ (ДЕСНО) .....	39
Слика 2.12. Влијанието на бројот на анхор јазли врз грешката на локализација кај топологија I .....	39
Слика 2.13. Влијанието на бројот на анхор јазли врз грешката на локализација кај топологија II со $5\%R$ отстапување на координатите ....	40
Слика 2.14. Влијанието на бројот на анхор јазли врз грешката на локализација кај топологија III со $5\%R$ отстапување на координатите ...	40
Слика 2.15. Влијанието на грешката ER врз грешката на локализација кај топологија I .....	40
Слика 2.16. Врска помеѓу радио опсегот (R) и просечната поврзаност на мрежата кај 3D-БСМ .....	42
Слика 2.17. Локализација на јазли кај тридимензионална мрежа со МДС-МАПА .....	42
Слика 2.18. Влијанието на бројот на анхор јазли врз грешката на локализација добиена со МДС-МАПА кај топологија I за $ER=15\%R$ (ЛЕВО) и $ER=30\%R$ (ДЕСНО) .....	43
Слика 2.19. Влијанието на ER врз грешката на локализација добиена со МДС-МАПА кај топологија I .....	43
Слика 2.20. Локализација на јазли кај топологија I со ПМДС (ЛЕВО) и МДС-МАПА (ДЕСНО) .....	44
Слика 2.21. Локализација на јазли кај топологија II со ПМДС (ЛЕВО) и МДС-МАПА (ДЕСНО) .....	44
Слика 2.22. Споредба на МДС-МАПА и ПМДС кај топологија I со $ER=10\%R$ .....	45

Слика 2.23. ВЛИЈАНИЕТО НА БРОЈОТ НА АНХОР ЈАЗЛИ ВРЗ ГРЕШКАТА НА ЛОКАЛИЗАЦИЈА ДОБИЕНА СО ПМДС КАЈ ТОПОЛОГИЈА I ЗА $ER=5\%$ .....	46
Слика 2.24. ВЛИЈАНИЕТО НА $ER$ ВРЗ ГРЕШКАТА НА ЛОКАЛИЗАЦИЈА ДОБИЕНА СО ПМДС КАЈ ТОПОЛОГИЈА II ЗА ПОВРЗАНОСТ НА МРЕЖАТА ОД 14.73 .....	46
Слика 2.25. ВЛИЈАНИЕТО НА $ER$ ВРЗ ГРЕШКАТА НА ЛОКАЛИЗАЦИЈА ДОБИЕНА СО ПМДС КАЈ ТОПОЛОГИЈА I .....	47
Слика 2.26. СПОРЕДБА НА МДС-МАПА И ПМДС СО АЛГОРИТМИТЕ ПРЕДЛОЖЕНИ ВО [2.24] И [2.25].....	48
Слика 2.27. ТИПИЧНИ 3Д ПОВРШИНИ: РИТЧЕ (ГОРЕ) И ДОЛИНА (ДОЛУ) .....	49
Слика 2.28. ВЛИЈАНИЕТО НА $ER$ ВРЗ ГРЕШКАТА НА ЛОКАЛИЗАЦИЈА ДОБИЕНА СО МДС-МАПА ЗА ТОПОЛОГИЈА II .....	50
Слика 2.29. ВЛИЈАНИЕТО НА БРОЈОТ НА АНХОР ЈАЗЛИ ВРЗ ГРЕШКАТА НА ЛОКАЛИЗАЦИЈА ДОБИЕНА СО МДС-МАПА ЗА ТОПОЛОГИЈА II .....	50
Слика 2.30. СПОРЕДБА НА МДС-МАПА И ПМДС КАЈ ТОПОЛОГИЈА I .....	51
Слика 2.31. СПОРЕДБА НА МДС-МАПА И ПМДС КАЈ ТОПОЛОГИЈА II .....	51
Слика 2.32. КОМПЛЕКСЕН ТРИДИМЕНЗИОНАЛЕН ТЕРЕН .....	54
Слика 3.1. НАЧИНИ НА ЗАШТЕДА НА ЕНЕРГИЈА КАЈ БСМ .....	56
Слика 3.2. А) ОСНОВНА СТРУКТУРА НА АДАПТИВЕН ФИЛТЕР И Б) АДАПТИВЕН ФИЛТЕР ЗА ПРЕДИКЦИЈА.....	62
Слика 3.3. СВЕЗДА-БАЗИРАНА МРЕЖНА ТОПОЛОГИЈА (ЛЕВО), КЛАСТЕР-БАЗИРАНА МРЕЖНА ТОПОЛОГИЈА (ДЕСНО) .....	67
Слика 3.4. СПОРЕДБА НА LMS-VSS И LMS-DPS КАЈ ТЕМПЕРАТУРНИТЕ ОТЧИТУВАЊА ОД ЦЕЛОТО ПМ I (ЛЕВО) И ОТЧИТУВАЊАТА ЗА ВЛАЖНОСТА НА ВОЗДУХОТ ЗА ЈАЗЕЛ БРОЈ 10 ОД ПМ I (ДЕСНО) .....	69
Слика 3.5. СПОРЕДБА НА LMS-VSS И LMS-DPS НА ТЕМПЕРАТУРНИТЕ ОТЧИТУВАЊА ЗА ЈАЗЛИТЕ БРОЈ 11 И 49 (ЛЕВО) И НА ОТЧИТУВАЊАТА ЗА ВЛАЖНОСТА НА ВОЗДУХОТ ЗА ЈАЗЕЛ БРОЈ 20 (ДЕСНО) ОД ПМ I.....	70
Слика 3.6. СПОРЕДБА НА ARMA, MA(2), MA(4) И MA(10) КАЈ ПМ I (ЛЕВО) И СПОРЕДБА НА MA(2), MA(4) И MA(10) КАЈ ПМ II (ДЕСНО).....	71
Слика 3.7. КЛАСТЕРИРАНА БСМ (INTEL BERKELEY RESEARCH LAB) [3.6] (ЛЕВО) И РЕЗУЛТАТИ ЗА КЛАСТЕРОТ КОЈ ГИ СОДРЖИ ЈАЗЛИТЕ: 7, 8, 9, 10, 11, 53 И 54 (ДЕСНО).....	72
Слика 4.1. СИСТЕМ БАЗИРАН НА НЕПРЕЦИЗНА ЛОГИКА.....	78
Слика 4.2. Ф-МЕРКА ИЗРАЗЕНА ВРЕМЕНСКИ ВО МИЛИСЕКУНДИ (ГОРЕ) И Ф-МЕРКА ВО СЛУЧАЈ КОГА ПОЖАРОТ Е ЛОКАЛИЗИРАН (ДОЛУ).....	83
Слика 4.3. СУСЛОПС [4.30] (ЛЕВО) И WEEVLE АРХИТЕКТУРА [4.31] (ДЕСНО) .....	86
Слика 4.4. А) ТРАДИЦИОНАЛЕН СИСТЕМ ЗА ВИДЕО НАДЗОР И Б) ДВОСЛОЈНА АРХИТЕКТУРА ЗА ВИДЕО НАДЗОР КАЈ БСМ .....	88
Слика 4.5. ДИСТРИБУЦИЈА НА N КРАЛИЦИ (ЛЕВО) И ДВОЈНАТА ДИСТРИБУЦИЈА НА N КРАЛИЦИ (ДЕСНО).....	90
Слика 4.6. ДЕТЕКЦИЈА НА ДВИЖЕЊЕ СО ТЕХНИКАТА НА ОДЗЕМАЊЕ НА ПОЗАДИНА (ЛЕВО) И N КРАЛИЦИ (ДЕСНО) .....	91
Слика 5.1. АРХИТЕКТУРА НА СИСТЕМ ЗА МОНИТОРИНГ .....	100

Слика 5.2. Развивачки дијаграм.....	101
Слика 5.3. Миса Јазли .....	102
Слика 5.4. Интерфејс на модулите за приказ на сензорски отчитувања.....	103
Слика 5.5. Интерфејс на модулите за статистика (лево) и топологија (десно)	104
Слика 5.6. Мобилни апликации за интеракција со БСМ .....	105
Слика 5.7. Резултати од прашалникот за евалуација на интерфејсот .....	105
Слика А.1. Првиот кат од двокатната куќа, вториот кат од двокатната куќа и еднокатна куќа .....	120
Слика А.2. Систем базиран на непрецизна логика .....	121
Слика А.3. Функциите на припадност за температура, концентрација на $O_2$ и $CO_2$ .....	121
Слика Б.1. Проширен развивачки дијаграм.....	125
Слика Б.2. Преглед на клиентскиот слој .....	126
Слика Б.3. Преглед на историски податоци .....	126

# Листа на табели

ТАБЕЛА 2.1. ЗАВИСНОСТ ПОМЕЃУ РАДИО ОПСЕГОТ И ПОВРЗАНОСТА НА МРЕЖАТА .....	29
ТАБЕЛА 2.2. СПОРЕДБА НА РАЗЛИЧНИ RSSI ТЕХНИКИ ЗА ОДРЕДУВАЊЕ НА РАСТОЈАНИЕ .....	33
ТАБЕЛА 2.3. ЗАВИСНОСТ НА РАДИО ОПСЕГОТ И ПОВРЗАНОСТА КАЈ ДВОДИМЕНЗИОНАЛНА БСМ .....	38
ТАБЕЛА 2.4. ГРЕШКА НА ЛОКАЛИЗАЦИЈА ЗА МДС-МАПА И ПМДС .....	45
ТАБЕЛА 2.5. ПРОСЕЧНАТА ПОВРЗАНОСТ НА МРЕЖАТА КАЈ ТОПОЛОГИЈА I .....	48
ТАБЕЛА 2.6. ПРОСЕЧНАТА ПОВРЗАНОСТ НА МРЕЖАТА КАЈ ТОПОЛОГИЈА II .....	49
ТАБЕЛА 4.1. ПАРАМЕТРИ ЗА ТЕСТИРАЊЕ .....	80
ТАБЕЛА 4.2. РЕЗУЛТАТИ ЗА ПРЕЦИЗНОСТ, СЕНЗИТИВНОСТ, $\Phi$ -МЕРКА И БРОЈ НА ВРЕМЕНСКИ ИНТЕРВАЛИ ЗА ДА СЕ ДЕТЕКТИРА ПОЖАР .....	82
ТАБЕЛА 4.3. СПОРЕДБА НА РЕЗУЛТАТИТЕ ДОБИЕНИ СО НАИВЕН БАЕСОВ КЛАСИФИКАТОР И МЕТОДОТ БАЗИРАН НА НЕПРЕЦИЗНА ЛОГИКА .....	83
ТАБЕЛА 4.4. ПОТРЕБНА ЕНЕРГИЈА ЗА ОБРАБОТКА НА СЛИКА .....	92

# Листа на кратенки

БСМ	Безжични Сензорски Мрежи
МДС	Мултидимензионално скалирање
ГПС	Систем за Глобално Позиционирање
2Д-БСМ	Дводимензионална Безжична Сензорска Мрежа
3Д-БСМ	Тридимензионална Безжична Сензорска Мрежа
ПМДС	Подобрен алгоритам за мултидимензионално скалирање
ДСВ	Декомпозиција на сингуларни вредности
ЕАМР	Хеуристички алгоритам за пресметување на матрицата на растојанија
МА	Модел на движечки просеци
АР	Авторегресивни модели
АРМА	Модел на авторегресивни движечки просеци
ДПС	Двојна шема за предикција
МСЕ	Средна квадратна грешка
ЛМС	Алгоритам на минимална средна квадратна грешка
ЛМС-VSS	ЛМС базиран алгоритам со променлива вредност за $\mu$

# Глава 1

## Вовед

### 1.1 Мотивација за изработка на докторската дисертација

Безжичните сензорски мрежи (БСМ) претставуваат колекција од автономни јазли кои прибираат корисни информации за околината која ја мониторираат и кои се задолжени прибраните податоци да ги проследуваат до централна станица (сервер, базна станица или синк) за понатамошна анализа. Кај БСМ секој јазел поседува еден или повеќе сензори (температура, јачината на звук, вибрации, притисок, загадување), микроконтролер кој може да врши локална обработка на измерените вредности, модул за безжична комуникација и батерија како извор на енергија.

Во иднина се очекува цената на овие сензорски јазли значително да падне и БСМ да ја доживеат долгоочекуваната експанзија и примена во голем број апликативни и комерцијални решенија. Ке наброиме некои од потенцијалните апликации во кои БСМ може да го најдат своето место:

- Мониторирање на сообраќај
- Мониторирање на животна средина
- Градежна индустрија
- Медицина
- Воена индустрија и безбедност

Освен во погоре споменатите апликации, БСМ се користи и во комерцијални апликации како автоматска контрола на осветлување и затоплување на канцеларии, следење на состојбата и условите во стаклени градини и сл.

**Податочна фузија** кај БСМ доаѓа како одзив на потребата од екстракција на знаење за конкретната апликација. Таа е претставена со алгоритми и техники за комбинирање и анализа на сензорски мерења од повеќе јазли од мрежата. Притоа потребно е да постои просторно-временска корелација на податоците. За анализа на просторната корелација

необходно е да се познава локацијата на јазлите од мрежата, додека за временска корелација потребно е да се најдат алгоритми кои најдобро ќе ја опишат оваа релација. Притоа постојат два главни предизвици: како да се определат локациите на јазлите кои се (најчесто) произволно расфрлани во областа од интерес, и како да се проследат прибраните податоци до централниот сервер со цел да се минимизира мрежната комуникација.

Скоро сите апликации бараат задолжително познавање на позицијата (локацијата) на јазлите. Ако некој јазел прати порака дека детектирал пожар или ако е забележан непријателски објект во дадена мониторирана област, таа информација е од интерес само ако точно се знае каде се наоѓа тој јазел, за да може навреме да се интервенира. Проблемот на локализација е од големо значење кога станува збор за мрежи кои се состојат од неколку стотици до неколку илјади јазли, расфрлани на голема површина. Се смета дека сензорските мрежи се самоорганизирачки, односно дека не постои цврста контрола врз поставувањето на сензорските јазли кога се инсталира мрежата (на пример, кога се фрлаат јазлите од авион). Алгоритмите за локализација се разликуваат во прецизноста на предвидување на позицијата, мрежниот сообраќај и оптоварувањето на процесорот. Земајќи ги во предвид различните цели при дизајнирањето на овие алгоритми, логичен е фактот дека секој од овие алгоритми е подобар од другите под специфични услови. Сепак, секој алгоритам остава многу простор за подобрување на прецизноста со која се предвидува позицијата на јазлите. Карактеристично е што повеќето предложени алгоритми за локализација кај БСМ го третираат проблемот кај дводимензионална мрежа. Многу малку истражувања се спроведени за тридимензионална локализација и тоа повеќето претставуваат модификација на веќе постоечки техники. Но во последните две-три години тридимензионалната локализација се повеќе се популаризира и различни истражувачки групи ширум светот веќе интензивно работат на изнаоѓање на нови алгоритми и техники.

Од друга страна, предикцијата на самите податоци кај една БСМ е значајна поради потенцијалот да го редуцира бројот на пратени пакети низ мрежата. Бидејќи енергијата на јазлите од БСМ е ограничена, а трансмисијата на пораки е најскапа операција од енергетски аспект, јасно е дека колку е поголем процентот на успешни предвидувања на сензорските отчитувања, толку подолг ќе биде животниот век на мрежата. Техниките за предикција најчесто функционираат на принципот на двојни филтри, каде две инстанции

од филтерот за предикција симултано се извршуваат и кај сензорите, но и кај базната станица. Овие модели треба периодично да се ажурираат за да се избегнат кумулативни грешки. Како генерален недостаток кај повеќето предложени алгоритми во литературата се јавува користењето на различни податочни множества за анализа на алгоритмите. Она што недостасува во литературата е евалуација на повеќето предложени алгоритми со користење на исти податочни множества како би можело истите успешно да се компарираат и анализираат.

Истражувањето во оваа докторската дисертацијата е мотивирано од гореспоменатите недостатоци:

- фактот што и покрај релативно големиот број предложени методи за локализација, многу мал дел од нив го третираат проблемот на тридимензионална локализација;
- непостоење на евалуација на алгоритмите за предикција на исти податочни множества со користење на иста метрика.

Цел на тезата е развој и имплементација на модифицирани или целосно нови алгоритми за податочна фузија кај БСМ кои делумно или во целост ќе ги надминат овие недостатоци.

## **1.2 Придобивки од докторската дисертација**

Во оваа докторска дисертација обработен е проблемот на просторно-временска податочна фузија кај БСМ, при што е обработен проблемот на локализација и проблемот на предикција на податоците. Дополнително, разработени се и техники за манипулација со овие податоци во зависност од потребите и целите на конкретната апликација.

Во продолжение сублимирани се најважните придобивки од докторската дисертација.

- Развој на нов алгоритам за тридимензионална локализација:
  - Споредба на алгоритмот за мултидимензионално скалирање со други алгоритми за локализација и потенцирање на неговите предности од аспект на точност.



- Имплементација на нов алгоритам за тридимензионална локализација базиран на мултидимензионално скалирање.
- Споредба на новиот алгоритам со постоечки алгоритми за тридимензионална локализација и негова евалуација.
- Развој на нови алгоритми за предикција на податоци од БСМ:
  - Имплементација на новите алгоритми за предикција кои ќе ја зголемуваат енергетската ефикасност на мрежата.
  - Споредба на новите алгоритми со референтни алгоритми.
  - Евалуација на алгоритмите на исти податочни множества.
- Комбинирање на предикцијата на податоци и предикцијата на локација за просторно-временска податочна фузија која генерира нови значајни информации за мрежата (како предикција на настани).
- Моделирање и дизајн на безжична сензорска мрежа за податочна фузија која ги содржи следните модули:
  - Систем за локализација на јазлите од мрежата.
  - Систем за прибирање и предикција на податоци.
  - Систем за анализа на податоци во самата мрежа.

### 1.3 Структура на докторската дисертација

Во **втората** глава од докторската дисертација опишан е проблемот на локализација кај БСМ. Даден е краток преглед на алгоритмите кои го третираат проблемот на тридимензионална локализација, нивните предности и недостатоци. Понатаму во детали е опишан алгоритмот на мултидимензионално скалирање (МДС) кој претставува основа кај многу алгоритми за локализација. Дадена е математичката позадина и временската комплексност на МДС кај дводимензионални и тридимензионални мрежи соодветно. Предложен е нов алгоритам за локализација базиран на МДС кој врши подобра проценка на растојанието помеѓу јазлите од мрежата. Направена е обемна симулациона евалуација и споредба на перформансите на новопредложениот алгоритам и покажано е дека тој е постабилен и дава поточна

предикција на локацијата на јазлите. На крај од оваа глава дадени се насоки за идни истражувања со цел подобрување на перформансите на новопредложениот алгоритам за локализација.

**Третата** глава го третира проблемот на предикција на сензорски отчитувања кај БСМ. Направен е краток преглед на досегашните истражувања во оваа област и детално се објаснети најпопуларните техники за предикција. Предложени се нови алгоритми за предвидување кои се евалуирани на различни податочни множества, превземени од базите на податоци достапни на интернет кои се првенствено наменети за истражувачки цели. Споредбата на методите е направена во однос на две евалуациски мерки. Оваа глава завршува со анализа и заклучоци донесени врз основа на добиените резултати.

Во **четвртата** глава е даден преглед на постоечките техники и методи за просторно-временска податочна фузија која може да послужи за детекција на настани кај БСМ. Развојот на техники за податочна фузија на сензорски податоци зависи од доменот каде се применува безжичната сензорска мрежа, т.е. од карактеристиките на самата апликација. Во оваа глава се дадени два можни пристапи, од кои првиот е базиран на непрецизна (фази) логика, а вториот е хеуристички базиран.

Во **петтата** глава предложена е архитектура за развој на конкретна реална безжична сензорска мрежа која е генеричка и модуларна и може да одговори на барањата на апликации од различен домен. Опишан е и развојот на веб-базирана апликација за податочна фузија кај БСМ која содржи модул за локализација на јазлите и модул за процесирање на податоците.

Во **шестата** глава се сумирани заклучоците до кои се дојде врз основа на анализите, имплементацијата и експерименталните резултати од алгоритмите за податочна фузија кај БСМ.

## **1.4 Листа на објавени трудови поврзани со докторската дисертација**

**Трудови во списанија:**

- [1] Biljana Stojkoska, Dimitar Solev, Danco Davcev, Variable Step Size LMS Algorithm for Data Prediction in Wireless Sensor Networks, *Sensors & Transducers Journal*, **14-2** (2012), 111-124.
- [2] Biljana Stojkoska, Danco Davcev, Trajkovik Vladimir, N-Queens based Algorithm for Moving Object Detection in Distributed Wireless Sensor Networks, *Journal of Computing and Information Technology (CIT)*, **16-4** (2008) 325 – 332.

**Трудови на конференции:**

- [3] Biljana Stojkoska, Danco Davcev, Distributed Decision Making in WSN using Fuzzy Logic Reasoning, submitted to Mobicase 2013, Paris, France, 2013.
- [4] Biljana Stojkoska, Danco Davcev, MDS-based Algorithm for Nodes Localization in 3D Surface Sensor Networks, in Proceedings of SENSORCOMM 2013, Barcelona, Spain, 2013.
- [5] Biljana Stojkoska, MDS-MAP Algorithm for Nodes Localization in 3D Wireless Sensor Networks, To appear in Proceedings of the 8th South East European Doctoral Student Conference, Thessaloniki, Greece, 2013
- [6] Biljana Stojkoska, Andrijana Popovska Avramova, Wireless Sensor Networks Framework for Indoor Temperature Regulation, To appear in Proceedings of the 8th South East European Doctoral Student Conference, Thessaloniki, Greece, 2013
- [7] Biljana Stojkoska, Improved MDS-based Algorithm for Nodes Localization in Wireless Sensor Networks, in Proceedings of IEEE EUROCON, Zagreb, 2013.
- [8] Biljana Stojkoska, Nodes Localization in 3D Wireless Sensor Networks, CIIT, Bitola, 2013.
- [9] Biljana Stojkoska, Kliment Mahoski, Comparison of different data prediction methods for Wireless Sensor Networks, CIIT, Bitola, 2013.
- [10] Biljana Stojkoska, Dimitar Solev, Danco Davcev, Data Prediction in WSN using Variable Step Size LMS Algorithm, IEEE SENSORCOMM 2011, August 21-27, Nice, France, pp. 191-196, 2011.
- [11] Biljana Stojkoska, Ilinka Ivanoska, Danco Davcev, Wireless Sensor Networks Localization Methods: Multidimensional Scaling vs. Semidefinite Programming Approach, ICT Innovations 2009, Springer- Verlag Berlin, Heidelberg, ISBN 978-3-642-10780-1, pp. 145- 155, 2010.
- [12] Biljana Stojkoska, Danco Davcev, Web interface for Habitat Monitoring using Wireless Sensor Network, In IEEE Digital Library and Proc. of the Fifth International Conference on Wireless and Mobile Communications, ICWMC 2009, August 23-30, Cannes, France, pp. 157-162, 2009.
- [13] Biljana Stojkoska, Danco Davcev, Trajkovik Vladimir, “N-Queens based Algorithm for Moving Object Detection in Distributed Wireless Sensor Networks” in Proceedings of the 30th International Conference on Information Technology Interfaces (ITI 2008), SRCE, IEEE, Dubrovnik, Croatia, pp. 899-904, 2008.

## Глава 2

# Локализација на јазли кај БСМ

### 2.1 Потреба од локализација кај БСМ

Кај повеќето БСМ апликации постои потреба од локализациски сервиси кои ја даваат позицијата (локацијата) на секој сензорски јазел. Информациите кои ги собираат сензорите најчесто се апсолутно незначајни ако не се знае од каде тие потекнуваат. Но сензорите сами по себе немаат податоци за својата физичка локација. Поседуваат само податоци за нивната релативна позиција во однос на другите јазли, односно знаат со кои јазли непосредно комуницираат. Затоа се потребни алгоритми кои врз основа на податоците за соседност може да конструираат мапа и визуелно да ја прикажат мрежата. Алгоритмите за локализација треба да ја предвидат локацијата на сите јазли од мрежата, притоа минимизирајќи ја грешката, т.е. растојанието помеѓу точната и предвидената позиција. Како дополнително ограничување, алгоритмите за локализација не смеат да бидат многу комплексни во смисла на потреба од пресметки и комуникација меѓу сензорите. Ова се должи на фактот што сензорските јазли се уреди со ограничени ресурси и доколку не се пристапи со голема претпазливост би дошло до намалување на животниот век на мрежата, а со тоа и до губење на нејзината функција.

Можеби наједноставен метод за одредување на локализацијата е секој сензорски јазел да се опреми со систем за глобално позиционирање (ГПС), под претпоставка дека сензорските јазли се распоредени на отворен терен каде е достапен ГПС сигналот. Сепак, опремувањето со ГПС приемници е скапо решение во однос на цената, големината и потрошувачката на енергија [2.1]-[2.3]. Друг недостаток на ова решение е тоа што сателитските сигнали не се достапни во затворени објекти. Друго алтернативно решение е да се изврши локализација при самата инсталација на сензорите од мрежата што подразбира мануелно бележење на позицијата на секој еден јазел. Но овој пристап е склон на грешки и несоодветен за мрежи составени од голем број јазли, какви што се најчесто повеќето од предложените БСМ апликации. Дополнително, кај апликации со

мобилни јазли иницијалната топологија станува невалидна и повторно е потребен алгоритам кој ќе ја открие новата распределба.

Најчеста алтернатива за локализација вклучува користење на ограничен број на јазли чија локација е однапред позната. Јазлите чија локација се знае а priori во литературата се познати и како јазли-котва или анхор јазли (anchor или beacon) и обично се опремени со ГПС приемници. Тука мора да нагласиме дека терминот анхор се користи кога јазелот е статичен, додека терминот бекон е присутен кога станува збор за јазел кој се движи. Анхор јазлите во принцип се помоќни од останатите јазли во мрежата, па поголемата потрошувачка на енергија поради ГПС приемниците не претставува проблем од енергетски аспект. Поради цената на овие јазли, се претпоставува дека тие треба да претставуваат мала порција од вкупниот број на јазли.

Анализа на алгоритмите за локализација и нивна класификација е дадена во [2.1]-[2.5]. Иако постојат повеќе таксономии на алгоритмите за локализација, сепак може да се издвојат неколку заеднички карактеристики според кои повеќето автори вршат класификација.

#### **2.1.1 Пресметувачки модел**

Во зависност од тоа кој го врши процесирањето на податоците и ја генерира мапата на БСМ, алгоритмите може да припаѓаат на една од следните три категории:

- Централизиран модел: сите мерења се собираат кај еден јазел (централна станица или синк) и тука се вршат сите пресметки. Добиените локации потоа се праќаат назад кон јазлите.
- Локално централизиран модел: комуникацијата е ограничена на јазли-соседи, така што мрежата е поделена на подмрежи, а за секоја подмрежа постои само еден јазел одговорен за процесирање и локализација на сите јазли од подмрежата. Овој модел може да се третира и како дистрибуиран модел.
- Целосно дистрибуиран модел: секој јазел е одговорен за одредување на својата локација врз основа на податоците кои ги знае за мрежата.

#### **2.1.2 Растојание помеѓу јазлите**

Во зависност од тоа дали е потребно да се знае растојанието помеѓу соседните јазли од мрежата, алгоритмите за локализација може да бидат:

- скок-базирани или хоп-базирани, кои во предвид го земаат само бројот на скокови помеѓу било кои два јазли во мрежата [2.6].
- опсег-базирани или методи базирани на растојание, кои го пресметуваат растојанието помеѓу јазлите во БСМ.

Кај безжичните сензорски мрежи, физичкото растојание помеѓу два јазли го определуваат самите јазли. Проценката на растојанието се врши со еден од следните методи, кои во литературата се познати и како техники на сигнализација [2.7]-[2.10]:

- Индикатор за јачина на примен сигнал (Received Signal Strength Indicator RSSI)
- Време на пристигнување на сигналот (Time of Arrival ToA)
- Временска разлика на пристигнување на сигналот (Time Difference of Arrival TDoA)
- Агол под кој пристигнува сигналот (Angle of Arrival AoA)

Првата техника во предвид ја зема јачината на сигналот кој пристигнал, претпоставувајќи дека јачината е обратно пропорционална со растојанието помеѓу предавателот и приемникот (каде предавател и приемник се два соседни јазли кои комуницираат). Ако е позната јачината на сигналот во моментот кога тој бил емитиран и ако таа се спореди со енергијата на сигналот на приемната страна, лесно може да се одреди растојанието помеѓу два соседни јазли во мрежата. Индикаторот за јачина на примен сигнал е релативно евтино решение бидејќи не бара дополнителен хардвер [2.7].

Кај втората и третата техника (ToA и TDoA) времето на пропација лесно може да се транслира во растојание доколку е позната брзината на пропација на сигналот [2.8][2.9]. Оваа техника може да се примени на различни сигнали, како RF, акустични, инфрацрвени и ултразвучни. Иако овие техники (ToA и TDoA) се подобри од првата, имаат и низа недостатоци. Бидејќи брзината на звукот во воздух варира во зависност од температурата и влажноста на воздухот, тоа влијае врз точноста на одредување на растојанието. Исто така, кога нема оптичка видливост помеѓу јазлите од мрежата, перформансите на овие две техники значително се намалуваат.

Последната техника (AoA) го наоѓа аголот под кој се прима сигналот и со користење на едноставни геометриски релации ја пресметува позицијата на јазелот. AoA бара дополнителен хардвер (антена со ултрасоничен приемник) и поради високата цена поретко се користи [2.10].

Важно е дека ниту една од овие техники во пракса не дава 100% точни резултати. Растојанието меѓу два соседни јазли одредено со некоја од гореспоменатите техники значително се разликува од точното растојание. Како најчести причини за овие отстапувања може да се неправилен радио опсег на сензорите поради анизотропен терен, но и други феномени како рефлексивност, дифракција, интерференција, постоењето на физички препреки, шум и сл. [2.11][2.12]. Моделот на радио пропација станува особено комплициран кога БСМ е инсталирана во затворен објект, па кај вакви мрежи треба во предвид да се земат и карактеристиките на околината. Методите за локализација на сензорски јазли во затворен објект се поделени на две основни групи [2.13]:

- Дедуктивни методи, кои во предвид ги земаат физичките карактеристики на пропацијата на сигналот. За да ја извршат локализацијата потребна им е мапа на објектот (сидови, мебел, врати и сл.), моделот на радио пропација и точната позиција на базните станици. Врз основа на овие податоци со помош на триангулација лесно може да се локализираат јазлите. Од техниките на сигнализација, овие методи најчесто користат AoA, ToA и TDoA.
- Индуктивни методи, кои се состојат од две фази. Во првата фаза се анализираат радио сигналите, се поврзуваат со некоја конкретна локација од затворениот објект и се складираат во база на податоци. Позната е и како тренинг фаза бидејќи системот учи да ја препознава јачината на сигналот и да ја поврзува со некоја локација. Оваа фаза има голема временска комплексност. Во втората фаза се врши позиционирањето: откако во системот ќе дојдат вредности за RSSI, се пребарува базата на податоци со цел измерените сигнали да се поврзат со најверојатната локација.

При избор на најсоодветен алгоритам, задолжително во предвид треба да се земат сите карактеристики на просторот каде се врши локализацијата. Ако во објектот има многу пречки и сидови, дедуктивните методи треба да се избегнуваат бидејќи тие го моделираат радио сигналот математички, а во реалноста моделот на пропација не важи идентично за сите јазли од мрежата и се менува со време. Од друга страна, ако објектот поседува повеќе базни станици распределени во широк отворен простор (ходници од трговски центар), индуктивните методи би довеле до зголемена потрошувачка поради тренинг фазата, а нема да доведат до некој значителен бенефит при локализацијата.

### 2.1.3 Мобилност на јазлите

Јазлите во една БСМ може да се статички или подвижни. Во поново време поактуелни стануваат мобилни сензорски мрежи. Со нивната експанзија се наметнува потребата од изнаоѓање на нови алгоритми за локализација на мобилни јазли. Самиот модел на мрежата е многу посложен кога има движење на јазлите. Досегашните истражување се базираат на методот на Монте Карло кој дава најдобри перформанси [2.14]-[2.17].

### 2.1.4 Потреба од анхор јазли

Ако алгоритмот за локализација врши позиционирање врз основа на локацијата на анхор јазлите, тогаш станува збор за анхор-базиран алгоритам. Постојат и алгоритми кои може да генерираат мапа на БСМ и без постоење на вакви јазли [2.18].

Ако самата апликација ги бара апсолутните локации на јазлите, тогаш потребен е минимален број анхор јазли опремени со ГПС за да се овозможи соодветно мапирање, т.е. минимум 3 јазли за да се локализира дводимензионална мрежа (2Д-БСМ), односно 4 анхор јазли кај тридимензионална мрежа (3Д-БСМ).

## 2.2 Локализација на јазли кај тридимензионална БСМ

Иако локализацијата на јазли кај БСМ како истражувачки предизвик е актуелна уште од самата појава на овие мрежи, локализацијата кај тридимензионални мрежи беше маргинализирана.

Еден од првите алгоритми кои ја истражуваат локализацијата кај комплексни тридимензионални терени е Landscape-3d [2.19]. Овој пристап претпоставува дека јазлите се расфрлани на произволен комплексен терен од авион. Како бекон јазел се користи локациски асистент (ЛА) кој може да претставува беспилотно летало. Секој јазел на земјата со помош на техниката RSSI ја мери својата оддалеченост од ЛА. Прибирајќи повеќе мерења за растојанието, секој јазел со помош на Калманов филтер се самолокализира.

Во [2.20] пристапот е идентичен, со таа разлика што за одредување на растојанието помеѓу беконот и јазелот на земјата се користи техниката ToA, додека за одредување на локацијата се применува латерација или Min-max техника.



Во [2.21] се користи мобилен бекон за одредување на растојанието, со тоа што се одредуваат четири растојанија помеѓу беконот и јазелот кој треба да се локализира. Потоа непознатиот јазел со овие четири растојанија ја одредува својата локација со техниката на мултидимензионално скалирање. Компарацијата на [2.21] со претходните два алгоритми ([2.19] и [2.20]) покажува дека [2.21] има помала временска комплексност и дава помала грешка на локализација.

Како предности на овие три алгоритми може да се издвојат:

- Нема јазел-до-јазел комуникација
- Не зависат од топологијата на мрежата
- Даваат задоволителна точност

Како недостаток на овие алгоритми [2.19]-[2.21] се смета зависноста од присуството на мобилен бекон кој не може да биде достапен во сите сценарија, на пример кога мрежата е поставена во непријателска околина.

Мобилен робот опремен со ГПС се користи во [2.22] како бекон јазел, додека растојанието помеѓу роботот и јазлите се одредува со помош на RSSI. Јазлите се локализираат со помош на рекурзивен Баесов филтер. За евалуација на овој алгоритам искористена е експериментална поставка составена од пет Mica2 јазли и три NERO автономни хеликоптери како мобилни работи.

Во [2.23] предложен е дистрибуиран алгоритам каде за локализација се користат три анхор јазли кои се статички и инсталирани на одредена висина над површината на земјата со цел да можат да комуницираат со што поголем број на јазли од мрежата. Дополнително, овие јазли имаат трансмисионен опсег многу поголем од оној на обичните јазли во мрежата. Јазлите сами ја одредуваат својата локација со помош на трилатерација.

Интересни алгоритми за локализација кај тридимензионална БСМ се среќаваат и во [2.24]-[2.26]. Во [2.27] анализиран е случај кога определен процент од анхор јазлите во мрежата даваат погрешни податоци за својата локација. Анализата е направена за изотропни и анизотропни мрежни топологии, при што се евалуирани повеќе алгоритми во услови на недоверливи анхор јазли. Предложен е нов робустен алгоритам за локализација кај вакви сценарија.

### 2.3 Мултидимензионално скалирање (МДС)

Мултидимензионално скалирање (МДС) претставува множество на аналитички техники популарни во дисциплини како економија, статистика и маркетинг. МДС претставува згоден метод за редукација на димензионалноста на податоците (објектите), со цел овие повеќедимензионални објекти да се претстават како точки во дводимензионален или тридимензионален простор [2.28][2.29] и полесно да се анализираат. МДС алгоритмот како влез ги користи растојанијата помеѓу сите објекти (најчесто се пресметуваат како Евклидови растојанија), а како излез генерира 2Д или 3Д точки. Тука може да се искористи аналогијата со јазлите кај една БСМ, каде користејќи ги техниките на сигнализација може да се апроксимира Евклидовото растојание помеѓу јазлите и да се прати како влез во МДС. Излезот од алгоритмот ќе ја даде мапата на БСМ во рамнина или простор. Алгоритмите од фамилијата на МДС ги користат растојанијата помеѓу сите парови јазли од мрежата, според тоа спаѓаат во групата методи базирани на растојание. Процесирањето е централизирано и најчесто се врши кај централната станица. Важна карактеристика на МДС е тоа што може да направи реконструкција на релативна мапа (концентрирана околу координатниот почеток) дури и кога во мрежата нема анхор јазли. Ако се дадени доволен број на анхор јазли, релативната мапа лесно може да се преслика во апсолутна користејќи линеарни трансформации [2.30]-[2.32].

Постојат повеќе верзии на МДС за локализација на јазли кај дводимензионална БСМ. Најпопуларен е МДС-МАПА предложен од Yi Shang и Wheeler Ruml [2.31]. Овој алгоритам, иако е еден од најстарите (2003 година), сè уште е атрактивен кај истражувачите, првенствено поради тоа што дава помала грешка споредено со други алгоритми, особено ако се применува на густе мрежи. Во литературата густината на мрежата се изразува како позитивен број кој го означува просечниот број на врски на еден јазел. Освен МДС-МАПА постојат и други пристапи кои се базираат на МДС, но повеќето од нив имаат поголема комплексност [2.33][2.34]. Еден таков пример е МДС-МАПА(П) [2.33], кој претставува дистрибуирана верзија на МДС-МАПА. Алгоритмот предложен во [2.33] е позгоден од МДС-МАПА кај мрежи со нерегуларни топологии, но потребно е процесирањето да се врши локално кај секој јазел. Кај МДС-МАПА(П), секој јазел пресметува локална мапа врз основа на податоците за растојание до своите соседи кои се оддалечени од него најмногу до два скока. Сите локални мапи на крај се фузираат

во една единствена релативна мапа, која лесно може да се трансформира во апсолутна мапа ако се присутни анхор јазли.

Еден различен пристап базиран на МДС-МАПА е даден во [2.35] и [2.36] и подетално разработен во [2.37]. Познат е како кластер-базиран пристап и претставува локално централизиран модел на пресметување на локациите. Тука мрежата е хиерархиски организирана и поделена на кластери. Секој кластер се состои од поголем број на соседни јазли групирани заедно. Во секој кластер еден јазел се бира за претставник на кластерот и се нарекува раководител на кластер кој е одговорен за локализација на јазлите во неговото соседство со МДС-МАПА. Бидејќи секој јазел-раководител генерира мапа во свој сопствен координатен систем, на крај се соединуваат сите координатни системи во еден. Со симулации потврдено е дека овој пристап дава помала грешка на локализација кај БСМ со неправилни топологии (мрежи со топологија во форма на буквата С, L, S и H) споредено со МДС-МАПА. Дополнително, комплексноста на овој пристап е значително помала споредено со МДС-МАПА и МДС-МАПА (II).

Како еден од најстарите алгоритми за локализација, МДС е сеуште популарен и актуелен. Во скоро сите истражувања се зема како референтен алгоритам, а главна причина за тоа е неговата голема точност во споредба со другите алгоритми. Во поново време се јавуваат и нови хибридни пристапи кои комбинираат различни техники со цел да добијат поголема точност [2.38][2.39]. Најчесто нивните пристапи користат комбинација од МДС- МАПА и трилатерација [2.40][2.41].

Можеби една од најзначајните карактеристики на МДС базираните алгоритми е нивната отпорност кон грешките кои ги даваат техниките за сигнализација. Во [2.42] дадено е опсежно истражување каде се тестирани шест методи базирани на растојание. Притоа во мрежата за одредување на растојанието помеѓу соседни јазли се користат емпириски добиени ултразвучни сигнали. Овие сигнали го евалуираат растојанието со определена грешка. Експерименталните резултати покажуваат дека мали варијации на оваа грешка може да доведат до голема грешка при одредување на локацијата на јазлите од БСМ. Ова наложува при евалуација на алгоритмите за локализација секогаш во предвид да се зема оваа грешка бидејќи некогаш и најточните алгоритми кои даваат одлични резултати при симулација може да се многу непредвидливи во реалност. Од

сите шест тестирани алгоритми, МДС-МАПА покажува најмала чувствителност кон грешката со која е одредено растојанието (оваа грешка е моделирана со пет различни модели).

Иако МДС-МАПА е најистражуван алгоритам за локализација кај БСМ, скоро сите алгоритми предложени во литературата кои се базираат на МДС-МАПА истражуваат дводимензионална мрежа. До сега многу малку внимание е посветено на можностите што ги даваат МДС техниките за локализација кај тридимензионални мрежи.

Во продолжение на оваа глава ќе биде анализиран МДС-МАПА кај дводимензионални и тридимензионални мрежи. Ќе биде опишан и евалуиран нов подобрен алгоритам базиран на МДС-МАПА кој врши модификација на начинот на кој се пресметува матрицата на растојанија со цел да ја намали грешката на одредување на најкратко растојание помеѓу несоседни јазли кај БСМ. За овој подобрен алгоритам за мултидимензионално скалирање во понатамошниот текст ќе биде користена скратеница ПМДС, додека во графициите при евалуација на перформансите ќе се користат скратениците IMDS за ПМДС и MDS-MAP за МДС-МАПА.

### 2.3.1 Мултидимензионално скалирање (МДС) кај 2Д-БСМ

Тука ќе се обидеме да ја елаборираме математичката позадина на техниката на МДС. Повеќе детали може да се најдат во [2.28][2.29]

Нека  $S_{nx2}$  е матрица со координатите  $x$  и  $y$  на  $n$  точки, а  $\Delta$  е матрица на Евклидовото растојание помеѓу тие точки.

$$\Delta^{(2)}(S) = \Delta^{(2)} = \begin{bmatrix} 0 & \Delta^{(2)}_{12} & \Delta^{(2)}_{13} & \dots & \Delta^{(2)}_{1n} \\ \Delta^{(2)}_{21} & 0 & \Delta^{(2)}_{23} & \dots & \Delta^{(2)}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta^{(2)}_{n1} & \Delta^{(2)}_{n2} & \Delta^{(2)}_{n3} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\Delta^{(2)}_{ij}(S) = \Delta^{(2)}_{ij} = \sum_{a=1}^2 (S_{ia} - S_{ja})^2 \quad (2.2)$$

Последниов израз може да се запише и како:

$$\Delta^{(2)}_{ij} = \sum_{a=1}^2 (S_{ia}^2 + S_{ja}^2 - 2S_{ia}S_{ja}) \quad (2.3)$$

Оваа равенка во матричен облик ќе биде:

$$\begin{aligned} \Delta^{(2)} = & \sum_{a=1}^2 \begin{bmatrix} S_{1a}^2 & S_{1a}^2 & \dots & S_{1a}^2 \\ S_{2a}^2 & S_{2a}^2 & \dots & S_{2a}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{na}^2 & S_{na}^2 & \dots & S_{na}^2 \end{bmatrix} + \sum_{a=1}^2 \begin{bmatrix} S_{1a}^2 & S_{2a}^2 & \dots & S_{na}^2 \\ S_{1a}^2 & S_{2a}^2 & \dots & S_{na}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{1a}^2 & S_{2a}^2 & \dots & S_{na}^2 \end{bmatrix} - \\ & - 2 \sum_{a=1}^2 \begin{bmatrix} S_{1a}S_{1a} & S_{1a}S_{2a} & \dots & S_{1a}S_{na} \\ S_{2a}S_{1a} & S_{2a}S_{2a} & \dots & S_{2a}S_{na} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{na}S_{1a} & S_{na}S_{2a} & \dots & S_{na}S_{na} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.4)$$

или

$$\Delta^{(2)} = c1' + 1c' - 2SS' \quad (2.5)$$

каде  $1$  е  $n \times 1$  вектор од единици,  $B=SS'$  е скаларен производ на матрицата  $S$ , додека  $c$  е вектор кој се состои од елементите кои припаѓаат на дијагоналата на  $B$ , т.е.

$$c = \sum_{a=1}^2 S^{(2)}_{ia}.$$

Ако оваа равенка се помножи со центрирачка матрица  $T$ ,

$$T = I - n^{-1}11' \quad (2.6)$$

тогаш се добива

$$\begin{aligned} T\Delta^{(2)}T &= T(c1' + 1c' - 2SS')T = Tc1'T + T1c'T - T2SS'T = Tc1'T + T1c'T - T(2B)T = \\ T\Delta^{(2)}T &= -T(2B)T \\ B &= -\frac{1}{2}T\Delta^{(2)}T \end{aligned} \quad (2.7)$$

Познато е дека секоја симетрична матрица може да се добие како производ на повеќе матрици. Бидејќи  $B$  е симетрична, таа може да се запише како:

$$B = Q\Lambda Q' = (Q\Lambda^{1/2})(Q\Lambda^{1/2})' = SS' \quad (2.8)$$

каде  $Q$  е ортонормална а  $\Lambda$  е дијагонална матрица.

$$S = Q\Lambda^{1/2} \quad (2.9)$$

Од последнава равенка јасно се гледа дека матрицата на координатите  $S$  може да се добие преку матриците  $Q$  и  $\Lambda$ , кои пак се добиваат од матрицата  $B$  која пак може да се добие како  $B = -\frac{1}{2}T\Delta^{(2)}T$ . Значи преку матрицата на растојанија може да се реконструираат координатите на точките.

Ова својство е всушност она што нам ни е потребно за да се реши проблемот на локализација на сензорски јазли. Имено, кај мрежите од сензорски јазли не се познати позициите на јазлите, но може да се одредат растојанијата помеѓу определен број на јазли со користење на некои од постоечките техники на сигнализација. На ваков начин може да се генерира матрица на растојанија. Со погоре презентираниот аналитички метод може да се реконструираат позициите и да се добие релативна мапа на јазлите. За да се добијат нивните апсолутни позиции кај дводимензионално позиционирање, потребни се барем три анхор јазли.

Овој алгоритам во литературата е познат како МДС-МАПА.

МДС-МАПА се состои од 3 чекори:

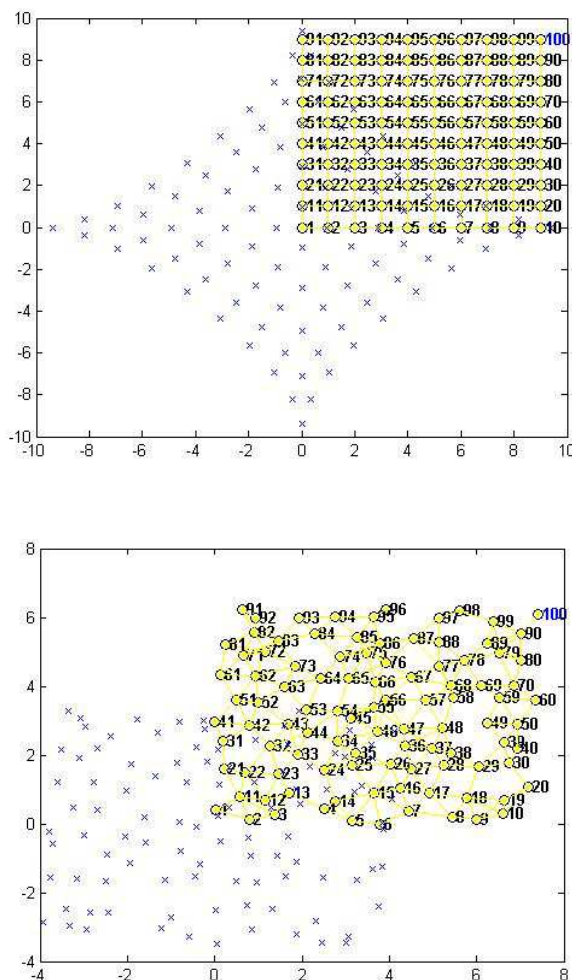
1. Пресметај ги најкратките растојанија помеѓу сите парови јазли во разгледуваниот регион. Пресметаните растојанија се користат за да се изгради матрица на растојанија за МДС.
2. Примени класичен метод на мултидимензионално скалирање врз матрицата на растојанија, задржувајќи ги првите две сопствени вредности и сопствени вектори за да се изгради 2Д релативна мапа.
3. Со доволен број на анхор јазли (минимум 3 за 2Д), трансформирај ја релативната мапа во апсолутна според координатите на анхор јазлите.

Тука важно е да се напомене дека мрежата (графот) мора да е поврзана. Ако ова не важи, не може да се добие матрица на растојанија, па не би постоел валиден влез за

чекор 2. Во тој случај, алгоритмот може да генерира релативна (и/или апсолутна) мапа само на оние јазли кои припаѓаат на поврзаните подграфови.

### Порамнување на координатите во 2Д

На слика 2.1 јасно се гледа како се позиционирани релативните позиции во однос на апсолутните, поточно, јазлите од релативната мапа секогаш се рамномерно дистрибуирани околу координатниот почеток.



**Слика 2.1. Релативни позиции на јазли распоредени во GRID (горе) и на произволни позиции (долу)**

За да се одредат точните позиции на јазлите од мрежата потребно е да се изврши порамнување на координатите. Постојат повеќе техники за порамнување на координати, а во продолжение ќе биде објаснета една од нив.

Порамнувањето обично вклучува шифтирање, ротација и рефлексија на релативните координатите  $R = Q\Lambda^{1/2} = [r_{ij}]_{2 \times n}$ . Нека вистинските координати се  $S = [s_{ij}]_{2 \times n}$ , и нека за јазлите 1, 2 и 3 од векторот  $S$  однапред се познати координатите  $x$  и  $y$ . Векторот  $R_i$  може да се шифтира на позиција  $R_i^{(1)}$  преку  $R_i^{(1)} = R_i + X$ , каде  $X = R_i - R_i^{(1)}$ .

$R_i$  може да се ротира спротивно од стрелките на часовникот за агол  $\alpha$  до  $R_i^{(2)} = Q_1 R_i$ , каде:

$$Q_1 = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Исто така може да се рефлектира преку права  $T = \begin{bmatrix} \cos(\beta/2) \\ \sin(\beta/2) \end{bmatrix}$  до  $R_i^{(3)} = Q_2 R_i$ , каде

$$Q_2 = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ \sin \beta & -\cos \beta \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Пред порамнувањето, познати се само позициите  $R$  и физичките локации на само три јазли  $S_1, S_2$  и  $S_3$ . Од овие податоци може да се пресметаат локациите на останатите јазли од мрежата:  $S_4, S_5, \dots, S_n$ . Врз основа на овие правила:

$$(S_1 - S_1, S_2 - S_2, S_3 - S_3) = Q_1 Q_2 (R_1 - R_1, R_2 - R_1, R_3 - R_1) \quad (2.12)$$

ако се познати  $S_1, S_2$  и  $S_3$ , може да се пресмета:

$$Q = Q_1 Q_2 = (R_1 - R_1, R_2 - R_1, R_3 - R_1) / (S_1 - S_1, S_2 - S_2, S_3 - S_3) \quad (2.13)$$

Потоа  $(S_4, S_5, \dots, S_n)$  може да се добие од

$$(S_4 - S_1, S_5 - S_1, \dots, S_n - S_3) = Q(R_4 - R_1, R_5 - R_1, \dots, R_n - R_1)$$

или

$$(S_4, S_5, \dots, S_n) = Q(R_4 - R_1, R_5 - R_1, \dots, R_n - R_1) + (S_1, S_1, \dots, S_1) \quad (2.14)$$



Со оваа трансформација на крај се добиваат апсолутните координати на јазлите од сензорската мрежа. Слична трансформација се применува и кога во мрежата се присутни повеќе анхор јазли.

Позициите на јазлите добиени со мултидимензионално скалирање нема да се сосема идентични со апсолутните позиции на јазлите. Ова е сосема очекувано ако се знае дека во презентираниот доказ матрицата на растојанија се состои од Евклидовите растојанија, а кај сензорските јазли не се познати и не постои начин да се добијат точните растојанија помеѓу сите јазли, туку само помеѓу оние јазли кои се во непосредна близина и може директно да комуницираат едни со други. Овој проблем се надминува така што Евклидовото растојание помеѓу два географски оддалечени јазли се апроксимира со најкраткото растојание добиено со алгоритам на Џикстра [2.43]. Алтернативно може да се искористи и алгоритмот на Флојд. Овој алгоритам лесно се применува ако мрежата се претстави како граф. На овој начин се генерира матрицата на растојанија.

Тука важно е да се напомене дека и во случаите кога јазлите се директни соседи (може да разменуваат податоци бидејќи се во непосредна близина), растојанието кое ќе го одредат со некоја од техниките на сигнализација не е точното Евклидово растојание, туку содржи одредена грешка која може да се должи на повеќе фактори, како несовершенство на мерните уреди, присуство на шум кај сигналот, атмосферски влијанија и сл. Оваа грешка при одредување на растојанието помеѓу соседните јазли понатаму се акумулира и во матрицата на растојанија и дополнително придонесува за грешки во предикцијата како на релативните, така и на апсолутните позиции.

### **Временска комплексност на МДС-МАПА за 2Д-БСМ**

Нека е дадена БСМ со  $n$  сензорски јазли и  $N$  анхор јазли.

Во првиот чекор, за познати растојанија помеѓу два соседни јазли, се применува класичен алгоритам за најкратка патека помеѓу јазли од граф, како Џикстра или Флојд, чија временска комплексност е  $O(n^3)$  [2.43].

Во вториот чекор, се применува МДС директно на матрицата на растојанија. Главната операција во МДС е декомпозиција на сингуларни вредности (ДСВ), со комплексност  $O(n^3)$ . Резултатот од МДС е релативна мапа која ја дава локацијата на секој јазел. Овие локации може да бидат доволно прецизни една во однос на друга.

Во третиот чекор, релативната мапа се трансформира во апсолутна со помош на линеарни трансформации. Целта е да се минимизира сумата на квадратите на грешките помеѓу точните позиции на анхор јазлите и нивните трансформирани позиции со МДС. Пресметувањето на трансформационите параметри има комплексност  $O(N^2)$ , каде  $N$  е бројот на анхор јазли. Откако ќе се пресмета трансформацијата, истата треба да се примени за секој јазел одделно. Оваа операција има комплексност  $O(n)$ , или поточно  $O(n \cdot N)$ .

### 2.3.2 Мултидимензионално скалирање (МДС) кај 3Д-БСМ

Математичката позадина за мултидимензионалното скалирање кај 3Д мрежи е сосема идентична како за 2Д мрежи [2.28][2.29].

Нека е дадена БСМ со  $n$  јазли распределени во простор. Нека  $S_{n \times 3}$  е непознатата матрица со координатите на јазлите од таа мрежа ( $x$ ,  $y$  и  $z$ ), каде  $i$ -тата редица ги претставува трите координати на  $i$ -тиот јазел од мрежата. Нека  $\Delta^{(2)}(S)$  (или само  $\Delta^{(2)}$ ) претставува матрица од квадратите на Евклидовите растојанија меѓу  $i$ -тиот и  $j$ -тиот јазел од мрежата ( $i=1..n, j=1..n$ ). Матрицата  $\Delta^{(2)}$  може да се пресмета ако се претпостави дека јазлите имаат механизми со кои би го одредиле меѓусебното растојание.

$$\Delta^{(2)}(S) = \Delta^{(2)} = \begin{bmatrix} 0 & \Delta^{(2)}_{12} & \Delta^{(2)}_{13} & \dots & \Delta^{(2)}_{1n} \\ \Delta^{(2)}_{21} & 0 & \Delta^{(2)}_{23} & \dots & \Delta^{(2)}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta^{(2)}_{n1} & \Delta^{(2)}_{n2} & \Delta^{(2)}_{n3} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

каде

$$\Delta^{(2)}_{ij}(S) = \Delta^{(2)}_{ij} = \sum_{a=1}^3 (s_{ia} - s_{ja})^2 \quad (2.15)$$

Последното може да се запише како:

$$\Delta^{(2)}_{ij} = \sum_{a=1}^3 (s_{ia}^2 + s_{ja}^2 - 2s_{ia}s_{ja}) \quad (2.16)$$

или

$$\Delta^{(2)} = c1' + 1c' - 2SS' \quad (2.5)$$

каде,  $1$  е  $n \times 1$  вектор од единици, а  $c = \sum_{a=1}^3 s_{ia}^2$  е вектор кој се состои од дијагоналните елементи на матрицата добиена како производ  $SS'$ .

Ако двете страни на претходната равенка (2.5) се помножат со центрирачка матрица

$$T = I - n^{-1}11', \quad (2.6)$$

каде  $I$  е единична матрица, ќе се добие:

$$\begin{aligned} T\Delta^{(2)}T &= T(c1' + 1c' - 2SS')T \\ T\Delta^{(2)}T &= Tc1'T + T1c'T - T2SS'T \\ T\Delta^{(2)}T &= Tc1'T + T1c'T - T(2B)T \\ T\Delta^{(2)}T &= -T(2B)T \\ B &= -\frac{1}{2}T\Delta^{(2)}T \end{aligned} \quad (2.7)$$

За симетричната матрица  $B$  важи:

$$B = Q\Lambda Q' = (Q\Lambda^{1/2})(Q\Lambda^{1/2})' = SS' \quad (2.8)$$

па се добива

$$\Rightarrow S = Q\Lambda^{1/2} \quad (2.9)$$

каде  $Q$  е ортонормална, а  $\Lambda$  дијагонална матрица.

Реконструираната матрица  $S$  ги претставува координатите на јазлите од мрежата, но во друг, ротиран координатен систем. За да се одредат апсолутните позиции, треба да се изврши ротација и транслација на релативните позиции.

МДС-МАПА за 3Д-БСМ се состои од 3 чекори:

1. Пресметај го најкраткото растојание помеѓу секој пар на јазли (со употреба на алгоритмите на Џикстра или Флојд [2.43]). Оваа матрица на растојанија е влез за следниот чекор.

2. Примени мултидимензионално скалирање (класично или друг тип) на матрицата на растојанија. Првите три најголеми сопствени вредности и сопствени вектори на матрицата на растојанија ќе ја дадат релативната мапа со релативните локации за секој јазел поединечно.
3. Ако се дадени доволен број анхор јазли (минимум 4), трансформирај ја релативната мапа во апсолутна.

### **Порамнување на координатите во 3Д (Наоѓање на оптималната ротација и translација)**

Нека  $N$  е бројот на анхор јазли во една БСМ, и нека  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$  е множество кое ги содржи релативните позиции на анхор јазлите, додека  $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_N\}$  е множество кое ги содржи соодветните апсолутни позиции. Потребно е да се најде трансформација која оптимално ќе ги порамни (мапира) двете кореспондирачки множества од аспект на квадратна грешка, т.е. потребно е да се минимизира сумата на квадратите на грешките помеѓу предвидените позиции на анхор јазлите од МДС мапата и нивните вистински позиции. Притоа треба да се одреди ротациона матрица  $\mathbf{R}$  и вектор на translација  $\mathbf{t}$  такви што

$$(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \underset{\mathbf{R}, \mathbf{t}}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=1}^N \|(R p_i + \mathbf{t}) - q_i\|^2, \quad (2.17)$$

Оваа трансформација е позната и како Евклидова или ригидна трансформација, бидејќи ги запазува формата и големината.

Во литературата се предложени многу алгоритми кои пресметуваат ригидна 3Д трансформација. Најистражуваните и најпопуларните се базираат на:

- Декомпозиција на сингуларни вредности (ДСВ),
- Унитарен кватернион (UQ)
- Двоен кватернион (DQ)
- Ортонормални матрици (ОМ)

Детална компарација на овие четири методи е извршена во [2.44]. Показано е дека резултатите од овие четири методи се слични во повеќето случаи и разликата во

точноста на порамнување е скоро незначајна, но методот со декомпозиција на сингуларни вредности (ДСВ) докажано е дека е најстабилен.

НАОЃАЊЕТО на оптимална ригидна трансформација со методот со декомпозиција на сингуларни вредности (ДСВ) се состои од следните чекори:

1. Пресметај ги медијаните на двете множества

$$\bar{p} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i, \quad \bar{q} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N q_i, \quad (2.18)$$

2. Пресметај ги векторите

$$p_i' := p_i - \bar{p}, \quad q_i' := q_i - \bar{q}, \quad i=1, \dots, N \quad (2.19)$$

3. Пресметај ја матрицата на коваријанси со димензии 3x3

$$H = P' Q'^T, \quad (2.20)$$

каде P' и Q' се матрици со димензии 3xN, чии колони се  $p_i'$  и  $q_i'$  соодветно.

4. Најди декомпозиција на сингуларни вредности

$$H = U \Sigma V^T, \quad (2.21)$$

Потребната ротација може да се добие како

$$R = V U^T, \quad (2.22)$$

5. Пресметај ја оптималната трансформација

$$t = \bar{q} - R \bar{p}, \quad (2.23)$$

### **Временска комплексност на МДС-МАПА за 3Д-БСМ**

За наоѓање на матрицата на растојанија со користење на алгоритмите на Џикстра или Флојд во чекор 1 потребно е  $O(n^3)$ , каде n е бројот на јазли во мрежата [2.43]. Во чекор 2, поради декомпозицијата на сингуларни вредности комплексноста на мултидимензионалното скалирање е  $O(n^3)$ . Во чекор 3, релативната мапа се трансформира во апсолутна со линеарни трансформации. Пресметувањето на ригидна

трансформација одзема време  $O(N)$  за пресметка на  $P$  и  $Q$ , додека пресметувањето на ДСВ одзема само  $O(3^3)$  време (бидејќи матрицата на коваријанси  $H$  е со димензии  $3 \times 3$ ). Пресликувањето (ротација и транслација) треба да се примени на секој јазел од мрежата и одзема  $O(n-N)$  време, каде  $N$  е бројот на анхор јазли ( $N \ll n$ ).

### 2.3.3 Подобрено мултидимензионално скалирање за локализација на јазли (ПМДС)

Во оваа докторска дисертација предложен е нов подобрен алгоритам за локализација на јазли кај БСМ базиран на мултидимензионално скалирање. Во понатамошниот текст ќе се користи скратеницата ПМДС за новопредложениот алгоритам.

Иако МДС-МАПА е доста точен алгоритам за предикција на позицијата на јазлите и по својата точност надминува голем број други алгоритми, има и свои недостатоци. Бидејќи растојанието меѓу два несоседни јазли се заменува со најкратко растојание меѓу два јазли во граф, оваа апроксимација некогаш доведува до многу лоша предикција, особено ако растојанието пресметано според алгоритмот на Џикстра (Флојд) значително се разликува од Евклидовото растојание [2.43]. Ова отстапување е поголемо ако јазлите меѓусебно комуницираат преку повеќе скокови, или ако растојанието меѓу соседните јазли е одредено со голема грешка.

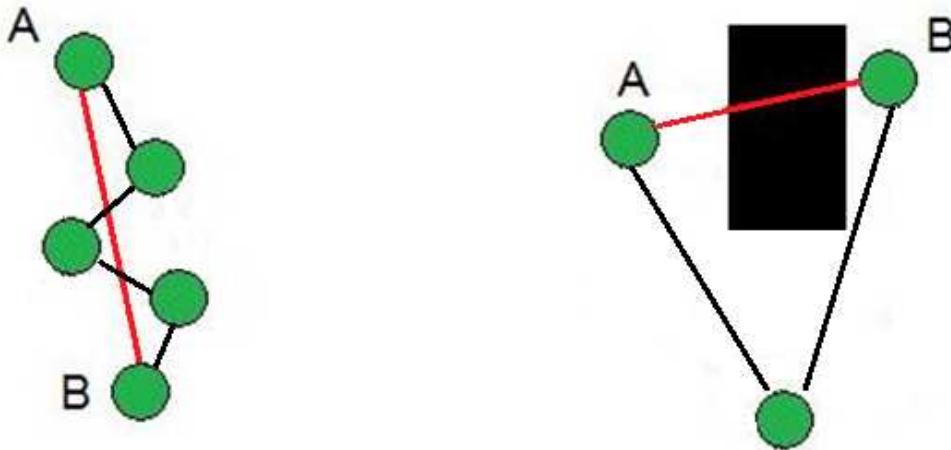
Ваков проблем најчесто може да се јави во два случаи:

- кај мрежи кај кои радио опсегот е краток и многу мал број на јазли од мрежата комуницираат директно.
- кај мрежи каде има пречки кои ја попречуваат комуникацијата меѓу јазлите, т.е., кога два јазли кои се географски блиску еден до друг не може директно да комуницираат поради постоење на објекти кои ги попречуваат радио брановите.

Овие два случаи се илустрирани на сликата 2.2.

Имено, Евклидовото растојание помеѓу јазлите  $A$  и  $B$  и во двата случаи многу отстапува од најкраткото растојание пресметано со алгоритмот на Џикстра (Флојд) [2.43]. Ова отстапување доведува до голема грешка во конечното позиционирање на јазлите.

Во првиот случај, илустриран на слика 2.2 лево, отстапувањето се должи на краткиот радио опсег поради што јазлите меѓусебно мора да комуницираат преку повеќе скокови. Во вториот случај (слика 2.2 десно), поради постоење на пречка, јазлите А и В не може непосредно да комуницираат иако се наоѓаат во радио опсег.



**Слика 2.2. Комуникација меѓу јазли кај мрежа без пречки (лево) и кај мрежа со пречки (десно)**

Со цел да се редуцира грешката кај алгоритмот за наоѓање на најкратко растојание меѓу два јазли во граф, во оваа дисертација беше развиен и анализиран нов алтернативен хеуристички алгоритам за пресметување на најкратко растојание меѓу два несоседни јазли во мрежа. Ако овој пристап се примени кај МДС-МАПА, се добива подобриот алгоритам базиран на мултидимензионално скалирање (ПМДС) за локализација на јазли кај БСМ.

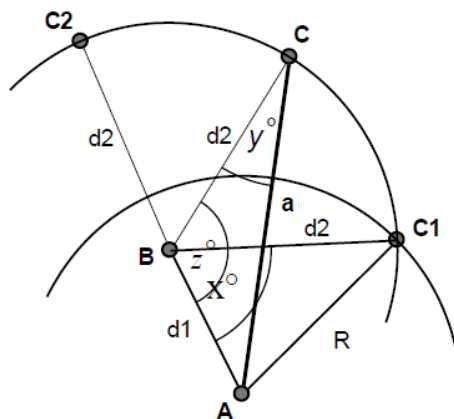
Разликата помеѓу МДС-МАПА и ПМДС е во чекор 1, односно во начинот на кој се пресметува најкраткото растојание помеѓу јазлите од мрежата. Имено, во МДС-МАПА во чекор 1 се користи алгоритмот на Џикстра, додека во ПМДС се користи новиот хеуристички алгоритам.

### **Хеуристички алгоритам за пресметување на матрицата на растојанија кај БСМ (ЕАМР)**

Во продолжение ќе биде дадено математичко објаснување за оправданоста на употребата на алтернативен пристап за одредување на растојание помеѓу јазлите од мрежата, кој се разликува од традиционалниот пристап базиран на алгоритмот на Џикстра [2.43].

Нека се дадени три јазли во една мрежа (A, B и C), така што се познати растојанијата помеѓу јазлите A и B ( $d_1=AB$ ), и помеѓу јазлите B и C ( $d_2=BC$ ). За да се конструира матрицата на растојанија за оваа мрежа, треба да се одреди растојанието помеѓу јазлите A и C (слика 2.3).

Ако максималниот радио опсег на јазлите од оваа мрежа е R, тогаш со сигурност се знае дека јазелот C лежи на кривата  $C_1C_2$ . Кога би се искористил алгоритмот на Џикстра за пресметување на растојание помеѓу два јазли во граф, би се добило растојание  $AC=AB+BC$ , што всушност претставува најдолгото можно растојание помеѓу јазлите A и C. Од друга страна, најкраткото можно растојание помеѓу овие два јазли би се добило кога точката C се совпаѓа со точката  $C_1$ , т.е.  $AC=R$ .



Слика 2.3. Апроксимација на растојание

Со цел да се минимизира грешката при апроксимација на растојанието со алгоритмот на Џикстра, се предлага хеуристичко решение според кое се избира точката C да лежи точно на средина на лакот  $C_1C_2$ . Според тоа, растојанието  $a=AC$  може да се одреди со користење на косинусна формула:

$$a^2 = d_1^2 + d_2^2 - 2 \cdot d_1 \cdot d_2 \cdot \cos(\sphericalangle ABC) \quad (2.24)$$

За да се пресмета растојанието  $a$  најпрво мора да се одреди аголот  $\sphericalangle ABC$ .

$$\sphericalangle ABC = \sphericalangle ABC_1 + \sphericalangle C_1BC \quad (2.25)$$



Аголот  $\sphericalangle ABC_1$  може да се пресмета со користење на косинусна формула:

$$\sphericalangle ABC_1 = \arccos\left(\frac{d_1^2 + d_2^2 - R^2}{2 \cdot d_1 \cdot d_2}\right) \quad (2.26)$$

Бидејќи

$$\sphericalangle C_1BC = \sphericalangle C BC_2, \quad (2.27)$$

$$\sphericalangle C_1BC = \frac{1}{2} \sphericalangle C_1BC_2 \quad (2.28)$$

$$\sphericalangle C_1BC = \frac{1}{2} (\pi - \sphericalangle ABC_1) \quad (2.29)$$

$$\sphericalangle ABC = \sphericalangle ABC_1 + \frac{1}{2} (\pi - \sphericalangle ABC_1) \quad (2.30)$$

$$\sphericalangle ABC = \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \sphericalangle ABC_1 \quad (2.31)$$

Конечно,

$$a^2 = d_1^2 + d_2^2 - 2 \cdot d_1 \cdot d_2 \cdot \cos(\sphericalangle ABC) = \quad (2.24)$$

$$\begin{aligned} &= d_1^2 + d_2^2 - 2 \cdot d_1 \cdot d_2 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \sphericalangle ABC_1\right) = \\ &= d_1^2 + d_2^2 + 2 \cdot d_1 \cdot d_2 \cdot \sin\left(\frac{1}{2} \sphericalangle ABC_1\right), \end{aligned} \quad (2.32)$$

каде

$$\sphericalangle ABC_1 = \arccos\left(\frac{d_1^2 + d_2^2 - R^2}{2 \cdot d_1 \cdot d_2}\right) \quad (2.26)$$

Овој хеуристички алгоритам за пресметување на растојанието (EAMP) помеѓу јазлите од мрежата се применува за било кои два несоседни јазли, без разлика дали меѓу нив има два или повеќе скокови.

Ако оваа модификација при пресметката на матрицата на растојанија се примени кај алгоритмот за мултидимензионално скалирање, се добива подобрен алгоритам (ПМДС) за предикција на јазли кај БСМ. Тука мора да се напомене дека промена има само во чекор 1, додека останатите два чекори се сосема идентични. Според тоа, кај ПМДС задржана е временската комплексност на основниот алгоритам базиран на мултидимензионално скалирање.

### Евалуација на EAMP

Со цел да се евалуира EAMP, извршени се симулации во Матлаб. Имено, за тридимензионални мрежи каде 100 јазли се произволно расфрлани во коцка со димензии  $r \times r \times r$  ( $r$  е единечна должина), пресметано е колку растојанието меѓу јазлите од мрежата добиено со EAMP алгоритмот и со алгоритмот на Цикстра отстапува од вистинското, Евклидово растојание. Резултатите се усреднети за сите јазли од мрежата и нормализирани според радио опсегот  $R$ :

$$Error = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (S_{ij}^{estimated} - S_{ij}^{euclidean})}{n \cdot R} \cdot 100\% \quad (2.33)$$

каде  $S_{ij}$  претставува растојание меѓу јазлите  $i$  и  $j$ ,  $n$  е бројот на јазли во мрежата, а  $R$  е радио опсегот.

Симулацијата е направена за различен радио опсег  $R$ . Со менување на радио опсегот се менува и просечниот број на соседи на јазлите од мрежата, или параметар познат како поврзаност на графот (мрежата). Во табелата 2.1 дадени се вредностите за овој параметар:

**Табела 2.1. Зависност помеѓу радио опсегот и поврзаноста на мрежата**

радио опсег $R$	0.35r	0.36r	0.38r	0.4r	0.45r	0.5r	0.55r
поврзаност	11.57	12.5444	14.066	15.9356	21.796	27.256	33.762

Поврзаноста на мрежата како и другите резултати добиени се како средна вредност од 20 симулации. Просечната поврзаност на графот е добиена како:

$$k=(vkupen\_broj\_vrski*2)/vkupen\_broj\_jazli \quad (2.34)$$

Бројот на врски се множи со 2 бидејќи мрежата може да се разгледува како ненасочен граф кај кој една врска припаѓа на два јазли. Поврзаноста на графот е правопрпорционална со опсегот на комуникација. За  $R=0.35r$  се добива просечна поврзаност од 11.57, додека за  $R=0.4r$  таа изнесува 15.9356.

Исто така, при моделирањето на мрежата земено е во предвид дека одредувањето на растојанието помеѓу соседните јазли од мрежата не е апсолутно точно, бидејќи во реалноста не е возможно да се одреди точното растојание со постоечките техники на сигнализација. Затоа, ако точното Евклидово растојание меѓу два соседни јазли е  $d$ , во симулациите се додава Гаусов шум, т.е., измереното растојание  $D$  се добива како:

$$D = d \times (1 + N(0, \epsilon_r)) \quad (2.35)$$

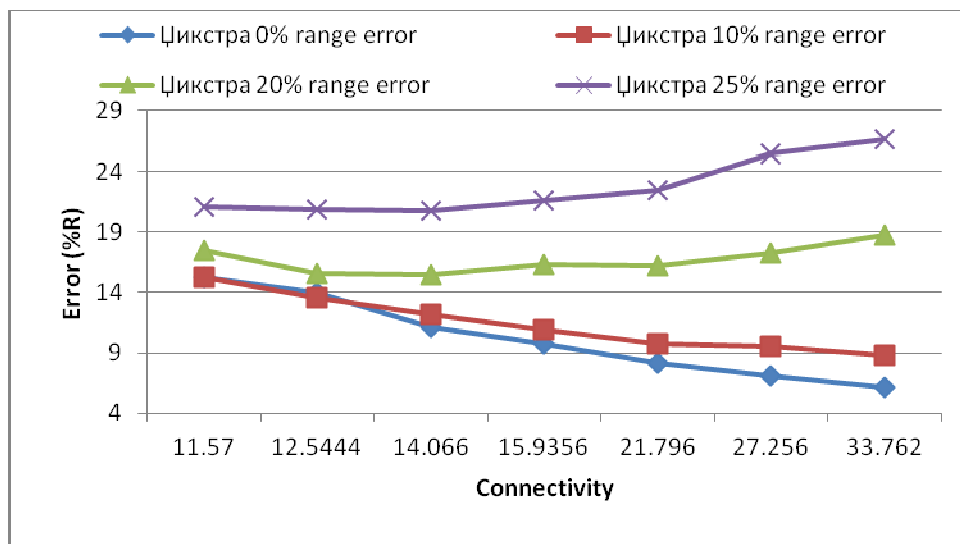
каде  $N(0, \epsilon_r)$  е нормална дистрибуција со математичко очекување 0, а  $\epsilon_r$  е грешката присутна при мерење на растојанието. Извршени се симулации за различни вредности на  $\epsilon_r$ , т.е. за  $\epsilon_r$  од  $0\%R$  до  $30\%R$  со чекор  $5\%R$ .

Како што се гледа од сликите 2.4 и 2.5, EAMP е значително постабилен во споредба со алгоритмот на Џикстра. Имено, кај Џикстра грешката во матрицата на растојанија кога  $\epsilon_r$  е мало зависи обратнопрпорционално од  $R$ , но кога  $\epsilon_r$  е поголемо, грешката е практично константна (слика 2.4). Од друга страна, кога матрицата на растојанија е добиена со EAMP, дури и за големо  $\epsilon_r$ , грешката е обратнопрпорционална од  $R$  (слика 2.5).

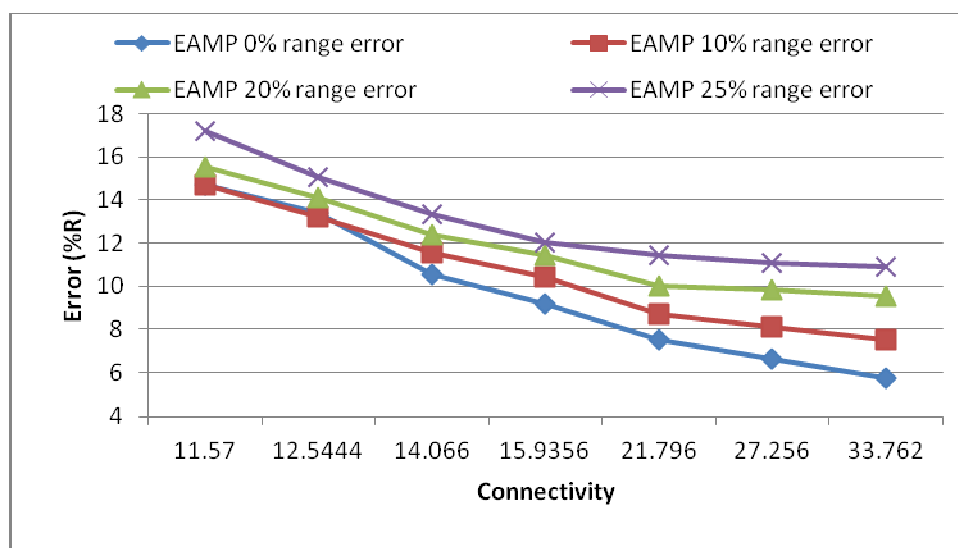
Резултатите се очекувани ако се земе во предвид дека Џикстра го пресметува најдолгото можно теоретско растојание, а EAMP има тенденција да го намали ова растојание.

На следните две слики дадени се графици на кои е направена директна споредба на резултатите од двата алгоритми. Како што се гледа, кога  $\epsilon_r$  е мало ( $0\%R$  и  $10\%R$ ) и двата алгоритми продуцираат грешка која има константна разлика (слика 2.6), но во

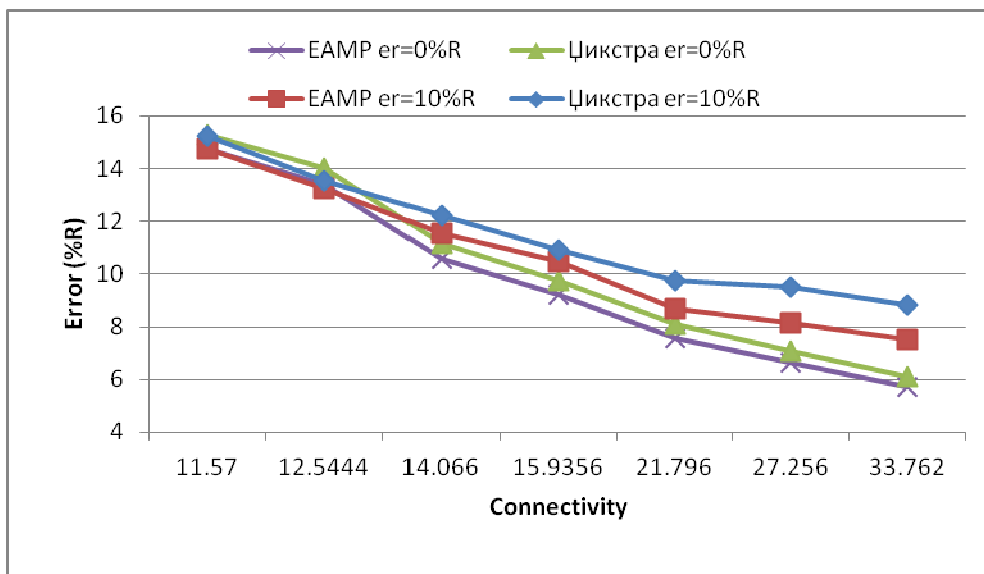
блага корист на EAMP. Кога  $er$  е поголемо (20%R и 25%R), а особено за големо R, EAMP е далеку подобар од Цикстра (слика 2.7).



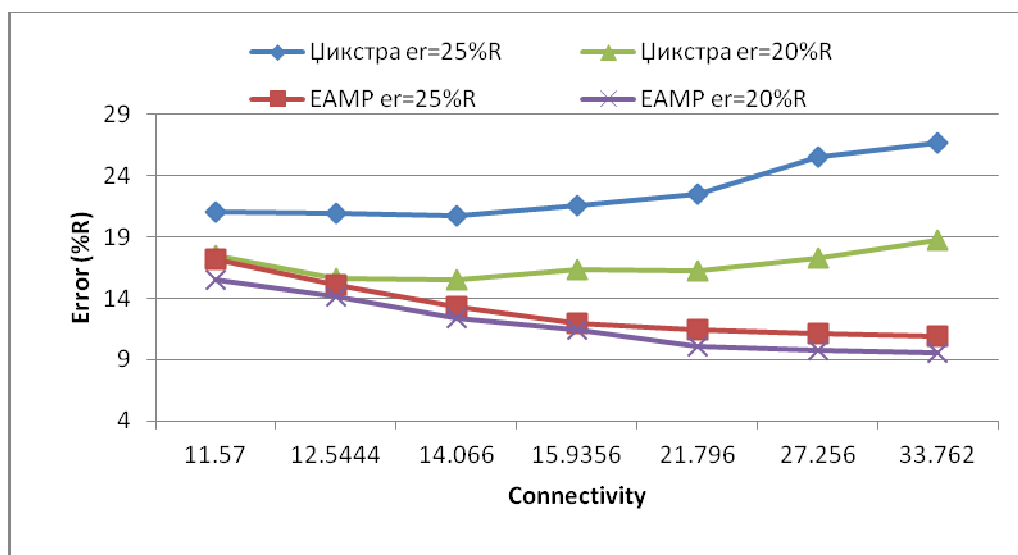
Слика 2.4. Грешка кај матрицата на растојанија генерирана со алгоритмот на Цикстра



Слика 2.5. Грешка кај матрицата на растојанија генерирана со EAMP



Слика 2.6. Споредба на грешките кај матриците на растојанија генерирани со Цикстра и ЕАМР за  $er=0\%R$  и  $er=10\%R$



Слика 2.7. Споредба на грешките кај матриците на растојанија генерирани со Цикстра и ЕАМР за  $er=20\%R$  и  $er=25\%R$

Резултатите добиени од симулациите ја потврдуваат оправданоста на користење на ЕАМР пред Цикстра при одредување на растојание меѓу јазли кај БСМ. Прв аргумент во прилог е сличната комплексност на двата алгоритми. Но многу позначајно е тоа што ЕАМР продуцира далеку помала грешка од Цикстра кога  $er$  е поголемо од  $10\%R$ , што во реалноста е случај.

Ако претпоставиме дека како техника за одредување на растојание меѓу два јазли се користи RSSI, тогаш со сигурност може да кажеме дека отстапувањето од вистинското растојание е во најмала рака поголемо од  $10\%R$ . Во прилог на ова тврдење ќе ја споменеме анализата од [2.45]. Имено, извршени се мерења на грешката која ја продуцира RSSI и резултатите од овие мерења се дадени во табелата 2.2:

**Табела 2.2. Споредба на различни RSSI техники за одредување на растојание [2.45]**

distance model	0~10m	10~20m	20~30m	30~40m
	error (m)	error(m)	error(m)	error (m)
SMVM	2.22	3.24	6.73	12.685
DBFM	1.16	2.485	5.23	9.946
GM	0.6086	1.964	3.618	6.984

Во ова истражување [2.45] искористени се експериментални мерења добиени со ZigBee хардверска платформа додека параметрите се во согласност со стандардот IEEE 802.15.4 [2.46]. Податоците се процесирани во Матлаб со цел јачината на примениот сигнал да се конвертира во апсолутна должина на растојание помеѓу предавателот и приемникот. Притоа користени се три различни техники:

- статистички модел на средна вредност (statistical mean value model SMVM)
- модел на растојание меѓу фиксни јазли (distance between the fixed-nodes-based model DBFM)
- Гаусов модел (Gaussian model GM)

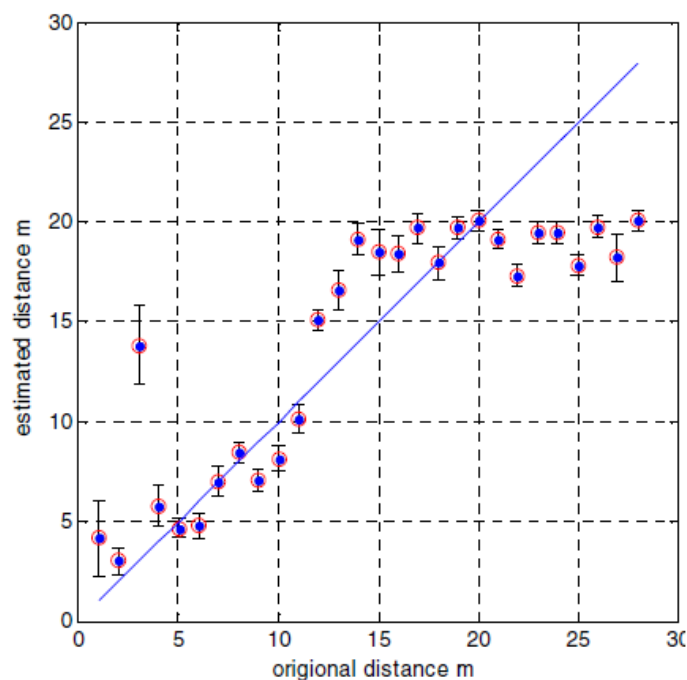
Како што се гледа од резултатите, најмала грешка се добива со користење на Гаусовиот модел како техника за обработка на сигналите. Кога растојанието меѓу јазлите е мало (10m) имаме 6% грешка, додека за растојание 40m грешката на овој модел е скоро 7m што претставува 17.5%. Бидејќи кај BCM како стандард за комуникација помеѓу јазлите веќе се наметна ZigBee со предефиниран радио опсег R во интервал од 70m-300m [2.47], очекувано е грешката да се зголемува кај поголемо R и да биде поголема од 17.5%.

Освен техниките евалуирани во [2.45] за одредување на растојание со RSSI постојат и други, како на пример линеарна регресија или вештачки невронски мрежи [2.48]. Во [2.48] направена е компарација на овие две техники и покажано е дека методот со користење на вештачки невронски мрежи дава за нијанса помала грешка при локализација со трилатерација (21.9%) во споредба со методот со линеарна

регресија кој продуцира 25.2% грешка. Мерењата се направени кај јазли распределени на површина 5m x 5m.

Слично истражување е презентирано во [2.49] и добиените резултати за растојанијата помеѓу јазли од 0-30m дадени се на слика 2.8. Јасно се гледа дека за растојанија од околу 25m RSSI естимира растојанија од околу 20m, што претставува 20% грешка, додека кај поголеми растојанија грешката е поголема.

Постојат и други истражувања кои ја анализираат грешката со која RSSI го одредува растојанието, но повеќето се фокусирани на BCM инсталирана во затворени (indoor) објекти [2.47][2.48][2.50][2.51] и тестирана е комуникација на пократки растојанија (<20m) [2.48][2.50][2.52][2.53]. Интересно е што постојат значително спротивставени ставови за оправданоста на употребата на RSSI за одредување на растојание помеѓу јазли кај BCM [2.54]. Во [2.55] експериментално е потврдено дека RSSI не може да се користи како метрика за мерење на растојание кај алгоритмите за локализација на BCM. Од друга страна, гореспоменатите трудови каде експерименталните резултати покажуваат грешка до 20% може да го потврдат спротивното. Во [2.54] во прилог на употребата на RSSI се наведуваат лошо калибрираните мерни уреди кои продуцираат грешка и доведуваат до заблуда дека RSSI е лош предиктор на растојание.



Слика 2.8. Точно и пресметано растојание помеѓу јазли со RSSI [2.49]

## 2.4 Евалуација на ПМДС

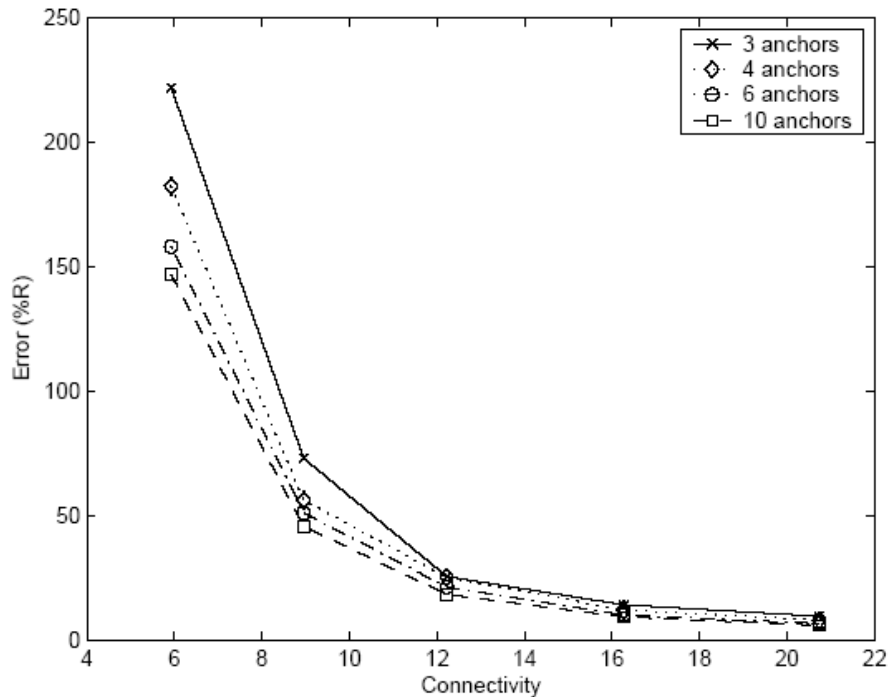
Перформансите на алгоритмите за локализација кај БСМ зависат од повеќе параметри кои ја опишуваат самата мрежа, како што се: топологијата на мрежата, бројот на анхор јазли (т.е. соодносот меѓу анхор јазли и обични јазли), радио опсегот  $R$ , густината на јазлите итн. Оттука, грешката на позиционирање мора да се евалуира како функција од повеќе различни параметри.

Најважен фактор од кој зависи точноста на алгоритмите за локализација е густината на мрежата. Оваа карактеристика на мрежата се сретнува и како поврзаност на мрежата. Густината на мрежата не зависи само од бројот на јазли на дадена површина, туку и од должината на радио опсегот. За мрежи со поголема поврзаност алгоритмите продуцираат помала грешка. Друг фактор е топологијата на мрежата. Тука може да се разгледуваат две основни поделби. Според првата, топологијата на мрежата може да биде GRID базирана или топологија на случајно расфрлани јазли. Во општ случај, алгоритмите за локализација даваат подобри резултати кај GRID базираната топологија, иако поврзаноста на оваа мрежа е значително помала од поврзаноста кај мрежа со униформна дистрибуција. Според една друга поделба, мрежите може да имаат регуларна топологија или топологија со пречки. Ако во мрежата има пречки кои го попречуваат сигналот и оневозможуваат јазли во непосредна близина да комуницираат помеѓу себе, тогаш централизираните алгоритми даваат многу голема грешка и се практично неупотребливи за адекватна локализација. Во вакви случаи, предност имаат алгоритмите базирани на кластери, каде локализацијата се врши парцијално и на крај резултатите се фузираат во единствена мапа.

Кога вршиме апсолутно позиционирање на мрежата, потребни се определен минимален број на анхор јазли со чија помош може да се генерира трансформациона матрица. Колку бројот на анхор јазли е поголем, толку алгоритмите поточно ќе ги порамнат (мапираат) останатите јазли од мрежата. Зависноста на грешката на локализација од бројот на анхор јазли јасно се гледа на слика 2.9.

Евалуацијата на ПМДС е извршена во однос на сите гореспоменати мрежни параметри и направена е компарација на резултатите добиени со ПМДС и МДС-МАП. Притоа одделно се евалуирани дводимензионални и тридимензионални мрежи. Кај тридимензионалните мрежи разгледани се и површински тридимензионални мрежи.





Слика 2.9. Грешка на локализација во функција од бројот на јазли

#### 2.4.1 Модел на безжична сензорска мрежа

Пред да бидат презентирани резултатите од симулациите, накратко ќе бидат објаснети основните карактеристики на моделот на мрежа која беше симулирана.

Се разгледува типична сензорска мрежа која може да содржи неколку стотици (до неколку илјади) сензорски јазли распределени на дводимензионален терен или во тридимензионален простор. Секој јазел е опремен со омнидирекциона антена и поседува ограничени ресурси (сметачка единица, батерија, меморија, итн.). Бидејќи радио бранот кој го емитура јазелот се шири омнидирекционо, само јазлите кои се во радио опсег  $R$  може да комуницираат еден со друг.

Дополнително, важат следните претпоставки:

- Јазлите се статички и не ја знаат својата локација.
- Постои патека помеѓу било кои два јазли.
- Јазлите кои се блиску едни до други разменуваат пораки.
- Секој јазел користи RSSI метод за определување на растојание до соседниот јазел.
- RSSI е доверлив метод кој овозможува прецизна проценка на растојанието.

Алгоритмите се имплементирани и симулирани на различни мрежни топологии во Матлаб. Овој програмски пакет е најсоодветен бидејќи нуди функции за брзо

процесирање на комплексни математички пресметки и има голем број на готови оптимизирани функции за работа со матрици.

Поврзаноста на мрежата и резултатите за секое сценарио одделно добиени се како средна вредност од 30 симулации. Средната грешка на предикција на локацијата е нормализирана со радио опсегот  $R$ :

$$Error = \frac{\sum_{i=1}^n \text{distance}(pos_i^{(estimated)} - pos_i^{(true)})}{(n - N) \cdot R} \cdot 100\% \quad (2.36)$$

каде  $n$  е бројот на јазли во мрежата,  $N$  е бројот на анхор јазли во мрежата,  $pos_i^{(estimated)}$  е предвидената позиција и  $pos_i^{(true)}$  е точната позиција на  $i$ -тиот јазел.

Оваа грешка во понатамошниот текст ќе биде именувана како **грешка на локализација**.

Притоа важи дека анхор јазлите се многу помалку на број од останатите јазли, т.е.  $N \ll n$ . Во симулациите презентирани подолу, анхор јазлите претставуваат случајно избрани јазли за секоја симулација одделно.

#### 2.4.2 Споредба на МДС-МАПА и ПМДС кај 2Д-БСМ

Кај дводимензионална мрежа, 100 јазли се распределени во квадрат со димензии  $g \times g$ , каде  $g$  е единечно растојание.

Разгледувана беше:

- Различна топологија на мрежата:
  - 100 јазли произволно распределени (топологија I)
  - 100 јазли распределени на GRID позиции (топологија II)
  - 100 јазли распределени на хексагонални GRID позиции (топологија III)

Кај првата топологија распределбата на јазлите е униформна, додека кај останатите две топологии јазлите не се позиционирани на точните GRID позиции, туку за секоја координата има  $10\%g$  отстапување моделирано како Гаусов шум.

- 3, 4, 6 и 10 анхор јазли за генерирање на апсолутна мапа

- Различен радио опсег (R) со што се постигнува различна просечна поврзаност на мрежата. За топологија I просечната поврзаност на графот за различни вредности на R е дадена во табелата 2.3.

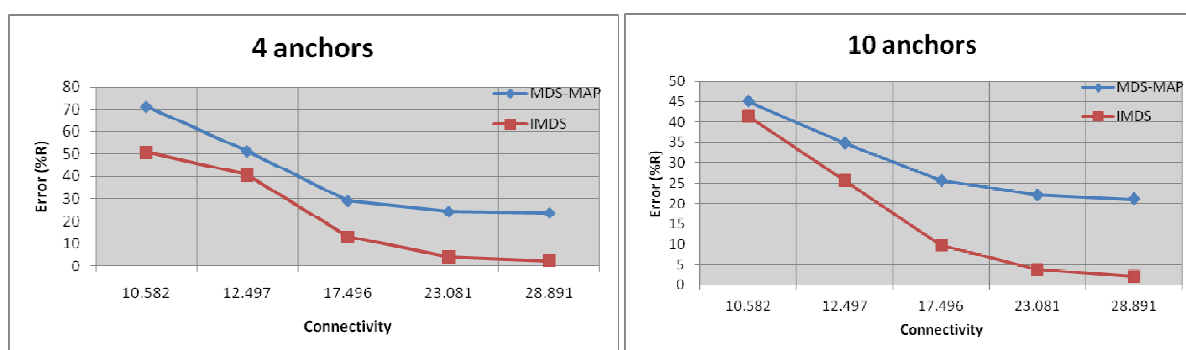
**Табела 2.3. Зависност на радио опсегот и поврзаноста кај 2Д-БСМ**

радио опсег R	0.18r	0.2r	0.25r	0.3r	0.35r	0.18r	0.2r
Поврзаност $e_r=0\%R$	10.582	12.497	17.496	23.081	28.891	10.582	12.497
Поврзаност $e_r=5\%R$	10.466	12.349	17.534	23.543	29.501	10.466	12.349
Поврзаност $e_r=10\%R$	10.629	12.176	17.529	23.429	29.825	10.629	12.176

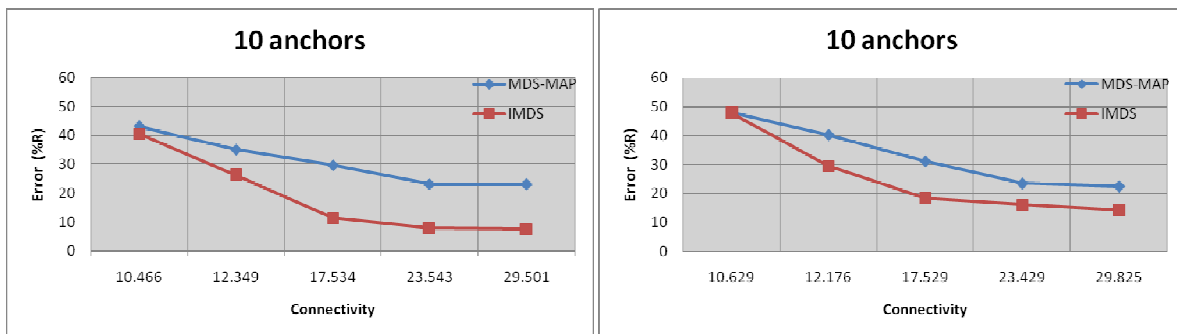
- Различна грешка  $e_r$  присутна при мерење на растојанието (од  $0\%R$  до  $30\% R$  со чекор  $5\%R$ )

Според тоа, симулирани беа 420 (3 x 4 x 5 x 7) различни сценарија (мрежи) и позицијата на секој јазел беше одредена со МДС-МАПА и со ПМДС.

На слика 2.10 дадени се споредби на резултатите добиени со МДС-МАПА и ПМДС за топологија I кога мапирањето е правено со 4 и 10 јазли соодветно. Притоа земен е идеален случај кога нема грешка при одредување на растојанието помеѓу јазлите. На следната слика (2.11) дадени се резултатите за  $e_r$  од  $5\% R$  и  $e_r$  од  $10\% R$  соодветно. Од самите графици може да се заклучи дека грешката на локализација се зголемува пропорционално со  $e_r$  и кај двата алгоритми, но разликата во предикција кај двата алгоритми се приближува, т.е. ако за  $e_r=0\%R$  ПМДС е далеку подобар од МДС-МАПА, веќе за  $e_r=10\%R$  двата алгоритми даваат споредливи резултати.

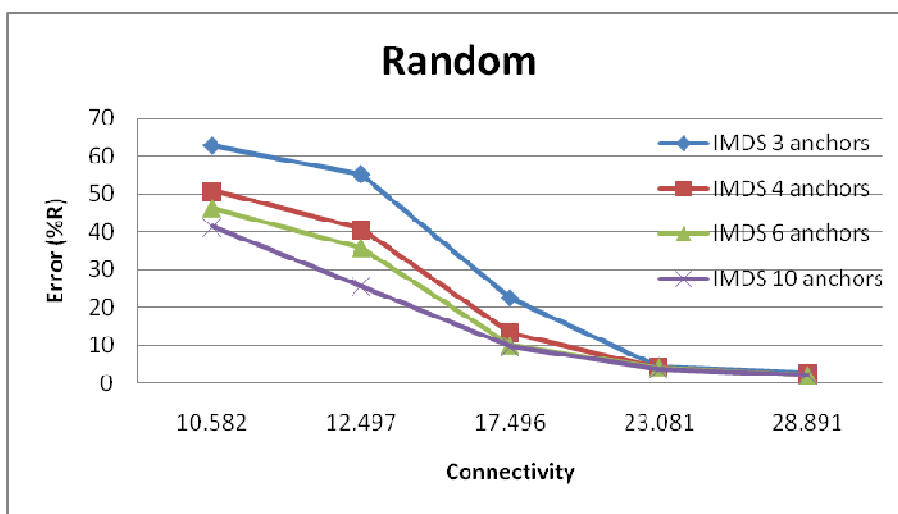


**Слика 2.10. Споредба на МДС-МАПА и ПМДС кај топологија I и  $e_r=0\%R$**



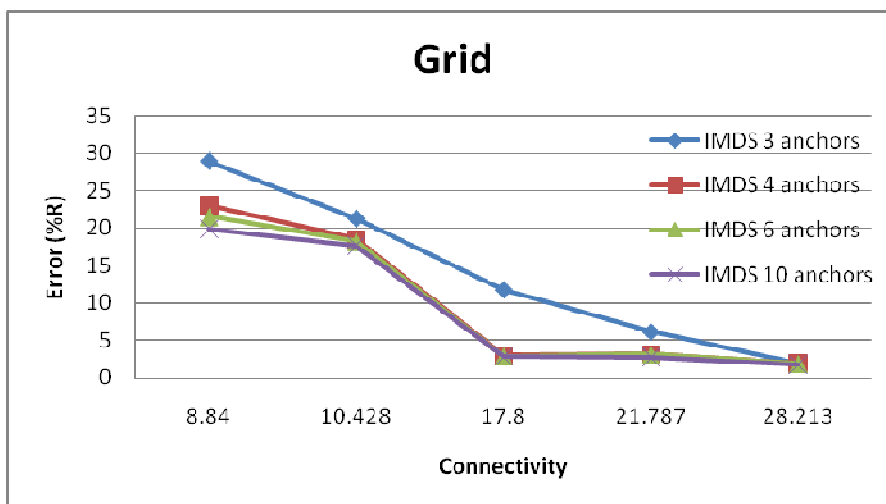
Слика 2.11. Споредба на МДС-МАПА и ПМДС кај топологија I со  $er=5\%R$  (лево) и  $er=10\%R$  (десно)

На следните три графици (слика 2.12, слика 2.13 и слика 2.14) се прикажани грешките на локализација на ПМДС во зависност од бројот на анхор јазли за сите три топологии. Овие мрежи се симулирани со  $er=0\%R$ . Како што се очекува, кај мрежите со поголем број на анхор јазли грешката е помала, но нема значително влијание кога поврзаноста на мрежата е голема.

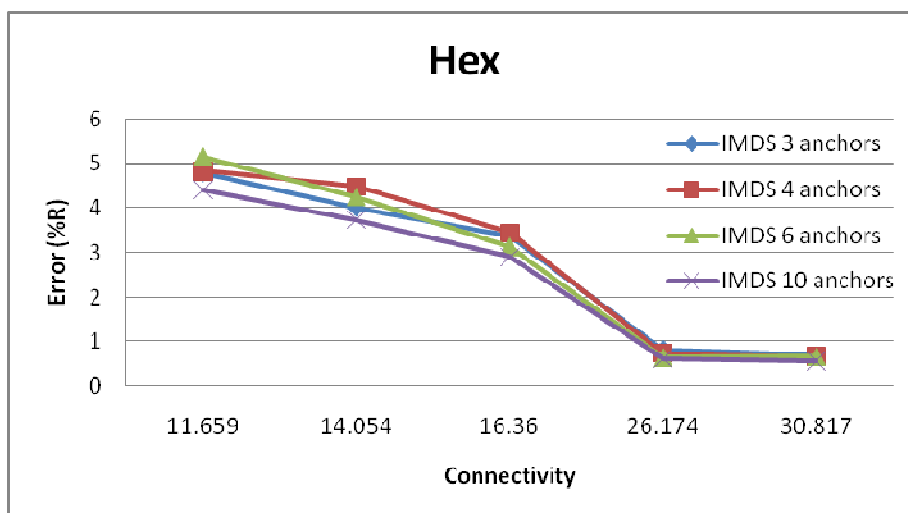


Слика 2.12. Влијанието на бројот на анхор јазли врз грешката на локализација кај топологија I

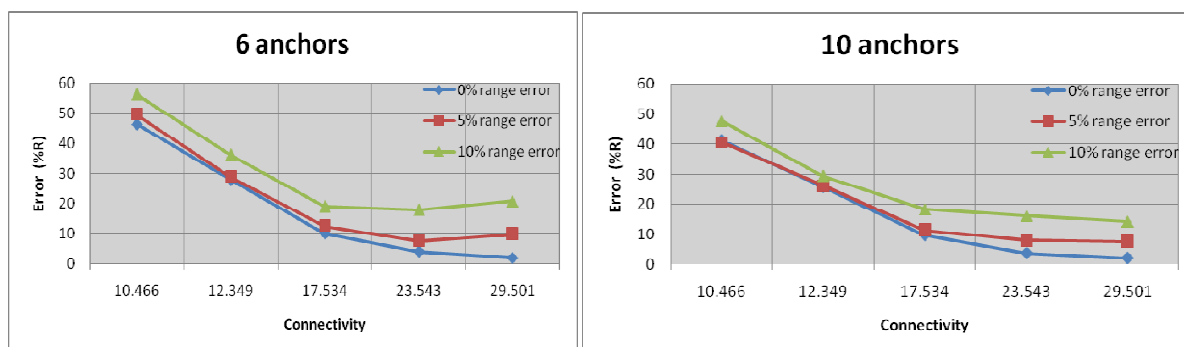
Графиците на слика 2.15 ја даваат грешката на локализација за  $er$  од  $0\%$  до  $10\%R$ . Како што се зголемува грешката  $er$  се зголемува и грешката на локализација на ПМДС. Очекувано, во мрежи со повеќе анхор јазли (10 vs. 6) грешката е помала.



Слика 2.13. Влијанието на бројот на анхор јазли врз грешката на локализација кај топологија II со 5%г отстапување на координатите



Слика 2.14. Влијанието на бројот на анхор јазли врз грешката на локализација кај топологија III со 5%г отстапување на координатите



Слика 2.15. Влијанието на грешката ег врз грешката на локализација кај топологија I

### 2.4.3 Споредба на МДС-МАПА и ПМДС кај 3Д-БСМ

Кај тридимензионална мрежа, 100 јазли се распределени во коцка со димензии  $g \times g \times g$ , каде  $g$  е единечно растојание.

Разгледувана беше:

- Различна топологија на мрежата:
  - 100 јазли произволно распределени (топологија I)
  - 125 јазли распределени на GRID позиции (топологија II)

Кај првата топологија распределбата на јазлите е униформна, додека кај втората топологија јазлите не се позиционирани на точните GRID позиции, туку за секоја координата има  $10\%g$  отстапување моделирано како Гаусов шум.

- 4, 6, 10 и 15 анхор јазли за генерирање на апсолутна мапа (за ригидна трансформација употребен беше ДСВ методот).
- Различен радио опсег ( $R$ ) со што се постигнува различна просечна поврзаност на мрежата. За топологија I просечната поврзаност на мрежата при  $er=0\%R$  дадена е во табелата 2.1 презентирани при евалуацијата на EAPM. Овој параметар е сличен и кога е присутна грешка  $er$ . На слика 2.16 дадена е врска помеѓу радио опсегот ( $R$ ) и просечната поврзаност на мрежата за топологија I.
- Различна грешка  $er$  присутна при мерење на растојанието (од  $0\%R$  до  $30\% R$  со чекор  $5\%R$ )

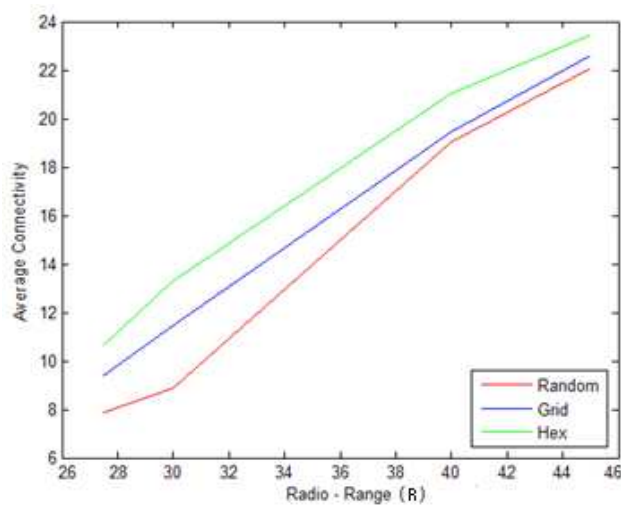
Според тоа, симулирани беа 280 ( $2 \times 4 \times 5 \times 7$ ) различни сценарија (мрежи) и позицијата на секој јазел беше одредена со МДС-МАПА и со ПМДС.

Тука мора да се напомене дека до сега во литературата не се презентирани резултати кои го анализираат МДС-МАПА кај тридимензионални мрежи. Ова е прво истражување кое го имплементира и во детали го разработува МДС-МАПА кај 3Д-БСМ во однос на сите мрежни параметри.

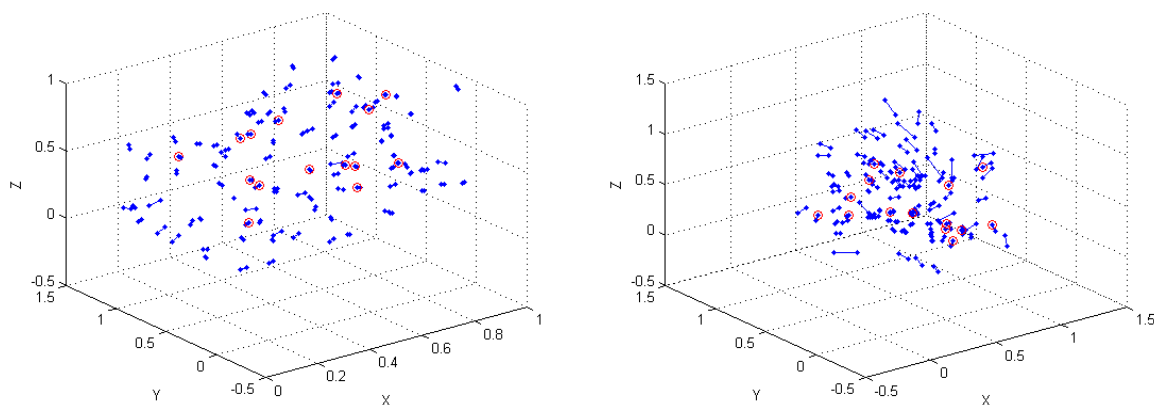
Дополнително е извршена и евалуација на МДС-МАПА и ПМДС со два референтни алгоритми за 3Д локализација предложени во [2.24][2.25].

На сликата 2.17 се гледаат две типични тридимензионални мрежи со произволно распределени 100 јазли (топологија I). Апсолутната мапа е генерирана со 15 анхор јазли (анхор јазлите се означени со црвени кругови околу јазелот). Сините линии го претставуваат растојанието помеѓу апсолутната и естимираната позиција добиена со

МДС-МАПА. Ако оваа линија е подолга тоа означува дека грешката на позиционирање е поголема. И кај двете мрежи од слика 2.17 растојанието меѓу соседните јазли е одредено со грешка  $\epsilon_r=5\%R$ . Кај мрежата на левата страна од сликата радио опсегот е  $R=0.5r$  со што просечната поврзаност е 25.6, а грешката на локализација е 5.4148% R. Од друга страна кај мрежата на десната страна од сликата радио опсегот е  $R=0.35r$  со што просечната поврзаност е значително помала и изнесува 11.76, додека грешката на локализација е 19.6493%R.



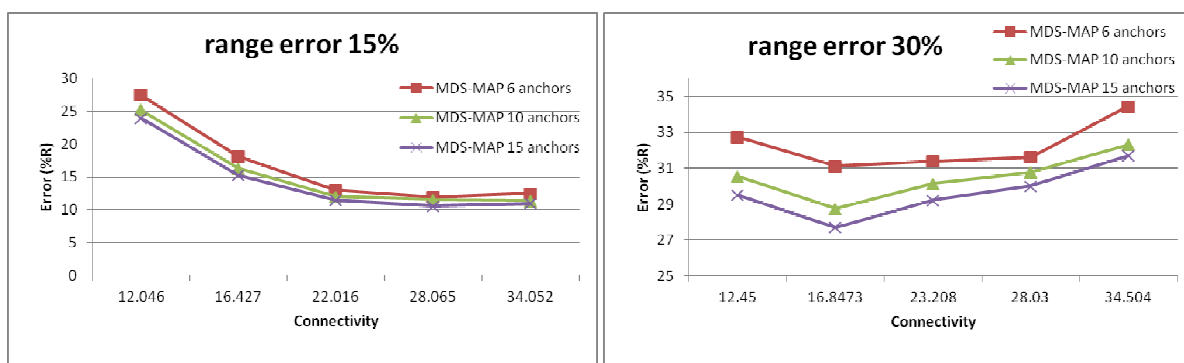
**Слика 2.16. Врска помеѓу радио опсегот (R) и просечната поврзаност на мрежата кај 3Д-БСМ**



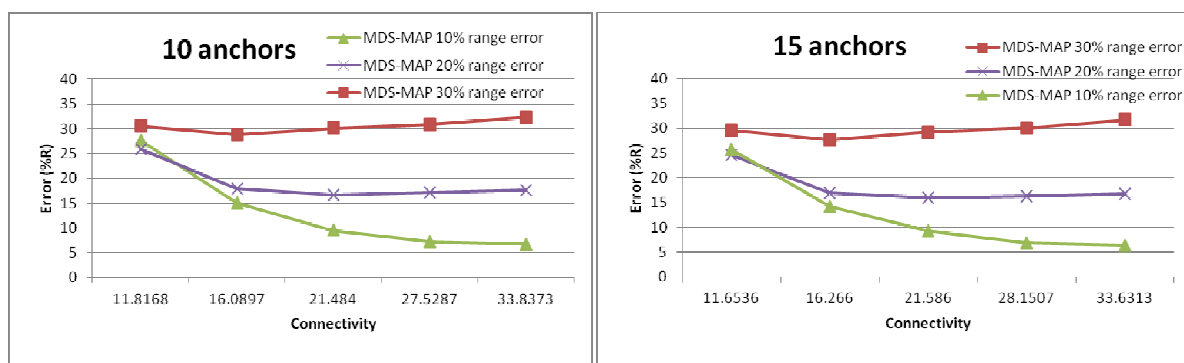
**Слика 2.17. Локализација на јазли кај тридимензионална мрежа со МДС-МАПА**

На слика 2.18 е дадена грешката на локализација добиена со МДС-МАПА кога растојанието помеѓу соседните јазли е одредено со грешка  $\epsilon_r=15\%R$  и  $\epsilon_r=30\%R$ . Апсолутната мапа е генерирана со 6, 10 и 15 анхор јазли. Како што се гледа од сликата,

за било која поврзаност на мрежата, поголем број на анхор јазли ја намалува грешката на локализација. Интересни се резултатите кога  $er=30\%R$ , бидејќи се очекува за поголема поврзаност на мрежата грешката да се намалува, што не е случај. Логично објаснување е следното: бидејќи поврзаноста на мрежата е правопропорционална со  $R$ , кога  $R$  е големо и поврзаноста на мрежата ќе биде голема, но бидејќи и грешката  $er$  е правопропорционална со  $R$ , за големо  $R$  и  $er$  ќе биде поголемо и ќе доведе до голема грешка во матрицата на растојание. Ова од своја страна директно влијае врз грешката на локализација. Ова веќе се потврдува на следната слика (2.19) каде е дадена споредба на резултатите добиени за различни вредности на грешката  $er$ . Јасно се гледа дека за мали вредности на  $er$  радио опсегот  $R$  е обратнопропорционален со грешката (за  $er$  до  $15\%R$ ), но како што се зголемува  $er$  ( $>20\%R$ ) таа пропорционалност не важи. Оваа закономерност е присутна независно од бројот на анхор јазли.



Слика 2.18. Влијанието на бројот на анхор јазли врз грешката на локализација добиена со МДС-МАПА кај топологија I за  $er=15\%R$  (лево) и  $er=30\%R$  (десно)



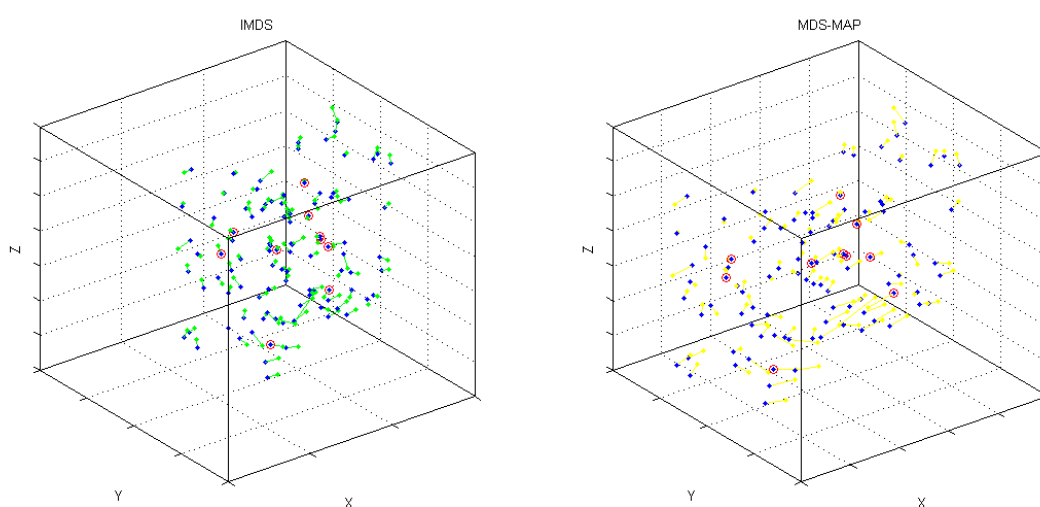
Слика 2.19. Влијанието на  $er$  врз грешката на локализација добиена со МДС-МАПА кај топологија I

На следните две слики прикажани се резултатите кои се добиваат на идентични мрежи со ПМДС (лево) и МДС-МАП (десно). На слика 2.20 дадени се две идентични

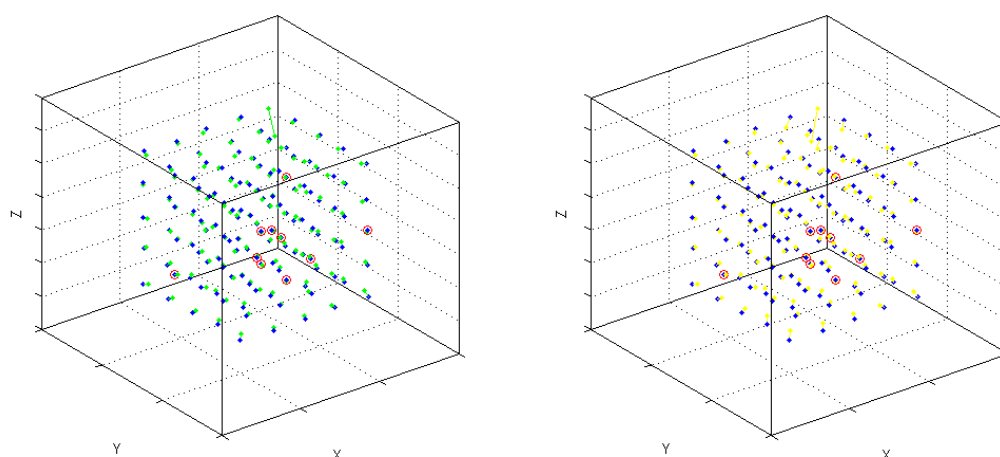


мрежи од топологија I со радио опсег  $R = 3.5r$  и просечна поврзаност од 11.6, додека на слика 2.21 дадена се две идентични мрежи од топологија II чија просечна поврзаност е 15.072. Зелените и жолтите линии го претставуваат растојанието помеѓу апсолутната и естимираната позиција добиена со ПМДС и МДС-МАПА соодветно. Апсолутната мапа е генерирана со 10 анхор јазли (црвени кругови).

Грешката на локализација кај овие мрежи е дадена во табелата 2.4. Како што може да се види од резултатите, ПМДС продуцира помала грешка од МДС-МАПА и кај двете топологии.



**Слика 2.20. Локализација на јазли кај топологија I со ПМДС (лево) и МДС-МАПА (десно)**



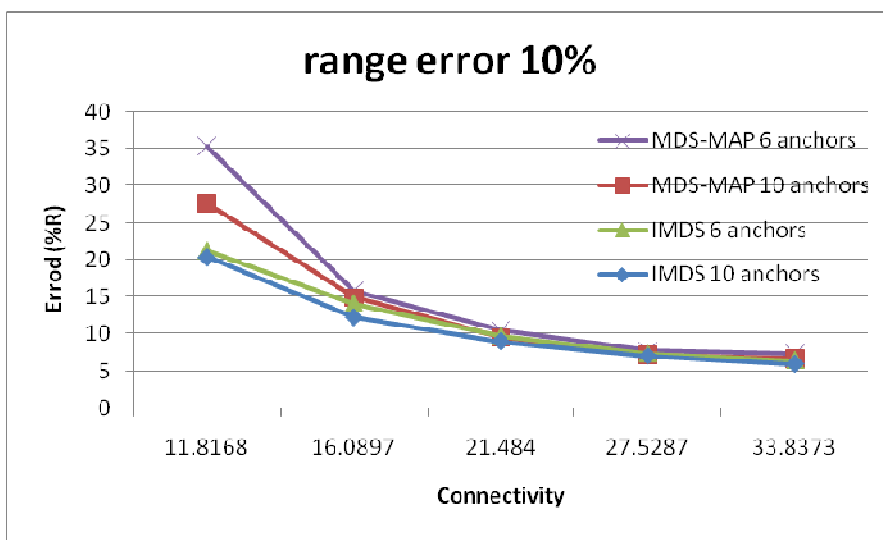
**Слика 2.21. Локализација на јазли кај топологија II со ПМДС (лево) и МДС-МАПА (десно)**

**Табела 2.4. Грешка на локализација за МДС-МАПА и ПМДС**

	Random	Grid
МДС-МАПА	17.9646%R	6.2627%R
ПМДС	14.3521%R	5.6037%R

На слика 2.22 дадени се резултатите за МДС-МАПА и ПМДС за топологија I со и  $er=10\%R$ , за апсолутна мапа генерирана со 6 и 10 анхор јазли. И во двата случаи ПМДС продуцира помала грешка на локализација од МДС-МАПА за било која поврзаност на мрежата.

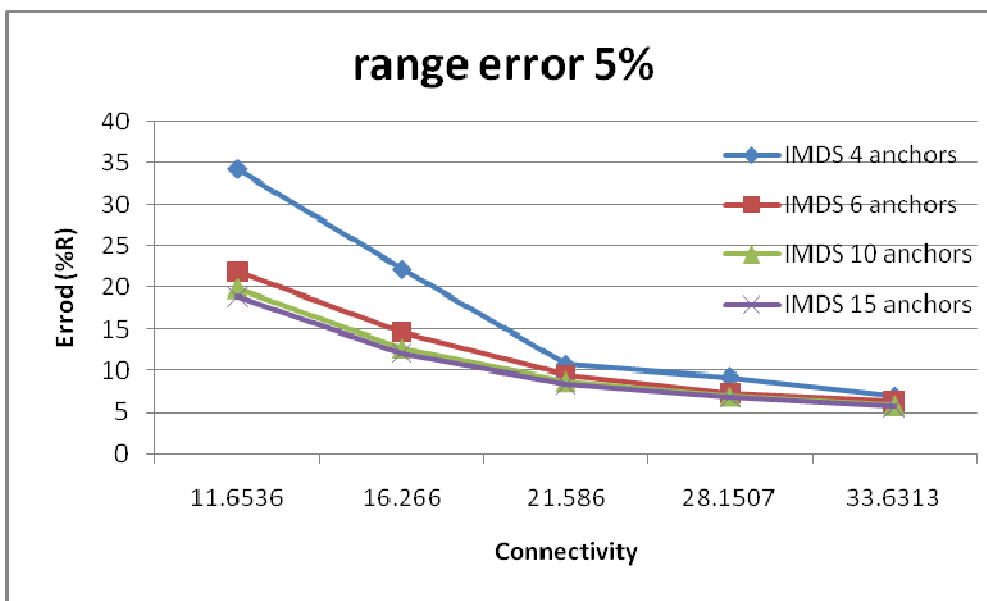
Влијанието на бројот на анхор јазли врз грешката на локализација добиена со ПМДС кај топологија I за  $er=5\%$  е дадена на слика 2.23. Поголем број на анхор јазли генерално ја намалува грешката на локализација, но кај мрежи со голема поврзаност нема значително влијание.



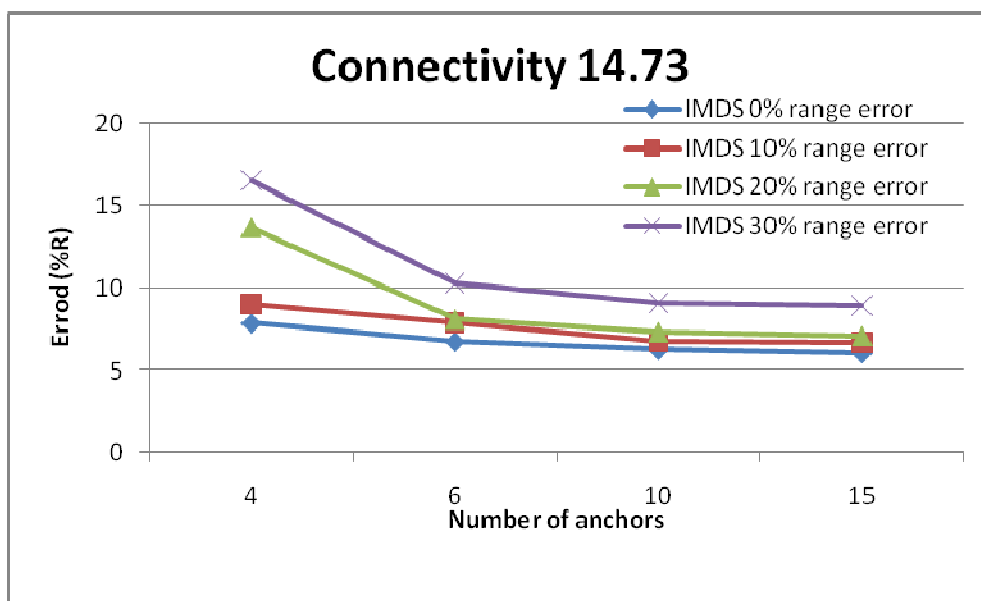
**Слика 2.22. Споредба на МДС-МАПА и ПМДС кај топологија I со  $er=10\% R$**

На слика 2.24 дадено е влијанието на  $er$  врз грешката на локализација добиена со ПМДС кај GRID топологија за поврзаност на мрежата од 14.73. Тука бројот на анхор јазли е особено важен кога вредноста на  $er$  е голема.

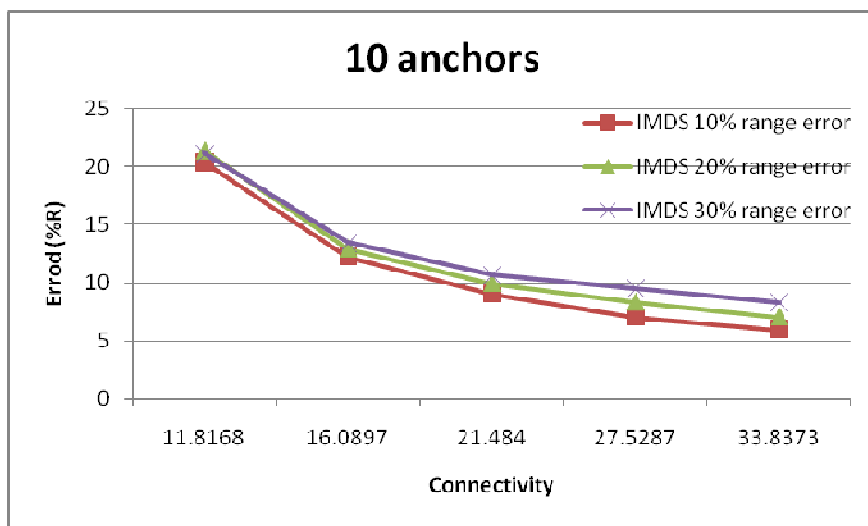
Грешката на локализација добиена со ПМДС како функција од поврзаноста на мрежата за топологија I е дадена на слика 2.25. Се гледа дека  $er$  има мало влијание врз грешката за мала поврзаност на мрежата. Слични резултати дава и МДС-МАПА (слика 2.19), каде оваа разлика во грешката е значително поизразена.



Слика 2.23. Влијанието на бројот на анхор јазли врз грешката на локализација добиена со ПМДС кај топологија I за  $er=5\%$



Слика 2.24. Влијанието на  $er$  врз грешката на локализација добиена со ПМДС кај топологија II за поврзаност на мрежата од 14.73



**Слика 2.25. Влијанието на ег врз грешката на локализација добиена со ПМДС кај топологија I**

Дополнително извршена е евалуација на МДС-МАПА и ПМДС со два референтни алгоритми за 3Д локализација предложени во [2.24][2.25].

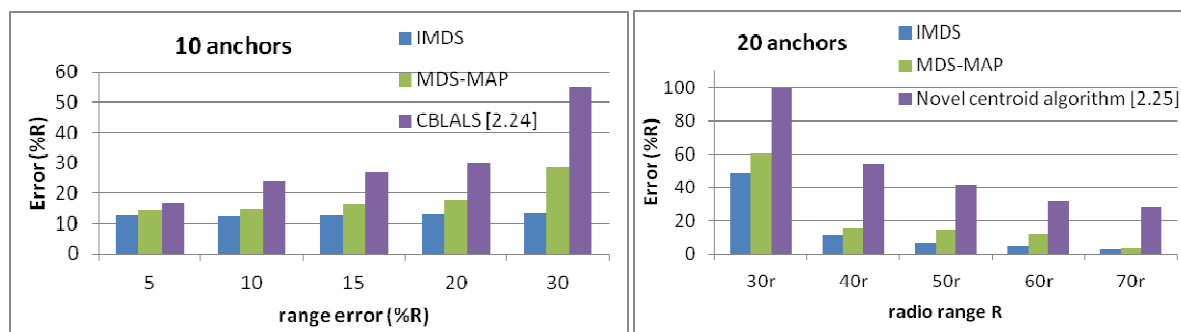
Во [2.24] авторите предлагаат кластер базиран пристап наречен CBLALS. Најпрво во секој кластер се врши корекција на грешката што се јавува при одредување на растојанието помеѓу јазлите од кластерот. За корекција се користи принципот на триаголник. Извршена е споредба на CBLALS со друг референтен алгоритам (DV-Distance 3D) и покажано е дека CBLALS дава значително помала грешка на локализација.

Во [2.25] предложено е подобрување на алгоритам кој за локализација ја користи техниката на медијани (Novel Centroid Algorithm). Секој јазел кој не ја познава својата локација бира четири анхор јазли кои се наоѓаат во неговиот радио опсег и креира низа од тетраедри за да ја одреди својата позиција со помош на техниката на медијани.

За да се евалуира МДС-МАПА и ПМДС, извршени беа симулации за овие две техники според податоците кои беа на располагање во [2.24] и [2.25].

Споредбата на МДС-МАПА и ПМДС со [2.24] покажува дека ПМДС дава најдобри резултати, следен е МДС-МАПА, а најлоши резултати дава CBLALS (слика 2.26 лево). Тука, од вкупниот број на јазли во мрежата 10% се анхор јазли, а поврзаноста на мрежата е 10~15. Во однос на грешката присутна при одредување на растојанието меѓу

соседните јазли  $er$ , се гледа дека за поголеми вредности на  $er$  важи истата подреденост на алгоритмите, т.е. ПМДС е далеку поробуствен од останатите два.



**Слика 2.26. Споредба на МДС-МАПА и ПМДС со алгоритмите предложени во [2.24] и [2.25]**

Резултатите од споредбата на МДС-МАПА и ПМДС со алгоритмот предложен во [2.25] се дадени на слика 2.26 (десно). За сите различни вредности на радио опсегот  $R$ , ПМДС и МДС-МАПА даваат значително подобри резултати од [2.25]. Густината на анхор јазли е 20% од вкупниот број на јазли во мрежата, а грешката  $er=0\%R$ .

#### 2.4.4 Споредба на МДС-МАПА и ПМДС кај површинска 3Д-БСМ

Кај тридимензионална површинска мрежа, 100 јазли се распределени на дадена површина.

Разгледувана беше:

- Различна топологија на мрежата (слика 2.27):
  - 100 јазли произволно распределени во долина (топологија I)
  - 100 јазли произволно распределени на ритче (топологија II).
- 4, 6, 10 и 15 анхор јазли за генерирање на апсолутна мапа (за ригидна трансформација употребен беше ДСВ методот)
- Различен радио опсег ( $R$ ) со што се постигнува различна просечна поврзаност на мрежата. Во табела 2.5 и во табела 2.6 дадена е просечната поврзаност на мрежите во зависност од  $R$  за топологија I и топологија II соодветно.

**Табела 2.5. Просечната поврзаност на мрежата кај топологија I**

радио опсег $R$	0.6r	0.7r	0.8r	0.9r	r	1.1r	1.2r
поврзаност	9.1856	11.909	15.129	18.728	22.479	27.375	31.143

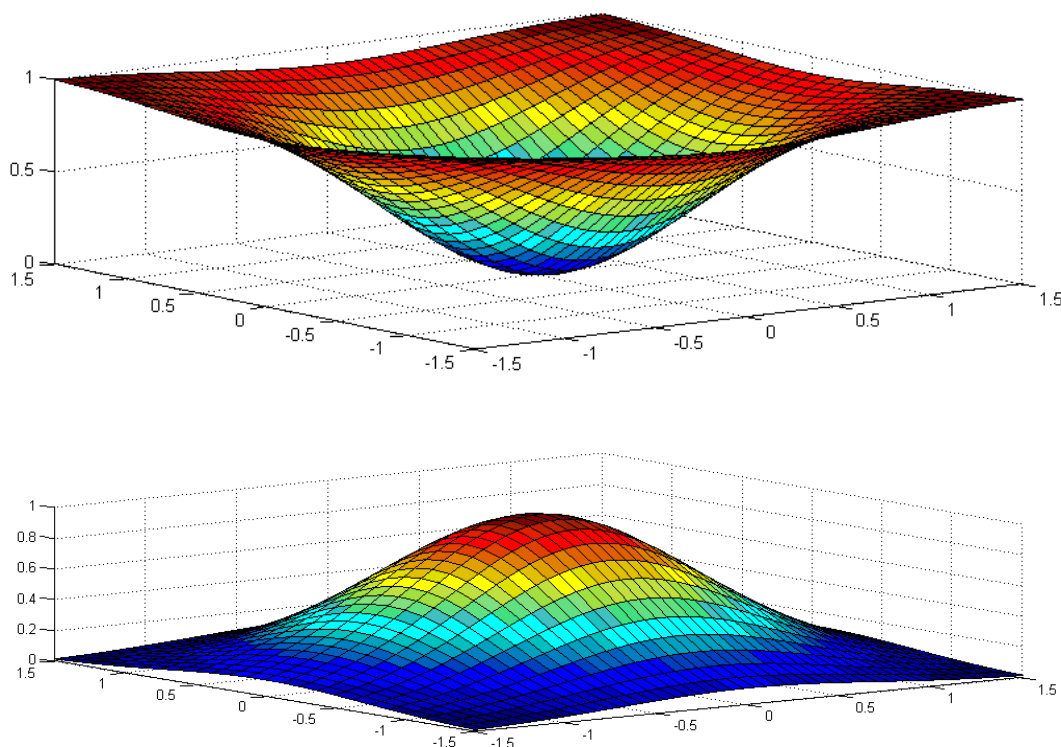
**Табела 2.6. Просечната поврзаност на мрежата кај топологија II**

радио опсег R	0.8r	0.9r	r	1.1r	1.2r	1.4r	1.6r	2r
поврзаност	11.362	13.612	15.532	17.432	19.242	21.908	24.129	25.462

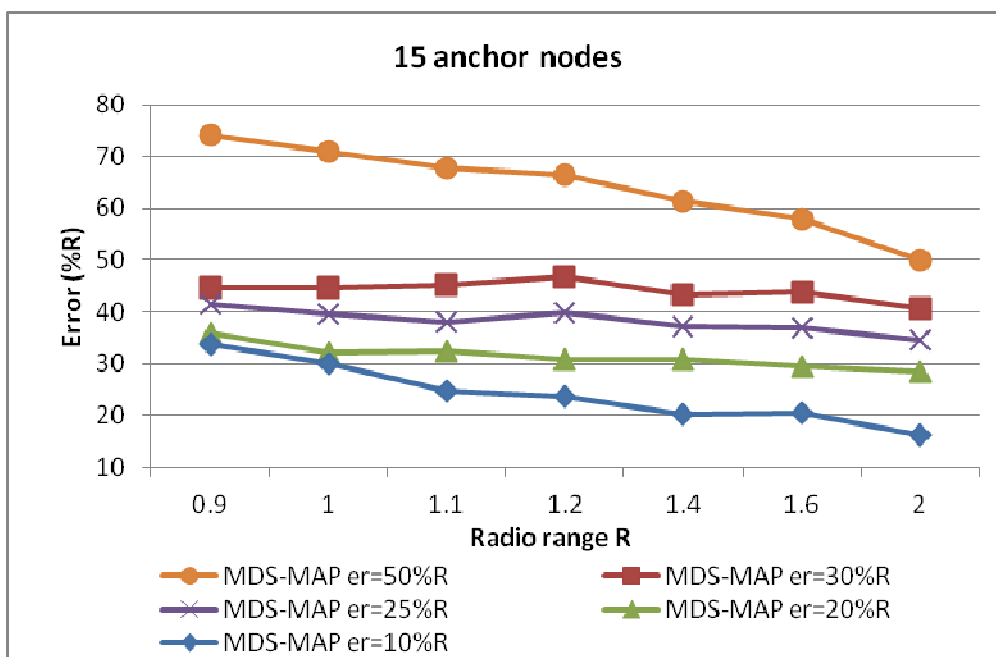
- Различна грешка  $\epsilon_r$  присутна при мерење на растојанието (од 0 до 30% R со чекор 5%R и  $\epsilon_r=50\%R$ )

Според тоа, симулирани беа 224 (4 x 7 x 8) различни сценарија (мрежи) за ридест терен и 256 (4 x 8 x 8) за долина. Позицијата на секој јазел беше одредена со МДС-МАПА и со ПМДС.

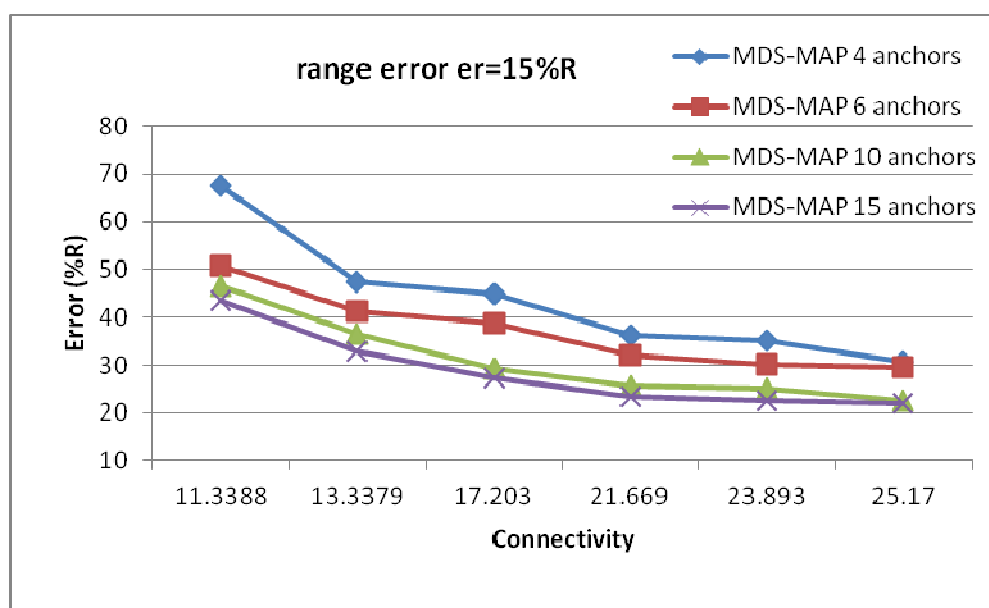
Како што се очекува, кај тридимензионална површинска мрежа важат истите зависимости на грешката од останатите параметри кои и до сега беа презентирани кај дводимензионална и тридимензионална мрежа, т.е. бројот на анхор јазли и поврзаноста на мрежата (должината на радио опсегот R) влијаат обратнопропорционално на грешката на локализација (слика 2.28), додека грешката  $\epsilon_r$  влијае правопрпорционално (слика 2.29).



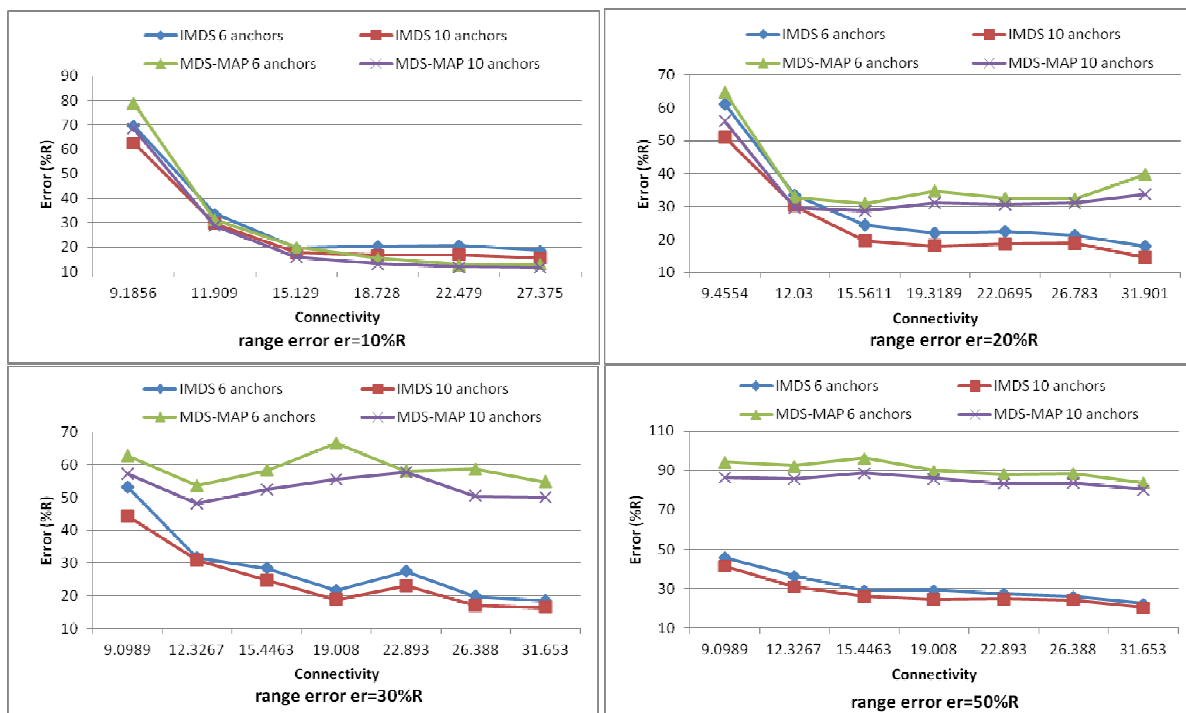
**Слика 2.27. Типични 3д површини: ритче (горе) и долина (долу)**



Слика 2.28. Влијанието на  $er$  врз грешката на локализација добиена со МДС-МАПА за топологија II

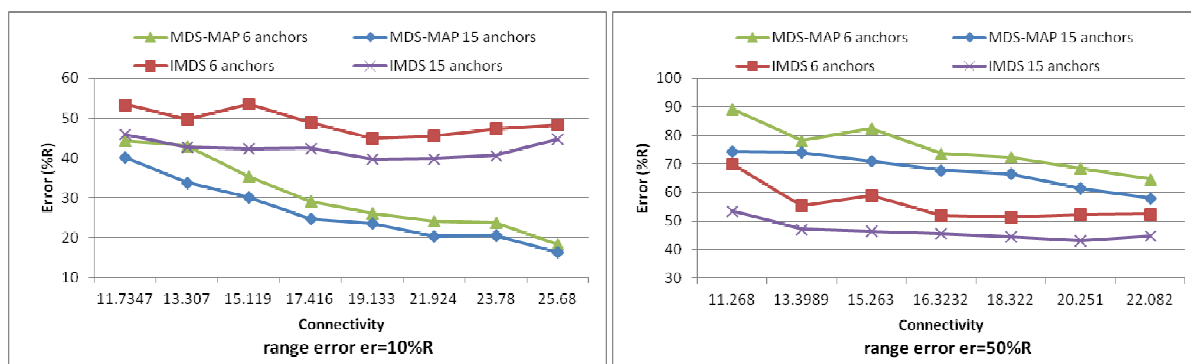


Слика 2.29. Влијанието на бројот на анхор јазли врз грешката на локализација добиена со МДС-МАПА за топологија II



Слика 2.30. Споредба на МДС-МАПА и ПМДС кај топологија I

Тука како поинтересни ќе ги издвоиме графициите кои ги споредуваат МДС-МАПА и ПМДС. Резултатите добиени како за топологија I (слика 2.30) така и за топологија II (слика 2.31) потврдуваат дека иако МДС-МАПА дава грешка на локализација споредлива со онаа на ПМДС кога грешката ер е мала, за големи вредности на ер МДС-МАПА е значително полош од ПМДС.



Слика 2.31. Споредба на МДС-МАПА и ПМДС кај топологија II

## 2.5 Заклучок и насоки за идна работа

Во оваа глава детално е објаснат проблемот на локализација кај БСМ.



Иако оваа истражувачка област е интересна за академската заедница подолг период, повеќето истражувања се фокусирани на дводимензионална мрежа. Малкуте истражувачи кои третираат тридимензионална мрежа се ограничени на подводна сензорска мрежа која претставува специјален тип на БСМ поради отсуството на пречки.

Во оваа теза за прв пат во литературата е имплементиран и детално евалуиран најпопуларниот алгоритам за локализација кај БСМ познат како МДС-МАПА кај тридимензионални мрежи. Исто така, имплементиран е и кај површински тридимензионални мрежи. Дополнително, предложен е нов алгоритам за локализација базиран на мултидимензионално скалирање кој претставува подобрување на МДС-МАПА.

Ново предложениот алгоритам (ПМДС) е евалуиран во однос на повеќе мрежни параметри и спореден со референтниот алгоритам МДС-МАПА. Резултатите добиени од евалуацијата ја потврдуваат супериорноста на ПМДС во однос на МДС-МАПА во сите три случаи, т.е. кај дводимензионални, тридимензионални и површински тридимензионални мрежи. Предноста на ПМДС во однос на МДС-МАПА се должи на новопредложената техника (EAMP) за наоѓање на најкратко растојание помеѓу јазли во една БСМ. Теоретски и симулационо е докажано дека овој хеуристички метод дава помала грешка во однос на традиционалните алгоритми како Џикстра или Флојд.

### **2.5.1 Идни истражувања кај тридимензионални мрежи**

Како продолжение на овие анализи може да се разгледаат тридимензионални мрежи со неправилни (ирегуларни) топологии каде има присуство на пречки во просторот кои ја оневозможуваат комуникацијата дури и помеѓу јазли кои се блиску едни до други. Како специјален тип на ваква мрежа може да се разгледува и погореспоменатата топологија на ритче, каде ритчето може да се смета како пречка. Кај вакви мрежи очекувано е алгоритмите од фамилијата на МДС-МАПА да даваат голема грешка на локализација, како впрочем што е случај кај вакви дводимензионални мрежи. Едно можно решение на овој проблем кое за дводимензионални мрежи е веќе евалуирано [2.35] и дава задоволителни резултати е хиерархиски организирана мрежа, каде мрежата се дели на подмрежи кои локално се локализираат за на крај да се фузираат сите локални мапи во единствена глобална. Локализацијата на локалните мапи може да се изврши со ПМДС и со МДС-МАПА со цел да се направи компарација на овие два алгоритми.

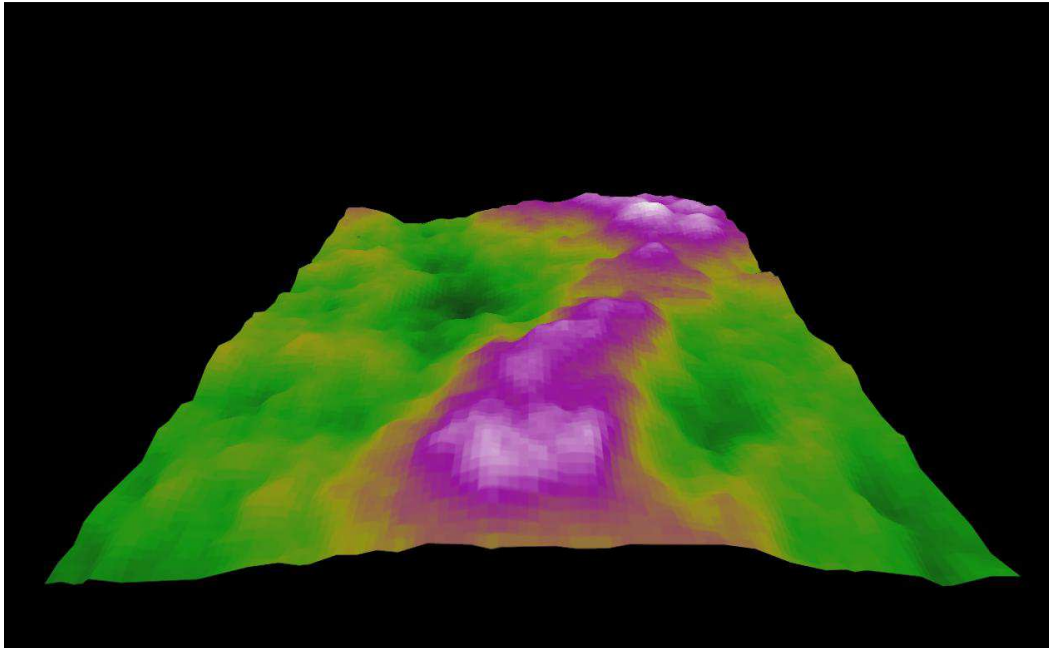
### 2.5.2 Идни истражувања кај тридимензионални површински мрежи

Друга насока за истражување е да се повторат сите симулации користејќи радио пропагациски модел генериран во согласност со стандардот IEEE 802.15.4. Во овој случај наместо Матлаб позгодно ќе биде да се користат ns-2 и ns-3 [2.56][2.57] како бесплатни или некои од комерцијалните симулатори (Opnet [2.58] или NetSim [2.59]) кои содржат готови модули за ZigBee. Предноста на овие симулатори е тоа што генерираат модел на мрежа каде во предвид ќе бидат земени сите механизми на простирање на радио брановите како рефлексија, дифракција и расејување [2.60]. Во симулациите презентирани во оваа теза моделирањето на мрежата беше идеално и во предвид беше земена само оптичката видливост помеѓу јазлите (LOS), а познато е дека јазлите може да се слушаат и кога не постои оптичка видливост помеѓу нив (NLOS).

Иницијални симулации беа извршени во ns-2 за јазли произволно распределени на комплексен тридимензионален терен (слика 2.32) и добиената грешка на локализација беше споредена со МДС-МАПА и ПМДС. На теренот на сликата со димензии 100m x 100m и максимална висина од 16.67m беа распределени од 100 до 200 јазли. Радио опсегот беше 20m, 23m, 30m, 35m, 40m и 45m, а останатите параметри од радио пропагацискиот модел беа во согласност со ZigBee стандардот [2.61]. Поврзаноста на оваа мрежа е значително помала од поврзаноста на истата мрежа кога би користеле идеален математички модел каде во предвид се зема само LOS. За илустрација, за 133 јазли во мрежата и за радио опсег од 45m користејќи идеално моделирање би добиле поврзаност на мрежата од околу 20, додека во овој случај добиена беше просечна поврзаност од 9.308. Добиената грешка беше споредлива со грешката што ја даваат ПМДС и МДС-МАПА за иста поврзаност на мрежата, т.е. таа се движеше од 83% до 110% од радио опсегот за различен број на анхор јазли (симулирано беше со 4, 6, 10 и 15 јазли). Тука сакам да изразам особена благодарност до колешката д-р Соња Филипоска за несебичната помош во реализацијата на овие симулации со ns-2.

За порелевантна компарација останува како идна работа алгоритмите да се тестираат на различни теренски конфигурации и за секоја конфигурација да се симулираат повеќе топологии (20-30) за секоја вредност на радио опсегот. Тука мора да се забележи дека при проекција на ваквата мрежа јасно може да се воочи природно формирање на кластери. Имено, доколку јазлите се наоѓаат на некоја височинка тие меѓусебно

комуницираат и таа подмрежа сама за себе е доволно густа за да може со голема точност да се локализира. Истото важи и за групите на јазли кои се наоѓаат во некоја долина.



**Слика 2.32. Комплексен тридимензионален терен**

Бидејќи комуникацијата помеѓу јазлите од двете подмрежи е ограничена и најчесто се состои од само неколку врски, кога би се применил централизиран модел на локализација ова ќе доведе до голема грешка. Како можна насока за идно истражување кај овој тип на мрежи останува можноста да се тестираат алгоритмите во хиерархиски организирана мрежа со дистрибуиран пристап. За таа цел мора прво да се изврши ефикасно кластерирање на мрежата, при што како услов за припадност на ист кластер нема да се зема Евклидовото растојание помеѓу јазлите, туку постоењето на врска (директна комуникација) [2.62][2.63].

## Глава 3

# Предикција на податоци кај БСМ

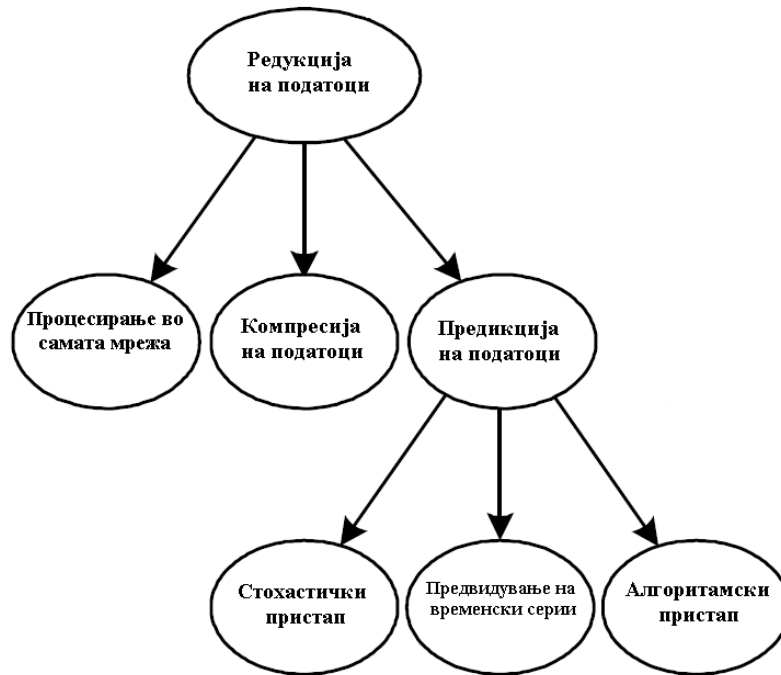
Основна функција на БСМ е следење на физички феномени и нивно навремено обработување. Физичките величини кои ги мерат треба континуирано или периодично да ги праќаат до некоја централна точка каде податоците се запишуваат, обработуваат или складираат за подоцнежна анализа. Познавајќи ги ограничувањата кај јазлите од БСМ очекувано е дека ова не е тривијална задача. Поради ограничената меморија, јазлите не може локално да складираат неограничен број на податоци, што значи дека компресирање на податоците не е секогаш возможно. Поради ограничената процесирачка моќ на јазлите, локално не може да се вршат сложени математички обработки и анализи. Како најголем проблем кај јазлите е нивната ограничена енергија. Најголем дел од оваа енергија се троши за комуникација така да препраќање на податоците на кратки временски интервали кон некоја централна станица ќе доведе до брзо истрошување на енергијата на јазлите. Бидејќи рутирањето кај БСМ најчесто се одвива преку повеќе скокови, отсуство на само еден јазел некогаш може да доведе до отцепување на цела подмрежа од некоја БСМ, со што ќе се наруши нејзината функционалност.

Во последниве години се појавија повеќе техники кои се стремат да ги надминат овие проблеми, т.е. да обезбедат интелегентни начини на процесирање на податоците со што ќе се намали бројот на трансмисии, а со тоа ќе се обезбеди подолг животен век на БСМ.

Техниките за редуција на податоци тежнеат да го намалат бројот на пратени податоци низ мрежата. Овие техники се поделени на три основни категории (слика 3.1):

- Процесирање во самата мрежа
- Компресија на податоците
- Предикција на податоците

Тука накратко ќе се задржиме на секоја од овие три категории. Повеќе детали за овие алгоритми може да се најдат во [3.1].



**Слика 3.1. Начини на заштеда на енергија кај БСМ [3.1]**

Процесирањето на податоците во самата мрежа е познато и како агрегација на податоци. Оваа операција се извршува кога податоците се рутираат кон базната станица (кон јазелот синк) и претставува дистрибуирана обработка и анализа на податоците во самата сензорска мрежа. Тука на некој начин настанува прочистување на податоците и намалување на нивната волуменозност пред тие да бидат доставени до финалните конзументи. Ова се постигнува на пример ако се примени некоја сумаризација на податоците (минимум, максимум, просек и сл.). Ако на самата БСМ апликација и се потребни точните оригинални мерења, ваквата сумаризација не би можела да се примени бидејќи доведува до губење на точноста [3.2].

Компресијата на податоците има за цел да ја редуцира количината на податоци кои ги праќа јазелот кон синкот. Тука потребна е некоја шема на кодирање како би можеле компресираните податоци да се декомпресираат кај синкот. Ова е многу погоден начин на заштеда на енергија, но доколку апликацијата бара податоци во реално време тогаш може да биде неупотреблив.

Кога станува збор за предикција на податоци кај БСМ, обично се користи една шема со која се врши двојна предикција (кај јазелот и кај синкот). Моделот (филтерот) според кој се прави предикција се извршува симултано на двете локации, т.е. еднаш кај самиот

јазел кој врши мерења, но и кај јазелот синк. Според тоа, јазлите вршат предикција на своите отчитувања, а јазелот синк врши предикција на отчитувањата на сите јазли од мрежата. Ако во мрежата има 50 јазли, синкот треба симултано да извршува 50 предикции.

Ако предикцијата која ја врши филтерот кај синкот е задоволителна (во рамките на дозволената грешка), тогаш таа предвидена вредност се прогласува за отчитана. Во спротивно, сензорот ќе ја прати точната (отчитана) вредност кон синкот. Бидејќи и јазелот го користи истиот филтер за предикција, јазелот секогаш ќе знае колку предикцијата отстапува од вистинското мерење и дали треба да праќа податоци. Користејќи ја оваа шема, јазелот синк врши реконструкција на отчитаните податоци со определен степен на прецизност. За да се избегне нагло влошување на предвидените податоци, потребно е моделите периодично да се валидираат и ажурираат.

Бидејќи алгоритмите за предикција треба да работат и кај сензорските јазли, тие мора да се лесни за имплементација поради ограничените ресурси на јазлите. Имено, алгоритмот не смее да има голема временска комплексност за да може да се извршува во разумно време имајќи ја во предвид малата процесирачка моќ на сензорските јазли споредено со персоналните компјутери. Од друга страна, филтерот за предикција не треба да чува голем број на отчитувања врз основа на кои ќе врши предикција на следното отчитување бидејќи сензорските јазли имаат ограничена меморија.

Техниките за предикција на податоци кај БСМ може дополнително да се поделат на три подкатегории кои се базираат на: стохастички пристапи, предвидувања кај временски серии од податоци и алгоритамски пристапи (слика 3.1).

Стохастичките пристапи од своја страна го анализираат феноменот (вредноста која се мери) од аспект на случаен процес, така што генерираат пробабилистички модел за да ги предвидат отчитаните вредности. На пример, временска корелација најчесто се моделира како Марков процес, додека за просторна корелација кај БСМ потребно е сите отчитувања од сензорските јазли да се групираат кај еден јазел за да може тој јазел да изработи соодветната корелација. Бидејќи ова доведува до дополнителна комуникација, многу поретко се имплементира. Како модел за предикција често се користи и Калманов филтер. Иако стохастичките пристапи се многу генерални, не секогаш се соодветно решение поради ограничените процесирачки капацитети на јазлите од мрежата.

Како најсоодветни модели за предикција на податоци кај БСМ се сметаат предвидувања на временски серии од податоци. Овие модели се едноставни, лесни за имплементација и даваат задоволителна точност на предикцијата [3.3][3.4]. Тука ќе ги споменеме: Движечки просеци (Moving Average MA), Авторегресивен (Autoregressive AR), Авторегресивни движечки просеци (Autoregressive Moving Average ARMA) и Авторегресивни интегрирани движечки просеци (Autoregressive integrated Moving Average ARIMA).

Алгоритамските пристапи се тесно поврзани со самата БСМ апликација и најчесто зависат од бихејвиористичките карактеристики на величината која се мери. Не ретко се користат и хеуристички пристапи.

### 3.1 Преглед на сродни истражувања

Алгоритмите за предикција на временски серии кај БСМ се уште не се доволно истражени, наспроти рапидната потреба од конзервација на енергијата на мрежата. Во литературата постојат имплементации на мал број техники евалуирани на реални податочни множества.

Најпозната парадигма која се користи за предвидување е позната како “двоен Калманов филтер” [3.7], или подоцна е прифатен терминот “двојна шема за предикција” (DPS) [3.3][3.5]. Кај овој модел, секој јазел од мрежата извршува индивидуални предвидување на вредностите користејќи адаптивни филтри. Паралелно со предвидувањето, јазлите вршат и мерење на саканите вредности, па според тоа може да направат проверка дали отчитаната вредност значително отстапува од предвидената. Ако отстапувањето е под некој претходно дефиниран праг, и синкот и јазелот го прифаќаат предвидувањето и тоа се сместува во меморијата наместо вистинската измерена вредност. Ако разликата помеѓу вистинската и предвидената вредност е значителна, сензорот ја праќа вистинската вредност кон синкот, по што и јазелот и синкот вршат ажурирање на моделот за предвидување, така што повторно ќе користат ист модел.

Во [3.7] предложено е решение кое се базира на Калманов филтер како техника за предвидување која е пофлексибилна кон појавата на шум кај сензорските отчитувања. Алтернативен пристап е предложен во [3.5], каде авторите користат адаптивен филтер кој не бара а priori познавање на мерната величина, што имплицира дека синкот и јазелот

не мора однапред да се договорот кој модел за предвидување ќе го користат. Во овој случај, ажурирањето на моделот, како и ажурирањето на тежините на филтерот се прави симултано на двете страни исклучиво врз основа на предвидените и отчитаните вредности. Römer и Santini во [3.5] постигнуваат намалување на бројот на пратени пораки до 90%. Но овие резултатите се така добри само затоа што се евалуирани на податочно множество кое содржи температурни отчитувања кои варираат во интервал од два Целзиусови степени. Кај податочни множества со поголема ентропија се очекува резултатите да бидат далеку полоши.

Le Borgne и Santini во [3.3] опишуваат генерална шема за предикција базирана на DPS во која на располагање има  $K$  модели за предикција, и секој сензор индивидуално го бира најдобриот модел со помош на таканаречениот “тркачки” механизам [3.8]. За предикција се користат авторегресивни модели од ред 1-5. Евалуацијата е извршена на 14 јавно достапни податочни множества и покажано е дека за величини кои временски бавно се менуваат AR моделите даваат задоволителна предикција.

Слични имплементации базирани на авторегресивни модели се опишани и во [3.4], каде во првата фаза се собираат податоци кај синкот врз основа на кои се гради модел за предвидување, а потоа тој модел се дистрибуира назад кон самите јазли. Во следната фаза се врши симултано предвидување на двете страни со ARIMA моделот. Ако дојде до влошување на точноста на предвидувањата, системот треба да се врати во првата фаза, или јазелот треба да прати одреден број мерења кон синкот за да се направи ажурирање на моделот. Одредување на редот на AR и MA компонентите кај ARIMA моделот треба да претставува компромис помеѓу посакуваната точност на предикција и енергетската ефикасност на мрежата.

Во [3.10] се користи сличен приод базиран на адаптивен ARMA модел. Тука моделот го гради секој јазел индивидуално за своите  $W$  последователни отчитувања, и потоа моделот го праќа кон јазелот синк. За анализа на податоците се користи подвижен прозорец од  $S$  отчитувања. Ако грешката на предикција за вредностите од тековниот лизгачки прозорец е поголема од предефинираниот праг, јазелот гради нов адаптивен модел и новите параметри ги праќа кон синкот.

Пристапи базирани на DPS се опишани и во [3.11] каде се користи двоен механизам на синхронизација на податоците кај јазлите и кај синкот со цел да се избегне



кумулятивна грешка. Во овој труд имплементирани се три различни модели: пристап базиран на сив модел [3.12], Калманов филтер и хибриден модел за предикција кој претставува комбинација од претходните два. Евалуацијата извршена на реални податочни множества покажува дека последниот метод е подобар од претходните два во смисла на енергетска ефикасност.

Во [3.13], предложена е DPS за безжична мрежа инсталирана на човечко тело која користи ПИД контролер за предикција. Други пристапи во литературата користат делта техники [3.14], каде се компресира разликата помеѓу отчитаната и пратената вредност на неколку последователни мерења.

Скоро сите автори користат различни метрики за мерење на перформансите на алгоритмите. Во некои истражувања се тежнее да се намали бројот на трансмисии, па за евалуација се користи бројот на пратени пораки од јазелот кон синкот изразен во проценти [3.3]-[3.5][3.7]. Втор начин на евалуација е со мерење на отстапувањето, т.е. за колку предвидената вредност се разликува од отчитаната. Оваа разлика се изразува со средна квадратна грешка (MSE) или корен од средна квадратна грешка (RMSE) [3.4][3.7][3.10]. Најдобро е овие две метрики да се обединат во една, т.е. однос помеѓу редуцијата на трансмисии и MSE.

## **3.2 Опис на алгоритмите за предикција**

Во продолжение ќе бидат накратко објаснети најзначајните алгоритми кои се користат за предикција на податоци кај БСМ.

### **3.2.1 Алгоритам на минимална средна квадратна грешка**

Алгоритмот на минимална средна квадратна грешка (во продолжение ќе ја користиме скратеницата LMS која доаѓа од “Least-Mean-Square”) како адаптивен филтер е еден од најпопуларните. Има голема примена која се должи на неговата едноставност за имплементација и добрите перформанси [3.15][3.16]. Негова предност е што не му се потребни никакви предзнаење за статистичките карактеристики на сигналите кои се мерат. Овој алгоритам за редуција на податоци кај БСМ за првпат е предложен од Santini и Römer [3.5]. Притоа добиена е максимална редуција на пратени податоци од 92% за температурни отчитувања (за Intel Berkeley Lab dataset [3.6]) при грешка на предикција не поголема од 0.5°C.

LMS се дефинира со следните три равенки:

1. Излез од филтерот:

$$y[n] = \underline{w}^T[n] \cdot \underline{u}[n],$$

2. Грешка на предикција:

$$e[n] = d[n] - y[n],$$

3. Адаптација (корекција) на тежини:

$$\underline{w}[n+1] = \underline{w}[n] + \mu \cdot \underline{u}[n] \cdot e[n]$$

каде  $w[k]$  и  $x[k]$  претставуваат вектори со димензија  $M \times 1$ :

$$\begin{aligned} \underline{w}[k] &= [w_1[k], w_2[k], \dots, w_N[k]]^T \\ \underline{u}[k] &= [u[k-1], u[k-2], \dots, u[k-M]]^T \end{aligned} \quad (3.1)$$

$M$  е целоброен параметар кој се користи од страна на филтерот и ја претставува неговата “меморија”, т.е. колку претходни отчитувања ќе користи филтерот за да генерира наредна предикција.

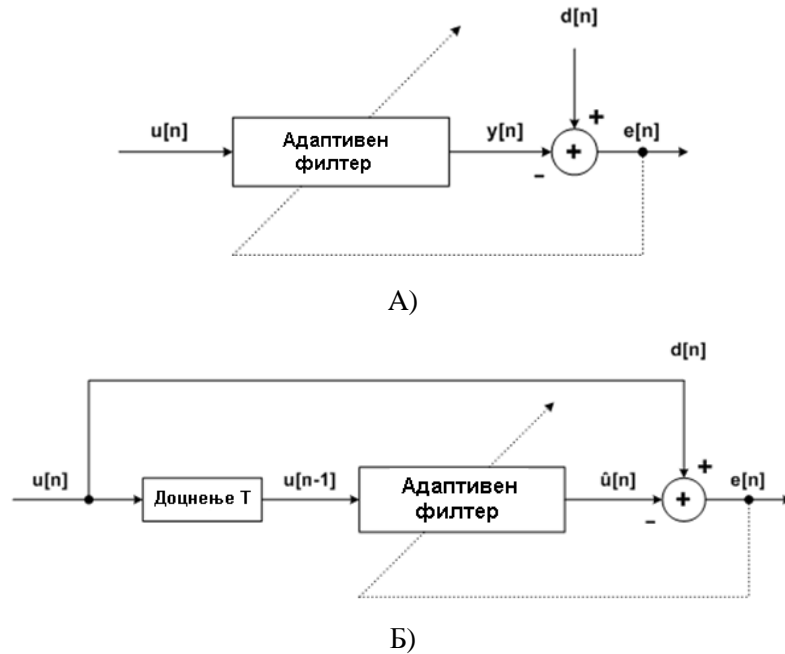
Со едноставна модификација на структурата на филтерот од слика 3.2(A) се добива предиктивен филтер како на слика 3.2(B). Идејата тука е тековниот влез  $u[n]$  кој доцни една временска инстанца да се користи како референтен сигнал  $d[n]$ . Филтерот прави предикција  $\hat{u}[n]$  на влезниот сигнал која претставува линеарна комбинација од  $N$  претходни читања. Разликата помеѓу предикцијата и вистинската вредност ја дава грешката која се користи за да се направи ажурирање на тежините на филтерот.

За процесот на адаптација потребно е да се дефинираат два параметри: должина на филтерот  $M$  и големината на чекорот  $\mu$ , која е значајна за ажурирање на тежините на филтерот.

Ако се знае дека  $w$  и  $u$  се вектори со димензии  $M \times 1$ , може да се заклучи дека LMS алгоритмот се извршува со  $2M + 1$  множења и  $2M$  собирања по итерација [3.15].

LMS може се користи кај БСМ за предикција на сензорски отчитувања како филтер кај двојна шема за предикција (во продолжение ќе се користи скратеницата LMS-DPS). LMS-DPS кај БСМ се состои од три основни режими: иницијализирачки режим, нормален режим и самостоен режим. Јазелот е во иницијализирачки режим само на

почеток, а потоа наизменично поминува од нормален во самостоен режим и обратно. Заштедата на енергија се случува кога јазелот е во самостоен режим бидејќи тогаш не врши трансмисија на сензорските отчитувања. Во продолжение е даден детален опис на секој од овие режими.



**Слика 3.2. А) Основна структура на адаптивен филтер и Б) Адаптивен филтер за предикција**

*Иницијализирачки режим:*

Најпрво мора да се одреди параметарот  $\mu$ . Овој параметар го пресметуваат и јазелот и синкот и треба да биде идентичен и на двете страни. За да се одреди соодветна вредност на  $\mu$  мора да се соберат определена количина податоци. Во оваа фаза, јазелот непречено праќа отчитувања кон синкот без да прави било каква предикција. За да се обезбеди конвергенција, за  $\mu$  мора да важи:

$$0 \leq \mu \leq \frac{2}{E_x} \tag{3.2}$$

каде

$$E_x = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x[n]|^2 \tag{3.3}$$

а  $N$  е бројот на итерации потребни за да се тренира филтерот. По пресметувањето на  $\mu$ , системот излегува од иницијализирачкиот режим и почнуваат да се пресметуваат предикциите и на двете страни.

*Нормален режим:*

Во овој режим и јазлите и синкот симултано вршат предикција на следните сензорски отчитувања. Користејќи ги последните  $M$  отчитувања истовремено вршат и ажурирање на тежините на филтерот користејќи ја грешката на предикција. Според [3.15], ако системот нема а priori знаење за сигналот, иницијалните вредности на тежините треба да се нули.

Јазелот ќе остане во нормален режим (мерење на величината и праќање на отчитувањата кон синкот) се додека грешката на предикција е поголема од некој предефиниран праг  $E_{\max}$ . Кога грешката ќе падне под оваа вредност, после  $M$  последователни итерации, тогаш јазелот ќе премине во самостоен режим т.е. ќе престане да ги праќа мерењата кон синкот и ќе престане да врши ажурирање на тежините од филтерот.

*Самостоен режим:*

Во овој режим јазелот продолжува да врши мерења и прави предикции, но ако грешката на предикција е помала од некој предефиниран праг  $E_{\max}$ , филтерот ја користи предвидената вредност  $y[n]$  за ажурирање на тежините, а измерената величина  $u[n]$  ја отфрла и не ја праќа кон синкот. На ваков начин се овозможува и јазелот и синкот постојано да имаат идентичен модел на филтерот за предикција.

Кога грешката на предикција е поголема од  $E_{\max}$ , јазелот преминува во нормален режим и отчитувањата ги праќа кон синкот.

### 3.2.2 LMS со променлив параметар

Изборот на соодветна вредност за параметарот  $\mu$  е од големо значење кај LMS ако се знае дека од овој параметар зависи брзината на конвергенција на алгоритмот [3.17].

Во продолжение елаборирано е подобрувања на LMS-DPS алгоритмот со користење на променливи вредности за параметарот  $\mu$  (ќе ја користиме скратеницата LMS-VSS за LMS базиран алгоритам со променлива вредност за  $\mu$ ):

1. Додека не се постигне доволен број добри предикции,  $\mu$  ќе ја има максималната вредност која се добива според неравенката (3.3), но помножена со  $10^{-2}$  за да се обезбеди робустност [3.16].

2. Откако  $\mu$  ќе ги научи податоците кои доаѓаат во филтерот, преминува во стабилна вредност која се добива како:

$$\mu_{new} = \frac{\mu_{old}}{M} \quad (3.4)$$

каде  $M$  е должината на филтерот, а  $\mu_{old} = 2 \cdot E_x^{-1} \cdot 10^{-2}$ .

Тука најважно е да се одреди после колку последователни итерации  $n$  треба да се промени вредноста на  $\mu$ , т.е.  $\mu_{old}$  да се замени со  $\mu_{new}$ . Најдобрата вредност за бројот на последователни итерации во независен режим може да се добие како:

$$M \leq n \leq M^2 \quad (3.5)$$

каде  $M$  е должината на филтерот, а  $n$  е бројот на последователни отчитувања во независен режим. На пример, ако  $M=4$ , користејќи  $n=M^2=16$  последователни добри предвидувања може да се смета како добар избор за преминување кон  $\mu_{new}$ , но за  $M=10$ ,  $n=M^2=100$  последователни добри предвидувања може никогаш да не се постигнат и со тоа да се нарушат перформансите на алгоритмот. Во овој случај, изборот за  $n=M=10$  ќе биде пооптимален. Вредноста  $n=M^{3/2}$  се смета за најсоодветна бидејќи ги задоволува и горната и долната вредност на должината на филтерот. За да се задржи конзистентноста на алгоритмот, и јазелот и синкот мора однапред да се договорени за вредноста на  $n$ .

Една од предностите на користењето на две различни вредности за параметарот  $\mu$  (една за забрзување на почетната тежинска адаптација, а друга за фино подесување на тежините по адаптацијата) е тоа што придонесува за целокупната редукција на податоци без притоа да додава било каква комплексност на алгоритмот. Покрај тоа, без користење на специфична хеуристика за одреден тип на податоци може да се користи и во други шеми.

### 3.2.3 Модел на движечки просеци

Модел на движечки просеци (МА) е едноставен за користење и широко применет во алгоритмите за дигитално процесирање на сигнали поради тоа што врши оптимално намалување на белиот шум [3.18]. Ова е причината што го прави моделот на движечки просеци основен филтер при обработката на кодирани сигнали во временски домен. Како што кажува и самото име, овој филтер го пресметува излезниот сигнал како аритметичка средина од голем број на влезни мерења.

За даден влезен дигитален сигнал

$$\mathbf{z} = (z(1), z(2), \dots),$$

вистинскиот сигнал

$$\mathbf{x} = (\hat{x}(1), \hat{x}(2), \dots)$$

може да се добие како:

$$\hat{x}(k) = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} z(k-i) \quad (3.6)$$

за секое  $k \geq M$ , каде  $M$  се вика прозорец на филтерот (ред на МА моделот), или бројот на влезови кои се фузираат за да се генерира излезот. Прецизноста на филтерот најмногу зависи од должината на  $M$ . Кога сигналот има бел шум, МА филтерот го редуцира шумот за фактор  $\sqrt{M}$  [3.18]. Според тоа,  $M$  треба да ја има најмалата вредност со која оваа редукција на шум ќе ги задоволи барањата на конкретната апликација.

МА моделите се користат за предвидување кај голем број апликации од БСМ. Во [3.19] при проучување на рутирачки протоколи МА се користи за предвидување на квалитетот на врските помеѓу јазлите од БСМ. Nakamura во [3.20] со МА предвидува сообраќај во една БСМ како би детектирал можни падови на одредени јазли од мрежата.

Кај БСМ се користи и тежински МА модел, кај кој тежините на влезовите експоненцијално (ЕТМА) опаѓаат со зголемување на временското доцнење. ЕТМА филтрите се применуваат кај МАС протоколите при естимација на шум [3.21] и за временска синхронизација [3.22]. Во [3.23] се применува МА за детекција и

класификација, додека во [3.24] за проценка на растојание помеѓу јазли при локализација на БСМ.

### 3.2.4 Авторегресивен модел

Авторегресивните модели (AR) претставуваат популарна фамилија на методи за предикција кај временски серии од податоци [3.25][3.26]. Авторегресивен модел претставува функција во форма:

$$\hat{s}[t] = \theta_1 s[t - 1] + \theta_2 s[t - 2] + \dots + \theta_p s[t - p]$$

чија цел е предвидување на мерењето во време  $t$ , со помош на линеарна комбинација од мерењата собрани во претходните  $p$  временски инстанци. Векторот на параметрите  $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p)^T$  има  $p$  елементи, каде  $p$  се нарекува ред на моделот.

Ако за влезниот вектор во временска инстанца  $k$  се користи нотацијата:

$$x[t] = (s[t - 1], s[t - 2], \dots, s[t - p])^T$$

релацијата може да се запише како:

$$\hat{s}[t] = x[t]^T \theta.$$

(3.7)

За да се добие векторот на параметри  $\theta$ , најпрво е потребно да се соберат  $N$  последователни мерења, а потоа да се примени стандардна процедура на регресија. Најпопуларниот метод за параметарска идентификација на еден линеарен модел е методот на најмали квадрати [3.27].

### 3.2.5 Модел на авторегресивни движечки просеци

Моделот на авторегресивни движечки просеци (ARMA) претставува комбинација од претходните два модели. Овој модел содржи авторегресивна компонента од ред  $p$  т.е. AR( $p$ ) и компонента на движечки просеци од ред  $q$ , т.е. MA( $q$ ) [3.26]. Скратено се означува со ARMA( $p, q$ ).

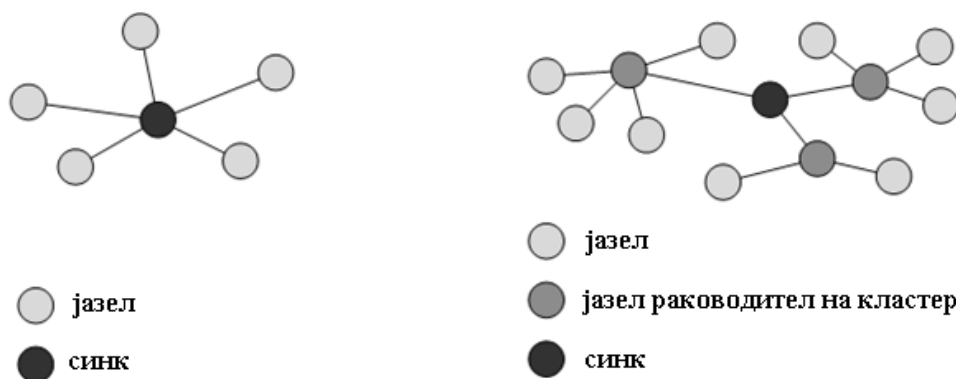
ARMA моделот кај БСМ се користи во [3.28] во комбинација со невронски мрежи за предикција на траекторија на движење на набљудуваниот објект. Со методот на најмали квадрати се добиваат коефициентите на AR компонента. Во [3.10] ARMA се користи за предвидување на временски серии на податоци. За да се намали комплексноста, се

земаат во предвид движечки прозорци со големина од 20 податоци за евалуација на точноста на предвидувањето. Ако средната квадратна грешка на предвидувањата во рамките на прозорецот е поголема од некој предефиниран праг, се врши ажурирање на ARMA коефициентите.

### 3.3 Евалуација на алгоритмите

#### 3.3.1 Топологија на мрежата

За евалуација на алгоритмите разгледувани беа две основни топологии, т.е. звезда (слика 3.3 лево) и кластер-базирана мрежна топологија (слика 3.3 десно). Кај првиот тип сите јазли своите податоци ги праќаат директно до синкот. Оваа топологија се карактеризира со мала латентност на комуникацијата помеѓу јазлите и синкот, но може да се примени само доколку синкот е во радио домет на сите јазли од БСМ. Во спротивно, кластер-базирана мрежна топологија е потенцијално решение каде сите јазли праќаат кон јазлите раководители на кластери. Овие јазли понатаму ги препраќаат податоците кон синкот. Ако синкот не е во радио домет на јазлите-раководители, може да се имплементира хибридна топологија.



Слика 3.3. Свезда-базирана мрежна топологија (лево), кластер-базирана мрежна топологија (десно)

#### 3.3.2 Податочни множества

Алгоритмите објаснети погоре беа имплементирани во Матлаб. За нивна евалуација беа искористени различни реални сензорски мерења добиени од две референтни бази на податоци. Хоризонталната оска на сите графици добиени при евалуацијата ја



претставува вредноста за дозволениот праг на грешка  $E_{\max}$  (во понатамошниот текст за  $E_{\max}$  ќе се користи “маргина на грешка”).

### **Податочно множество I ( ПМ I)**

Првата база е добиена од лабораторијата “Intel Berkeley Research Lab” [3.6] каде се распределни 54 Mica2Dot јазли опремени со сензори кои мерат температура, влажност на воздухот, интензитет на светлина и напон. Мерењата се правени на секоја 31s во периодот од 28 Февруари до 5 Април 2004 година. Податочното множество содржи 2.3 милиони записи. За евалуација на алгоритмите во ова истражување беа користени само записите за температура и влажност на воздухот. Симулациите беа направени за 50 различни вредности за маргината на грешка  $E_{\max}$  (во опсегот од  $0.1^{\circ}\text{C}$  до  $5^{\circ}\text{C}$  со чекор  $0.1^{\circ}\text{C}$ ).

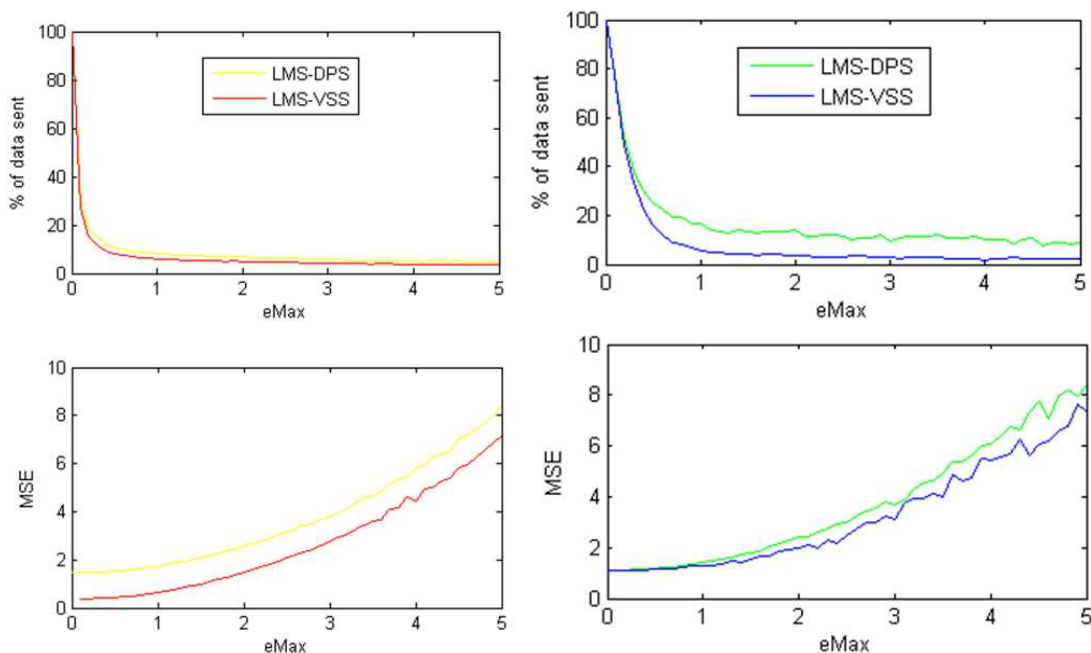
### **Податочно множество II ( ПМ II)**

Второто множество на мерни податоци кое се користи е од базата на податоци на национална океанска и атмосферска администрација на САД (NDBC) [3.29]. Во оваа база се чуваат историски записи за параметри како температура на морската вода, правец и брзина на ветер над океанската површина итн. За разлика од претходното податочно множество, вредностите на параметрите од ова податочно множество брзо се менуваат и не се временски корелирани како температурните отчитувања од ПМ I. Ова е очекувано ако се знае дека температурата е бавно менлива величина, особено ако станува збор за температура во затворен објект како што е случајот кај лабораторијата од ПМ I.

#### **3.3.3 Споредба на алгоритмите за предикција кај свезда-базирана мрежна топологија**

Кај свезда-базирана мрежна топологија, LMS-VSS алгоритам постигнува значително намалување во бројот на трансмисии во однос на LMS-DPS. За податоците од [3.6] на слика 3.4 (лево) дадени се резултатите за двата модели евалуирани на температурни отчитувања. Резултатите го даваат просечното намалување на бројот на трансмисии за сите 54 јазли од ПМ I [3.6]. LMS-DPS, за фиксна вредност за параметарот  $\mu = 1.2 \cdot 10^{-5}$  и должина на филтерот  $M = 4$  постигнува намалување на бројот на трансмисии на целата мрежа од околу 88% за маргина на грешка од  $0.5^{\circ}\text{C}$ . LMS-VSS користи иста должина на филтерот, но ги користи првите  $M = 4$  мерења за пресметување на почетната вредност на  $\mu$ , а потоа по  $M^{3/2}$  читања ја користи  $\mu_{\text{new}} = \mu_{\text{old}} \cdot M^{-1}$ . LMS-VSS постигнува просечна

заштеда на целата мрежа од околу 92%, со евидентно намалување на средната квадратна грешка (MSE). На слика 3.4 (десно) дадена е споредба на двата модели добиена за јазел 10 која се однесува за мерењата за влажноста на воздухот од ПМ I.

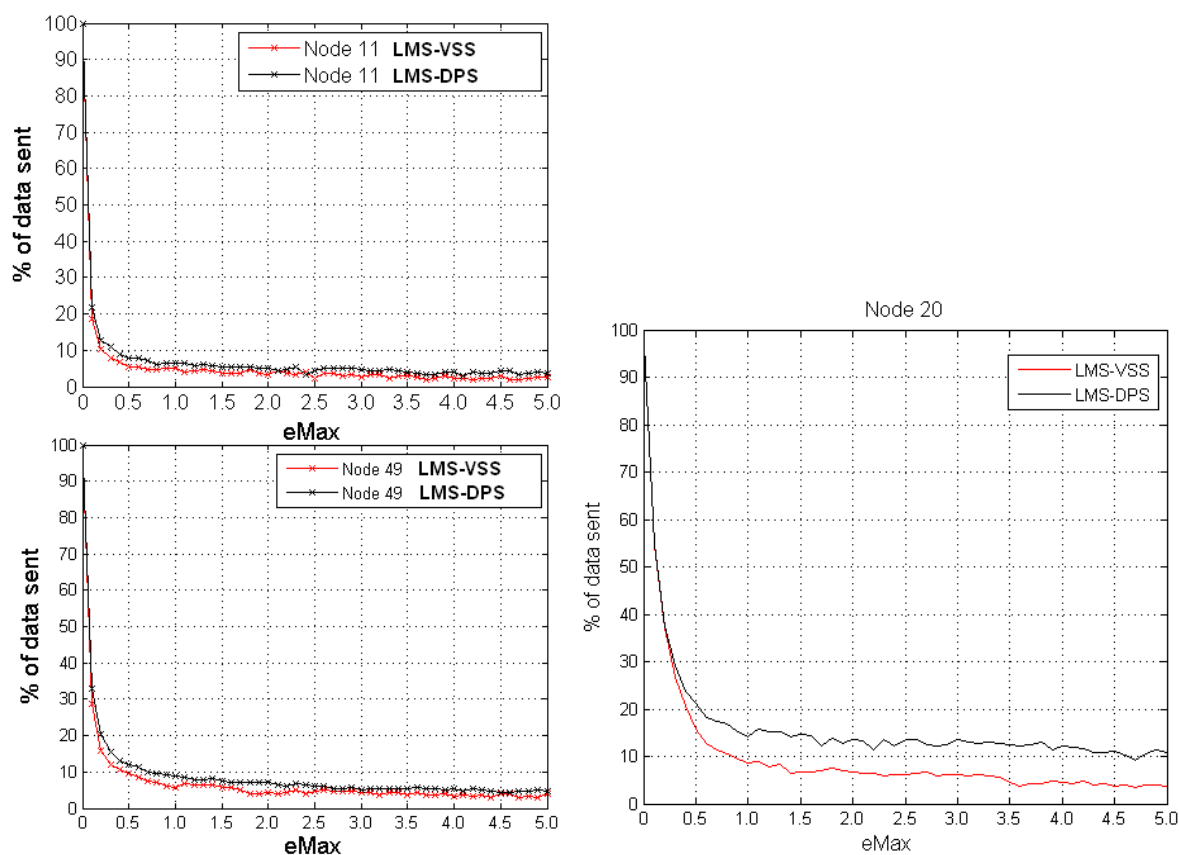


**Слика 3.4. Споредба на LMS-VSS и LMS-DPS кај температурните отчитувања од целото ПМ I (лево) и отчитувањата за влажноста на воздухот за јазел број 10 од ПМ I (десно)**

На слика 3.5 (лево) може да се споредат резултатите добиени од моделите LMS-VSS и LMS-DPS за одредени јазли од мрежата. Избрани се овие јазли, бидејќи јазел 11 дава најдобри резултати, т.е. 95% намалување за  $0.5^{\circ}\text{C}$ , а јазел 49 дава најлоши резултати или 90% намалување за  $0.5^{\circ}\text{C}$ . Покрај тоа, анализирани се и резултатите што ги даваат методите ако се применат на мерењата за релативна влажност изразена во проценти (0-100%). Резултатите за јазел 20 дадени се на слика 3.5 (десно). Како што може да се види од слика 3.5, LMS-VSS дава за 5% подобри резултати во споредба со LMS-DPS за маргина на грешка од  $0.5^{\circ}\text{C}$ , а за повеќе од 10% подобри резултати за маргина на грешка од  $1^{\circ}\text{C}$  и поголема. Сите резултати се добиени за должина на филтер  $M = 4$ .

Резултатите од MA и ARMA (слика 3.6 лево) покажуваат дека во однос на бројот на трансмисии ARMA алгоритмот е постојано подобар од останатите. MA алгоритмите се подредени по редослед: MA(2) е најдобар, MA (4) е втор, а MA (10) е веднаш зад него. Во најголем дел од резултатите од симулациите, разликата е поголема за вредности на

маргина на грешка во опсег  $[0, \sim 1.5]^{\circ}\text{C}$ . Меѓутоа, има многу мала разлика за вредности поголеми од  $\sim 1.5^{\circ}\text{C}$ .



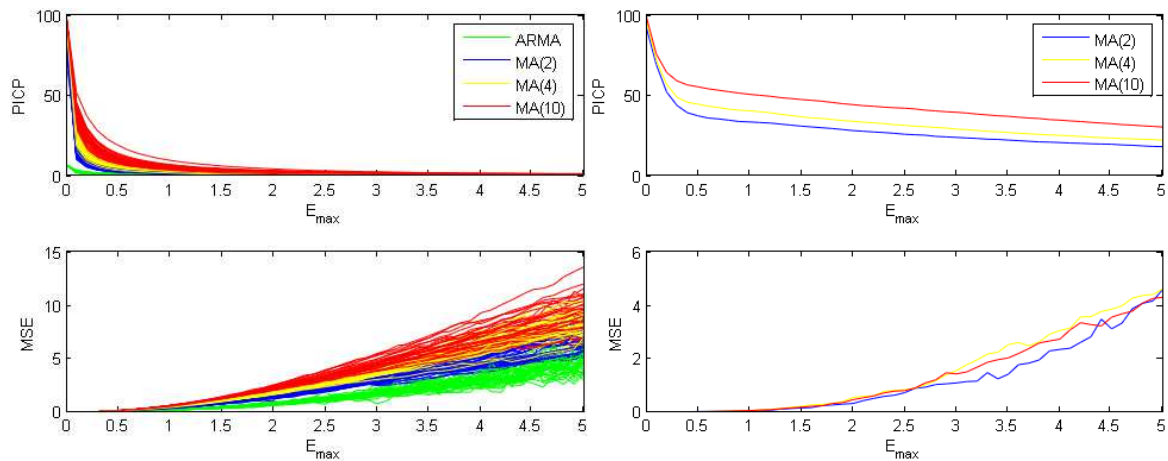
**Слика 3.5. Споредба на LMS-VSS и LMS-DPS на температурните отчитувања за јазлите број 11 и 49 (лево) и на отчитувањата за влажноста на воздухот за јазел број 20 (десно) од ПМ I**

Во однос на MSE, резултатите се малку понеконзистентни, но сеуште се појавуваат одредени шеми. Најпрво, може да се забележи дека постојат два главни интервали на вредности за маргината на грешка т.е. опсегот  $[0, \sim 3.5]^{\circ}\text{C}$  и опсегот  $[\sim 3.5, 5]^{\circ}\text{C}$  (каде што  $\sim 3.5$  е приближна вредност за границата). Во првиот опсег важи истиот распоред на алгоритмите, но во најголемиот дел од вториот опсег резултатите се испреплетени. Симулациите на слика 3.6 се однесуваат на температурните отчитувања од 30 јазли од ПМ I.

Резултатите од симулациите направени врз податочно множество од мерењата на правец на ветар се прикажани на слика 3.6 (десно). Правците на ветар се земени како

пример за податочно множество со нагло променливи вредности на сензорските отчитувања.

Во поглед на бројот на трансмисии, резултатите се во обратна корелација со редот на МА алгоритмот. Иако резултатите за секој од алгоритмите се блиски еден до друг во однос на MSE, МА(2) ги има најдобрите перформанси повторно, но за повисоки вредности за  $E_{\max}$ , вредностите за MSE понекогаш се испреплетуваат.



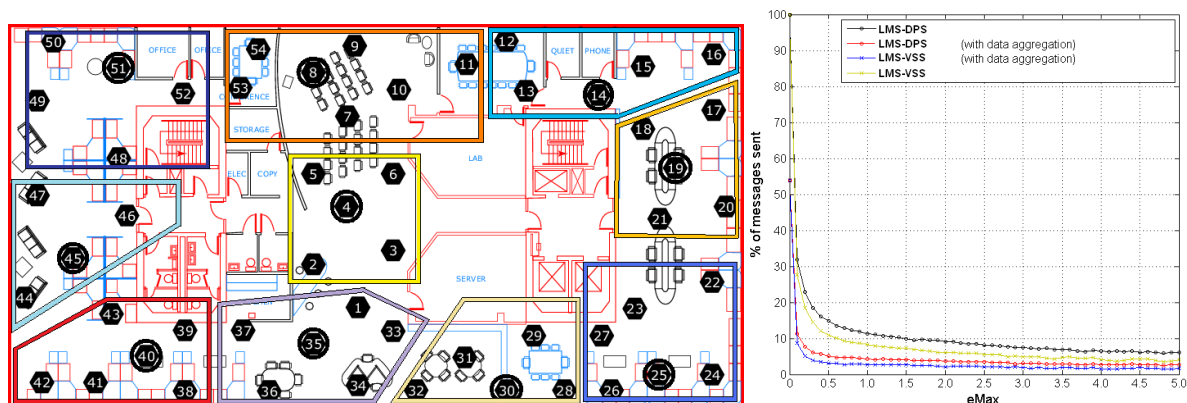
**Слика 3.6. Споредба на ARMA, МА(2), МА(4) и МА(10) кај ПМ I (лево) и споредба на МА(2), МА(4) и МА(10) кај ПМ II (десно)**

### 3.3.4 Споредба на алгоритмите за предикција кај кластер базирана мрежна топологија

Бидејќи сензорските читања од базата [3.6] се просторно корелирани, дополнително беа имплементирани и анализирани кластер-базирани мрежни топологии, каде што секој кластер врши агрегација на податоците. Евалуацијата беше извршена на LMS-VSS и LMS-DPS моделите.

Кластерирањето на јазлите кај БСМ претставува уште еден начин на продолжување на животниот век на мрежата. Пример на ваква кластерирана мрежа е даден на слика 3.7 (лево), каде е извршено кластерирање на Intel мрежата [3.6]. За кластерирање беше избран методот на  $k$ -средини, каде  $k = 10$ . Вредноста за  $k$  беше избрана интуитивно и даде задоволителни резултати. Како што се гледа на сликата, јазлите се групирани во кластери според физичките позиции (Евклидовото растојание помеѓу јазлите). Во секој кластер еден претставник е избран да биде раководител или глава на кластерот (задебелен круг околу јазелот). Сите јазли во кластерот ги праќаат своите мерења до

раководителот на нивниот кластер кој понатаму може да ги препраќа добиените податоци, или пак може да ги процесира па да ги препраќа само резултатите. Во првиот случај, секој податок (мерење) се праќа по два пати освен мерењето на раководителот на кластерот. Во вториот случај секое мерење се праќа само еднаш до раководителот на кластерот, кој по извршената сумаризација (просек, минимум, максимум, итн.) го праќа агрегатот кон синкот.



Слика 3.7. Кластерирана БСМ (Intel Berkeley Research Lab) [3.6] (лево) и резултати за кластерот кој ги содржи јазлите: 7, 8, 9, 10, 11, 53 и 54 (десно)

Во симулациите за параметарот  $\mu$  беше земена вредноста  $1.2 \cdot 10^{-5}$  а должината на филтерот е  $M = 4$  за сите јазли. Промена на  $\mu$  и на  $M$  може да доведе до дополнителна заштеда. Одредувањето на овие вредности може да се прави и динамички и со примена на некои техники од вештачка интелигенција.

За анализа беше избран кластерот кој ги содржи јазлите: 7, 8, 9, 10, 11, 53 и 54.

Резултатите од симулацијата покажуваат дека LMS-VSS моделот е супериорен во однос на LMS-DPS. Како што се гледа на слика 3.7 (десно), LMS-VSS моделот постигнува поголема редукција за 5% во споредба со моделот LMS-DPS. Ако се примени и агрегација на податоци, намалувањето на трансмисиите е далеку поголемо и LMS-VSS моделот резултира со 97% намалување на вкупните пораки испратени за дадената маргина на грешка на  $0.5^\circ\text{C}$ .

### 3.4 Заклучок

Редукцијата на податоци кои се праќаат кај БСМ е најробуствен начин на заштеда на енергија. Од повеќето начини кои овозможуваат редукција на трансмисиите,

предикцијата на податоци е најсоодветна бидејќи истовремено обезбедува добивање на автентични податоци и нивна анализа во реално време. Иако повеќето техники за предикција се зависни од самата апликација, пожелно е да се изнајдат техники кои би биле универзални и би важеле за поголем опсег на мерни податоци. Соодветен избор на модел за предикција кај БСМ може да доведе до високи комуникациски заштеди дури и ако се поседува малку или воопшто не се поседува а priori знаење за сигналите од интерес. За таа цел, моделите треба да се бираат со соодветни автоматски процедури кои овозможуваат навремено приспособување кон променливите сигнали и мрежната динамика.

Во оваа глава беа предложени и анализирани повеќе модели за предикција на временски серии од податоци. Благодарение на нивната генеричка применливост и можност за имплементација кај јазли со ограничени ресурси, овие модели треба да овозможат употреба на БСМ за ефикасно и долгорочно следење на животната средина. Секако, предикцијата на податоци кај БСМ не е сеуште исцрпена. Останува и во иднина да се имплементираат и евалуираат нови хибридни модели кои би довеле до поточна предикција.

## Глава 4

# Податочна фузија кај БСМ

БСМ генерираат големи количини на податоци кои треба да се процесираат и препраќаат и до кои треба да се пристапува во зависност од потребите и целите на конкретната апликација. Начинот на манипулација со овие податоци е од круцијално значење кај една БСМ. Податочната фузија се јавува како одзив на оваа потреба за обработка на сензорските податоци.

Терминот податочна фузија во литературата честопати се среќава и како “сензорска фузија”, ”мулти-сензорска фузија” или “информациона фузија” [4.1]. Формално, сите овие термини означуваат процес на комбинирање на податоци од повеќе сензори (извори). Притоа, целта е преку прибирање и анализа на соодветните податоци да се постигне поголема точност и попрецизни заклучоци, споредбено ако истата постапка се примени врз податоците добиени од еден сензор (извор).

Агрегација на сензорски податоци е друг термин кој во поново време станува актуелен во академската заедница [4.2]-[4.4]. Иако често се користи како синоним за податочна фузија, постојат некои разлики. Агрегација на сензорски податоци претставува дистрибуирана обработка и анализа на податоците во самата сензорска мрежа, и се однесува на анализа на податоци на најниско ниво. Според тоа, агрегацијата опфаќа техники за намалување на волуменозноста на податоците пред тие да бидат доставени до финалните конзументи. Со оваа постапка се намалува количината на податоци кои се препраќаат низ мрежата и се зголемува нејзиниот животен век. Агрегацијата на податоци претставува подмножество на податочната фузија.

Значи, податочна фузија опфаќа алгоритми, методи и техники за анализа на податоци добиени од голем број на различни, и честопати дистрибуирани извори [4.5][4.6].

Поради временско-просторните ограничувања кои постојат во една БСМ, податочната фузија треба да обезбеди: кооперација, редундантност и комплементарност.

Кооперација е соработка и интеграција на податоците добиени од повеќе сензори. Ако набљудуваниот регион е покриен со определен број на сензори, секој од нив може да генерира парцијална информација. Податочната фузија треба врз основа на овие делумни информации да генерира комплетни информации.

Редундантност на податоците има кога два независни извори продуцираат иста информација (мерат температура во ист регион). Тогаш имаме нивно фузирање со цел да се добие подоверлива информација.

Комплементарност на податоци имаме кога постојат повеќе различни извори во набљудуваниот регион [4.7]-[4.13].

Безжичните сензорски мрежи се користат за да се поедностави решавањето на ситуации во комплексни апликациски сценарија. Во сите случаи целта е врз база на прибраните податоци да се детектираат настани од интерес. Има два пристапи за тоа како да се моделираат системите за детекција на настани. Едниот пристап е да се испратат необработени податоци од сите јазли до базната станица за централна евалуација. Но со тоа се намалува траењето на јазлите бидејќи постојано трансмитираат податоци со што рапидно ја трошат својата енергија. Другиот пристап е секој јазел да направи одредена класификација на податоците што ги добива, да се извести базната станица за детектираниот настан и базната станица да направи статистичка евалуација од сите пристигнати извештаи. Во ова сценарио може да има намалување на точноста бидејќи евалуацијата зависи од точноста на детекција кај сите јазли. Дополнително, учењето на јазлите за тоа како да ги детектираат настаните може да биде многу скап процес, бидејќи може да се праќаат многу експериментални настани за да се утврди кој настан ќе биде алармантен и ќе се разликува од останатите.

Според тоа, основна поделба на алгоритмите и техниките за податочна фузија е на централизирани и децентрализирани (дистрибуирани). Препорака е кај скалабилни мрежи да се фаворизираат дистрибуираните техники, бидејќи тие обезбедуваат помал проток на информации низ мрежата што придонесува за зголемување на нејзиниот животен век. Агрегацијата на податоци е најсоодветна техника од овој аспект и треба да се користи во сите случаи кога таа ги задоволува барањата на конкретната апликација [4.14]-[4.16]. Агентско-базираните системи се предложени во [4.17] како дистрибуирана парадигма за податочна фузија. Овој пристап е погоден кога димензионалноста на



податоците е многу голема, а кодот кој треба да се извршува врз тие податоци е значително помал. Централизираните системи, од друга страна, некогаш се покажуваат како подобри од дистрибуираните [4.5]. Тоа се должи на фактот дека овие системи имаат глобално знаење, т.е. сите мерења се достапни за обработка.

Во продолжение на оваа глава ќе бидат опишани два пристапи за податочна фузија кај БСМ. Првиот пристап е базиран на неопределна логика и се користи за детекција на пожар, а вториот хеуристички пристап се користи за детекција на движење со видео БСМ.

#### **4.1 Детекција на пожар со примена на непрецизна логика**

Пожарите се честа појава во летните периоди, особено во Јужна Европа и на Балканскиот полуостров. Во Македонија ситуацијата беше особено лоша во 2007 година, кога според официјалниот извештај на претставништвото на Обединетите Нации во Македонија изгореле 50000 хектари шума, а штетата била проценета на 21 милион евра. Само во околината на Битола изгореле околу 6000 хектари борова шума. Последиците од овие пожари се незанемарливи, особено ако се има во предвид дека обновата на изгорениот шумски појас во просек трае и до 50 години. Во продолжение ќе наброиме само некои од позначајните последици [4.18]-[4.20].

##### **Еколошки последици**

- намалено производство на кислород и намалена апсорпција на јаглерод диоксид од дрвјата.
- зголемување на  $CO_2$  во воздухот со што се зголемува глобалното затоплување.
- појава на поплави и ерозија.
- намалување на капацитетот на подземните води и изворите, а со тоа и намалување на квалитетот на водата за пиење.
- намалување на бројот на диви животни.
- зголемување на интензитетот на ветровите и промена на микроклимата.

##### **Социо-економски последици**

- уништување на плодна земја, фарми и посеви.
- уништување на дрво за граѓа, шумски плодови и природни лекови.

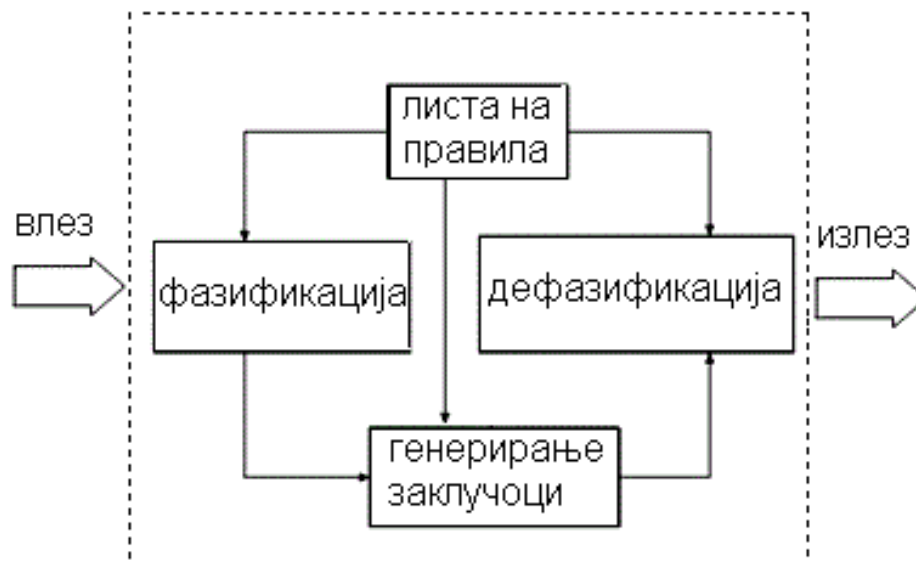
- уништување на инфраструктурни објекти.
- последици по здравјето на луѓето (поради ослободениот  $\text{CO}_2$  во големи количини).
- трошоци за гаснење на пожарите и обновување на шумата.

Веќе има повеќе обиди за инсталација на БСМ во шумски региони со цел навремена детекција на пожар и брза реакција при гаснење на истиот [4.21]. Јазлите од ваква мрежа најчесто се опремени со сензори за температура и концентрација на  $\text{CO}_2$ . Измерените вредности мора дистрибуирано да се процесираат со цел да се добие оптимален животен век на мрежата, што е од особено значење кај овие мрежи бидејќи е практично невозможно да се врши замена на батериите од јазлите.

#### 4.1.1 Непрецизната логика

Резонирањето со непрецизна логика е многу слично како човековото резонирање бидејќи е многу интуитивно и манипулира со непрецизни и недоверливи податоци. Истото важи и за донесените заклучоци. Непрецизната логика за прв пат е воведена од Lotfi A. Zadeh и овозможува едноставен начин за донесување на заклучоци врз база на непрецизни информации за состојбата на системот [4.22]. Со користење на едноставни IF-THEN правила се дефинираат операциите врз расположливите податоци. Правилата и фактите најчесто се изразени со нумерички, лингвистички променливи. Пристапот базиран на непрецизна логика манипулира со вредности во интервал  $[0,1]$ , но не во пробабилистичка смисла. Во тој контекст, се користи поимот “степен на припадност” за одредени вредности кон одредени множества. Оваа дефиниција е најчесто субјективна и се гради во консултација со експерти од соодветната област за чии потреби се гради конкретниот систем за резонирање. Овие множества се викаат “множества на припадност”, а самиот процес на генерирање на овие множества е познат како фазификација. На слика 4.1 е даден модел на систем за резонирање со непрецизна логика. Најпрво влезните податоци се фазифицираат, односно се одредува степенот на припадност за секоја влезна варијабла кон предефинираните множества на припадност. Потоа за конкретните влезови се повикуваат правилата на системот со чија помош се носи некаков заклучок. Постојат повеќе техники за донесување на заклучоци кај овие системи, но најпознати се Мамдани и Сугено техниките. На крај, донесениот заклучок, кој повторно е даден преку степен на припадност кон излезните множества, се

дефазифицира. Дефазификација е обратен процес од фазификација, т.е. се врши трансформација од “степен на припадност” во конкретна нумеричка вредност.



**Слика 4.1. Систем базиран на непрецизна логика**

Непрецизната логика кај БСМ освен за детекција на настани [4.23], наоѓа примена и кај други проблеми како наоѓање на оптимална патека за рутирање [4.24], избор на раководител на кластер кај кластер базирана мрежна топологија [4.25] и сл.

Дистрибуирано донесување на заклучоци кај БСМ со примена на непрецизна логика е недоволно истражено. До сега во литературата предложени се мал број на пристапи кои користат непрецизна логика за детекција на настани кај БСМ. Еден од нив е D-FLER [4.26] каде со користење на max-min заклучување се врши комбинација на индивидуалните и соседните опсервации со цел да се донесе најпрецизен заклучок. Дополнително, овој пристап е тестиран на прототип платформа базирана на Ambient  $\mu$ Node 2.0. Како недостаток тука може да се спомене тоа што авторите не го споменуваат бројот на погрешни предвидувања, па овој метод не може да се компарира со други методи. Сличен пример е даден во [4.27] каде е извршена споредба на резултатите добиени со непрецизна логика и со два други алгоритми за класификација и потврдена е супериорноста на првиот пристап.

#### 4.1.2 Дизајн на БСМ систем базиран на непрецизна логика

Во оваа секција користејќи го моделот од слика 4.1, опишано е дизајнирањето на БСМ систем за дистрибуирано донесување на одлуки со користење на непрецизна

логика. За тестовите спроведени во овој проект се користат податоците од четири различни пожари симулирани од Националниот институт за стандарди и технологии (NIST) [4.28]. Дадени се мерењата на јазлите за различни сензори пред и по настанот: температура, чад и концентрација на различни гасови. За некои од сензорите кои се користат при моделирањето недостасуваат мерења за некои временски интервали. Овој проблем е решен со повторување на претходните валидни вредности за интервалите кои недостасуваат.

За евалуација користени беа четири сценарија, при што кај првите две јазлите беа распределени во двокатна куќа, а кај другите две во еднокатна куќа. Мапа на куќите и распоредот на јазлите по катови е даден во Прилог А. Јазлите содржат сензори за температура, зачаденост, концентрација на јаглероден моноксид (CO), концентрација на јаглероден диоксид (CO<sub>2</sub>) и концентрација на кислород (O<sub>2</sub>). За овој проект се користеа само мерењата за температура и концентрацијата на CO<sub>2</sub> и O<sub>2</sub>, бидејќи овие параметри имаат најголемо влијание кога се работи за детекција на пожар и обезбедуваат повеќе информации во споредба со параметарот за концентрација на CO.

Сензорите распоредени на различни локации низ собите чуваат копија од сопствените вредности на следниве параметри: температура, информации за концентрација на CO<sub>2</sub> и O<sub>2</sub>, како и информации за просечната температура на соседните јазли (сите јазли во една соба се сметаат за соседни јазли).

За секое од четирите сценарија извршени беа осум тестови за различни влезни атрибути и различни методи на донесување на заклучоци. Параметрите за овие осум тестови се дадени во табела 4.1. Функциите на припадност за секој од четирите параметри се дадени во Прилог А. Сите функции на припадност имаат трапезоидна форма. Се користат следните четири влезни променливи: температура (Temp), просечна температура на соседните јазли (tempN), концентрација на кислород (O<sub>2</sub>) и концентрација на јаглерод диоксид (CO<sub>2</sub>).

Следниот чекор при креирање на системот е дефинирање на правила. Бројот на правила е правопрпорционален со бројот на функциите на припадност. Еден од недостатоците при имплементацијата на непрецизна логика кај сензорски јазли е потребата од значителна меморија. Бидејќи бројот на правила расте експоненцијално со бројот на променливи, т.е. за  $n$  променливи од кои секоја може да има  $m$  вредности,

бројот на правилата е  $m^n$ . Поради ограничените мемориски ресурси кај сензорите, потребно е да се применат техники за намалување на бројот на правила. За да се постигне поефикасна имплементација на системот, во опишаниот систем иницијалните 64 правила беа редуцирани на 33 правила.

**Табела 4.1. Параметри за тестирање**

Тест	Temp	tempN	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Метод на донесување на заклучок
1	да	да	да	да	Мамдани
2	да	не	да	да	Мамдани
3	да	да	да	не	Мамдани
4	да	да	не	да	Мамдани
5	да	не	не	да	Мамдани
6	да	да	да	да	Сугено
7	да	не	да	не	Сугено
8	да	не	да	да	Сугено

#### 4.1.3 Резултати и дискусија

Бидејќи за сите сценарија познато е дали настанал пожар, можно е да се одредат вредностите за прецизност и сензитивност. Овие поими се дефинирани со следниве формули:

$$\text{ПРЕЦИЗНОСТ} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (1)$$

$$\text{СЕНЗИТИВНОСТ} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

$$\Phi\text{-мерка} = 2 \cdot \frac{\text{Прецизност} \cdot \text{Сензитивност}}{\text{Прецизност} + \text{Сензитивност}} \quad (3)$$

каде TP е број на точни позитивни класификации, FP е број на неточни позитивни класификации, TN е број на точни негативни класификации и FN е број на неточни негативни класификации. Значи, прецизността ни кажува колкав дел од случаите кои се класифицирани како позитивни се навистина позитивни, додека сензитивност е бројот на позитивно класифицирани настани поделен со вкупниот број на настани од позитивната класа. Ф-мерката ја дава хармониската средина од прецизността и сензитивноста.

Резултатите се во интервал [0,1]. Вредностите помали од 0.5 се класифицираат како 0 (нема пожар), а останатите како 1 (има пожар). Се анализира излезот од секој јазел од мрежата. Ако барем еден јазел детектира пожар тогаш се заклучува дека настанал пожар. Со употреба на формулите (1), (2) и (3) се пресметани прецизноста, сензитивноста и  $\Phi$ -мерката. За да се постигне поголема точност при детекцијата, потребно е да се добијат што е можно поголеми вредности за прецизноста и за сензитивноста. Резултатите од осумте тестови за секое од четирите сценарија се дадени во табела 4.2. Како што се гледа од резултатите, бидејќи прецизноста е секогаш 1, системот никогаш не детектира пожар кога нема пожар, т.е. не генерира лажан аларм.

Ако го елиминираме првото сценарио кое дава најдобри резултати бидејќи врз основа на податоците од ова сценарио беше моделиран системот и соодветните правила и функции на припадност, може да се заклучи дека најдобри резултати дава четвртото сценарио. Најдобрата вредност за  $\Phi$ -мерката е скоро 90% за тестот кој дава најдобри резултати, а најлоша е 53% за тест број 8 од второто сценарио. Просечната вредност за  $\Phi$ -мерката кај второто сценарио е 68.97%, за третото сценарио е 76.33%, а за четвртото сценарио е 85.43%.

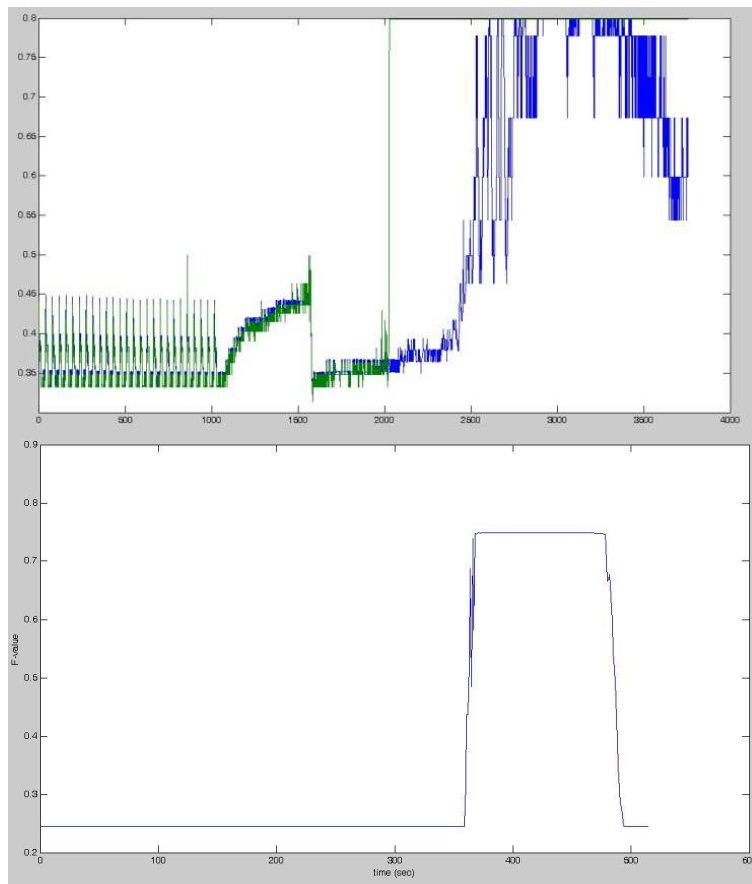
Ако подобро се анализираат резултатите, може да се види дека најдобри резултати се добиваат за тест 2 кај сите четири сценарија. Кај овие тестови не се зема во предвид атрибутот  $tempN$ , што ни кажува дека овој атрибут може сосема да се занемари, што од друга страна би довело до намалување на множеството на правила и редуција на комплексноста на алгоритмот од аспект на време на процесирање и потребна меморија кај јазлите за складирање на листата со правила. Ова е очекувано ако се знае дека кога некој јазел би детектирал пожар, сигурно неговата измерена вредност за параметарот температура е поголема од вредноста за истиот параметар која ја измериле соседните јазли. Исто така, бидејќи потребен услов за да системот детектира пожар е барем еден јазел да детектира пожар, очигледно е дека параметарот  $tempN$  не носи дополнителни корисни информации за системот. Ако се анализираат резултатите кај тест 3 и тест 4, каде параметрите за концентрацијата на  $CO_2$  и  $O_2$  взаемно се исклучуваат, може да се заклучи дека вториот параметар е позначаен при донесување на одлуката, бидејќи кога концентрацијата на  $O_2$  се зема во предвид времето за детекција на пожар е пократко.

На слика 4.2 (горе) дадена е споредба на времето потребно да се детектира пожар од два јазли распоредени во спалните соби кај првото сценарио. Дадена е Ф-мерката за јазел кој се наоѓа во непосредна близина на пожарот и јазел кој се наоѓа во соседната соба. Резултатите се очекувани имајќи во предвид дека е потребно одредено време за да се рашири пожарот од една во друга соба.

**Табела 4.2. Резултати за прецизност, сензитивност, Ф-мерка и број на временски интервали за да се детектира пожар**

Сценарио	Тест	Прецизност	Сензитивност	Ф-мерка	Временски интервали потребни за детекција
1	1	1	0.9612	0.9799	70
	2	1	0.9695	0.9842	55
	3	1	0.9695	0.9842	55
	4	1	0.9612	0.9785	70
	5	1	0.9695	0.9828	55
	6	1	0.9612	0.9799	70
	7	1	0.9696	0.9828	55
	8	1	0.6987	0.8223	543
2	1	1	0.454	0.6245	89
	2	1	0.6442	0.7836	58
	3	1	0.6074	0.7557	64
	4	1	0.4479	0.6186	90
	5	1	0.6442	0.7836	58
	6	1	0.4601	0.6303	88
	7	1	0.6442	0.7836	58
	8	1	0.3681	0.5381	103
3	1	1	0.5	0.667	82
	2	1	0.75	0.8571	41
	3	1	0.7012	0.8244	49
	4	1	0.5061	0.6721	81
	5	1	0.7561	0.8611	40
	6	1	0.5	0.667	82
	7	1	0.7564	0.8611	40
	8	1	0.5	0.667	82
4	1	1	0.7086	0.8295	44
	2	1	0.8013	0.8897	30
	3	1	0.8013	0.8897	30
	4	1	0.6623	0.7968	51
	5	1	0.8013	0.8897	30
	6	1	0.702	0.8249	45
	7	1	0.8013	0.8897	30
	8	1	0.702	0.8249	45

Во некои случаи пожарот е детектиран и експресно изгаснат. Иако системот ги детектира ваквите случаи, не детектира пожар по изгаснувањето на пожарот. На слика 4.2 (долу) е дадена  $\Phi$ -мерката за еден ваков случај од второто сценарио.



**Слика 4.2.  $\Phi$ -мерка изразена временски во милисекунди (горе) и  $\Phi$ -мерка во случај кога пожарот е локализиран (долу)**

Со цел да го споредиме нашиот метод за класификација кај БСМ базиран на непрецизна логика, го избравме Баесовиот класификатор за споредба [4.29]. За изборот на овој класификатор пресудна беше неговата временска комплексност која е многу слична со комплексноста на нашиот пристап [4.20]. Резултатите добиени за истото податочно множество [4.28] се дадени во табела 4.3.

**Табела 4.3. Споредба на резултатите добиени со Наивен Баесов класификатор и методот базиран на непрецизна логика**

	Непрецизна логика	Наивен Баес
Рата на точност	81.4%	71.78%



Ратата на точност кога се користи непрецизна логика е пресметана според формулата (4):

$$\text{Рата на точност} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (4)$$

И за двете рати на точност земени се најдобрите резултати добиени и од двата методи.

Емпириски резултати добиени од ова истражување покажуваат дека непрецизната логика е супериорна техника за детекција на пожар со БСМ. Од резултатите може да се заклучи дека податоците добиени од само еден сензор се сосема доволни за откривање на пожар. Ова укажува дека бројот на сензори може да се намали со добро решение за нивно поставување. Исто така, може да се заклучи дека локацијата на сензорите е од клучно значење за брза детекција. Ако сакаме да се постигне многу висока прецизност при откривање на пожари на одредено место пожелно е да се дизајнира систем кој ќе биде компатибилен со условите во тоа место (на пример, за некои просечна собна температура е 25°C, а други одржуваат просечна собна температура од 18°C). Понатамошна анализа на реални сценарија и/или експериментални резултати ќе биде од голема важност при дизајнирање на еден ваков систем.

## 4.2 Детекција на подвижни објекти со видео БСМ

Потребата од поголема безбедност поттикна нови истражувања во областа на системите за видео надзор, особено кај сензорските системи кои генерираат видео секвенци. Тоа доведе до појава на безжични сензорски мрежи кои имаат интегрирани камери каде што камерите се „главни“ сензори на јазлите. Спротивно на предностите на користењето на стабилна и реконфигурабилна комуникација помеѓу јазлите кај една БСМ, безжичните сензорски мрежи кои имаат камери треба да се соочат со главните ограничувања на овие мрежи (ограничен пресметковен и складирачки капацитет и комуникација со низок пропусен опсег). Според ова, сите централизирани решенија каде еден јазел ќе ги обработува сите слики не се соодветни за овој тип на БСМ. Затоа најчесто сликите од секоја камера се обработуваат кај секој јазел од безжичната сензорска мрежа локално. Секој јазел кој има интегрирана камера има доволен пресметковен капацитет да изврши некаков алгоритам за обработка на сликата за да се

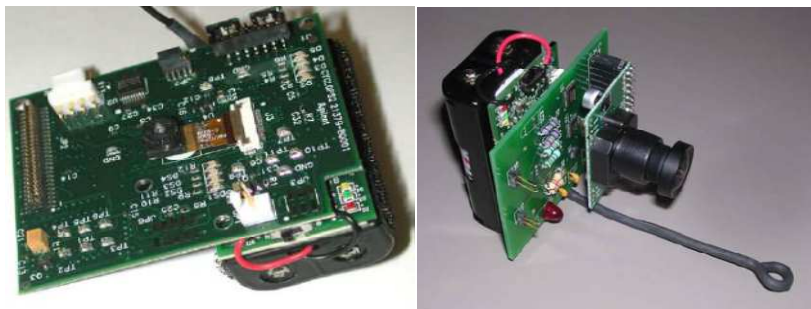
добијат потребните информации од сликите. Јазлите со интегрирана камера праќаат само одредени податоци низ БСМ. Потоа базната станица која ги прима податоците од сите јазли кои имаат интегрирани камери извршува некаква фузија на податоците за да генерира знаење за системот, како на пример податоци за координатите на некој објект во околината што се набљудува. Овој пристап драстично ги намалува потребите за пропусен опсег и ги распределува пресметковните задачи кај сите јазли од БСМ. Во продолжение ќе бидат опишани различни видео платформи понудени од различни производители на безжични сензорски јазли кои имаат интегрирани камери.

Cyclops [4.30] е надворешна плочка со камера која лесно може да се интегрира како надворешен сензор на било која сензорска платформа, како што се на пример јазлите од фамилијата на Mica (слика 4.3 лево). Оваа плочка се состои од микроконтролер, програмирачка единица, надворешна меморија и камера која дава слики со ограничена резолуција (128x128). Cyclops се состои од Atmel ATmega128L микроконтролер заедно со 64 килобајти SRAM. Микроконтролерот има 8 битна RISC архитектура со брзина од 8MHz која е одговорна за брза обработка на слики додека прима податоци. Овие системи дозволуваат контрола и обработка директно на чипот и се карактеризираат со голема енергетска ефикасност. Микроконтролерот се користи за одредување на режимот на работа на целиот јазел, за режимот на работа на другите компоненти на системот, одредува кога и кои податоци треба да се пренесат и комуницира со домаќинот (хостот), т.е. со јазелот на кој е интегрирана камерата. Иако овој систем има мала потрошувачка на енергија, главен недостаток е тоа што може да генерира само 5 слики во секунда.

Weeble архитектурата е уште една видео платформа [4.31] чија камера се карактеризира со ниска цена и лесна интеграција со Mica2 јазлите (слика 4.3 десно). Овој јазел е способен за превземање на слики со максимална резолуција од 640x480.

Philips Smart Camera Mote е ново решение за видео платформа наменета за безжичните сензорски јазли развиено од Philips Research Laboratories [4.32]. За да го намали времето потребно за обработка на слика на ниво на пиксели од повеќе VGA сензори, јазелот користи специјално дизајниран Xetal-II процесор кој овозможува една форма на паралелизам при процесирањето, т.е. поседува 3 процесори на еден чип, еден за влезните податоци, друг за излезните податоци и последниот за контрола на перифериите. Брзината на тактот е 84 MHz. Сето ова е направено затоа што при

обработката на сликите, врз одредени блокови од соседни пиксели се прават исти или слични операции. Оваа архитектура овозможува имплементација на комплексни алгоритми за обработка на сликите, но како главен недостаток на ова решение е релативно големата потрошувачка на енергија [4.33][4.35].



**Слика 4.3. Cyclops [4.30] (лево) и Weeble архитектура [4.31] (десно)**

Постојат и други популарни безжични сензорски јазли со интегрирани камери. како што се SensEye [4.36], Yale's AER [4.37][4.38], MeshEye [4.39], eCam [4.40], MicrelEye [4.41], Citric [4.42] и многу други.

#### 4.2.1 Двослојна архитектура за видео надзор кај БСМ

Детекција на движење е прв чекор при генерирање на типична апликација за видео надзор. Следните фази (следење на објект и напредна обработка и анализа) во голема мера зависат од точноста и стабилноста на првиот чекор [4.43].

Во традиционалните системи за видео надзор, видео секвенцата се компресира со користење на JPEG компресија. Модулот за детекција на движење добива широк агол на сликата од камерата како влез и ја пресметува разликата помеѓу последователните слики. Кога оваа разлика е над некој предефиниран праг, детектира присуство на подвижен објект. Детекцијата на движење е комплексен проблем поради постојаните промени во природата, како ненадејни илуминации, атмосферски влијанија, движење на лисја од дрва, вода итн.

Повеќето алгоритми предложени во последните години кои го третираат проблемот на екстракција на подвижни објекти од видео секвенци, во основа може да се поделат на три основни групи: временско диференцирање, одземање на позадина и оптички проток. Последниот пристап е многу сложен како од мемориски така и од временски аспект и според тоа и несоодветен за апликации каде е потребно процесирање во реално време.

Временско диференцирање е високо прилагодлива техника кога околината која се мониторира се карактеризира со голема динамика. Оваа техника ја користи разликата на ниво на пиксели помеѓу две или три последователни слики од видео секвенцата. Но овој метод не дава добри перформанси при извлекување на сите релевантни пиксели, особено кога објектот кој треба да се детектира ќе престане да се движи, се движи бавно или има униформна текстура.

Алгоритмите кои најчесто се користат за детекција на движење го користат методот на одземање на позадина. Овој метод е многу чувствителен на динамични средини и обезбедува целосна екстракција на сите пиксели од објектот кој треба да се детектира. Детекцијата се постигнува со одземање на тековната слика од референтната слика во сите региони каде што тие се совпаѓаат. Референтната слика уште се вика и позадина и се генерира во иницијализирачката фаза како просек од неколку последователни слики. Со цел да се прилагоди на тековните услови на средината која се мониторира, референтната слика на одредени временски интервали се ажурира користејќи ги поновите слики.

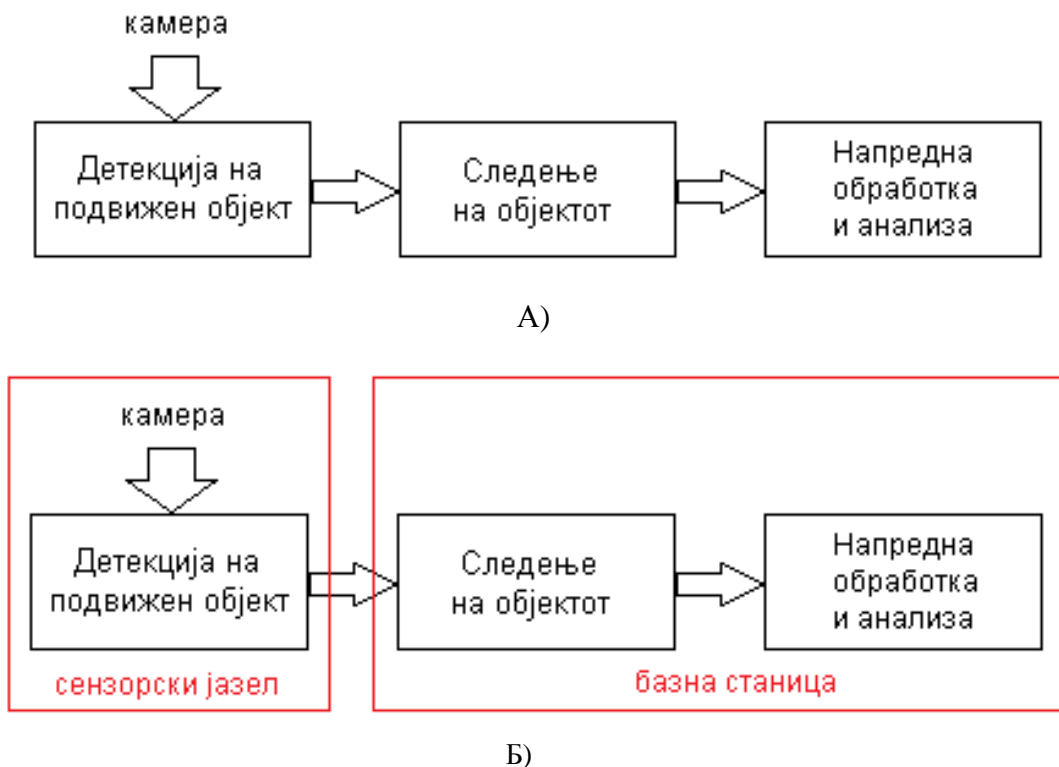
При моделирање на позадината, најчесто се јавуваат два типични проблеми:

- присуство на објекти кои по правило не припаѓаат во набљудуваниот регион, но случајно се нашле таму за време на процесот на моделирање на позадината.
- ненадејни варијации во осветлувањето.

Моделирањето на позадината обично се врши на ниво на пиксели, каде пикселите би можеле да бидат групирани во блокови. Интензитетот или бојата на пикселите е најчесто употребуваната карактеристика.

За разлика од традиционалните системи за видео надзор, кај апликациите изградени врз БСМ, податоците не можат да се процесираат на традиционален или централизиран начин, т.е. да се праќаат видео секвенците до базната станица за понатамошно процесирање (слика 4.4 А). Затоа е потребна двослојна архитектура каде првиот слој е претставен од самите сензорски јазли, а вториот слој го претставува базната станица (слика 4.4 Б). Јазлите се одговорни за иницијално процесирање на видео секвенците, т.е. за имплементација на алгоритмите за локална детекција на објекти. Ако резултатите од анализата покажат дека таа слика има потенцијал да содржи корисна информација, сликата се компресира и се праќа до базната станица. За компресија може да се користат

различни техники, но JPEG стандардот е прифатен како најсоодветен [4.44]. Вториот слој е одговорен за понатамошна анализа (следење на објект и напредна обработка и анализа).



**Слика 4.4. А) Традиционален систем за видео надзор и Б) Двослојна архитектура за видео надзор кај БСМ**

#### 4.2.2 Алгоритам за детекција на движење кој користи дистрибуција на $N$ кралици

Во претходната дискусија за обработка на слика кај БСМ акцент е ставен само на намалување на мрежниот сообраќај со што би се постигнало минимизирање на комуникациските трошоци и зголемување на животниот век на мрежата. Друг предизвик кој се јавува кај БСМ системите за видео надзор е изнаоѓање на нови алгоритми кои истовремено ќе овозможат комплексна обработка на сликата при мемориски и пресметковни ограничувања. Кодирањето/декодирањето на податоците е несоодветно решение од аспект на комплексна обработка, додека агрегацијата на податоци бара сложени алгоритми и поголема процесирачка моќ. Мемориските ограничувања, енергијата потребна за локалните пресметки како и ограничувањата на процесирачката брзина треба да се земат во предвид со цел да се гарантира одзив во реално време. За да одговори на овие предизвици, предложен е нов брз алгоритам за детекција на движење.

Познатиот проблем на дистрибуција на  $N$  кралици на шаховско поле претставуваше инспирација за оваа техника. Потребно е  $N$  кралици да се постават на шаховска табла со димензии  $N \times N$  така што да нема две кралици кои би се нападнале една со друга. Оваа парадигма претходно е предложена за споредба на пиксели во рамките на еден блок од слика, како во [4.45], каде се користи за брза естимација на движења.

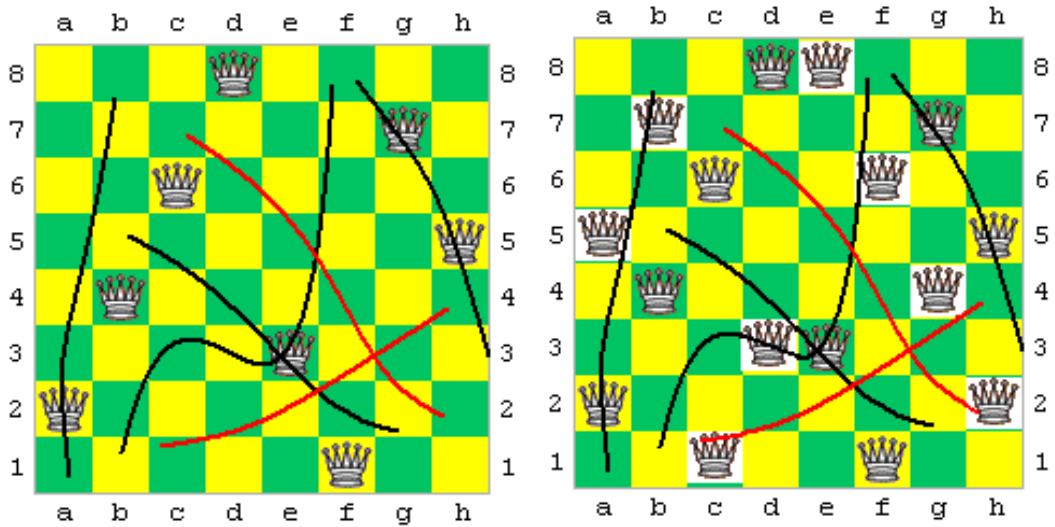
Траекториите на објектите кои се движат може да имаат најразлична насока и правец. Ако влезната слика се подели на  $N$  колони и  $N$  редици и ако  $N$  кралици се поставени така што:

- на секоја колона лежи најмногу една кралица
- на секоја редица лежи најмногу една кралица
- на секоја дијагонала лежи најмногу една кралица

постои голема веројатност дека повеќето траектории од објектите кои се движат ќе пресечат најмалку една кралица. Тоа е сосема очекувано бидејќи траекториите на објектите кои се движат обично се континуирани, т.е. цик-цак траекториите не се многу чести.

Со цел да се намали временската и процесирачка комплексност при обработка на сликата, предложен е нов модифициран алгоритам кој се базира на техниката на одземање на позадина. Наместо да се споредуваат сите  $N^2$  блокови од референтната и тековната слика, доволно е да се споредат само  $N$ -те блокови на кои лежат  $N$ -те кралици, под претпоставка дека објектот кој се движи ќе пресече барем еден блок со кралица.

За да се верифицира овој хеуристички приод, извршен беше мал експеримент. На почетокот 64 кралици беа поставени на слика поделена на  $32 \times 32$  блокови. Генерирани беа траектории, и за секоја беше проверено дали сечи барем една кралица. Од 100 произволно генерирани траектории, 75% од примероците сечеа барем една кралица. Како што може да се види од сликата (слика 4.5 (лево)), траекториите со црвена боја не сечат блок со кралици. За да се зголеми овој процент, потребно е да се постават дополнителни кралици на повеќе блок позиции. Еден начин е шаховското поле да се преслика огледално, и повторно да се распоредат нови  $N$  кралици по истото правило (слика 4.5 (десно)). Оваа дистрибуција се нарекува двојната дистрибуција на  $N$  кралици. Можни се и други комбинации за распределба на кралиците. За двојната дистрибуција на  $N$  кралици експериментот беше позитивен во 95% од генерираните траектории.



**Слика 4.5. Дистрибуција на  $N$  кралици (лево) и двојната дистрибуција на  $N$  кралици (десно)**

Оваа анализа претставува мотивација за следниот алгоритам:

Чекор 1. Превземи ја првата слика.

Чекор 2. Прогласи ја првата слика за референтна слика и смести ја во меморија.

Чекор 3. Повторувај го чекорот се додека има нови слики:

- превземи нова слика.
- смести ја новата слика во влезниот бафер.
- подели ја сликата на  $N$  колони и  $N$  редови.
- избери  $2N$  референтни блокови кои одговараат на позициите на двојна дистрибуција на  $N$  кралици.
- спореди го секој од блоковите од влезната слика со соодветниот блок од референтната слика.
- ако разликата кај барем еден блок е над прагот, испрати ја сликата до базната станица и оди на чекор 3.
- ако разликата кај сите блокови е под прагот, ажурирај ја референтната слика и оди на чекор 3.

Главниот предизвик тука е моделирање на позадината. Наједноставно е првата слика да се прогласи за позадина, иако таа може да биде добиена и како просек од одреден број почетни последователни слики. За да се прилагоди референтната слика на промените во околината (ден/ноќ, сонце/облаци), потребно е повремено референтната слика да се

придвижува кон тековната, т.е. благо да се менуваат вредностите на пикселите и да се доближуваат кон вредностите на пикселите од временски поновите слики. Тука мора да се напомене дека изборот на прагот не зависи само од конкретната апликација, туку зависи и од карактеристиките на околината каде се мониторира движење.

#### 4.2.3 Евалуација

Алгоритмот базиран на двојна дистрибуција на  $N$  кралици прво беше тестиран на видео секвенците превземени од веб камери [4.46], со резолуција  $320 \times 240$ . За споредба на перформансите имплементирани беа традиционалните техники базирани на одземање на позадина (слика 4.6 (лево)) и алгоритмот базиран на  $N$  кралици (слика 4.6 (десно)).

Кога се користи  $8 \times 8$  репрезентација, пикселите се групираат во блокови каде секој блок се состои од 64 пиксели. Влезната слика најпрво се претвора во слика со резолуција  $40 \times 30$ , каде што секој пиксел од новата слика се добива како просек од еден блок. За техниката со одземање на позадина беа користени 1200 блокови, додека за методот со  $N$  кралици 64 блокови. Овие 64 блокови ја задоволуваат двојната дистрибуција на  $N$  кралици.



**Слика 4.6. Детекција на движење со техниката на одземање на позадина (лево) и  $N$  кралици (десно)**

Со цел да се анализираат перформансите кај сензорски јазли, имплементирани беа и двете техники на платформата Mica2 со програмскиот јазик NesC, додека Avrora [4.47] симулаторот беше искористен за да се симулира потрошувачката на енергија.



Потрошувачката на енергија беше измерена за процесирање на една слика. Притоа во предвид не е земена енергијата која ја троши камерата за добивање на една слика бидејќи таа е идентична и кај двата методи. Резултатите се прикажани во табела 4.4.

**Табела 4.4. Потребна енергија за обработка на слика**

	Потребна енергија (mJ)	
	128x128	176x255
Алгоритам	128x128	176x255
Одземање на позадина	23.19	63.78
N кралици	2.9	5.79

Како што се гледа од резултатите, алгоритмот базиран на N кралици е значително подобар од аспект на заштеда на енергија отколку традиционалните техники на одземање на позадина. Бидејќи овој алгоритам се базира на хеуристика, препорачливо решение кај системите за детекција на објекти е адаптивен пристап, кој ќе претставува комбинација од традиционалната техника на одземање на позадина и методот на N кралици. На пример, ако се процесира една слика на секои 5 секунди, четири слики може да бидат обработени со методот на N кралици, а петтата слика може да се обработува со традиционалните техники. Бројот на слики кои ќе се обработуваат со методот на N кралици е специфичен за определена апликација. Ако сме заинтересирани за откривање на натрапници прво треба да се пресмета брзината со која натрапникот би преминал преку мониторираната област. Ако времето потребно за тоа е минимум 20 секунди, и ако системот генерира слики на секоја секунда, тогаш со методот на N кралици може да се процесираат 19 слики, а со традиционалниот метод доволно е да се процесира само една слика. Таквиот адаптивен пристап треба да ја зголеми стабилноста на целиот систем.

## Глава 5

# Развој на апликации за податочна фузија кај БСМ

Во дваесет и првиот век кога опстанокот се базира на синтагмата “информацијата е моќ” повеќе од разбирлива е потребата за навремени информации. Потребата на човекот да ја контролира или барем да ја предвидува околината која го опкружува, резултира со најразлични испитувања кои би му го олесниле овој процес и би резултирале со навремени информации. Мерења на влажност на воздухот, на температура или брзина на ветер не е нешто ново кое е предмет на интересирање на човекот, но начинот на изведување на овие мерења напредува заедно со напредокот на технологијата. Еден од инвентивните и продуктивни начини на изведување на овие мерења е користење на безжични сензорски мрежи.

Со поставување и програмирање на сензори кои собираат однапред одредени типови на информации се јавува потребата за конкретен систем за складирање на овие податоци и нивно сортирање за да може да се исползат до максимум. Природата на ваквите системи е најразновидна и најчесто се состои од дел за мониторирање, дел за следење и дел за управување. Конкретна примена на еден ваков систем можеме да сретнеме во мониторирање на живеалишта, следење и детекција на движечки објекти, контрола на реактори, следење на сообраќај и сл.

Достапноста на информациите е еден од најважните аспекти на овие системи, затоа преку интеракција со интернетот може да се обезбеди пристап до податоците за секој кој има потреба од нив. Во оваа глава ќе биде даден дизајн и имплементација на прототип апликација за мониторинг. Ќе биде опишана архитектурата на системот како и изработката на веб апликација која овозможува сортирање, пристап и класификација на овој вид на информации како и лесно менаџирање и графички приказ на самата сензорска мрежа. Дополнително ќе биде опишан и модул за локализација на јазлите од мрежата.

## 5.1 Преглед на постоечки апликации

Во [5.1] предложен е прототип на систем за мониторирање на температура во универзитетски кампус. Цел на овој систем е да врши оптимално менаџирање на системот за ладење како би се добила минимална потрошувачка на електрична енергија. Системот се состои од:

- Клиентски дел каде има веб базиран интерфејс за прикажување на измерените отчитувања од БСМ. Тука се наоѓа и MySQL базата на податоци.
- Координатор кој претставува јазел од БСМ задолжен за прибирање на податоците од другите јазли. Овој јазел содржи два дела: веб сервер и интерфејс за комуникација меѓу јазлите базиран на ZigBee стандардот.
- Крајни уреди (јазли) задолжени за мерење на три параметри: температура, влажност на воздух и интензитет на светлина. Дополнително, јазлите го содржат истиот интерфејс за комуникација како кај координаторот.

Оваа прототип апликација е имплементирана на централизирана мрежа (топологија звезда), каде секој јазел го праќа своето отчитување до координаторот. Максимална оддалеченост на јазлите од координаторот е 140 метри во простор без препреки или 40 метри ако има препреки. Јазлите и координаторот користат исти микроконтролери, кои се базирани на Arduino [5.2] плочки и Xbee [5.3] модули за комуникација кои го подржуваат ZigBee стандардот. Единствена разлика е во тоа што координаторите немаат сензори, а јазлите немаат LAN интерфејс.

Овој систем има повеќе недостатоци:

- централизираната мрежа не би можела да го покрие цел кампус земајќи ги во предвид ограничувањата на максималната оддалеченост на јазлите од координаторот.
- софтверот кај координаторот не подржува складирање на податоците во MySQL база на податоци, па идејата истите да се складираат кај клиентот е несоодветно решение.
- Arduino микроконтролерите се скапо решение за БСМ поради нивната комплексност која апсолутно не е нужна кај јазлите кои имаат примитивна задача да мерат три физички параметри.

Во [5.4], предложен е систем за контрола на температура со БСМ. За разлика од претходните пристапи кои се фокусирани на дизајн на мрежата, тука акцент е ставен на обработката на податоците. Се предлага анализа на температурните отчитувања со користење на вариограм со цел да се направи предикција на температурата на секоја можна локација од собата (објектот) само врз основа на сензорските отчитувања на јазлите во близина.

Во [5.5] и [5.6] се користи звезда топологија за мониторирање на температура во стаклена градина, односно во училишница од универзитетски кампус каде нема прозорци. Во [5.5] радио опсегот е 100m и е доволен за да може јазлите директно да ги праќаат своите податоци до базната станица. Во [5.6] јазлите се прицврстени на ѕидовите и немаат батерии како извор на енергија. Идејата е за напојување да се користи енергијата од вештачкото осветлување.

Можеби најголем дел од БСМ апликациите се користат за мониторинг на стабилноста на комплексни објекти, како згради и мостови. БСМ е далеку поефтино решение од традиционална жичана инфраструктура за мониторинг, а подоверливо решение од мануелната инспекција. Како илустрација, ќе наведеме еден пример во Мисури, САД, каде инсталацијата на жичана инфраструктура на Emerson Memorial Bridge чинела повеќе од милион долари, или приближно 15000 долари по сензор [5.7].

Една ваква безжична имплементација е реализирана на еден мост во САД во државата Илиноис [5.7]. Оваа БСМ претставува колаборативен проект на повеќе институти од универзитетот во Илиноис (градежен институт, институт за животна средина и институт за компјутерски науки) со поддршка на компаниите Интел и Водафон. Апликацијата има за цел да врши автоматско мониторирање на вибрациите на структурата.

Станува збор за хомогена БСМ каде јазлите се претставени со Imote2 [5.8] хардверска платформа, која е една од најмоќните платформи опремени со 32 битни процесори и 32MB работна меморија. Цената на еден ваков јазел е околу 200 долари, но се очекува да паѓа. Мрежата работи со TinyOS [5.9] оперативен систем. Мрежната топологија е хиерархиски организирана. Постојат четири типа јазли (базна станица, јазли координатори, јазли раководители на кластери и јазли листови), но бидејќи мрежата е хомогена, функцијата на секој јазел од мрежата може временски да се менува

во зависност од условите. На пример, ако некој јазел стане неактивен поради истрошување на батериите или поради грешка во оперативниот систем, друг јазел може да ја превземе неговата улога.

Во [5.10] опишан е комплетен дизајн на БСМ за мониторинг на културно наследство. Станува збор за средновековна кула во Италија на чии ѕидови има значајни фрески и секојдневно е посетена од голем број туристи. Целта на оваа БСМ е да се следи стабилноста на објектот. Изборот на БСМ пред традиционална жичана мрежа се должи на тоа што БСМ е лесна за инсталација и не бара инфраструктура која тешко би се имплементирала во кулата. Дополнително, непостоењето на инфраструктура визуелно не го оптеретува ентериерот на кулата што е значајно за вакви објекти. Оваа мрежа се состои од три типа на јазли кои мерат:

- Надворешни влијанија од околината (температура, влажност на воздухот и интензитет на светлина). За оваа намена се користат “ЗМАТЕ!” јазли [5.11], кои се слични со популарните TMote, но имаат оптимизирана потрошувачка на енергија.
- Деформации на објектот, за што стандардните “ЗМАТЕ!” јазли се надградени со оптички сензори дизајнирани специјално за овој проект.
- Вибрација, за што основните јазли се надградени со феромагнетна меморија каде треба да се складираат измерените вредности. Овие јазли собираат многу повеќе отчитувања од другите бидејќи вибрацијата треба да се мери многу почесто од останатите величини (на секои 30s).

Измерените вредности од сите јазли се праќаат кај јазелот синк кој е задолжен да ги прибере податоците и да ги препрати кон сметачката единица (персонален компјутер). Уникатноста на оваа БСМ е тоа што ратата на земање примероци се разликува од јазел до јазел, па синхронизацијата на јазлите е голем предизвик за дизајнерите. За да не мора секој примерок да се праќа кон синкот и да се оптимизира потрошувачката на енергија јазлите вршат кодирање на примероците. Ова е особено значајно за јазлите кои мерат вибрација на секои 30s. Притоа се користи модифициран код на Хофман со што е постигната редукција во сообраќајот за повеќе од 50%. Софтверот за оваа БСМ е напишан во NesC [5.9] за TinyOS оперативен систем, додека за графичкиот интерфејс

искористен е бесплатниот пакет Octopus [5.12], кој е специјално дизајниран за визуелизација на БСМ.

Слични апликации може да се најдат во [5.13][5.14].

Mote-VIEW [5.15][5.16] е софтвер развиен од Crossbow кој содржи многу функционалности за анализа на податоци од БСМ. Податоците кои се прибираат од јазлите од мрежата најпрво се сместуваат во релациона база на податоци. Овој софтвер содржи модули кои ги прикажуваат отчитувањата на јазлите во реално време, ја визуелизираат топологијата на мрежата, генерираат графици за групи на јазли или ги експортираат податоците во посакуван формат.

Слична генеричка апликација е jWebDust [5.17]. Станува збор за Java базирана апликација која содржи разновидни софтверски компоненти кои меѓусебно комуницираат преку добро дефинирани интерфејси. Со едноставна модификација постоечките сервиси лесно може да се интегрираат со новоразвиени сервиси.

## 5.2 Предизвици при дизајн на БСМ

Иако има повеќе предизвици при дизајн на апликации за БСМ, тука ќе издвоиме некои од позначајните:

- Економска оправданост

Ако околината (објектот) што треба да се мониторира веќе има некаква мрежна инфраструктура, можеби поефтино е да се зачува постоечкото жичано решение. Иако БСМ практично не генерира трошоци за инфраструктура, комерцијалните јазли не се секогаш соодветни за секоја апликација. Често треба да се врши модификација на јазлите со додавање на дополнителни сензорски модули, дополнителна меморија, камери и сл. Дизајнот на овие компоненти често е поскап од самите јазли. За илустрација ќе споменеме некои примери: јазлите Imote2 чинат околу 50 долари, но со модификациите за проектот опишан во [5.7] нивната цена достигнува 200 долари. Јазлите “ЗМАТЕ!” од проектот во [5.10] чинат околу 120 долари.

- Топологија

Во зависност од карактеристиките на околината која се мониторира треба да се избере и соодветна топологија на мрежата. Ако станува збор за помала површина без

присуство на пречки каде сигналот на јазлите може да покрие барем половина од површината, наједноставно решение е да се имплементира ѕвезда топологија при што јазелот синк ќе се постави во центарот. Ако површината е поголема, мора да се врши рутирање и оваа топологија е позната како меш топологија. Тука јазлите трошат многу повеќе енергија бидејќи не само што треба да ги праќаат своите сопствени отчитувања, туку треба да ги препраќаат и отчитувањата на јазлите чија патека до синкот минува преку нив. Постои и кластер-базирана топологија која е погодна ако мрежата е хетерогена, т.е. ако има одредена порција на јазли со помоќни карактеристики. Секако, изборот на топологија зависи и од самата апликација и од конфигурацијата на теренот, при што најчесто е потребно да се направи хибриден модел (комбинација од некои од основните топологии).

- Локализација

Позиционирањето на јазлите е особено значајно ако мрежата е организирана како меш или кластер. За да може да се изврши оптимално рутирање или најсоодветно кластерирање мора да се знае локацијата на јазлите. При избор на алгоритам за локализација мора да се внимава дали станува збор за мрежа во затворен или отворен простор, дали постојат препреки и сите останати карактеристики кои беа разработени во Глава 2.

- Енергетска ефикасност

При дизајн на БСМ оваа карактеристика е најзначајна ако се има во предвид дека енергијата е најголемото ограничување кај јазлите. Иако постојат ограничувања и од мемориски и од процесирачки аспект, се очекува со равојот на технолошките достигнувања овие лимити да се надминат. За жал, батериите не ги следат истите трендови, туку напротив, со зголемување на останатите перформанси барањата за напојување стануваат се поголеми. Затоа и во иднина атрактивна ќе биде потребата да се изнаоѓаат нови алгоритми за процесирање на податоците и екстракција на знаење во самата мрежа како би се редуцирал бројот на трансмисии. Ако се знае дека трансмисијата на податоци е од ред  $10^3$  поскапа операција од процесирањето, секоја можност за локална обработка е значајна.

Ако мрежата е хоп-базирана (меш, кластер или хибридна топологија), и ако податоците се просторно и временски корелирани, како најефикасно енергетско

решение е да се воведат агрегација на податоци. Кај ѕвезда топологија, барање на просторната корелација во самата мрежа би довело до непотребна комуникација, затоа најефикасни се техниките за предикција на податоците, кои лесно може да се имплементираат користејќи некои од филтрите објаснети во Глава 3. Тука мора да се спомене и компресијата како алтернатива кога апликацијата нема потреба од сензорски отчитувања во реално време. Во [5.10] за оваа цел воведен е модифициран Хофманов код, додека во [5.5] се користи делта кодирање.

Од останатите предизвици кои треба да се имаат предвид при моделирање на БСМ ќе ги споменеме: калибрирање на јазлите, синхронизација, покриеност на теренот, поврзаност на мрежата, безбедност и др. Повеќето од овие предизвици се карактеристични за самата апликација и нема универзални правила за градење на оптимална БСМ.

### 5.3 Опис на архитектура на систем за мониторинг

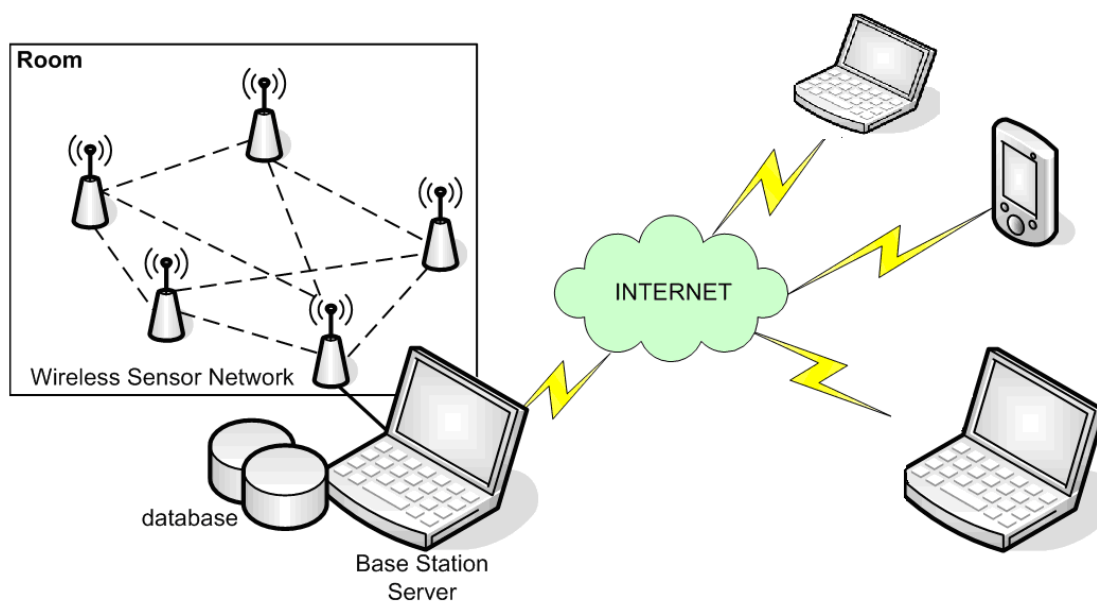
Во продолжение ќе биде елабориран развој на една типична БСМ. Оваа мрежа може да се користи за мониторирање на различни објекти, но првенствено беше наменета за мониторирање на стаклена градина. Идејата е да се следат условите преку мерење на температурата, влажноста на воздухот и светлината, па мануелно да се интервенира ако има потреба од тоа (отварање на прозорци, вклучување на дополнителен извор на топлина или светлина и сл.).

Во лабораториски услови развиена беше прототип апликација која има едноставна архитектура (слика 5.1). Сите сензорски јазли ги праќаат измерените вредности кон базната станица која понатаму може да ги праќа кон заинтересираните клиенти преку Интернет. Базната станица претставува врска помеѓу сензорските јазли и клиентите. Клиентите може да вршат прегледи или упити преку десктоп или мобилни веб апликации.

Сензорите се програмирани да мерат различни физички величини на предефинирани временски интервали и истите да ги праќаат кон базната станица (синкот). Праќањето на податоци се врши преку рутирање. Топологијата на мрежата е стандардна меш топологија. Отчитувањата пристигнати кај синкот се складираат во база на податоци за да можат да бидат анализирани и процесирани по потреба. Корисниците



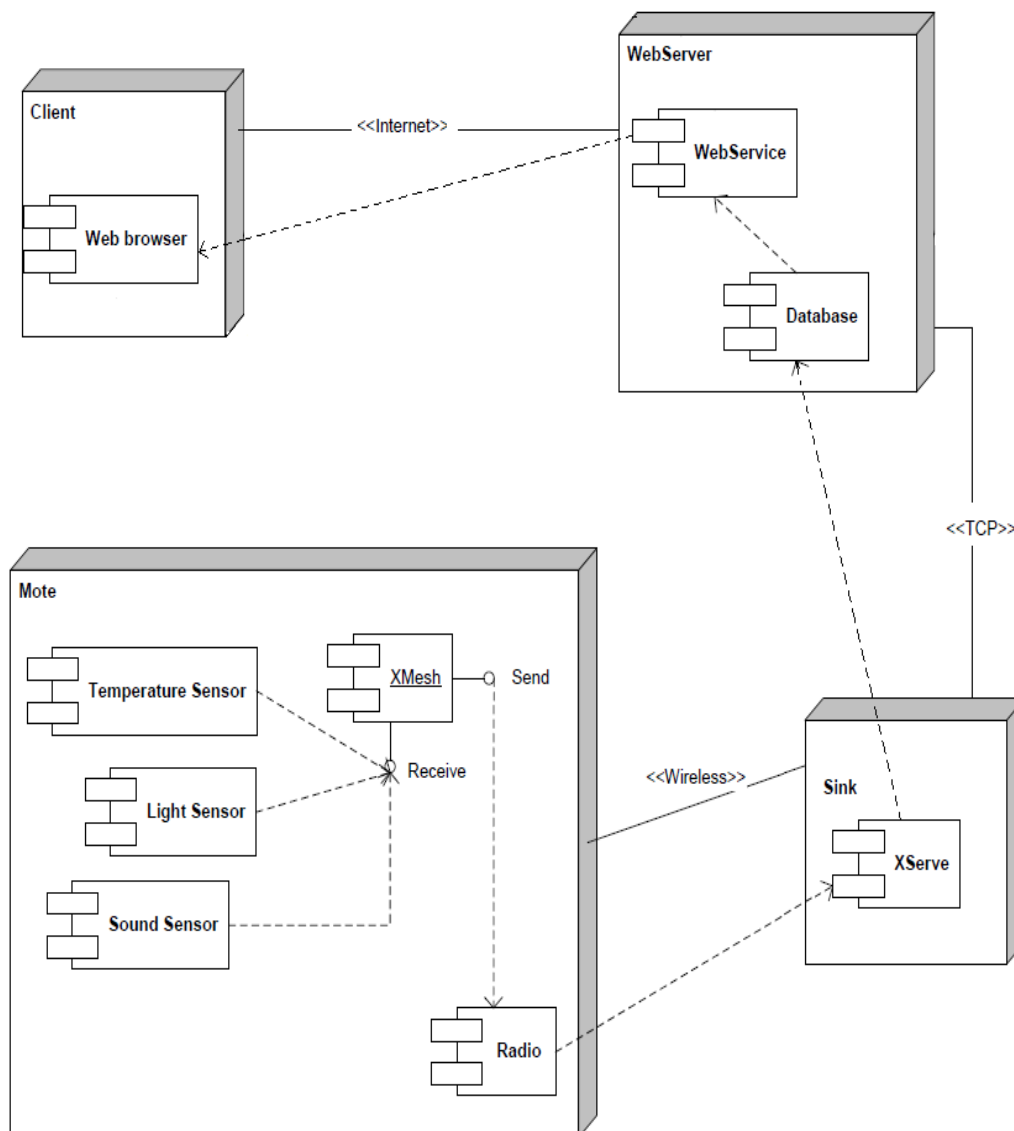
(клиентите) може да пристапуваат до овие податоци преку веб пребарувачи. Ако се детектираат рапидни промени (пример ако отчитаните вредности надминат некој предефиниран опсег) тогаш системот треба да алармира за новонастанатата ситуација како би се превзеле соодветни акции.



**Слика 5.1. Архитектура на систем за мониторинг**

На слика 5.2 даден е развивачки дијаграм кој претставува стартна точка во дизајнирањето на БСМ, која се состои од четири основни компоненти: сензорски јазли, синк, веб сервер и клиенти (корисници). Синкот најчесто претставува обичен јазел кој преку LAN мрежа е поврзан со персонален компјутер, а многу често на истиот компјутер се наоѓа и веб серверот со базата на податоци. На клиентите им е потребен само пребарувач.

Оваа апликација се состои од три софтверски модули (слоеви): сензорски модул, серверски модул и клиентски модул. Јазлите користат XMesh протокол развиен од компанијата Crossbow [5.8], кој овозможува скалабилност и мала потрошувачка на енергија. На серверска страна работи апликација XServe, додека клиентите преку веб-базирана апликација комуницираат со XServe и пристапуваат до податоците преку XML RPC команден интерфејс.



Слика 5.2. Развивачки дијаграм

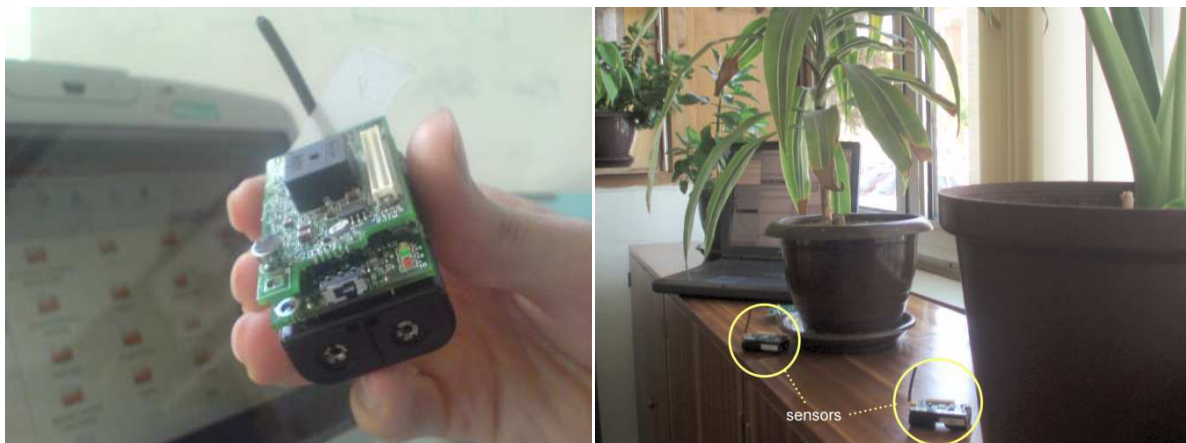
## 5.4 Имплементација на апликацијата

### Програмирање на јазлите и прибирање на сензорски отчитувања

За овој проект се користат Berkeley MICA јазли (слика 5.3), кои може да се набават од Crossbow [5.8]. Тие се опремени со радио модул, 4 MHz микропроцесор, меморија, 2 AA батерии и множество на сензори (различни плочки имаат различни сензорски модули, но во основа сите имаат сензори за температура, влажност на воздух и интензитет на светлина). Јазлите работат со TinyOS [5.9] оперативен систем, кој е специјално развиен за вградливи системи со ограничени ресурси. Самиот оперативен

систем (заедно со библиотеките и придружните апликации) е напишан во NesC [5.9], кој претставува структуриран програмски јазик многу сличен со програмскиот јазик C.

За потребите на оваа апликација сензорите ја користат библиотеката XMesh, која овозможува комуникација помеѓу јазлите и имплементира алгоритми за рутирање кај меш базирани мрежи.



**Слика 5.3. Миса јазли**

На серверска страна централна апликација е XServe. Таа служи како врска помеѓу БСМ и клиентите. XServe содржи сервиси кои овозможуваат двонасочно движење на податоците (сензорски отчитувања од јазлите кон синкот, инструкции и реконфигурациски наредби од клиентите кон јазлите). Интеракцијата со XServe може да биде директна преку терминал или преку XML RPC команден интерфејс.

### **Имплементација на веб интерфејс**

Веб интерфејсот треба да биде слоевит и модуларен, со цел лесно надградување и проширување на функционалностите на системот. За потребите на оваа БСМ, веб интерфејсот содржи две Silverlight [5.18] компоненти и една веб апликација. Првата Silverlight компонента служи за да ги прибере податоците од PostgreSQL базата на податоци и да ги прикажува тие податоци на екран. Кога се развиваше оваа апликација единствена база на податоци која ја поддржуваше XServe беше PostgreSQL, која е објектно-релациона база на податоци [5.19]. Втората Silverlight компонента ја прикажува последната валидна топологија на БСМ. Комуникацијата помеѓу веб апликацијата и XServe се одвива преку асинхрони сокети.

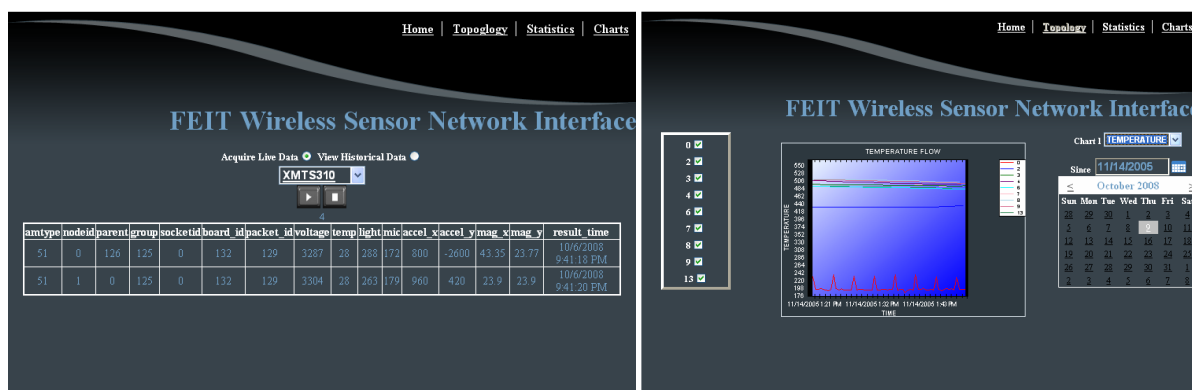
## 5.5 Функционалности на БСМ

Во продолжение ќе бидат накратко прикажани некои од основните функционалности на оваа апликација. Повеќе детали околу имплементацијата може да се најдат во Прилог Б.

### Табеларен и графички приказ во реално време

На самиот старт на апликацијата по дефиниција се прикажуваат историски сензорски вредности кои се превземаат од PostgreSQL базата на податоци. Притоа се прикажуваат податоците кои се стигнати последни (слика 5.4 лево).

На слика 5.4 (десно) даден е графички приказ на сензорските отчитувања во реално време за избраниот параметар. Истовремено може да се прикажуваат податоци за повеќе сензорски јазли, но за иста величина (пр. температура). Оската X динамички се менува за да ја зголеми прегледноста на приказот. За оваа намена искористена е бесплатна софтверска компонента ZedGraph [5.20]. Корисникот има опција да го зачува графот како слика.



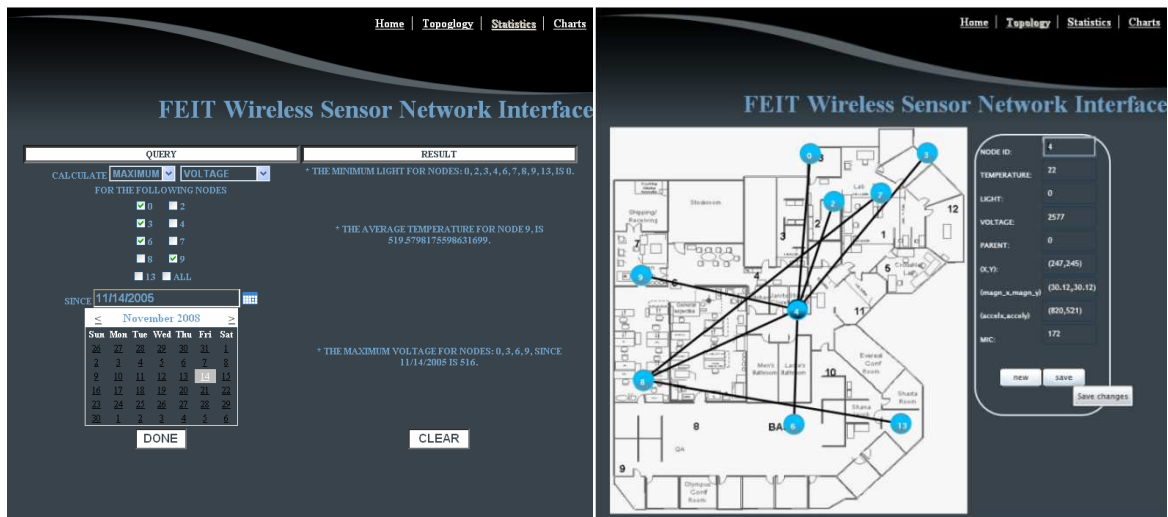
Слика 5.4. Интерфејс на модулите за приказ на сензорски отчитувања

### Статистика

Апликацијата содржи модул за подетална статистичка анализа на податоците, како наоѓање на максимум, минимум или просек од конкретен сензор на конкретен јазел (слика 5.5 лево). Ако корисникот не специфицира дата, анализата се прави за сите податоци од базата. Во спротивно, податоците пристигнати во базата пред специфицираната дата се игнорираат.

## Топологија

Втората Silverlight компонента служи за генерирање на топологија и нејзина визуелизација користејќи ги расположливите информации за јазлите од базата на податоци (слика 5.5 десно). Овој модул овозможува додавање на податоци за јазлите и врски помеѓу јазлите. Оваа е практична компонента бидејќи ја намалува апстракцијата помеѓу корисниците и мрежата.



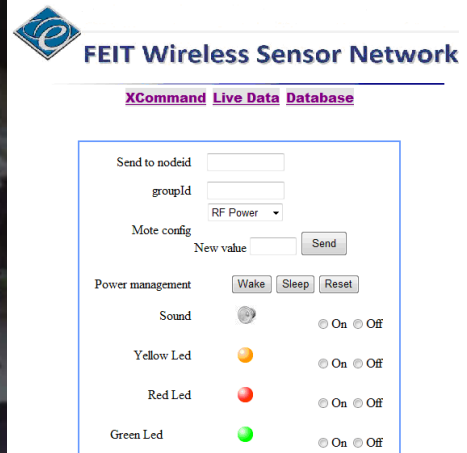
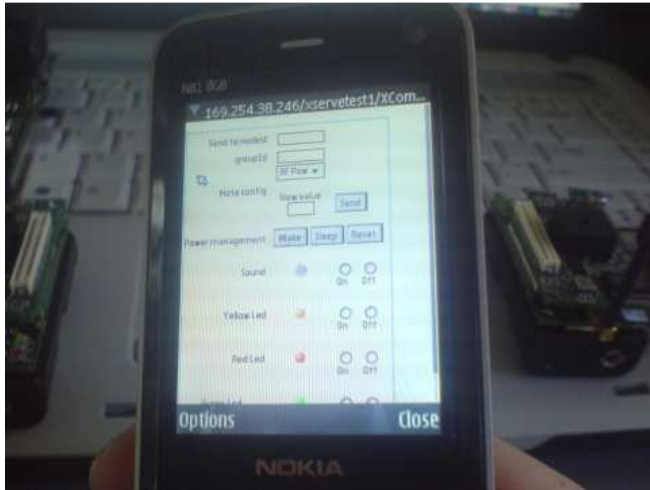
Слика 5.5. Интерфејс на модулите за статистика (лево) и топологија (десно)

## Праќање на аларми

Овој модул нуди две можности за информирање на корисниците за новонастаната состојба (одредена вредност на конкретен параметар е надвор од предефинираните граници). Една можност е да им се праќа порака по меил, а втората поелегантна опција е да им се прати СМС порака.

## Интеракција

Понекогаш потребно е да се праќаат наредби кон мрежата. За потребите на оваа апликација, корисникот преку својот паметен телефон може да праќа едноставни наредби кон поединечни јазли (уклучување или исклучување на звучен сигнал, режим на работа и сл.). Ако некој јазел е при крај со батерија, на ваков начин преку менување на режимот може да се заштеди енергија. Ако на некој јазел мора да му се смени батерија, преку звучниот сигнал тој јазел може лесно да се локализира (слика 5.6).

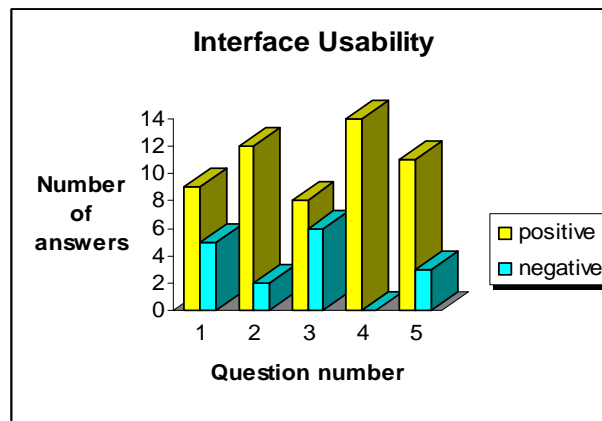


**Слика 5.6. Мобилни апликации за интеракција со БСМ**

## 5.6 Евалуација на апликацијата

Со цел да се идентификуваат и редизајнираат недостатоците на оваа апликација, извршена беше едноставна евалуација. Интерфејсот беше тестиран од поголем број корисници, од кои повеќето беа инженери и студенти.

На слика 5.7 дадени се одговорите од 15 испитаници.



**Слика 5.7. Резултати од прашалникот за евалуација на интерфејсот**

Следните прашања им беа поставени на испитаниците:

1. Дали мислите дека модулот “Statistics” треба да се прошири?
2. Дали сте задоволни од начинот на кој се прикажани графичите?
3. Дали ви се допаѓа дизајнот на интерфејсот?

4. Какво е вашето мислење за топологијата генерирана со Silverlight?
5. Дали сметате дека треба да се автоматизира генерирањето на топологијата на мрежата?

Од резултатите се гледа дека генералниот впечаток за оваа апликација е позитивен, но остава простор за подобрување.

## Глава 6

### Заклучок

Оваа теза го третира проблемот на податочна фузија кај БСМ. Притоа, целта беше да се генерира просторно-временска фузија која ќе овозможи екстракција на корисна и релевантна информација во самата мрежа, притоа минимизирајќи го бројот на трансмисији. Главниот фокус беше поставен на два основни проблеми: локализација на јазли и предикција на податоци кај БСМ со употреба на различни методи и техники.

За решавање на проблемот на локализација во литературата понудени се бројни решенија, но најголем дел од нив го третираат проблемот на дводимензионална локализација. Потребата од алгоритми за тридимензионална локализација е неминовна бидејќи најчесто мрежите во природата се распоредени во 3Д простор. Цел на оваа теза беше да се развие еден таков алгоритам. Како основа беше искористен алгоритмот за 2Д локализација базиран на мултидимензионално скалирање како еден од најпопуларните и најексплоатирани алгоритми. Алгоритмот опишан во оваа теза користи различен пристап за определување на најкраткото растојание помеѓу јазлите од мрежата и претставува своевидно подобрување на алгоритмот на Цикстра кој најчесто се користи за оваа намена. Евалуацијата на алгоритмот кај тридимензионални просторни и површински мрежи покажа дека алгоритмот развиен и презентираан во оваа теза дава мала грешка на локализација и може да претставува солидна основа за равој на слични алгоритми.

Како насоки за идна работа може да се разгледа генерирање на нови хибридни техники и методи кои би продуцирале уште помала грешка на локализација. Една можност е да се пренасочи централизираниот пристап кон дистрибуиран, т.е. мрежата да се подели на неколку подмрежи чии јазли локално би се самопозиционирале. Бидејќи процесот на фузирање на сите подмапи во единствена глобална мапа би довел до кумулативна грешка, за да се избегне ова потребно е алгоритмот да поседува дополнителна фаза на самокорекција на координатите, како трилатерација, триангулација и сл. Овој пристап може да биде особено погоден за мрежи со неправилни



топологији или за мрежи распределени во средина каде има пречки кои оневозможуваат директна комуникација помеѓу јазли кои се наоѓаат во непосредна близина.

Во оваа теза претпоставено беше дека сите анхор јазли точно ја знаат сопствената локација, што во реалноста не е случај. Независно од начинот на кој анхор јазлите ги детерминирале своите координати (мануелно, ГПС, итн.) не ретко одредена фракција од анхор јазлите може да ги “излаже” останатите јазли. Ова понатаму може да продуцира голема грешка при предикцијата. Успешен алгоритам за локализација мора да поседува модул кој би детектирал и би се справил со ваков тип на погрешни информации.

За да се евалуира алгоритмот најдобро е тој да се имплементира на реална мрежа. Иако ние поседуваме одреден број на јазли (осум) кои содржат RSSI за одредување на растојание помеѓу соседни јазли, тој број е доволен само за да се симулира ѕвезда-базирана мрежна топологија, која е реализибилна за мали мрежи поставени во мал и ограничен регион. Резултатите продуцирани од таква експериментална поставка не би биле релевантни за скалабилни мрежи. Имено, кај мрежи поставени на ограничена и детерминирана површина воопшто и нема потреба од локализација.

Бидејќи за овој тип на алгоритми попрактично и значително поефтино е да се направи симулациона евалуација, порелевантни резултати би се добиле ако се симулира над некој протокол, како на пример ZigBee. Ваквата симулација, кога би ги имала во предвид и некои од карактеристиките на радио брановите, како рефлексивност, дифракција, и расејување, би продуцирала далеку порелевантни резултати.

Вториот проблем третиран во оваа теза беше проблемот на предикција на податоци. За таа цел најпрво беа евалуирани повеќе алгоритми за предикција на податоци врз реални податочни множества. Користејќи ги информациите за позицијата на јазлите, беше извршено кластерирање на мрежата и агрегација на податоците. Предложени беа повеќе алгоритми, т.е. модели базирани на движечки просеци и подобрен модел на алгоритмот на минимална средна квадратна грешка. Генерален заклучок е дека изборот на алгоритам во најголема мера зависи од природата на податоците кои треба да се предвидуваат. Понатаму беа разгледани два системи за детекција на настани со БСМ. Првиот систем ги користеше принципите на непрецизна логика за успешна детекција на пожар. Вториот систем детектираше подвижни објекти со користење на БСМ со инсталирани камери. Предложена беше двослојна архитектура за видео надзор кај БСМ,

каде процесирањето на сликите се врши од страна на самите јазли. За таа цел развиен беше брз алгоритам за процесирање кој користи дистрибуција на  $N$  кралици на шаховско поле.

Во оваа теза е претпоставено дека сите испратени пораки се примени од страна на базната станица. Сите податочни множества кои беа искористени за евалуација во оваа теза беа предпроцесирани за да се отстранат грешните мерења. За некои временските интервали недостасуваа сензорски мерења, па тие беа игнорирани. Но во реалност безжичната комуникација е подложна на грешки и може да предизвика губење на пораки помеѓу сензорските јазли. Исто така, самите сензори инсталирани на јазлите од мрежата често генерираат грешни мерења. Како идна насока може да се модифицираат предложените алгоритми за успешно да се справуваат и со овие предизвици.

Безжичните сензорски мрежи во иднина ќе бидат дел од секојдневен живот и ќе обезбедуваат информации во реално време за сите феномени што не опкружуваат. БСМ се очекува да ги интегрираат различните мрежи, вклучувајќи ги тука интернетот и паметните телефони. Иако овие нови технологии ќе донесат бројни предизвици, се верува дека техниките за интелигентна обработка на податоци во рамките на самата мрежа може да се издвојат како најважни. Количината и волуменозноста на податоците генерирани од овие мрежи ќе ги направи истите тешко видливи за корисниците доколку не се соодветно процесирани. Оваа теза дава своевиден придонес кон развојот на техники за просторно-временска податочна фузија кои треба да овозможат намалување на комуникацијата меѓу сензорските јазли и екстракција на знаење од интерес за крајните корисници.

# Користена литература

- [2.1] J. Wang, R.K. Ghosh, S.K. Das. “A survey on sensor localization”. *Journal of Control Theory and Applications*, 8(1):2-11, 2010.
- [2.2] A. Pal. Localization Algorithms in Wireless Sensor Networks: Current Approaches and Future Challenges. In *Network Protocols and Algorithms*, 2010, Vol. 2, No. 1
- [2.3] G. Mao, B. Fidan, B. D. Anderson. Wireless sensor network localization techniques *Computer Networks*, 2007, 51(10): 2529 – 2553. 11 July 2007
- [2.4] S. Pandey, P. Agrawal. A survey on localization techniques for wireless networks. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 29(7), 2006
- [2.5] A. Youssef, M. Youssef, A taxonomy of localization schemes for wireless sensor networks, in: *The 2007 International Conference on Wireless Networks, ICWN*, Nevada, US, 2007, pp. 444–450
- [2.6] T. He, C. Huang, B. Blum, J. Stankovic, T. Abdelzaher, “Range-free localization schemes in large scale sensor networks”, In *Proceedings of the Ninth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'03)*, September 2003, San Diego, CA, USA, pp. 81-95.
- [2.7] E. Elnahrawy, X. Li, R. P. Martin, “The Limits of Localization Using Signal Strength: A Comparative Study, in *Proceedings of IEEE SECON*, pp. 406-414, Santa Clara, California, USA, October 2004.
- [2.8] R. I. Reza, “Data fusion for improved TOA/TDOA position determination in wireless systems,” Ph.D. Dissertation, Virginia Tech., 2000.
- [2.9] F. Gustafsson, F. Gunnarsson, “Positioning using time-difference of arrival measurements”, *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Proceedings 2003. (ICASSP '03)*, Volume: 6, 6-10 April 2003.
- [2.10] D. Niculescu, B. Nath. “Ad Hoc Positioning System (APS) Using AOA.” In *Proceedings of The 22rd Conference of the IEEE Communications Society (INFOCOM'03)*, pp. 1734-1743, 2003.
- [2.11] G. Zhou, T. He, S. Krishnamurthy, J. A. Stankovic, “Impact of radio irregularity on wireless sensor networks”, *Proceedings of the 2nd international conference on Mobile systems, applications, and services (MobiSys '04)*, pages 125–138, 2004.
- [2.12] K. Whitehouse, C. Karlof, A. Woo, F. Jiang, D. Culler. “The Effects of Ranging Noise on Multihop Localization: an Empirical Study” *The Fourth International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN '05)*. Los Angeles, California. April 25-27, 2005.
- [2.13] J. Lloret, J. Tomas, M. Garcia, A. Canovas, A hybrid stochastic approach for self-location of wireless sensors in indoor environments. *Sensors* 2009, 9, 3695–3712.

- [2.14] I. Amundson, X. D. Koutsoukos, "A Survey on Localization for Mobile Wireless Sensor Networks", 2nd International Workshop on Mobile Entity Localization and Tracking in GPS-less Environments (MELT), LNCS 5801, 2009, pp: 235-254
- [2.15] M. Rudafshani, S. Datta, "Localization in wireless sensor networks," In: 6th international conference on Information processing in sensor networks, pp. 51-60 (2007)
- [2.16] L. Hu, D. Evans, "Localization for mobile sensor networks." in Proc. Mobicom, Philadelphia, 2004, pp. 45–57.
- [2.17] A. Baggio. "Monte-Carlo localization for mobile wireless sensor networks," Delft University of Technology, Delft, Tech. Rep. PDS-2006-004, June 2006.
- [2.18] N. Priyantha, H. Balakrishnan, E. Demaine, S. Teller, "Anchor-free distributed localization in sensor networks", MIT Laboratory for Computer Science, Technical Report TR-892, April 2003,
- [2.19] X. Zhou, L. Zhang, Q. Cheng. (2006) "Landscape-3d: A robust localization scheme for sensor networks over complex 3d terrains." In Proc. 31st IEEE International Conference Local Computer Networks, pages 239--246, November, 2006.
- [2.20] Q. Shi, H. Huo, T. Fang, D. Li, "A 3D Node Localization Scheme for Wireless Sensor Networks," IEICE Electron. Express, vol. 6, no. 3, pp. 167-172, 2009.
- [2.21] E. Kim, S. Lee, C. Kim, K. Kim, "Mobile Beacon-Based 3D-Localization with Multidimensional Scaling in Large Sensor Networks," IEEE Comm. Letters, vol.14, no.7, pp.647-649, Jul. 2010.
- [2.22] F. Caballero, L. Merino, I. Maza, A. Ollero, A Particle Filtering method for Wireless Sensor Network Localization with an Aerial Robot Beacon. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, CA, USA, 2008; pp.596–601.
- [2.23] H. S. Abdelsalam, S. Olariu, A 3D-Localization and Terrain Modeling Technique for Wireless Sensor Networks, Proc. Second ACM International Workshop on Foundations of Wireless Ad Hoc and Sensor Networking and Computing, FOWANC 2009, held in conjunction with MobiHoc 2009, New Orleans, LA, 2009.
- [2.24] H. Chen, P. Huang, M. Martins, H. C. So, K. Sezaki, Novel centroid localization algorithm for three-dimensional wireless sensor networks, in Proc. 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM 2008), Oct. 2008, Dalian, China.
- [2.25] J. Shu, R. Zhang, L. Liu, X. Wu, Z. Zhou, "Cluster-based Three-dimensional Localization Algorithm for Large Scale Wireless Sensor Networks," Journal of Computers, vol 4, no 7 (2009), 585-592, Jul 2009.
- [2.26] C. Liu, H. Jiang, D. Zeng, "Unitary Matrix Pencil Algorithm for Range-Based 3D Localization of Wireless Sensor Network Nodes". Journal of Networks, Vol. 7, No. 9, September 2012.
- [2.27] R. Feng, X. Guo, N. Yu, J. Wan, "Robust Multihop Localization for Wireless Sensor Networks with Unreliable Beacons," International Journal of Distributed Sensor Networks, vol. 2012, Article ID 972101, 13 pages, 2012. doi:10.1155/2012/972101
- [2.28] T. Cox and M. Cox, Multidimensional Scaling, Chapman & Hall, London, 1994.

- [2.29] I. Borg and P. Groenen, *Modern multidimensional scaling theory and applications*, Springer, 1997.
- [2.30] X. Ji, H. Zha, "Sensor Positioning in Wireless Ad-hoc Sensor Networks using Multidimensional Scaling," *Proceedings of 23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2004)*, March 2004.
- [2.31] Y. Shang, W. Ruml, Y. Zhang, M. P. J. Fromherz, "Localization from mere connectivity," in *Proceedings of ACM International symposium on mobile ad hoc networking and computing*, pp. 201-212, June 2003.
- [2.32] V. Vivekanandan, V. W. Wong. Ordinal mds-based localization for wireless sensor networks. In *VTC-2006: IEEE 64th Vehicular Technology Conference*, pages 1-5, 2006.
- [2.33] Y. Shang, W. Ruml, "Improved mds-based localization," in *Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*, pp. 2640–2651, 2004
- [2.34] A. Costa, N. Patwari, A. O. Hero III, "Distributed multidimensional scaling with adaptive weighting for node localization in sensor networks", *IEEE/ACM Trans. Sensor Networks*, 2005
- [2.35] B. Stojkoska, D. Davcev, A. Kulakov "Cluster-based MDS Algorithm for Nodes Localization in Wireless Sensor Networks with Irregular Topologies", *Proceedings of The The Fifth ACM/IEEE International Conference on Soft Computing as Transdisciplinary Science and Technology (CSTST'08)*, Paris, France , October 26-30, 2008, pp. 384-389.
- [2.36] G. Yu, S. Wang "Hierarchical MDS-based Localization Algorithm for Wireless Sensor Networks", *22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, 25-28 March, 2008, pp.748-754.
- [2.37] M. H. Shon, M. Jo, H. Choo: An interactive cluster-based MDS localization scheme for multimedia information in wireless sensor networks. *Computer Communications* 35(15): 1921-1929 (2012)
- [2.38] D. Ma, M. J. Er, B. Wang, H. B. Lim, "Range-free wireless sensor networks localization based on hop-count quantization," *Telecommunication Systems*, vol. 50, no. 3, pp. 199–213, 2010.
- [2.39] Y. Xu, J. Ford, F. S. Makedon, "A Variation on Hop-counting for Geographic Routing", *The Third Workshop on Embedded Networked Sensors (EmNets 2006)*, Harvard University, Cambridge, MA, May 30-31, 2006.
- [2.40] A. A. Ahmed, H. Shi, Y. Shang, "Sharp: A new approach to relative localization in wireless sensor networks," in *Proceedings of IEEE ICDCS*, 2005.
- [2.41] S. Patil, M. Zaveri, Mds and trilateration based localization in wireless sensor network. *Wireless Sensor Network* 3, 198–208 (2011)
- [2.42] K. Whitehouse, D. Culler. "A Robustness Analysis of Multi-hop Ranging-based Localization Approximations". *The Fifth International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN '06)*. Nashville, TN, April 19-21, 2006.
- [2.43] Donald E. Knuth: *A Generalization of Dijkstra's Algorithm*. *Inf. Process. Lett.* 6(1): 1-5 (1977).

- [2.44] A. Lorusso, D. Eggert, R. Fisher, "A Comparison of Four Algorithms for Estimating 3-D Rigid Transformations", In: Proceedings of the 4th British Machine Vision Conference (BMVC 1995), Birmingham, England, pp. 237-246, (September 1995).
- [2.45] Z. Jianwu, Z. Lu, "Research on distance measurement based on RSSI of ZigBee," Computing, Communication, Control, and Management, 2009. CCCM 2009. ISECS International Colloquium on , vol.3, no., pp.210-212, 8-9 Aug. 2009
- [2.46] <http://www.ZigBee.org/en/about/faq.asp>
- [2.47] C. T. Young, (December 2007). A Study on In-door Positioning Method Using RSSI Value in IEEE 802.15.4 WPAN. Master's Thesis in School of Electronical Engineering & Computer Science, Kyungpook National University, Korea.
- [2.48] A. Awad, T. Frunzke, F. Dressler, "Adaptive distance estimation and localization in WSN using RSSI measures," in Proc. 10th Euromicro Conf. Digital Syst. Des. Architectures, Methods Tools (DSD) 2007, pp. 471–478.
- [2.49] A. Faheem, R. Virrankoski, M. Elmusrati, "Improving RSSI Based Distance Estimation for 802.15.4 Wireless Sensor Networks," in Conference Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Wireless Technology and Systems (ICWIT 2010), Aug. 2010.
- [2.50] M. Sugano, T. Kawazoe, Y. Ohta, M. Murata, "Indoor Localization System using RSSI Measurement of Wireless Sensor Network based on ZigBee Standard," Proceeding of Wireless Sensor Networks, vol. 7, pp. 54-69, 2006.
- [2.51] H. Ahn, S. Rhee, "Simulation of a RSSI-Based Indoor Localization System Using Wireless Sensor Network", in: Ubiquitous Information Technologies and Applications (CUTE), December 2010, pp. 1-4.
- [2.52] P. Moravek, D. Komosny, M. Simek, M. Jelinek, D. Girbau, A. Lazaro, Signal Propagation and Distance Estimation in Wireless Sensor Networks. In The 33rd International Conference on Telecommunication and Signal Processing, TSP 2010, Baden, Austria, 17–20, August 2010, pp. 35-40.
- [2.53] S. Schwarzer, M. Vossiek, M. Pichler, A. Stelzer, "Precise distance measurement with IEEE 802.15.4 (ZigBee) devices," in Radio and Wireless Symposium, 2008 IEEE, 2008, pp. 779-782.
- [2.54] K. Srinivasan, P. Levis, "RSSI is under appreciated," in Proc. EMNETs, Boston, MA, May 2006.
- [2.55] A. T. Parameswaran, M. I. Husain, S. Upadhyaya, "Is RSSI a Reliable Parameter in Sensor Localization Algorithms - An Experimental Study", in Proc. of IEEE SRDS, 2009.
- [2.56] <http://www.isi.edu/nsnam/ns/> [March, 2013]
- [2.57] <http://www.nsnam.org/> [March, 2013]
- [2.58] <http://www.opnet.com/> [March, 2013]
- [2.59] <http://www.boson.com/> [March, 2013]
- [2.60] J. B. Andersen, T. S. Rappaport, S. Yoshida, "Propagation measurements and models for wireless communication channels," IEEE Commun. Mag., vol. 33, pp. 42–49, Jan. 1995.
- [2.61] <http://www.ifn.et.tudresden.de/~marandin/ZigBee/ZigBeeSimulationEnvironment.html#simulation-8> [March, 2013]

- [2.62] G. Sheikholeslami, S. Chatterjee, A. Zhang, "WaveCluster: A multiresolution clustering approach for very large spatial databases," in Proc.24th VLDB Conf., 1998, pp. 428–439.
- [2.63] A. Lancichinetti, S. Fortunato (2009) Community detection algorithms: A comparative analysis. Phys Rev E 80: 056117.
- [3.1] G. Anastasi , M. Conti , M. Di Francesco, A. Passarella, Energy Conservation in Wireless Sensor Networks: A survey, Ad Hoc Networks, vol.7 n.3, pp. 537-568, May, 2009.
- [3.2] E. F. Nakamura , A. A. F. Loureiro, A. C. Frery, Information Fusion for Wireless Sensor Networks: Methods, models, and classifications, ACM Computing Surveys (CSUR), vol.39 n.3, pp. 9-55, 2007.
- [3.3] Y. L. Borgne, S. Santini, G. Bontempi, Adaptive Model Selection for Time Series Prediction in Wireless Sensor Networks, Signal Processing, vol.87 n.12, pp. 3010-3020, December, 2007.
- [3.4] C. Liu, K. Wu, M. Tsao, "Energy Efficient Information Collection with the ARIMA Model in Wireless Sensor Networks", In Proceedings from IEEE Globecom, vol. 5, pp. 2470–2474, 2005.
- [3.5] S. Santini, K. Römer, An Adaptive Strategy for Quality-Based Data Reduction in Wireless Sensor Networks, Proceedings of the 3rd International Conference on Networked Sensing Systems (INSS 2006), pp. 29-36, Chicago, IL, USA. June 2006.
- [3.6]. Intel lab data. Web Page,  
<http://db.lcs.mit.edu/labdata/labdata.html> [May, 2013]
- [3.7] A. Jain, E.Y. Chang, Y.-F. Wang, Adaptive Stream Resource Management using Kalman Filters. In Proceedings of the ACM SIGMOD/PODS Conference (SIGMOD '04). Paris, France, June 2004.
- [3.8] O. Maron, A.W. Moore, The racing algorithm: model selection for lazy learners, Artificial Intell. Rev. 11 (1–5) (1997) 193–225.
- [3.9] I. Lazaridis, S. Mehrotra, Capturing sensor-generated time series with quality guarantee, in: Proceedings of the 19<sup>th</sup> International Conference on Data Engineering (ICDE'03), Bangalore, India, 2003.
- [3.10] J. Lu, F. Valois, M. Dohler, M.-Y. Wu, "Optimized Data Aggregation in WSNs using Adaptive ARMA" in Proceedings Sensorcomm 2010, pp. 115–120.
- [3.11] G. Wei, Y. Ling, B. Guo, B. Xiao, A. V. Vasilakos: Prediction-based Data Aggregation in Wireless Sensor Networks: Combining Grey Model and Kalman Filter. Computer Communications 34(6): 793-802, 2011.
- [3.12] J.L. Deng, Introduction to Grey system theory, Journal of Grey System 1 (1) (1989) 1–24.
- [3.13] F. Xia, Z. Xu, L. Yao, W. Sun, M. Li. Prediction-Based Data Transmission for Energy Conservation in Wireless Body Sensors, The Int Workshop on Ubiquitous Body Sensor Networks (UBSN), in conjunction with the 5th Annual Int Wireless Internet Conf (WICON), Singapore, March 2010.
- [3.14] Y. S. Suh, "Send-On-Delta Sensor Data Transmission with A Linear Predictor", Sensors, 2007, 7(4): 537-547.

- [3.15] S. Haykin: Least-Mean-Square Adaptive Filters. Edited by S. Haykin, New York Wiley-Interscience, 2003.
- [3.16] G. Moschytz and M. Hofbauer: Adaptive Filter. Springer Verlag, Berlin, 2000, ISBN 3-540-67651-1.
- [3.17] R. Kwong, E.W. Johnston, A Variable Step Size LMS Algorithm, IEEE Trans. On Signal Process., vol. 40, pp. 1633 - 1642, 1992.
- [3.18] S. W. Smith, *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, 2nd ed. California Technical Publishing, San Diego, CA, 1999.
- [3.19] A. Woo, T. Tong, D. Culler, Taming the underlying challenges of reliable multihop routing in sensor networks. In *Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Network Sensor Systems (SenSys'03)*, 2003, pp. 14–27.
- [3.20] E. F. Nakamura, F. G. Nakamura, C. M. Figueredo, A. A. Loureiro, Using information fusion to assist data dissemination in wireless sensor networks. *Telecomm. Syst.* vol. 30, no. 1-3, (November), 2005, pp. 237–254.
- [3.21] J. Polastre, J. Hill, D. Culler, Versatile low power media access for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 2nd ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems*, Baltimore, 2004, pp. 95–107.
- [3.22] I. Rhee, A. Warrier, M. Aia, J. Min, Z-mac: A hybrid MAC for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'05)*, 2005, pp. 90–101.
- [3.23] L. Gu, D. Jia, P. Vicaire, T. Yan, L. Luo, T. He, A. Tirumala, Q. Cao, J. A. Stankovic, T. Abdelzaher, B. H. Krogh, Lightweight detection and classification for wireless sensor networks in realistic environments. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'05)*, 2005, pp. 205–217.
- [3.24] J. Blumenthal, D. Timmermann, C. Buschmann, S. Fischer, J. Koberstein, N. Luttenberger, Minimal transmission power as distance estimation for precise localization in sensor networks. In *Proceedings of the 2006 International Conference on Communications and Mobile Computing (IWCMC'06)*, 2006, Vancouver, Canada, pp. 1331–1336.
- [3.25] P. Brockwell, R. Davis. Introduction to time series and forecasting. Springer, 2002.
- [3.26] C. Chatfield. Time-series forecasting. Chapman & Hall/CRC, 2001.
- [3.27] T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman, T. Hastie, J. Friedman, and R. Tibshirani. The elements of statistical learning. Springer New York, 2001.
- [3.28] X. Wang, S. Wang, J. Ma, D. Bi, "Energy-efficient Organization of Wireless Sensor Networks with Adaptive Forecasting." *Sensors* 2008, no. 4, pp. 2604-2616.
- [3.29] National Oceanic Atmospheric Administration's National Data Buoy Center, Historical data. [http://www.ndbc.noaa.gov/historical\\_data.shtml](http://www.ndbc.noaa.gov/historical_data.shtml) [May, 2013]
- [4.1] R. C. Luo, C.-C. Yih, K. L. Su, 2002. Multisensor fusion and integration: Approaches, applications, and future research directions. *IEEE Sensors J.* 2, 2 (April), pp. 107–119.
- [4.2] J. Ahn, B. Krishnamachari, 2006. Fundamental scaling laws for energy-efficient storage and querying in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 7th ACM International*



*Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc'06)*. ACM, Florence, Italy, pp. 334–343.

[4.3] A. Ciancio, S. Patten, A. Ortega, B. Krishnamachari, 2006. Energy-efficient data representation and routing for wireless sensor networks based on a distributed wavelet compression algorithm. In *Proceedings of the 5th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'06)*, pp. 309–316.

[4.4] B. Krishnamachari, D. Estrin, S. Wicker, 2002. The impact of data aggregation in wireless sensor networks. In *International Workshop of Distributed Event Based Systems (DEBS)*. IEEE, Vienna, Austria, pp. 575–578.

[4.5] B. V. Dasarathy, 2001. What, where, why, when, and how? *Inform. Fus.* 2, 2 (January), pp. 75–76. Editorial.

[4.6] K. Kalpakis, K. Dasgupta, P. Namjoshi, 2003. Efficient algorithms for maximum lifetime data gathering and aggregation in wireless sensor networks. *Comput. Netw.* 42, 6 (August), pp. 697–716.

[4.7] W.U. Bajwa, J. Haupt, A.M. Sayeed, R. Nowak, 2006. Compressive wireless sensing. *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'06)*, pp.134–142.

[4.8] J. Haupt, R. Nowak, 2006. Signal reconstruction from noisy random projections. *IEEE Trans. Inform. Theory* 52, 9 (September), pp. 4036–4048.

[4.9] J. Liu, Y. Zhang, F. Zhao, 2006. Robust distributed node localization with error management. In *Proceedings of the 7th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc'06)*. ACM, Florence, Italy, pp. 250–261.

[4.10] J. Liu, F. Zhao, 2005. Towards semantic services for sensor-rich information systems. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Broadband Networks (BROADNETS 2005)*. IEEE, Boston, pp. 967–974.

[4.11] R. Nowak, U. Mitra, R. Willett, 2004. Estimating inhomogeneous fields using wireless sensor networks. *IEEE J. Select. Areas Comm.* 22, 6 (August), pp. 999–1006.

[4.12] M. Rabbat, J. Haupt, A. Singh, R. Nowak, 2006. Decentralized compression and predistribution via randomized gossiping. In *Proceedings of the 5th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'06)*, pp. 51–59.

[4.13] K. Whitehouse, J. Liu, F. Zhao, 2006. Semantic streams: A framework for composable inference over sensor data. In *3rd European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN'06)*, K. Romer, H. Karl, and F. Mattern, Eds. Lecture Notes in Computer Science, vol. 3868. Springer, Zurich, Switzerland, 5–20.

[4.14] C. Guestrin, P. Bodik, R. Thibaux, M. A. Paskin, S. Madden, 2004. Distributed regression: an efficient framework for modeling sensor network data. In *Proceedings of the 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'04)*, pp. 1–10.

[4.15] J. M. Hellerstein, W. Hong, S. Madden, K. Stanek, 2003. Beyond average: Towards sophisticated sensing with queries. In *Information Processing in Sensor Networks: 2nd International Workshop (IPSN'03)*, pp. 63–79.

- [4.16] S. R. Madden, M. Franklin, J. M. Hellerstein, W. Hong, 2005. TinyDB: An acquisitional query processing system for sensor networks. *ACM Trans. Database Syst.* 30, 1 (March), pp. 122–173.
- [4.17] H. Qi, X. Wang, S. S. Iyengar, K. Chakrabarty, 2002. High performance sensor integration in distributed sensor networks using mobile agents. *Int. J. High Perf. Comput. Appl.* 16, 3 (Fall), pp. 325–335.
- [4.18] U.S. Department of Homeland Security, Federal Emergency Management Agency, United States Fire Administration, National Fire Data Center: Fire Risk to Older Adults, Topical Fire Research Series, Volume 7 – issue 7, February 2008
- [4.19] J. G. Goldammer, “Ecological Damage Assessment of the Wildfires in the Former Yugoslav Republic of Macedonia in 2007” Available form:  
<http://www.fire.uni-freiburg.de/GlobalNetworks/SEEurope/FYROM-2007.pdf> [May, 2013]
- [4.20] M. Ahrens, Fire Analysis and Research Division, National Fire Protection Association: Home Candle Fires, 2005
- [4.21] M. Hefeeda and M. Bagheri, Forest Fire Modeling and Early Detection using Wireless Sensor Networks, *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks*, 7(3-4), pp.169--224, April 2009.
- [4.22] J. Espinosa, J. Vandewalle, V. Wertz, Fuzzy logic, identification and predictive control. Springer, Heidelberg, 2004
- [4.23] K. Kapitanova, S. H. Son, K. Kang, "Event Detection in Wireless Sensor Networks - Can Fuzzy Values Be Accurate?", in Proc. ADHOCNETS, 2010, pp.168-184.
- [4.24] T. Haider, M. Yusuf, “A Fuzzy Approach to Energy Optimized Routing for Wireless Sensor Networks”, *The International Arab Journal of Information Technology*, Vol. 6, No. 2, April 2009
- [4.25] I. Gupta, D. Riordan, S. Sampalli, “Cluster-head election using fuzzy logic for wireless sensor networks”, *Communication Networks and Services Research Conference*, 2005. Proceedings of the 3rd Annual, pp. 255 – 260
- [4.26] M. Marin-Perianu, P. Havinga, “D-FLER – A Distributed Fuzzy Logic Engine for Rule-Based Wireless Sensor Networks”, 4th International Symposium, UCS 2007, Tokyo, Japan, November 25-28, 2007.
- [4.27] K. Kapitanova, S. H. Son, K. Kang, " Using Fuzzy Logic for Robust Event Detection in Wireless Sensor Networks," *Ad Hoc Networks Journal*, vol. 10, no. 4, pp 709-722, 2012.
- [4.28] NIST: [http://www.nist.gov/el/fire\\_protection/buildings/home-smoke-alarm-tests.cfm](http://www.nist.gov/el/fire_protection/buildings/home-smoke-alarm-tests.cfm)
- [4.29] S. J. Russell, P. Norvig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, Pearson Education, 2003
- [4.30] M. Rahimi, R. Baer, J. Warrior, D. Estrin, M. Srivastava. Cyclops: In Situ Image Sensing and Interpretation in Wireless Sensor Networks, in Proceedings of the 3rd ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '05), pp. 192–204, San Diego, Calif, USA, November 2005.
- [4.31] P. Sambhoos, A. Hasan, R. Han, T. Lookabaugh, J. Mulligan. Weeblevideo: Wide angle field-of-view video sensor networks. In Workshop on Distributed Smart Cameras (DSC06), 2006, held in conjunction with ACM SenSys 2006.

- [4.32] C. Wu, H. Aghajan, R. Kleihorst. Real-time human posture reconstruction in wireless smart camera networks. In *International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, pp.321–331, 2008.
- [4.33] A. Abbo, R. Kleihorst, B. Schueler: Xetal-II: A Low-Power Massively-Parallel Processor for Video Scene Analysis. *Signal Processing Systems* 62 (1) pp. 17-27, 2011.
- [4.34] Y. Pu, Y. He, Z. Ye, S. Londono, A. Abbo, R. Kleihorst, H. Corporaal: From Xetal-II to Xetal-Pro: On the Road Toward an Ultralow-Energy and High-Throughput SIMD Processor. *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Techn.* 21 (4) pp. 472-484, 2011.
- [4.35] Y. He, Y. Pu, Z. Ye, S. Londono, R. Kleihorst, A. Abbo, and H. Corporaal. Xetal-Pro: An Ultra-Low Energy and High Throughput SIMD Processor. In *Proceedings of the 47th Annual Design Automation Conference*, pp. 543-548 DAC 2010.
- [4.36] P. Kulkarni, D. Ganesan, P. Shenoy, Q. Lu, SensEye: A Multi-tier Camera Sensor Network, in *Proceedings of the 13th ACM International Conference on Multimedia (ACM Multimedia '05)*, pp. 229–238, Singapore, November 2005.
- [4.37] T. Teixeira, D. Lymberopoulos, E. Culurciello, Y. Aloimonos, A. Savvides. A lightweight camera sensor network operating on symbolic information. In *ACM SenSys Workshop on Distributed Smart Cameras*. Citeseer, 2006.
- [4.38] D. Jung, T. Teixeira, A. Savvides, Towards Cooperative Localization of Wearable Sensors using Accelerometers and Cameras , *Proceedings of IEEE Infocom*, March 2010, San Diego, CA, pp. 2330–2338.
- [4.39] S. Hengstler , D. Prashanth , S. Fong, H. Aghajan "Mesheye: A hybrid-resolution smart camera mote for applications in distributed intelligent surveillance", *Proc. 6th Int. Symp. Inf. Process. in Sensor Netw. (IPSN 2007)*, pp.360 -369 2007
- [4.40] C. Park , P. H. Chou, eCAM: ultra compact, high data-rate wireless sensor node with a miniature camera, *Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems*, October 31-November 03, 2006, Boulder, Colorado, USA pp. 359–360
- [4.41] A. Nahapetian, P. Lombardo, A. Acquaviva, L. Benini, M. Sarrafzadeh, "Dynamic reconfiguration in sensor networks with regenerative energy sources," in *DATE*, 2007, pp. 1054-1059.
- [4.42] P. Chen, "CITRIC: A low-bandwidth wireless camera network platform", *Proc. ACM/IEEE Intl. Conf. Distributed Smart Cameras*, pp.1 -10, 2008
- [4.43] C. Ianasi, V. Gui, C. I. Toma, D. Pescaru, A Fast Algorithm for Background Tracking in Video Surveillance, Using Nonparametric Kernel Density Estimation, *FACTA UNIVERSITATIS (Nis)*, Series: Electronics and Energetics, 18(1):127-144, April 2005
- [4.44] H. Wu, A. Abouzeid, "Energy Efficient Distributed JPEG2000 Image Compression in Multihop Wireless Networks, in *Proceedings of the 4th workshop on Applications and Services in Wireless Networks (ASWN)*, Boston, 2004.
- [4.45] C. N. Wang, S. W. Yang, C. M. Liu, T. Chiang, A hierarchical decimation lattice based on N-Queen with an application for motion estimation, *Signal Processing Letters, IEEE*, 10(8): 228-231, Aug. 2003,
- [4.46] <http://www.stuttgart-airport.com/travellers-and-visitors/airport-fascination/webcams-at-stuttgart-airport/webcam-1/> [May, 2013]

- [4.47] <http://compilers.cs.ucla.edu/avrora> [May, 2013]
- [5.1] V. Boonsawat, J. Ekchamanonta, K. Bumrunghet, S. Kittipiyakul, "Xbee wireless sensor networks for temperature monitoring," in 2nd ECTI-Conference on Application Research and Development (ECTI-CARD 2010), Pattaya, Chonburi, Thailand, 10-12 May 2010.
- [5.2] <http://www.arduino.cc/> [April, 2013]
- [5.3] <http://www.digi.com/xbee/> [April, 2013]
- [5.4] C. C. Castello, R. X. Chen, J. Fan, A. Davari, Context aware wireless sensor networks for smart home monitoring. Int. J. Auton. Adap. Commun. Sys. 2013, 6, pp.99–114.
- [5.5] M. Demirbas, K.Y. Chow, C.S. Wan, "Insight: Internet-Sensor Based Integration for Habitat Monitoring", Advanced **EXPerimental** activities ON WIRELESS networks and systems (EXPONWIRELESS) Workshop (as part of WOWMOM 2006), Buffalo, NY, June 2006, pp. 553-558.
- [5.6] Q. Huang, C. Lu, S. Mark, "Feasibility Study of Indoor Light Energy Harvesting for Intelligent Building Environment Management", International High Performance Buildings Conference, July, 2010.
- [5.7] <http://www.shm.cs.uiuc.edu/index.html> [April, 2013]
- [5.8] <http://www.xbow.com/> [April, 2013]
- [5.9] <http://www.tinyos.net/> [April, 2013]
- [5.10] M. Ceriotti, L. Mottola, G. P. Picco, A. L. Murphy, S. Guna, M. Corra, M. Pozzi, D. Zonta, P. Zanon, 2009. Monitoring heritage buildings with wireless sensor networks: The Torre Aquila deployment. In Proceedings of the 2009 International Conference on Information Processing in Sensor Networks, pp.277-288, April 13-16, 2009.
- [5.11] <http://www.tretec.it/public/webroot/default.asp?pID=OaA9IuYtqkls> [April, 2013]
- [5.12] <http://www.csi.ucd.ie/content/octopus-dashboard-sensor-networks-visual-control>  
[April, 2013]
- [5.13] B. F. Spencer, S. Cho, "Wireless smart sensor technology for monitoring civil infrastructure: technological developments and full-scale applications", Proceeding of the World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM'11 Plus), Seoul, Korea, 2011, pp. 4277-4304.
- [5.14] G. Zhao, "Wireless Sensor Networks for Industrial Process Monitoring and Control: A Survey", Network Protocols and Algorithms, Vol. 3, No. 1, 2011, pp.46-63.
- [5.15] M. Turon, MOTE-VIEW: A Sensor Network Monitoring and Management Tool, In The 2nd IEEE Workshop on Embedded Network Sensors (EmNets'05), May. 2005, pp.11-18.
- [5.16] [http://www.willow.co.uk/html/mote-view\\_client\\_software.html](http://www.willow.co.uk/html/mote-view_client_software.html) [April, 2013]
- [5.17] I. Chatzigiannakis, G. Mylonas, S. E. Nikolettseas, "jWebDust : A java-based generic application environment for wireless sensor networks," in DCOSS, 2005, pp. 376–386.
- [5.18] <http://www.microsoft.com/SILVERLIGHT/> [April, 2013]
- [5.19] <http://www.postgresql.org/> [April, 2013]
- [5.20] <http://zedgraph.sourceforge.net/samples.html> [April, 2013]

# Прилози

## Прилог А

### Опис на четирите сценарија за тестирање на системот за детекција на пожар базиран на непрецизна логика

Кај двокатната куќа која се користи кај првите две сценарија инсталирани се 30 јазли во 6 соби: дневна соба, лоби, помошна просторија и кујна (од првиот кат), како и во спална соба 1 и спална соба 3 (од вториот кат). Во секоја соба има по 5 јазли. На слика А.1 (горе лево и горе десно) даден е распоредот на соби кај оваа двокатна куќа.

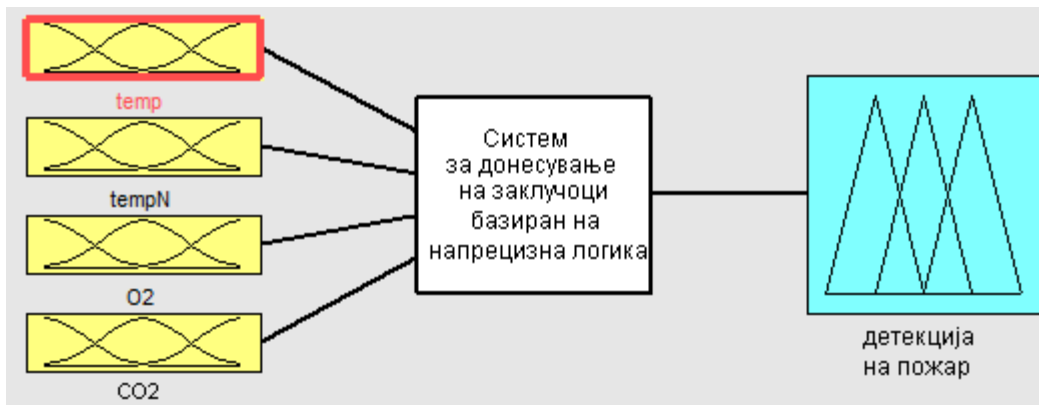
Кај еднокатната куќа (слика А.1 долу) во секоја соба има по 7 јазли. Во моделот за донесување на заклучоци базиран на непрецизна логика во предвид се земени само 4 соби (спална соба 1, спална соба 2, дневна соба и кујна), односно 28 јазли.



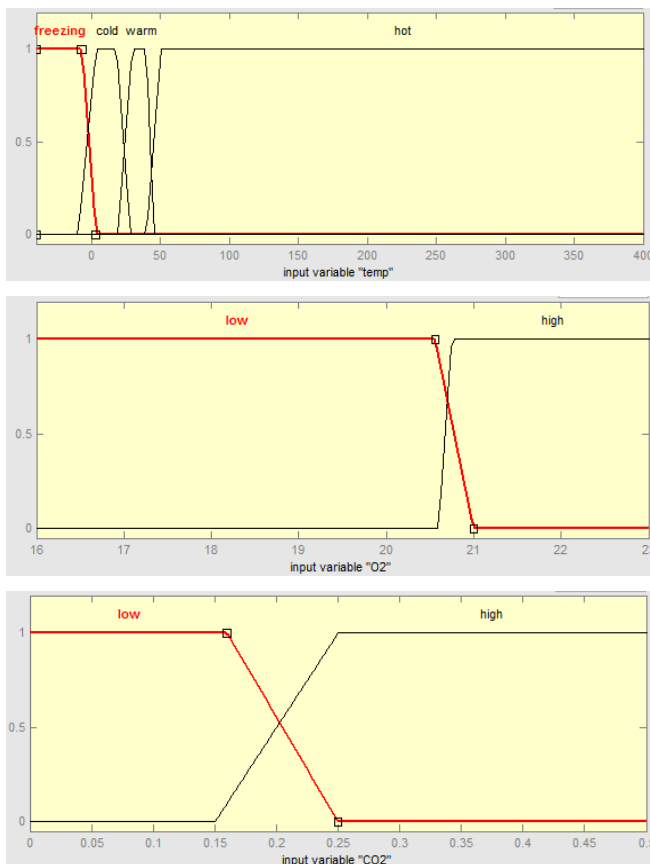
Слика А.1. Првиот кат од двокатната куќа, вториот кат од двокатната куќа и еднокатна куќа

На слика А.2 даден е дизајн на системот за детекција на пожар базиран на непрецизна логика.

Преглед на функциите на припадност за сите четири влезни атрибути во системот е даден на слика А.3. Функциите на припадност за атрибутите temp и tempN се идентични.



Слика А.2. Систем базиран на непрецизна логика



Слика А.3. Функциите на припадност за температура, концентрација на O<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub>

За температурните отчитувања дефинирани се четири функции на припадност: мрзнење, ладно, просечно и жешко. Вредностите се изразени во степени Целзиусови во интервал [-40, 400]. За CO<sub>2</sub> се користат две функции на припадност: ниско и високо. Концентрацијата на CO<sub>2</sub> е изразена во m<sup>3</sup>/ m<sup>3</sup> во интервал [0, 0.5]. Исто така и за O<sub>2</sub> се користат две функции на припадност: ниско и високо. Концентрацијата на O<sub>2</sub> изразена во m<sup>3</sup>/ m<sup>3</sup> се наоѓа во интервал [16, 23]. Сите функции на припадност имаат трапезоидна форма.

Следниот код го имплементира првиот тест во Матлаб.

```
[System]
Name='test1'
Type='mamdani'
Version=2.0
NumInputs=4
NumOutputs=1
NumRules=33
AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='centroid'

[Input1]
Name='temp'
Range=[-40 400]
NumMFs=4
MF1='freezing':'trapmf',[-40 -40 -7 3]
MF2='cold':'trapmf',[-10 3 18 28.1]
MF3='warm':'trapmf',[18.8 29.26 39.7 45]
MF4='hot':'trapmf',[39.7 50.21 400 400]

[Input2]
Name='tempN'
Range=[-40 400]
NumMFs=4
MF1='freezing':'trapmf',[-40 -40 -7 3]
MF2='cold':'trapmf',[-10 3 18 28.1]
MF3='warm':'trapmf',[18.8 29.26 39.7 45]
MF4='hot':'trapmf',[39.7 50.21 400 400]

[Input3]
Name='O2'
Range=[16 23]
NumMFs=2
MF1='low':'trapmf',[9.7 15.3 20.56 21]
MF2='high':'trapmf',[20.6 20.75 23.5 29.1]

[Input4]
Name='CO2'
Range=[0 0.5]
NumMFs=2
```

```
MF1='low': 'trapmf', [-0.45 -0.15 0.16 0.25]
MF2='high': 'trapmf', [0.15 0.25 0.55 0.95]
```

```
[Output1]
Name='fireDetection'
Range=[0 1]
NumMFs=2
MF1='no': 'trapmf', [0 0 0.49 0.495]
MF2='yes': 'trapmf', [0.483 0.502 1.1 1.9]
```

```
[Rules]
1 1 0 0, 1 (1) : 1
2 1 0 0, 1 (1) : 1
1 2 0 0, 1 (1) : 1
2 2 0 0, 1 (1) : 1
1 2 2 0, 1 (1) : 1
1 2 1 2, 2 (1) : 1
1 2 1 1, 1 (1) : 1
1 4 2 2, 2 (1) : 1
1 4 1 0, 2 (1) : 1
2 3 2 0, 1 (1) : 1
2 3 1 2, 2 (1) : 1
2 3 1 1, 1 (1) : 1
2 4 2 2, 2 (1) : 1
2 4 2 1, 1 (1) : 1
2 4 1 0, 2 (1) : 1
3 1 2 0, 1 (1) : 1
3 1 1 2, 1 (1) : 1
3 1 1 1, 2 (1) : 1
3 2 2 0, 1 (1) : 1
3 2 1 2, 2 (1) : 1
3 2 1 1, 1 (1) : 1
3 3 2 0, 1 (1) : 1
3 3 1 0, 2 (1) : 1
3 4 2 2, 2 (1) : 1
3 4 2 1, 1 (1) : 1
3 4 1 0, 2 (1) : 1
4 1 0 0, 1 (1) : 1
4 2 2 0, 1 (1) : 1
4 2 1 0, 2 (1) : 1
4 3 2 2, 2 (1) : 1
4 3 2 1, 1 (1) : 1
4 3 1 0, 2 (1) : 1
4 4 0 0, 2 (1) : 1
```



## Прилог Б

### Дополнителни информации за системот за мониторинг

#### Преглед на пристигнати електронски пораки

За праќање на електронски пораки искористен е бесплатниот е-меил сервер на Google (smtp.gmail.com). За да може да се користи овој сервер потребно е да се поседува корисничка адреса на истиот. Корисничкото име заедно со соодветната лозинка се користи за да може корисникот да се автентифицира на серверот. Комуникацијата со серверот се одвива преку енкриптиран канал што гарантира сигурност при преносот на податоците.

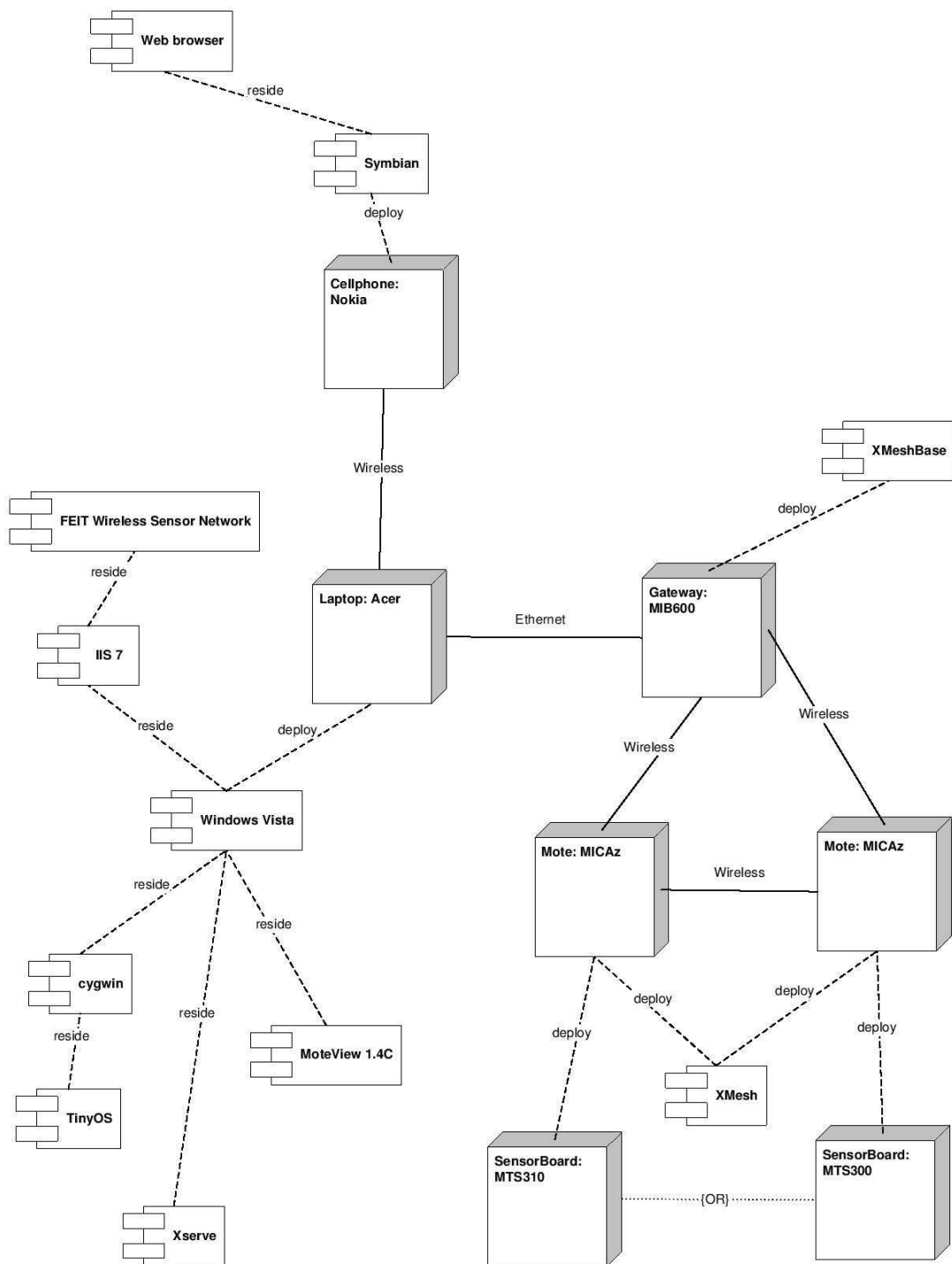
#### Преглед на пристигнатата смс порака

За праќање на смс пораки искористен е комерцијален портал (Clickatell) за праќање смс преку интернет. Овој портал нуди неколку типови на конекции. Во оваа апликација се користи HTTP/S конекција чија имплементација е многу едноставна. Корисникот треба само да повика соодветно сетирана веб адреса:

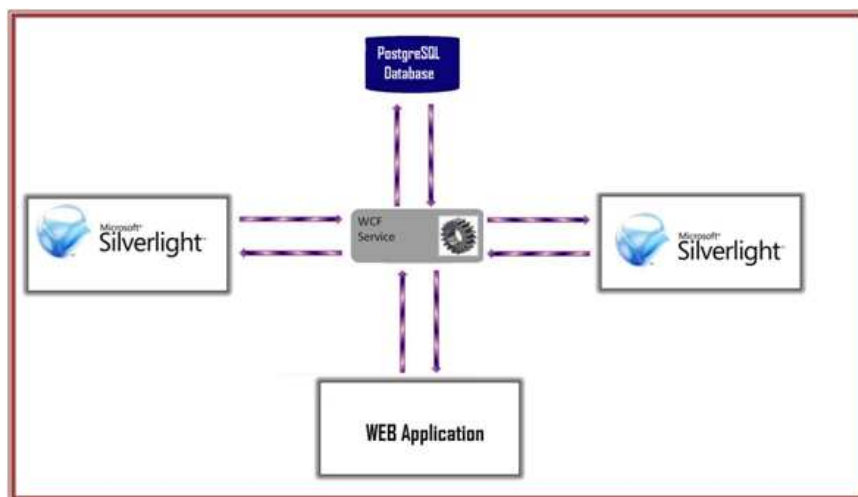
**[http://api.clickatell.com/http/sendmsg?user=xxx&password=xxx&api\\_id=xxx  
&to=TELNO448311234567&text=TEXT\\_MESSAGE\\_HERE](http://api.clickatell.com/http/sendmsg?user=xxx&password=xxx&api_id=xxx&to=TELNO448311234567&text=TEXT_MESSAGE_HERE)**

Исто како и претходниот сервис, и овој бара задолжителна регистрација. Со процесот на регистрација секој корисник добива корисничко име, кое се запишува во делот означен со user=xxx, лозинка која се запишува во делот означен со password=xxx и идентификациски број кој се запишува во делот означен со api\_id=xxx. Останатите два дела ги поставува корисникот, т.е. во делот означен со to=TELNO се внесува телефонскиот број до кој сакаме да пратиме порака, а во делот означен со text=TEXT\_MESSAGE\_HERE се внесува содржината на пораката што сакаме да ја испратиме.

Овој начин на праќање на смс пораки не ни гарантира сигурен канал и заштита на податоците. Уште една ограниченост на смс сервисот е дозволената должина на една смс порака која изнесува 160 карактери, па системот може да се дизајнира на два начини, односно со предефинирање и лимитирање на пораките што се праќаат или пак со праќање на повеќе смс пораки. Во нашиот случај одбрана е првата варијанта, т.е. должината на пораките не смее да надмине 160 карактери.



Слика Б.1. Проширен развивачки дијаграм



Слика Б.2. Преглед на клиентскиот слој

[Home](#) | [Topology](#) | [Statistics](#) | [Charts](#)

## FEIT Wireless Sensor Network Interface

Acquire Live Data ● View Historical Data ●

nodeID	light	temp	voltage	parent	mic	accelX	accelY	resultTime	magX
0	110	-3	3278	126	475	-3460	190	11/18/2005 6:12:25 AM	22.42
2	0	16	2637	4	193	-8900	10	11/18/2005 6:12:02 AM	105.2
3	0	22	2495	4	196	440	469	11/18/2005 6:10:46 AM	30.66
4	0	22	2577	0	172	820	521	11/18/2005 6:10:19 AM	30.12
6	0	22	2631	4	182	-8980	781	11/18/2005 6:10:33 AM	105.47
7	0	22	2699	8	200	-8740	781	11/18/2005 6:10:08 AM	105.47
8	0	22	2659	4	178	-8980	40	11/18/2005 6:09:51 AM	104.66
9	0	23	2693	4	162	-8940	4	11/18/2005 6:11:06 AM	105.61
13	0	22	2676	8	448	-8980	1	11/18/2005 6:12:32 AM	106.55

Слика Б.3. Преглед на историски податоци

Имплементација на Windows Communication Foundation (WCF) сервисот NpgSqlService кој го имплементира интерфејсот INpgSqlService:

```
[ServiceContract]
public interface INpgSqlService
{
    [OperationContract]
    LinkedList<NodeDataContract> getNodesFromPostgresql();
}

[DataContract]
public class NodeDataContract
{
    [DataMember]
    public int nodeID;
    [DataMember]
    public int temp;
    ...
    [DataMember]
    public string resultTime;

    public void set(int nodeid, int temp, ..., string result_time)
    {
        this.nodeID = nodeid;
        this.temp = temp;
        ...
        this.resultTime = result_time;
    }
}

public class NpgSqlService : INpgSqlService
{
    public LinkedList<NodeDataContract> getNodesFromPostgresql()
    {
        LinkedList<NodeDataContract> nodes = new LinkedList<NodeDataContract>();

        try
        {
            nodes = NpgsqlDataAccessImplementation.getLatestData();
        }
        catch (Exception)
        {
            return nodes;
        }
    }
}
```

C# имплементација на комуникацијата со XServer:

```
public static bool createSocketConnection (string srcLocation)
{
    IPAddress address = IPAddress.Loopback;
    IPEndPoint xServer = new IPEndPoint(address, 9001);
    socketListener = new Socket(AddressFamily.InterNetwork, SocketType.Stream, ProtocolType.Tcp);
    sourceLocation = srcLocation;

    //connect to live stream
    try {
        socketListener.Connect(xServer);
        connectionSucceeded = true;
    }
    catch (SocketException ex) {
        connectionSucceeded = false;
        result += ex.Message;
    }
    catch (Exception ex) {
        result += ex.Message;
    }
    if (connectionSucceeded) {
        waitForInitialisationData();
    }
}
```

```

    }
    return connectionSucceeded;
}
public static void waitForInitialisationData ()
{
    if (initCallBack == null) {
        initCallBack = new AsyncCallback(initReceiveCompleted);
    }
    //start listening for data
    try {
        IAsyncResult asyncResult = socketListener.BeginReceive(initialisationData, 0, initialisationData.Length,
SocketFlags.None, initCallBack, null);
    }
    catch (SocketException ex) {
        result += ex.Message;
        socketListener.Disconnect(false);
    }
    catch (Exception ex) {
        result += ex.Message;
        if (socketListener.Connected)
        {
            socketListener.Disconnect(false);
        }
    }
}
public static void initReceiveCompleted (IAsyncResult ar)
{
    //Initialisation Data received
    try {
        int iRx = 0;
        iRx = socketListener.EndReceive(ar);
        if (initialisationData[0] == 84 && initialisationData[1] == 32)
        {
            acknowledgeReceipt();
        }
    }
    catch (Exception ex) {
        result += ex.Message;
        if (socketListener.Connected)
        {
            socketListener.Disconnect(false);
        }
    }
}
public static void acknowledgeReceipt () {
    socketListener.Send(initialisationData);
    //connection established, start receiving packet
    //each packet has the form:
    //<length><data payload><16-bit CRC>
    //1. receive length
    waitForDataSize();
}
public static void waitForDataSize () {
    if (sizeCallBack == null) {
        sizeCallBack = new AsyncCallback(receiveSizeCompleted);
    }
    //start listening for data
    try {
        IAsyncResult asyncResult = socketListener.BeginReceive(dataSize, 0, dataSize.Length, SocketFlags.None,
sizeCallBack, null);
    }
    catch (SocketException ex) {
        result += ex.Message;
        if (socketListener.Connected) {
            socketListener.Disconnect(false);
        }
    }
    catch (Exception ex) {
        result += ex.Message;
        if (socketListener.Connected) {
            socketListener.Disconnect(false);
        }
    }
}

```

```

    }
}

public static void receiveSizeCompleted (IAsyncResult ar) {
    //Data Size received
    try {
        int iRx = 0;
        iRx = socketListener.EndReceive(ar);
        int size = dataSize[0];
        DataBuffer = new byte[size];
        //2. receive data payload
        waitForData();
    }
    catch (Exception ex) {
        result += ex.Message;
        if (socketListener.Connected) {
            socketListener.Disconnect(false);
        }
    }
}

public static void waitForData ()
{
    if (callBack == null) {
        callBack = new AsyncCallback(receiveCompleted);
    }
    //start listening for data
    try {
        IAsyncResult asyncResult = socketListener.BeginReceive(DataBuffer, 0, DataBuffer.Length, SocketFlags.None,
callBack, null);
    }
    catch (SocketException ex) {
        result += ex.Message;
        socketListener.Disconnect(false);
    }
    catch (Exception ex) {
        result += ex.Message;
        if (socketListener.Connected) {
            socketListener.Disconnect(false);
        }
    }
}

public static void receiveCompleted (IAsyncResult ar) {
    //Data received
    try {
        int iRx = 0;
        String xmlText = System.Text.Encoding.ASCII.GetString(DataBuffer);
        iRx = socketListener.EndReceive(ar);
        char[] chars = new char[iRx + 1];
        chars = System.Text.Encoding.ASCII.GetChars(DataBuffer, 0, iRx);
        String data = new System.String(chars);
        Array xml = DataBuffer.ToArray();
        XmlParsingUtilities.parseXml(DataBuffer, sourceLocation);
        waitForDataSize();
    }
    catch (Exception ex) {
        if (socketListener.Connected)
        {
            socketListener.Disconnect(false);
        }
        result += ex.Message;
    }
}
}

```

Следниот код ја дава XML конфигурацијата која е специфична за секоја апликација и ги содржи функциите за конверзија:

```
- <XCondOr>
- <XCond name="IsEqual">
  <XFilterParam name="fieldname" value="amtype" />
  <XFilterParam name="fieldvalue" value="0x31" />
</XCond>
- <XCond name="IsEqual">
  <XFilterParam name="fieldname" value="amtype" />
  <XFilterParam name="fieldvalue" value="0x33" />
</XCond>
- <XCondAnd>
- <XCondOr>
  - <XCond name="IsEqual">
    <XFilterParam name="fieldname" value="socketid" />
    <XFilterParam name="fieldvalue" value="0x31" />
  </XCond>
  - <XCond name="IsEqual">
    <XFilterParam name="fieldname" value="socketid" />
    <XFilterParam name="fieldvalue" value="0x33" />
  </XCond>
</XCondOr>
- <XCondOr>
  - <XCond name="IsEqual">
    <XFilterParam name="fieldname" value="amtype" />
    <XFilterParam name="fieldvalue" value="0x0B" />
  </XCond>
  - <XCond name="IsEqual">
    <XFilterParam name="fieldname" value="amtype" />
    <XFilterParam name="fieldvalue" value="0x0D" />
  </XCond>
</XCondOr>
</XCondAnd>
- <XCond name="IsEqual">
  <XFilterParam name="fieldname" value="board_id" />
  <XFilterParam name="fieldvalue" value="0x84" />
</XCond>
</XCondAnd>
```

Следниот код се користи за парсирање на пакетите според соодветната XML конфигурација:

```
private static bool checkPacket()
{
    XmlNodeList filter = doc.GetElementsByTagName("XFilter");
    bool acceptPacket = false;
    foreach (XmlNode node in filter)
    {
        foreach (XmlNode condition in node.ChildNodes)
        {
            if (condition.Name.Equals("XCondAnd"))
            {
                acceptPacket = AND(condition);
            }
            else if (condition.Name.Equals("XCondOr"))
            {
                acceptPacket = OR(condition);
            }
            else if (condition.Name.Equals("XCond"))
            {
                acceptPacket = calculate(condition);
            }
        }
    }
    return acceptPacket;
}

public static bool AND(XmlNode andNode)
{
    bool result = true;
    foreach (XmlNode node in andNode.ChildNodes)
    {
        if (node.Name.Equals("XCondAnd"))
        {
            result = AND(node);
            if (result == false)
                //do not iterate any more
                return false;
        }
        else if (node.Name.Equals("XCondOr"))
        {
            result = OR(node);
        }
    }
}

private static bool calculate(XmlNode node)
{
    if (result == false)
        return false;
    else if (node.Name.Equals("XCond"))
    {
        result = calculate(node);
        if (result == false)
            return false;
    }
    return result;
}

private static bool OR(XmlNode andNode)
{
    bool result = false;
    foreach (XmlNode node in andNode.ChildNodes)
    {
        if (node.Name.Equals("XCondAnd"))
        {
            result = AND(node);
            if (result == true)
                return true;
        }
        else if (node.Name.Equals("XCondOr"))
        {
            result = OR(node);
            if (result == true)
                return true;
        }
        else if (node.Name.Equals("XCond"))
        {
            result = calculate(node);
            if (result == true)
                return true;
        }
    }
    return result;
}
```