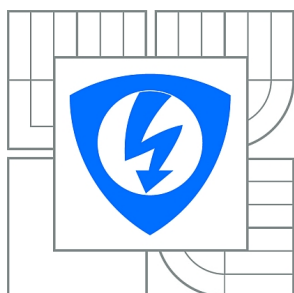


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

SNÍŽENÍ CHYBY ODHADU POZICE U INKREMENTÁLNÍCH LOKALIZAČNÍCH TECHNIK

REDUCTION OF POSITION ESTIMATE ERROR IN INCREMENTAL LOCALIZATION
TECHNIQUES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

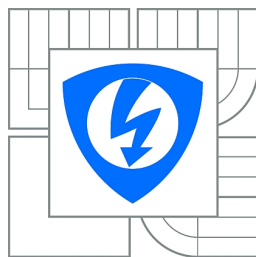
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAN PEKÁREK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MILAN ŠIMEK, Ph.D.

BRNO 2011



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Jan Pekárek

ID: 98410

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Snížení chyby odhadu pozice u inkrementálních lokalizačních technik

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce je navrhnout lokalizační algoritmus, pro určení pozice bezdrátových sensorových uzlů umístěných ve vnitřních prostorech. Student se v práci zaměří na problematiku návrhu lokalizačního algoritmu, který by měl vykazovat optimální chybu určení pozice při uvažování velké chybovosti odhadu vzdálenosti mezi jednotlivými uzly. Efektivita navrženého algoritmu bude zkoumána vzhledem k různé hustotě a počtu sensorových kotevních jednotek, k variabilní chybě odhadu vzdálenosti a také vzhledem k umístění počátečního referenčního systému. Navržený algoritmus bude porovnán s dosavadním vývojem ve světě a budou diskutovány jeho výhody a možné aplikační nasazení. Výstupem práce by také mělo být doporučení postupu pro rozmístění bezdrátových sensorových jednotek v konkrétní budově, která bude definována vedoucím práce.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Stojmenovic I., Handbook of Sensor Networks, Wiley, ISBN: 13 978-0-471-68472-5, 2005.
- [2] Swami A., Zhao Q., Hong Y., Tong L., Wireless Sensor Networks, Signal Processing and Communications Perspectives, ISBN: 978-0-0470-03557-3, 2007.

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 26.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Milan Šimek, Ph.D.

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá popisem a výzkumem inkrementálních lokalizačních technik v bezdrátových senzorových sítích. V práci jsou popsány základní algoritmy Map-Growing a ABC (Assumption Based Coordinates). Po prostudování výše zmíněných lokalizačních algoritmů je vybrán vhodný algoritmus pro výzkum na náhodných senzorových sítích a problematiky s nimiž spojené. Pro výzkum této problematiky je zvolen jako optimální simulační software MATLAB. Dále pro zadané univerzitní prostředí jsou zkoumány vhodné lokalizační algoritmy s možnými optimalizacemi či optimální počet senzorových uzlů. Výsledkem diplomové práce je navržený lokalizační algoritmus s počátečním referenčním systémem o čtyřech kotevních uzlech, který je umístěn ve středu senzorové sítě. Algoritmus může být také použit v provedení Map4-Growing s optimalizací Mass-Spring, který po testování vykazoval nejmenší lokalizační chybu pro univerzitní prostředí.

KLÍČOVÁ SLOVA

Bezdrátové senzorové sítě, lokalizace komunikačních uzlů, Map-Growing, trilaterace, multilaterace, Mass-Spring.

ABSTRACT

The diploma thesis describes localization of communications nodes in the Wireless Sensor Networks. This thesis contains basic algorithms for localization sensor's nodes as are Map-Growing and ABC (Assumption Based Coordinates). Then is chosen acceptable algorithm for simulation on random sensor networks. For research these problems is used software MATLAB. For a given the university's environment are researched appropriate algorithms with possible optimization algorithms. The result of diploma thesis is a localization algorithm with initial multilateration system and this system is located in the center sensor's network. As algorithm IMap4-Growing (Improved Map4-Growing) with optimization, which uses optimization distance between sensors and radio range. In the diploma thesis is simulated optimization algorithm Mass-Spring.

KEYWORDS

Wireless Sensor Networks, localization of communications nodes, Map-Growing, trilateration, multilateration, Mass-Spring.

PEKÁREK, J. *Snížení chyby odhadu pozice u inkrementálních lokalizačních technik*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 79 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Milan Šimek, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Snížení chyby odhadu pozice u inkrementálních lokalizačních technik“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Milanu Šimkovi, Ph.D., za velmi užitečnou metodickou, odbornou a pedagogickou pomoc při zpracování práce. Svým rodičům za umožnění vysokoškolského studia a podporu během studií.

OBSAH

Úvod	13
1 Lokalizace v síti WSN	14
1.1 Inkrementální lokalizační algoritmy	14
1.1.1 Map-Growing	14
1.1.2 ABC	17
1.1.3 WLS	18
1.1.4 IQL	19
1.1.5 KPS	19
1.1.6 SPA	21
1.2 Základní lokalizační algoritmy	22
1.2.1 Multi-lateration	22
1.3 Postupná realizace lokalizačního algoritmu s využitím inkrementální algoritmů	23
1.3.1 Výběr simulačního prostředí	23
1.3.2 Vytvoření sensorového pole a základní simulace problematiky lokalizace ve WSN	23
2 Lokalizační algoritmus pro budovu UTKO	31
2.1 Trilaterace - 1 sensorový uzel v každé místnosti	31
2.1.1 Lokalizace bez omezení výpočtu	34
2.2 Použití výpočetní metody multilaterace v algoritmu Map-Growing	37
2.2.1 Ohodnocení počátečního čtyř kotevního systému	37
2.2.2 Multilaterace - 1 sensorový uzel v každé místnosti bez omezení	39
2.2.3 Multilaterace - 2 sensorové uzly v každé místnosti bez omezení	42
2.3 Vývoj možných optimalizačních algoritmů pro návrh univerzitní sítě	44
2.3.1 Optimalizační algoritmus IMap4-Growing (Improved Map4- Growing)	44
2.3.2 Optimalizační algoritmus Mass-Spring	47
3 Výsledky diplomové práce a srovnání se světovým vývojem	52
4 Závěr	55
Literatura	56
Seznam symbolů, veličin a zkratk	57

A Příloha A	58
A.1 Jak jsou zobrazena data pomocí box plotu?	58
A.2 Výsledky algoritmu Map-Growing se dvěma typy počátečních systémů	59
A.3 Výsledky simulace vlivu umístění počátečního systému na chybu lokalizace senzorové mapy	60
A.4 Simulace typů počátečních systémů metody trilaterace	61
A.5 Simulace typů počátečních systémů metody multilaterace	63
B Příloha B	66
B.1 Podrobné výsledky simulace algoritmu Map-Growing s trilaterací - místnost 1 senzor	66
B.2 Podrobné výsledky simulace algoritmu Map-Growing s multilaterací - místnost 1 senzor	69
B.3 Podrobné výsledky simulace algoritmu Map-Growing s multilaterací - místnost 2 senzory	71
B.4 Vývoj možných optimalizačních algoritmů	71
B.4.1 Optimalizace na základě porovnání vzdáleností s rádiovým dosahem	71
B.4.2 Optimalizace na základě porovnání průměrné vzdálenosti s rádiovým dosahem	72
B.4.3 Optimalizace Mass-Spring	73
B.5 Základní simulace problematiky lokalizace ve WSN	75
B.6 Nejlepší hodnoty lokalizační chyby pro návrh univerzitní sítě	77
C Příloha C	79

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Základní lokální mapa o třech sensorových uzlech	15
1.2	Skupiny nasazení algoritmu KPS	20
1.3	Růst lokalizační chyby se zvyšující se hodnotou parametru k	24
1.4	Chyba lokalizace při ostroúhlém systému při chybovosti prostředí +40%	25
1.5	Vyhodnocení simulace počátečního systému	26
1.6	Výsledek simulace algoritmu Map-Growing	28
1.7	Znázornění chyb v jednotlivých kolech lokalizace	28
1.8	Lokalizovaná bezdrátová sensorová síť	29
1.9	Vliv umístění počátečního systému na chybu lokalizované mapy	30
2.1	Prostředí s jedním senzorem v místnosti	33
2.2	Stanovení minimálního R	34
2.3	Zhodnocení lokalizačních chyb pro rádiové dosahy při umístění systému uprostřed sensorové sítě a chybovosti univerzitního prostředí	35
2.4	Zobrazení lokalizačních chyb pro různé rádiové dosahy a chybovosti prostředí $\pm 10\%$ až $\pm 50\%$, umístění ve středu sítě	36
2.6	Nejlepší parametry počátečního systému pro $\epsilon_r = +40\%$	36
2.5	Zobrazení lokalizačních chyb pro různé rádiové dosahy a chybovosti prostředí $\pm 10\%$ až $\pm 50\%$, umístění ve středu sítě	37
2.7	Výběr počátečního systému s nejmenší lokalizační chybou	38
2.8	Počáteční systém ve tvaru kosočtverce - $\epsilon_r = +40\%$	38
2.9	Zhodnocení lokalizačních chyb pro rádiové dosahy při umístění systému uprostřed sensorové sítě a chybovosti univerzitního prostředí	40
2.10	Zobrazení lokalizačních chyb pro různé rádiové dosahy a chybovosti prostředí $\pm 10\%$ až $\pm 50\%$, umístění ve středu sítě	41
2.11	Nejlepší parametry počátečního systému pro $\epsilon_r = +40\%$	41
2.12	Prostředí se dvěma senzory v potřebných místnostech	42
2.13	Zobrazení lokalizačních chyb pro různé rádiové dosahy a chybovosti prostředí $\pm 10\%$ až $\pm 50\%$, umístění ve středu sítě	43
2.14	Nárůst lokalizační chyby s hustotou sensorové sítě	44
2.15	Vliv IMap4-Growing s porovnáním vzdáleností na lokalizační chybu	45
2.16	Vliv IMap4-Growing s porovnáním průměrné vzdálenosti na lokalizační chybu	47
2.17	Mass-Spring optimalizace	48
2.18	Mass-Spring optimalizace s oběma typy energií	49
2.19	Mass-Spring optimalizace s oběma typy energií pro patro univerzity	50
2.20	Závislost lokalizační chyby na počtu iterací v Mass-Spring pro patro univerzity	50

2.21	Obecné využití optimalizace při chybovosti prostředí +40% a počtu iterací čtyři	51
2.22	Využití optimalizace při chybovosti prostředí +40% a počtu iterací sto - univerzitní budova	51
3.1	Lokalizační chyby inkrementálních lokalizačních algoritmů	53
3.2	Detailní zobrazení lokalizačních chyb inkrementálních lokalizačních algoritmů	54
A.1	Zobrazení dat pomocí nástroje box plot v prostředí Matlab	58
A.2	Rovnostranný počáteční systém - $\epsilon_r = +40\%$, $\epsilon_r = -40\%$	61
A.3	Rovnoramenný počáteční systém - $\epsilon_r = +40\%$, $\epsilon_r = -40\%$	61
A.4	Ostroúhlý počáteční systém - $\epsilon_r = +40\%$, $\epsilon_r = -40\%$	62
A.5	Tupoúhlý počáteční systém - $\epsilon_r = +40\%$, $\epsilon_r = -40\%$	62
A.6	Pravoúhlý počáteční systém - $\epsilon_r = +40\%$, $\epsilon_r = -40\%$	63
A.7	Počáteční systém ve tvaru kosočtverce - $\epsilon_r = +40\%$, $\epsilon_r = -40\%$	63
A.8	Počáteční systém ve tvaru kosodélníku - $\epsilon_r = +40\%$, $\epsilon_r = -40\%$	64
A.9	Počáteční systém se dvěma tupými úhly - $\epsilon_r = +40\%$, $\epsilon_r = -40\%$	64
A.10	Počáteční systém s tupým a pravým úhlem - $\epsilon_r = +40\%$, $\epsilon_r = -40\%$	65
B.1	Simulace vlivu „dobrého“ a „špatného“ systému na lokalizaci uzlů	75
B.2	Simulace vlivu „dobrého“ a „špatného“ systému na lokalizaci uzlů	76
B.3	Nejlepší parametry trilaterálního počátečního systému pro $\epsilon_r = -40\%$	77
B.4	Nejlepší parametry multilaterálního počátečního systému pro $\epsilon_r = -40\%$	77
B.5	Obecné využití optimalizace při chybovosti prostředí -40% a počtu iterací dvě	78
B.6	Využití optimalizace při chybovosti prostředí -40% a počtu iterací sto - univerzitní budova	78

SEZNAM TABULEK

1.1	Simulace počátečního trojúhelníku	25
1.2	Simulace algoritmu Map-Growing	27
1.3	Simulace vlivu umístění počátečního systému na chybu lokalizované mapy	30
2.1	Simulace jeden senzor v každé místnosti	32
2.2	Zobrazení některých souřadnic senzorů	33
2.3	Vyhodnocení nejlepšího umístění počátečního systému	34
2.4	Simulace jeden senzor v každé místnosti	39
2.5	Vyhodnocení nejlepšího umístění počátečního systému	39
2.6	Simulace dva senzory v potřebných místnostech	42
3.1	Simulace chyb lokalizace inkrementálních lokalizačních algoritmů . . .	52
3.2	Podrobné nasimulované hodnoty inkrementální lokalizačních algoritmů	53
A.1	Simulace „špatného“ systému	59
A.2	Simulace „dobrého“ systému	59
A.3	Simulace umístění systému na okraji sítě	60
A.4	Simulace umístění systému ve středu sítě	60
A.5	Vliv rovnostranného počátečního systému na chybu lokalizace	61
A.6	Vliv rovnoramenného počátečního systému na chybu lokalizace	61
A.7	Vliv ostroúhlého počátečního systému s úhlem $< 30^\circ$ na chybu lokalizace	62
A.8	Vliv tupoúhlého počátečního systému na chybu lokalizace	62
A.9	Vliv pravoúhlého počátečního systému na chybu lokalizace	63
A.10	Vliv počátečního systému ve tvaru kosočtverce na chybu lokalizace . .	63
A.11	Vliv počátečního systému ve tvaru kosodélníku na chybu lokalizace .	64
A.12	Vliv různoběžníkového systému se dvěma tupými úhly na chybu lo- kalizace	64
A.13	Vliv počátečního systému s tupým a pravým úhlem na chybu lokalizace	65
B.1	Lokalizace bez omezení výpočtu pro $R = 12\ m$	66
B.2	Lokalizace bez omezení výpočtu pro $R = 13\ m$	66
B.3	Lokalizace bez omezení výpočtu pro $R = 14\ m$	67
B.4	Lokalizace bez omezení výpočtu pro $R = 15\ m$	67
B.5	Lokalizace bez omezení výpočtu pro $R = 16\ m$	68
B.6	Lokalizace bez omezení výpočtu pro $R = 17\ m$	68
B.7	Lokalizace bez omezení výpočtu pro $R = 14\ m$	69
B.8	Lokalizace bez omezení výpočtu pro $R = 15\ m$	69
B.9	Lokalizace bez omezení výpočtu pro $R = 16\ m$	70
B.10	Lokalizace bez omezení výpočtu pro $R = 17\ m$	70
B.11	Lokalizace bez omezení výpočtu pro $R = 12\ m$	71

B.12 Lokalizace bez omezení výpočtu pro $R = 13\text{ m}$	71
B.13 Lokalizace bez omezení výpočtu pro $R = 14\text{ m}$	71
B.14 Optimalizace - porovnání vzdáleností s rádiovým dosahem, $N[-] = 29$	71
B.15 Optimalizace - porovnání vzdáleností s rádiovým dosahem, $N[-] = 49$	72
B.16 Optimalizace - porovnání průměrné vzdálenosti s rádiovým dosahem, $N[-] = 29$	72
B.17 Optimalizace - porovnání průměrné vzdálenosti s rádiovým dosahem, $N[-] = 49$	72
B.18 Mass-Spring - obecné řešení s počáteční energií 2.5	73
B.19 Mass-Spring - obecné řešení s energií 2.6	73
B.20 Mass-Spring - řešení pro návrh patra univerzity s počáteční energií 2.5	74
B.21 Mass-Spring - řešení pro návrh patra univerzity s energií 2.6	74

ÚVOD

Diplomová práce se zabývá lokalizací sensorových uzlů v bezdrátových sensorových sítích WSN (Wireless Sensor Networks). Cílem diplomové práce je snížení chyby inkrementálních lokalizačních algoritmů. Záměrem je vytvoření nového lokalizačního algoritmu pomocí dostupných metod výpočetních algoritmů. Dále tento inkrementální lokalizační algoritmus aplikovat na zadané univerzitní prostředí a dle potřeby použít potřebné optimalizace.

Bezdrátové sensorové sítě jsou složeny z komunikačních jednotek, které mohou být osazeny senzory. Sensor je zařízení, které dokáže změřit fyzická data z prostoru, který je sledován. Zachytí spojitý analogový signál a provede digitalizaci pomocí A/D převodníku, digitální signál pošle kontroléru pro další zpracování. Požadavky na sensorové uzly jsou malá velikost, spotřebovat co nejmenší energii (energii komunikační jednotky, kterou protéká stálý elektrický proud I po dobu t při stálém elektrickém napětí U výpočet dle 1), pracovat bez obsluhy.

$$E [J] = P \cdot t = U_{cc} \cdot I \cdot t \quad (1)$$

Energetická náročnost musí být navržena s ohledem na napájení sensorových uzlů tak, aby byla zaručena funkčnost celé sítě například minimálně jeden rok.

1 LOKALIZACE V SÍTI WSN

1.1 Inkrementální lokalizační algoritmy

Pro správné fungování celé sensorové sítě musejí být jednotlivé komunikační jednotky správně lokalizovány. Existuje řada lokalizačních algoritmů, ale ne každý je vhodný pro různé tvary sítí. Následující lokalizační algoritmus je zaměřen hlavně na nepravidelné tvary např. na sítě ve tvaru C nebo O, sítě s častými ohyby. Základem lokalizačních technik je co nejpřesnější určení vzdáleností jednotlivých uzlů. Většina těchto technik využívá pro měření nejkratší cesty vzdálenosti daného uzlu i více tzv. skoků. Inkrementální lokalizační algoritmy se snaží redukovat chyby algoritmů využívající právě více skoků, z tohoto důvodu používají pouze vzdálenost odpovídající velikosti jednoho skoku. Dále u těchto typů algoritmů se zavádí myšlenka počátečního trojúhelníku, který při jeho správném vytvoření snižuje celkovou chybu lokalizace sensorové mapy. Pro započítání výpočtu lokalizačního algoritmu je zapotřebí minimálně tří kotevních komunikačních jednotek (počáteční systém), které znají svoje umístění.

1.1.1 Map-Growing

Algoritmus Map-Growing [1] slouží pro lokalizaci sensorových uzlů zejména v sensorových sítích různorodých tvarů. Map-Growing algoritmus používá právě jedno skokovou vzdálenost, protože takováto vzdálenost není zatížena velkou chybou, která bývá především u algoritmů APS [6] (APS algoritmy využívají např. 3 skoky, kde chyba může být až desítky procent radiového rozsahu).

Map-Growing je rozdělen do jednotlivých kroků.

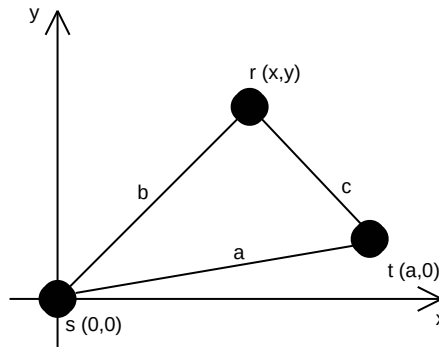
1. výběr startovacího uzlu
2. výběr dvou zbývajících uzlů sloužících pro vytvoření „dobrého“ trojúhelníku
3. výpočet souřadnic X-Y uzlu ve vrcholu trojúhelníka

Senzorovou síť můžeme chápat jako spojený, nesměrový graf, ve kterém se nacházejí uzly a hrany. Hrany zde představují spojení mezi jednotlivými sousedy a k tomu také patří odpovídající změřená vzdálenost. Změřená vzdálenost je zde představována jako Eukleidovská vzdálenost, která je zatížena Gaussovou chybou. Výběr startovacího uzlu je určen tak, aby lokalizovaná mapa rostla co nejpravidelněji (postupná lokalizace uzlů nacházejících se různým směrem od počátečního systému). Pojmem lokalizovaná mapa se myslí sensorová síť, která je složena již z lokalizovaných jednotek lokalizačním algoritmem. Poté následuje výběr „dobrého“ trojúhelníka dle následujícího kódu. [1]

```

if počet sousedů < 2
    return chyba;
else
    poté zjistí vzdálenosti s, t s, r a r,t sousedů;
    while jednotlivé úhly v trojúhelníku < 30°
        if více uzlů k dispozici
            pokus se najít vyhovující trojúhelník;
        end
    end
    poté zjistí vzdálenosti s, t s, r a r,t sousedů;
    return s,t;
end

```



Obr. 1.1: Základní lokální mapa o třech senzorových uzlech

Na obrázku 1.1 je znázorněn uzel s se souřadnicemi $(0,0)$ jako uzel startovací a z něho vycházející souřadnicový systém. Druhému uzlu např. uzlu t se zavede souřadnice x ve formě vzdálenosti a (souřadnice y se rovná nule). Prozatím neznámý uzel r sice nezná své souřadnice, ale zná vzdálenosti svých sousedů a pomocí následujícího algoritmu dopočítá své souřadnice x, y

$$x = \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2a}, \quad y = \pm \frac{\sqrt{(-a + b - c)(a - b - c)(a - b + c)(a + b + c)}}{2a}. \quad (1.1)$$

Tyto uzly budou dále využity jako uzly kotevní pro případnou trilateraci nebo pro výpočet pomocí dvou kotev. Nyní již kotevní uzly z obrázku 1.1 zašlou pomocí svého rádiového signálu informaci o svých souřadnicích svým sousedům, ty na tomto základě vědí, že senzorové uzly z trojúhelníku jsou pro ně uzly kotevní. Následně se provede lokalizační algoritmus trilaterace.

Trilaterace je lokalizační technika využívající geometrických tvarů - kružnic. Kde

tyto kružnice představují rádiový dosah jednotlivých kotev. Pro výpočet požadovaných souřadnic x , y se provede následující výpočet pomocí Pythagorových vět aplikovaných pro metodu trilaterace

$$\begin{aligned} 1. (x_1 - x_?)^2 + (y_1 - y_?)^2 &= r_1^2, & 2. (x_2 - x_?)^2 + (y_2 - y_?)^2 &= r_2^2, \\ 3. (x_3 - x_?)^2 + (y_3 - y_?)^2 &= r_3^2. \end{aligned} \quad (1.2)$$

Následně dojde k odečtení rovnic, výsledkem budou dvě již řešitelné rovnice

$$\begin{aligned} 2x_?(x_3 - x_1) + 2y_?(y_3 - y_1) &= r_1^2 - r_3^2 - x_1^2 + x_3^2 - y_1^2 + y_3^2 \\ 2x_?(x_3 - x_2) + 2y_?(y_3 - y_2) &= r_2^2 - r_3^2 - x_2^2 + x_3^2 - y_2^2 + y_3^2. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Řešením této soustavy rovnic o dvou neznámých budou získány souřadnice neznámého uzlu. Z výše zmíněných rovnic je vidět, že r znázorňuje vzdálenost od jednotlivých kotevních uzlů. Hodnota r bude získána z měření pomocí RSSI (Received Signal Strength Indication) [6]

$$\begin{aligned} RSSI [dBm] &= 10 \log \frac{P_{RX}}{P_{ref}} \\ P_{RX} [W] &= P_{TX} \cdot G_{TX} \cdot G_{RX} \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2. \end{aligned} \quad (1.4)$$

$P_{TX} [W]$ přenosová intenzita signálu vysílače

$P_{RX} [W]$ přijatá síla signálu

$G_{TX} [dB]$ zisk vysílací antény

$G_{RX} [dB]$ zisk přijímací antény

$\lambda [m]$ vlnová délka

$P_{ref} [W]$ referenční hodnota výkonu $1mW$

$d [m]$ vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem

V případě, že neznámý uzel je v rádiovém dosahu pouze dvou kotev provede se níže zobrazený postup, kde p je neznámý uzel, n je uzel, který není ve spojení s uzlem p , d jsou vzdálenosti od uzlu p k uzlům A , B

$$(x_1 - x_p)^2 + (y_1 - y_p)^2 = d_1^2, \quad (x_2 - x_p)^2 + (y_2 - y_p)^2 = d_2^2. \quad (1.5)$$

Tímto se získají dvojí souřadnice uzlu $p_1 (x_{p1}, y_{p1})$, $p_2 (x_{p2}, y_{p2})$. Souřadnice jsou následně využity pro výpočet tzv. testovací vzdálenosti.

$$\text{testD1} \leftarrow \sqrt{(x_{p1} - x_n)^2 + (y_{p1} - y_n)^2}$$

$$\text{testD2} \leftarrow \sqrt{(x_{p2} - x_n)^2 + (y_{p2} - y_n)^2}$$


```

if testD1 < r && testD2 > r
    return souřadnice (xp1,yp1);
else
    return souřadnice (xp2,yp2);

```

Dále také může dojít k situaci, že všechny tři kotevní sensorové uzly leží na téže přímce. Takovýto případ se řeší stejně jako případ se dvěma kotevními uzly a to tak, že se tyto dvě kotvy vyberou z kotev ležících na jedné přímce.

1.1.2 ABC

Algoritmus ABC [4] (Assumption Based Coordinates) určuje umístění neznámých sensorových uzlů jeden po druhém v pořadí, jak navazují spojení. V případě potřeby dochází ke kompenzaci vzniklých chyb. Toto je nutné pro vypořádání se s „falešnou“ soustavou souřadnic, která byla zavedena v počátku výpočtu pro několik prvních uzlů. Algoritmus nejprve předpokládá, že poloha uzlu n_0 je $(0,0)$. Dále tento uzel naváže komunikaci s uzlem n_i a určí vzdálenost r_{0i} pomocí RSSI, tento uzel bude mít zavedené souřadnice $(r_{0i},0)$. Lokalizace dalšího sensorového uzlu bude řešena za předpokladu, že odmocniny, které se použijí pro nalezení y_j budou kladné. Souřadnice x se vypočítá následovně

$$x_j = \frac{r_{0i}^2 + r_{0j}^2 - r_{ij}^2}{2r_{0i}}. \quad (1.6)$$

Souřadnice y za pomoci Pythagorovy věty

$$y_j = \sqrt{r_{0j}^2 - x_j^2}. \quad (1.7)$$

Tento algoritmus výpočtu souřadnic bude aplikován na každý nový uzel. Za ideálních podmínek bude algoritmus ABC produkovat sensorovou mapu s náhodnými souřadnicemi vzhledem ke globálnímu souřadnicovému systému. I u tohoto způsobu lokalizace dochází k nežádoucím odchylkám, které jsou způsobeny metodou měření vzdálenosti mezi jednotlivými uzly. [4]

$$\sigma_i^{node} = \frac{\sigma_{0,i}^{dosah}}{2}, \quad \sigma_j^{node} = \sqrt{\sigma_{0,j}^{dosah^2} + \sigma_{i,j}^{dosah^2}} \quad (1.8)$$

Minimalizace těchto odchylek je zajištěna pomocí algoritmu WLS (Weighted Least-Square Algorithm). Pro výpočet pozic dalších uzlů v síti se algoritmus ABC použije následně: Pro výpočet pozice x_x uzlu n_x , dojde k nalezení tří uzlů, které svoji pozici znají (kotev) a také znají jednotlivé vzdálenosti k uzlu n_x . Poté se využije algoritmus trilaterace, další částí celého procesu je použití algoritmu WLS pro vylepšení jednotlivých vzdáleností a dále se stanoví hodnota odchylky σ_x^{node} . Takže smyslem

algoritmu ABC je určení pozic prvních třech neznámých uzlů a následně využití známé trilaterace, mezi tím však dochází k vylepšování odhadnutého umístění pomocí WLS. U tohoto algoritmu dochází k poměrně velkým chybám na okrajích senzorové sítě, kde tato chyba je způsobena umístěním kotevních uzlů na jedné straně neznámého uzlu. Tento problém je možný řešit přidáním více kotevních uzlů.

1.1.3 WLS

V algoritmu WLS [2] se využívá Gaussovy distribuce k určení spolehlivosti měření. Po počátečním odhadu je vypočítán zlepšující vektor a přidán do předchozího odhadu, ale jen pokud je tento vylepšující vektor menší než určitá hodnota. Zlepšující vektor je počítán lineární váženou metodou nejmenších čtverců. Tato metoda nejmenších čtverců slouží k nalezení řešení tak, aby součet druhých mocnin chyb nalezeného řešení byl co nejmenší. Tuto problematiku lze řešit využitím následujícího vzorce, $wAx = wb$, kde A je matice a x , b jsou sloupcové vektory. Postup vytvoření této zlepšující metody je následující.

x označuje pravdivou polohu

x_i sousední uzly, kde $i = 1 \dots n$

$r_i [m]$ označuje vzdálenosti mezi uzly

δ_x označuje zlepšující vektor

$\epsilon_i [m]$ je chyba nepřesnosti

Tedy jednotlivé vzdálenosti jsou zatíženy určitou chybou a výsledná skutečná pozice uzlu je součet odhadnuté pozice x^{est} a zlepšujícího vektoru

$$r_i [m] = \|x_i - x\| + \epsilon_i, \quad x = x^{est} + \delta_x. \quad (1.9)$$

r_i^{est} je odhadnutá vzdálenost

$$r_i^{est} [m] = \|x_i - x^{est}\|, \quad (1.10)$$

Z důvodu chyby v určení pozice se tato chyba objevuje i v určení vzdálenosti

$$\delta r_i [m] = r_i - r_i^{est}. \quad (1.11)$$

Následující úpravou se získá potřebný směrový vektor, délky 1, pro vytvoření matice A

$$\delta r_i = r_i - r_i^{est} = \|x_i - x^{est} - \delta_x\| - \|x_i - x^{est}\| + \epsilon_i \approx -\frac{(x_i - x^{est})}{\|x_i - x^{est}\|} \cdot \delta_x + \epsilon_i = dir_i \cdot \delta_x + \epsilon_i. \quad (1.12)$$

Závažnost w_i chyby je vyjádřena pomocí rozptylů σ^2 . Rozptyl znázorňuje odchylky středních hodnot kvadrátů od střední hodnoty. Pro výpočet rozptylu je nejprve potřebný výpočet průměrné hodnoty, kde N je počet hodnot

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_1^N x_i. \quad (1.13)$$

Rozptyl se tedy vypočítá následovně

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \left(\sum_1^N x_i^2 \right) - \bar{x}^2. \quad (1.14)$$

Pomocí zmíněného rozptylu dojde k výpočtu závažnosti chyby

$$w_i = \sqrt{-2\sigma_{vzdalenosti}^2 + \sigma_{polohyUzlu}^2}. \quad (1.15)$$

Poté pomocí vypočtených údajů dojde k vypočtení zlepšujícího vektoru pro souřadnice x, y . [2]

$$\begin{bmatrix} dir_{x,1}/w_1 & dir_{y,1}/w_1 \\ \vdots & \vdots \\ dir_{x,n}/w_n & dir_{y,n}/w_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta x & \delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta r_1/w_1 \\ \vdots \\ \delta r_n/w_n \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

1.1.4 IQL

Algoritmus IQL [2] (Iterative Quality-based Location Algorithm) je navržen jako soubor dílčích algoritmů pro výpočet téměř ideálního umístění. Nejprve dojde k zjištění počátečního odhadu pozice pomocí níže zmíněného algoritmu ABC (Assumption Based Coordinates), poté je aplikován WLS algoritmus (Weighted Least-Square Algorithm) k vylepšení daného umístění.

1.1.5 KPS

Algoritmus KPS [7] (deployment Knowledge-based Positioning System) je na počátku založen na vytváření skupin uzlů. Uzly v těchto skupinách mají přednastavenou pozici své skupiny. Jednotlivé senzory v dané skupině mají tuto pozici předem nastavenou ve svých pamětech, tyto nasazené senzory se použijí jako referenční body. Následně každý uzel v síti musí zjistit svůj prostorový vztah k jednotlivým skupinám, tedy počet sousedů z každé skupiny. Tento proces se nazývá pozorování sensorových uzlů. Sensorový uzel může být umístěn v místech kolem bodu nasazení dle určitého rozložení pravděpodobnosti, tento bod je nazván jako rezidentní bod. Pravděpodobnost distribuční funkce konečných rezidentních uzlů je pro všechny uzly ze stejné skupiny stejná.

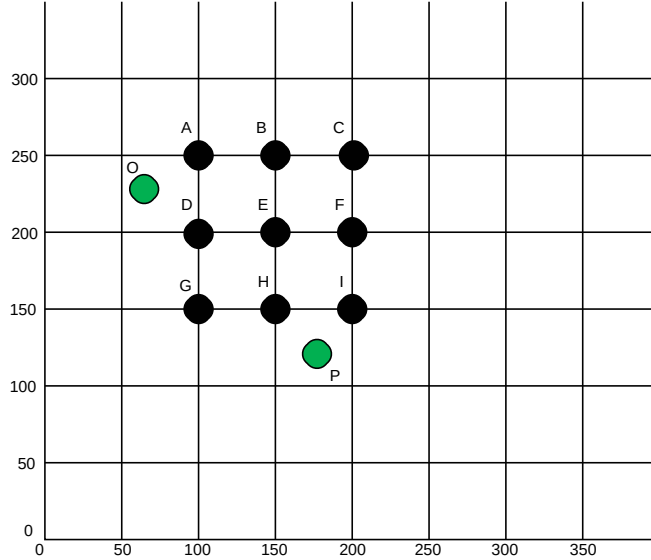
Model nasazení založený na skupinách uzlů

Senzorové uzly se nejprve rozdělí do n skupin o stejném počtu uzlů, kde každá skupina je označena jako G_i , ($i = 1, \dots, n$), o souřadnicích (x_i, y_i) . Jednotlivé pozice uzlů ve skupině jsou rozloženy kolem bodu nasazení pomocí normálního rozdělení (Gaussovo rozdělení pravděpodobnosti). Pro uzel k ze skupiny G_i se střední hodnotou normálního rozdělení $\mu = (x_i, y_i)$ je rozdělení pravděpodobnosti následující

$$f_k^i(x, y | k \in G_i) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2]/2\sigma^2} = f(x - x_i, y - y_i). \quad (1.17)$$

Podobně je i vyjádřena průměrná pravděpodobnost nasazení vztažená k celé síti

$$f_{overall}(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_k(x, y | k \in G_i). \quad (1.18)$$



Obr. 1.2: Skupiny nasazení algoritmu KPS

Po nasazení všech skupin uzlů a neznámých uzlů, znázorněných na obrázku 1.2, dochází k postupnému odhadnutí pozice neznámého uzlu. Nejprve uzly, které jsou zahrnuty v určité skupině, všesměrově vysílají své skupinové *id* všem svým sousedům. Poté tento neznámý uzel např. vyhodnotí, že se nachází v blízkosti skupiny G_a , to bylo způsobeno pouze příjmem *id* od jedné skupiny. Na tomto základě je potom určena pravděpodobnost možného umístění, je předpokládáno umístění $\theta = (x, y)$ uzlu n . Je-li počítáno s počtem uzlů obsažených v jednotlivých skupinách, dále s distribučními funkcemi nasazení, lze určit pravděpodobnost uzlů z příslušných skupin, které mohou sledovat uzel na pozici $\theta = (x, y)$. Poté je získána proměnná např. S_i , která reprezentuje počet uzlů ze skupiny G_i , které mohou být sledovány uzlem na

pozici $\theta = (x, y)$. Dále je vytvořen vektor a , který reprezentuje pozorované uzly, také se následně určuje pravděpodobností funkce pro každý pozorovaný uzel z vektoru a . Pro určení této pravděpodobnostní funkce je využita metoda MLE (Maximum Likelihood Estimation).

MLE

Metoda MLE [7] (Maximum Likelihood Estimation) je statistická metoda pro vytvoření statistického modelu dat. Používá se u velkého množství dat, u kterých není možné provést např. měření jejich vlastností např. z důvodu časové náročnosti. Metoda MLE však předpokládá, že tyto vlastnosti, které jsou zkoumány jsou normálně rozloženy (Gaussovo rozdělení pravděpodobnosti). Pro výpočet je potřeba znát střední hodnotu a rozptyl, metoda MLE tyto hodnoty určí pouze ze známých změřených hodnot, které byly změřeny pouze jen u některých dat.

Poté pravděpodobnost, že senzory a_i se nacházejí v sousedství senzoru n je následující

$$f(S_i = a_i | \theta) = \binom{m}{a_i} (g_i(\theta))^{a_i} (1 - g_i(\theta))^{(m-a_i)}. \quad (1.19)$$

$g_i(\theta)$ je pravděpodobnost, že senzor ze skupiny G_i je sousedem uzlu n s pozicí θ
 m je počet senzorů v každém bodě nasazení (skupině)

Výpočet pravděpodobnosti umístění

Stejně jako u ostatních lokalizačních algoritmů pro výpočet neznámé pozice je nutné znát nejméně tři vzdálenosti od bodů nasazení. Pro výpočet vzdálenosti d je zde využita metoda MLE, kde pravděpodobnost sledování sousedů a_i ze skupiny G_i je maximální. Následně $g(d)$ reprezentuje pravděpodobnost, že senzor ze skupiny G_i se nachází v rádiovém dosahu, střed této kružnice představuje vzdálenost od skupiny G_i . Poté pravděpodobnosti $g(d), g(\theta)$ se rovnají. Pro zlepšení přesnosti je neznámý bod n použit jako výchozí bod a provádí se hledání v nedalekých skupinách dokud není nalezena maximální pravděpodobnost $L(\theta)$ výskytu u sousedů a_i .

$$g_i(\theta) = g(\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} | n_i \in G_i) \quad (1.20)$$

1.1.6 SPA

Algoritmus SPA [3] (Self-Positioning Algorithm) je distribuovaným algoritmem používajícím se v bezdrátových senzorových sítích bez použití GPS (Global Positioning System). Bezdrátová senzorová síť je pomyslně rozdělena na jednotlivé části (skupiny), u kterých lze vyjádřit hustotu výskytu senzorových uzlů. Následně „skupina“

s nejvyšší hustotou je vybrána jako referenční a je také vybrán uzel s nejvyšším faktorem hustoty, který představuje výchozí bod souřadnicového systému. Základním úkolem algoritmu SPA je tedy zjištění hustoty jednotlivých částí sítě, proto nejprve dojde k tomu, že každý sensorový uzel v síti vytvoří vlastní souřadnicový systém pro změření jednotlivých vzdáleností ke svým sousedům. Po zjištění příslušných vzdáleností dojde mezi uzly k výměně těchto informací. Nevýhodou však je, že vlivem zavádění jednotlivých souřadnicových systémů dochází k celkovému se natáčení, zrcadlení celé sensorové mapy dle referenčních bodů. Z tohoto důvodu dochází k výpočetní transformaci, aby byla dosažena co nejideálnější sensorová mapa zpět. Hlavním nedostatkem algoritmu SPA je, že jednotlivé senzory neznají svoji fyzickou orientaci k celkovému souřadnicovému systému, tedy sensorové uzly neznají své sousedy ve svém souřadnicovém systému. V SPA algoritmu je pro své velké komunikační náklady navržena clustering lokalizace. V porovnání s uzlem sousedním, sensorový uzel i , který má nastaven časovač na co nejkratší dobu, se stane tzv. master uzlem a všesměrově vyšle zprávu všem jeho sousedním uzlům. Následně všechny uzly, které tuto zprávu přijaly zastaví své časovače a stanou se tzv. slave uzly. Lze to také vyjádřit, že tyto uzly se stanou polem uzlu master. Poté každý master uzel vytvoří souřadnicový systém algoritmem, který je totožný s SPA, berou se v úvahu jednotlivá referenční pole a menší ID lokálního souřadnicového systému master uzlů se nastaví jako výchozí souřadnicový systém. Následně souřadnice sousedního pole jsou konvertovány jako první a dojde krok po kroku k vystavění globálního souřadnicového systému. Celkovou nevýhodou algoritmu SPA je, že při jakékoli změně referenčního bodu dochází k opětovnému přepočítávání celé mapy.

1.2 Základní lokalizační algoritmy

V této části práce budou popsány lokalizační algoritmy, které se dále využijí pro snížení lokalizační chyby u inkrementálních lokalizačních algoritmů.

1.2.1 Multi-lateration

V kapitole 1.1.1 je zmíněna technika nazvaná trilaterace, z tohoto názvu vyplývá, že se zde využívají pro výpočet tři kotevní uzly. Pro přesnost výpočtu lokalizace sensorových uzlů je také možnost využití více kotevních uzlů, poté se tato metoda nazývá multi-laterace. [5] Rovnice $AX = B$ je poté řešena následovně

$$A = \begin{pmatrix} 2(x_n - x_1) & 2(y_n - y_1) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_n - x_{n-1}) & 2(y_n - y_{n-1}) \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} -x_1^2 + x_n^2 - y_1^2 + y_n^2 + r_1^2 - r_n^2 \\ \vdots \\ -x_{n-1}^2 + x_n^2 - y_{n-1}^2 + y_n^2 + r_{n-1}^2 - r_n^2 \end{pmatrix}. \quad (1.21)$$

1.3 Postupná realizace lokalizačního algoritmu s využitím inkrementální algoritmů

1.3.1 Výběr simulačního prostředí

Z výsledků práce [6], ve které bylo zkoumáno nové prostředí pro simulaci senzorových sítí J-Sim, bylo prostředí J-Sim vyhodnoceno jako nevhodné pro simulaci problematiky lokalizace senzorových uzlů. Prostor by bylo vhodné např. pro simulaci práce jednotlivých senzorových uzlů. Lokalizační algoritmy pracují pouze s matematickými výpočty a z tohoto uvažování bylo zvoleno prostředí Matlab (Matlab R2009b).

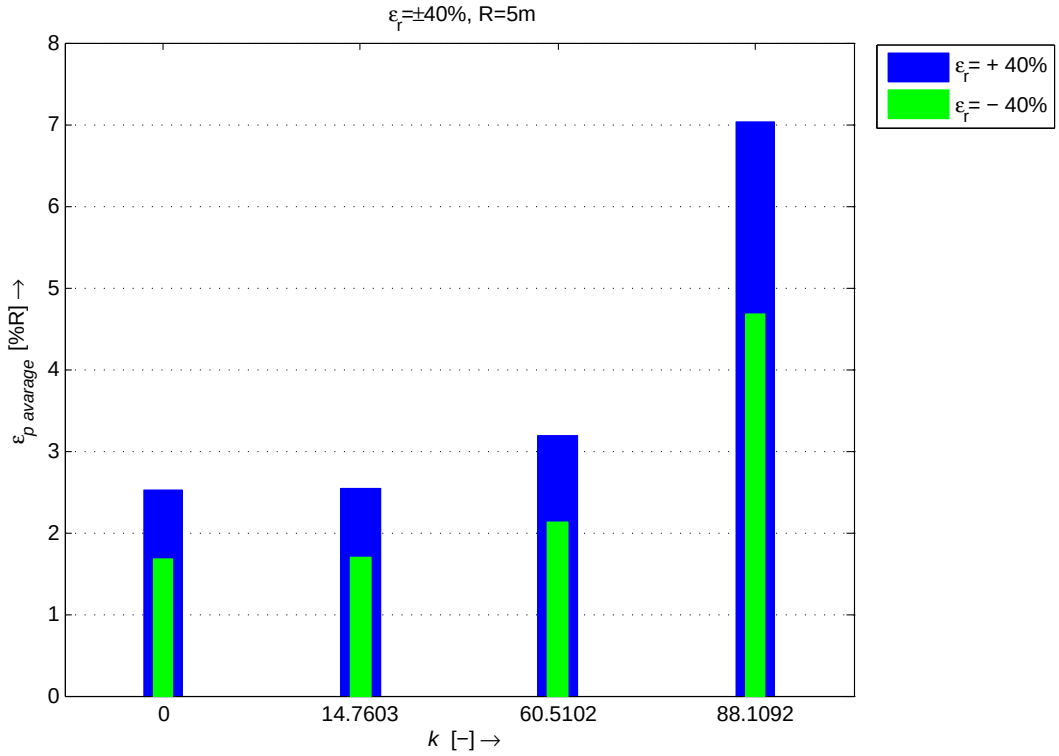
1.3.2 Vytvoření senzorového pole a základní simulace problematiky lokalizace ve WSN

Simulace typů počátečních systémů

Z výše uvedených lokalizačních algoritmů byla vybrána část algoritmu Map-Growing zabývající se vytvořením počátečního trojúhelníku. Cílem následných experimentů bude vylepšení počátečního výpočtu pozice nekotevních uzlů pomocí metody trilaterace. Pro tyto simulace je zaveden nový parametr k popisující kvalitu zvoleného trojúhelníku.

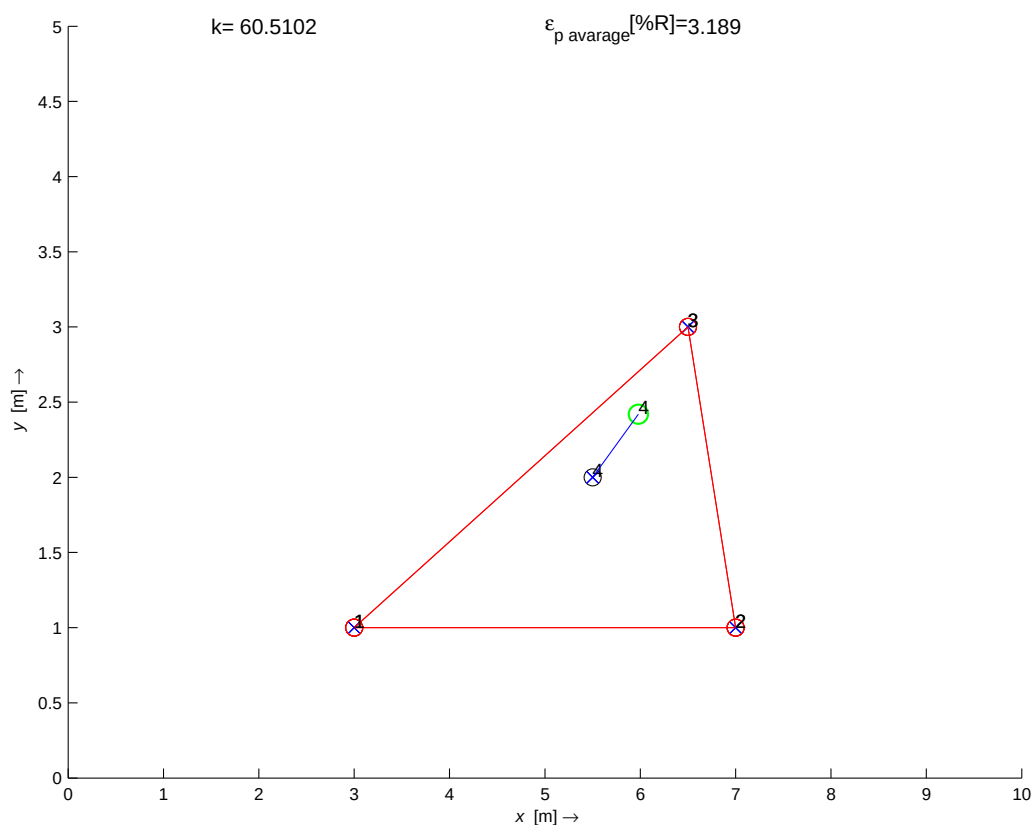
$$k [-] = |60 - \alpha| + |60 - \beta| + |60 - \gamma| \quad (1.22)$$

Hodnota 60° je zde zvolena z důvodu splnění podmínky, že jednotlivé vnitřní úhly mají být větší než 30° a v případě rovnostranného trojúhelníku jsou jednotlivé vzdálenosti v trojúhelníku stejné (ideální vzájemná poloha kružnic). Tedy kvalita počátečního systému se zvyšuje s hodnotou parametru k blížící se nule. Výpočet parametru k platí také pro úhly, u kterých není zavedena podmínka velikosti úhlu větší než 30° .



Obr. 1.3: Růst lokalizační chyby se zvyšující se hodnotou parametru k

Na obrázku 1.3 je ověřena zavedená myšlenka popisující kvalitu počátečního systému, grafické zobrazení pro $\epsilon_r = \pm 40\%$ je zvoleno z důvodu shodné chybovosti prostředí v budově univerzity. Chybovostí je myšlen rozdíl mezi Eukleidovskou vzdáleností a změřenou vzdáleností pomocí RSSI mezi dvěma uzly. V tabulkách A.5 až A.7 jsou uvedeny simulované hodnoty pro jednotlivé typy systémů a pro chybovost prostředí až 50%. Na ukázce 1.4 lze vidět lokalizační chybu uzlu při použití ostroúhlého systému. Pro správný výpočet byla tato simulace ověřena pomocí zadání chyby prostředí 0%, v takovém případě odpovídala vypočtená pozice pozici, kterou určil lokalizační algoritmus. Simulované typy počátečních systémů pro $\epsilon_r = \pm 40\%$ jsou zařazeny do přílohy A.4 spolu s grafickým zobrazením závislosti chyby lokalizace na kvalitě systému pro $\epsilon_r = -40\%$. V tabulce rovnostranného trojúhelníku A.5 je parametr k roven hodnotě $3,94 \cdot 10^{-9}$, při takovémto typu systému by se hodnota měla rovnat nule. Hodnota je menší z důvodu přesnějších výpočtů simulačního prostředí Matlab.



Obr. 1.4: Chyba lokalizace při ostroúhlém systému při chybovosti prostředí +40%

Na obrázku 1.4 jsou jednotlivé typy uzlů označeny dle následujících barev. Červená barva označuje kotevní sensorové uzly, s modrými křížky je vyznačeno fyzické umístění sensorového uzlu, zelená barva představuje pozici vypočtenou daným algoritmem.

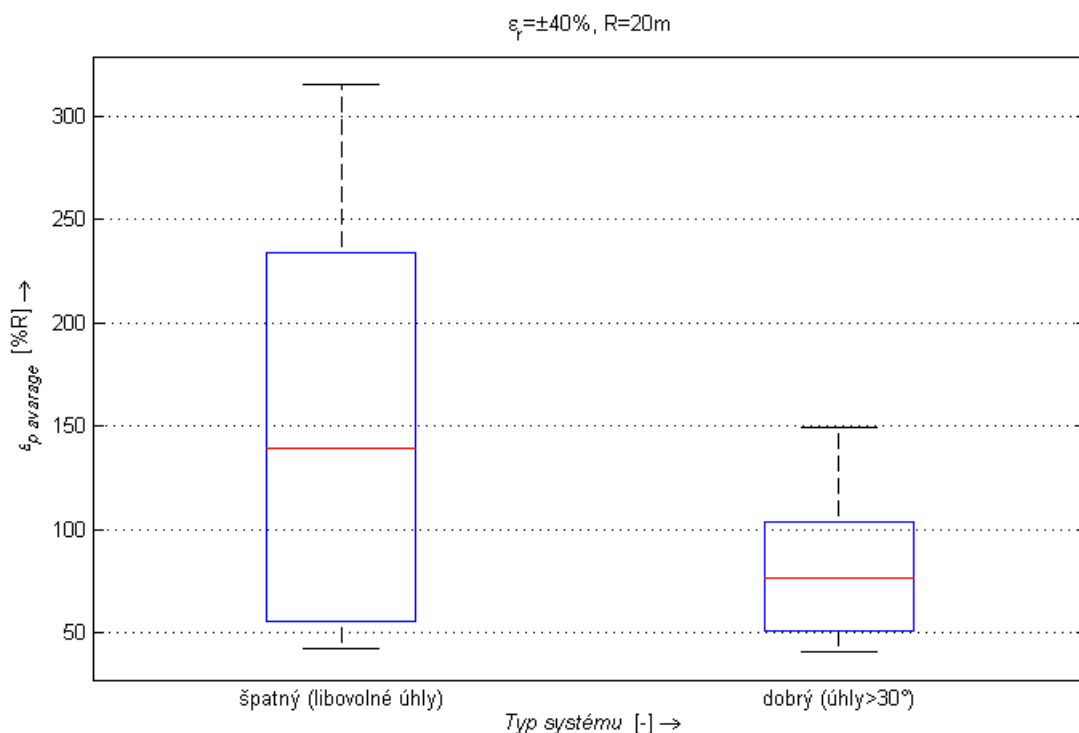
Simulace algoritmu Map-Growing s počátečním systémem o libovolných úhlech a o úhlech $> 30^\circ$

Parametry simulace	Zadané hodnoty
Počet uzlů	$N=50$
Rádiový dosah	$R[m]=20$
Chyba měření vzdálenosti	$\epsilon_r[\%] = \pm 40$
Počet opakování simulace	10

Tab. 1.1: Simulace počátečního trojúhelníku

Na obrázcích B.1 a B.2 je znázorněna náhodná simulace sensorového pole s vytvořením počátečního trojúhelníku, který je tvořen kotevními uzly (červeně

označené). Dále navržený algoritmus vyhodnotí a následně vypočítá předpokládané umístění všech sensorových uzlů v síti pomocí metody trilaterace (zeleně označené). V těchto simulacích je také zobrazeno „pravdivé“ umístění pomocí modrých křížků. Tyto simulace byly provedeny vždy na stejném rozložení sensorové sítě pro oba typy simulovaných systémů a dále pro vytvářené systémy byl použit stejný startovací uzel. Po odsimulování trojúhelníku s libovolnými vnitřními úhly je aplikována myšlenka z algoritmu Map-Growing o velikosti vnitřních úhlů větší než 30° .



Obr. 1.5: Vyhodnocení simulace počátečního systému

V tabulkách A.1 a A.2 je znázorněna simulace jednotlivých systémů odkud je vidět menší hodnota průměrné chyby v určování pozice u tzv. „dobrého“ trojúhelníku.

V grafu 1.5¹ je znázorněn výsledek simulace počátečního systému. Lze vyhodnotit zvyšující se chybu lokalizace u tzv. „špatného“ trojúhelníku, kde není zavedena kontrola vnitřních úhlů. Chyby lokalizace v tabulkách a obrázcích jsou vztaženy k rádiovému dosahu sensorových uzlů. Např. chybu $\epsilon_{p\ average} [\%R] = 65,5074$ lze znázornit i v metrech a to pomocí následujícího vzorce

$$\epsilon_{p\ average} [m] = \frac{R \cdot 65,5074}{100} = 13,1015. \quad (1.23)$$

¹Popis znázornění pomocí box plotu viz. příloha A.1.

Výsledky této simulace jsou zobrazeny v příloze B.5. Vysoké chyby lokalizace při použití metody trilaterace jsou způsobeny zejména tzv. zrcadlením pozic senzorových uzlů. K tomuto zrcadlení dochází při využití kotevních uzlů, jejichž pozice se nacházejí v jedné přímce (obr. 4 v B.1).

Simulace algoritmu Map-Growing

Simulace je provedena pro různé počty senzorů z důvodu viditelnosti růstu chyby lokalizace se zvyšujícím se počtem senzorových uzlů.

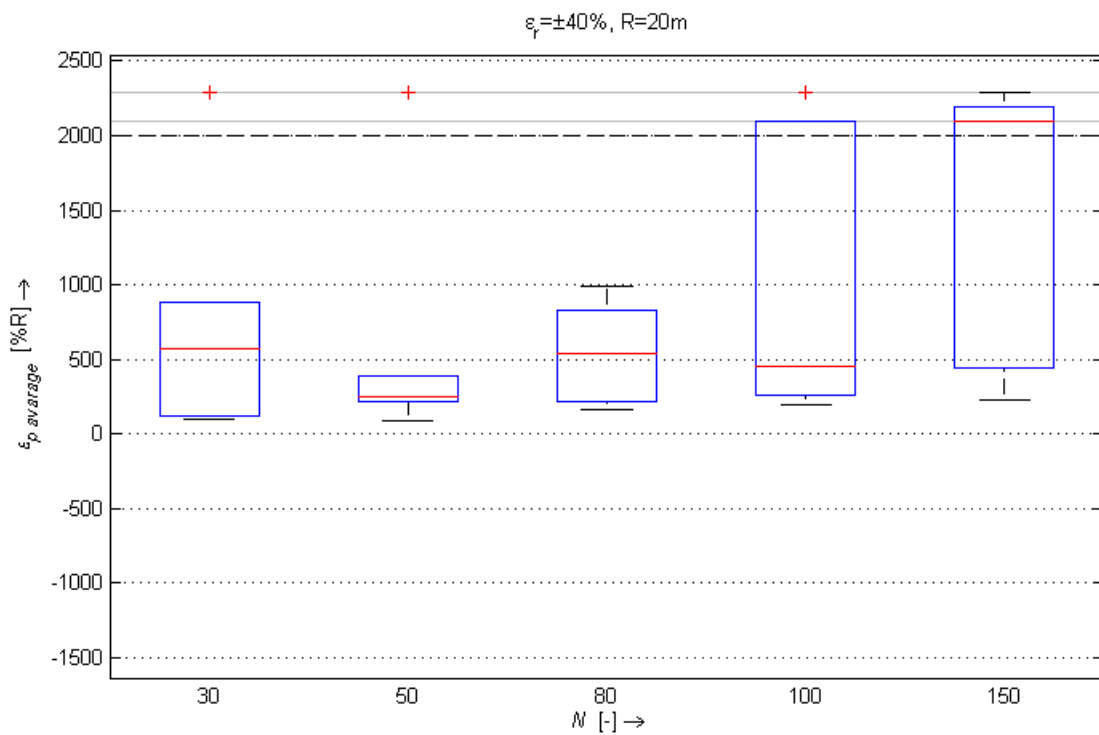
Parametry simulace	Zadané hodnoty
Počet uzlů	$N=30,50,80,100,150$
Rádiový dosah	$R[m]=20$
Chyba měření vzdálenosti	$\epsilon_r[\%] = \pm 40$
Počet opakování simulace	10-krát pro každé N , celé 6-krát

Tab. 1.2: Simulace algoritmu Map-Growing

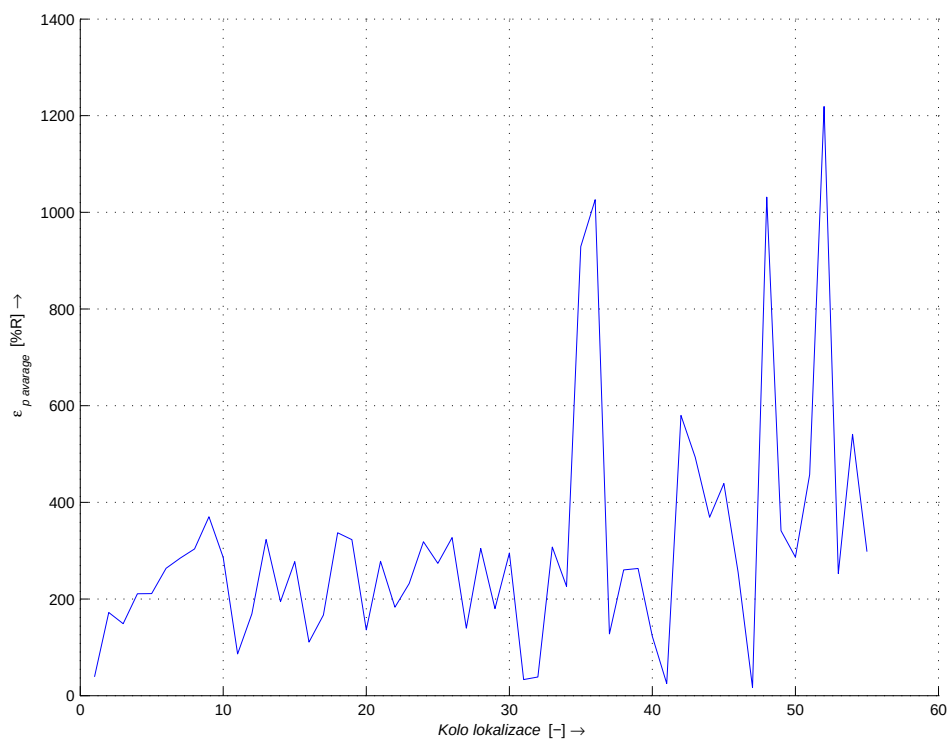
V tabulce 1.2 jsou zobrazeny parametry simulace. Počet opakování byl zvolen s ohledem na náhodné vytváření senzorové sítě, z každých deseti opakování byla vypočtena průměrná chyba lokalizace pro danou senzorovou mapu. Následně těchto šest průměrných hodnot bylo znázorněno v grafu 1.6¹, pomocí kterých došlo k ověření nárůstu lokalizační chyby s rostoucím počtem senzorových uzlů.

V grafu 1.7 lze vidět lokalizační chyby v jednotlivých kolech celkové lokalizace. Lokalizační chyba roste společně se zvyšujícím se počtem kol lokalizace.

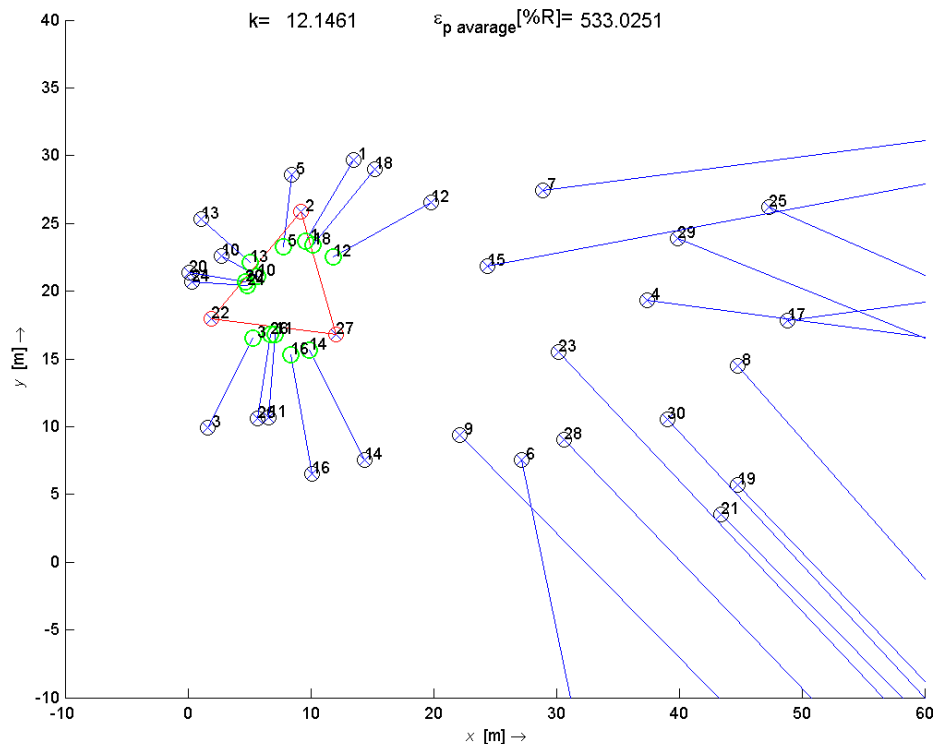
¹Popis znázornění pomocí box plotu viz. příloha A.1.



Obr. 1.6: Výsledek simulace algoritmu Map-Growing



Obr. 1.7: Znázornění chyb v jednotlivých kolech lokalizace



Obr. 1.8: Lokalizovaná bezdrátová senzorová síť

Na obrázku 1.8 je zobrazena již lokalizovaná mapa (zeleně), jednotlivé vypočtené pozice jsou spojeny s tzv. „pravými“ pozicemi senzorových uzlů. Úsečky spojující tyto dva body představují chybu lokalizace. Dále je zde také vidět nárůst chyby lokalizace se vzdáleností od počátečního systému.

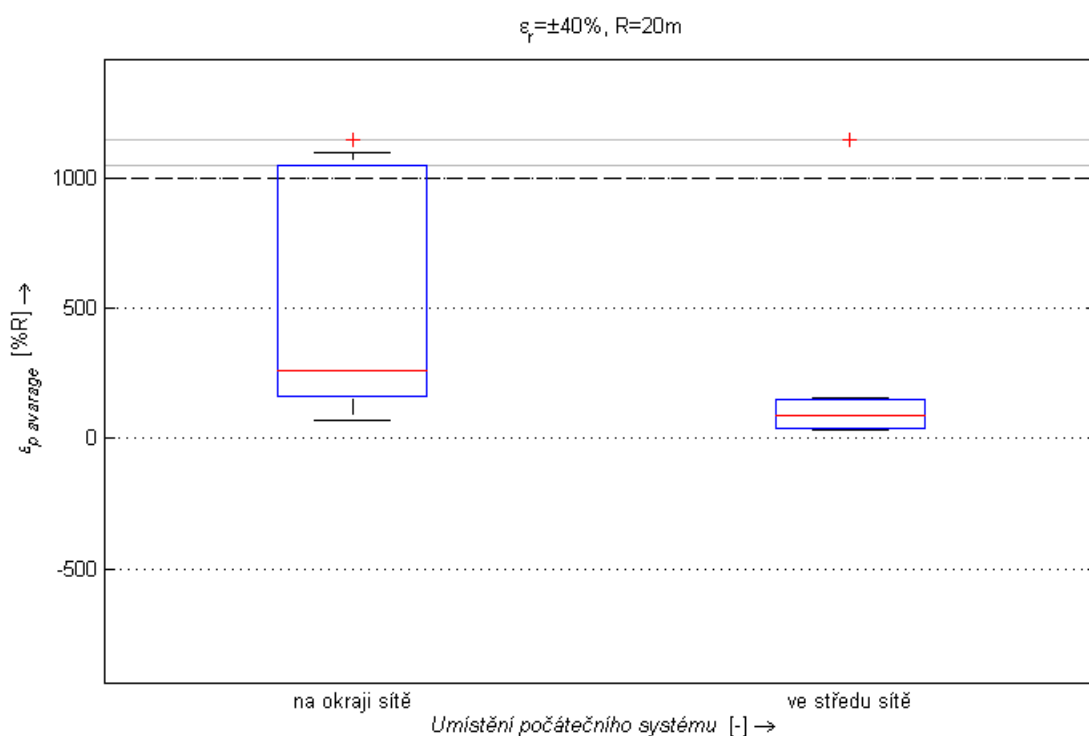
Simulace vlivu umístění počátečního systému na chybu lokalizace senzorové mapy

V následné simulaci je zkoumán vliv umístění počátečního systému na celkovou chybu lokalizace senzorové mapy. Pro oba typy umístění (na okraji a ve středu sítě) je vždy použita stejná senzorová síť, z tohoto důvodu je zlepšení lokalizace v případě použití trojúhelníku ve středu sítě zcela zjevné (viz. graf 1.9¹). Dále bylo usouzeno, že v případě malých sítí o velikosti desítek senzorových uzlů není zlepšení zcela zřetelné. U malých sítí nemusí v případě volby startovacího uzlu ve středu sítě vždy docházet k zřetelnému posunutí trojúhelníku do středu sítě.

¹Popis znázornění pomocí box plotu viz. příloha A.1.

Parametry simulace	Zadané hodnoty
Počet uzlů	$N=50$
Rádiový dosah	$R[m]=20$
Chyba měření vzdálenosti	$\epsilon_r[\%]=\pm 40$
Počet opakování simulace	10

Tab. 1.3: Simulace vlivu umístění počátečního systému na chybu lokalizované mapy



Obr. 1.9: Vliv umístění počátečního systému na chybu lokalizované mapy

Zobrazení hodnot v grafu 1.9 je zvoleno podobně jako v předchozích případech ². Z podrobnějších hodnot, umístěných v tabulkách A.3 a A.4 v příloze, lze vyhodnotit menší hodnoty parametru k i $\epsilon_p \text{ average } [\%R]$ při systému ve středu senzorové sítě. Nedochozí zde k jednosměrnému nárůstu lokalizované mapy ani jednotlivých chyb jako v případě systému na okraji sítě.

²Hodnota 1000 zde zobrazuje hranici hodnot, nad níž se nacházejí vysoké lokalizační chyby.

2 LOKALIZAČNÍ ALGORITMUS PRO BUDOVU UTKO

Návrh lokalizačního algoritmu pro školní sensorovou síť vychází z reálného tvaru patra dle projektového plánu. Z výzkumu zabývajícího se chybovostí tohoto prostředí byly zjištěny výsledky, ze kterých lze vyhodnotit velkou zarušenost rádiového prostředí v němž pracují sensorové uzly. Z následných výsledků je chybovost RSSI ve školním prostředí určena na $\pm 40\%$. Dále je zde zkoumán vliv počtu sensorů v jednotlivých učebnách na celkovou chybu lokalizace, určitý ohled je také brán na rádiový dosah sensorových uzlů a na umístění počátečního systému. Hodnoty chyb lokalizace lokalizované mapy by neměly přesáhnout hodnotu rádiového dosahu z důvodu zachování „osobního“ prostoru sensorů. Při volbě rádiového dosahu sensorových uzlů je zohledněna plocha, ve které se senzory nacházejí. Umístění počátečního systému uprostřed sensorové mapy je předpokládáno, z důvodu tvaru sítě ve tvaru „L“, jako nejideálnější.

2.1 Trilaterace - 1 sensorový uzel v každé místnosti

V této simulaci je použit algoritmus Map-Growing, který dále neplní žádné speciální podmínky kladené na výpočet. Při tomto výzkumu se zpočátku vycházelo z výpočtu optimálního dosahu sensorů pro velikost dané plochy 2.1, v případě této simulace $R = 17,0047m$ [8]. Dále zde byl vytvořen vzorec pro výpočet minimálního rádiového dosahu, který musí zahrnovat n sensorových uzlů pro správnou funkci daného lokalizačního algoritmu.

$$R_{opt} [m] = \Theta \sqrt{\frac{\log N}{N}}$$
$$\Theta [m] = \sqrt{(X^2 + Y^2)} \quad (2.1)$$

Výpočet minimálního rádiového rozsahu zahrnující požadovaný počet uzlů n lze vypočítat pomocí vzorce 2.2. V tomto vzorci dojde k odečtení průměru plochy Θ_n , ve kterém se nachází n sensorových uzlů od optimálního rádiového dosahu R_{opt} . Optimální rádiový dosah je počítán pro průměr plochy, ve kterém se nachází N sensorových uzlů.

$$R_{min} [m] = R_{opt} - \Theta_n$$
$$\Theta_n [m] = \sqrt[n]{\Theta} \quad (2.2)$$

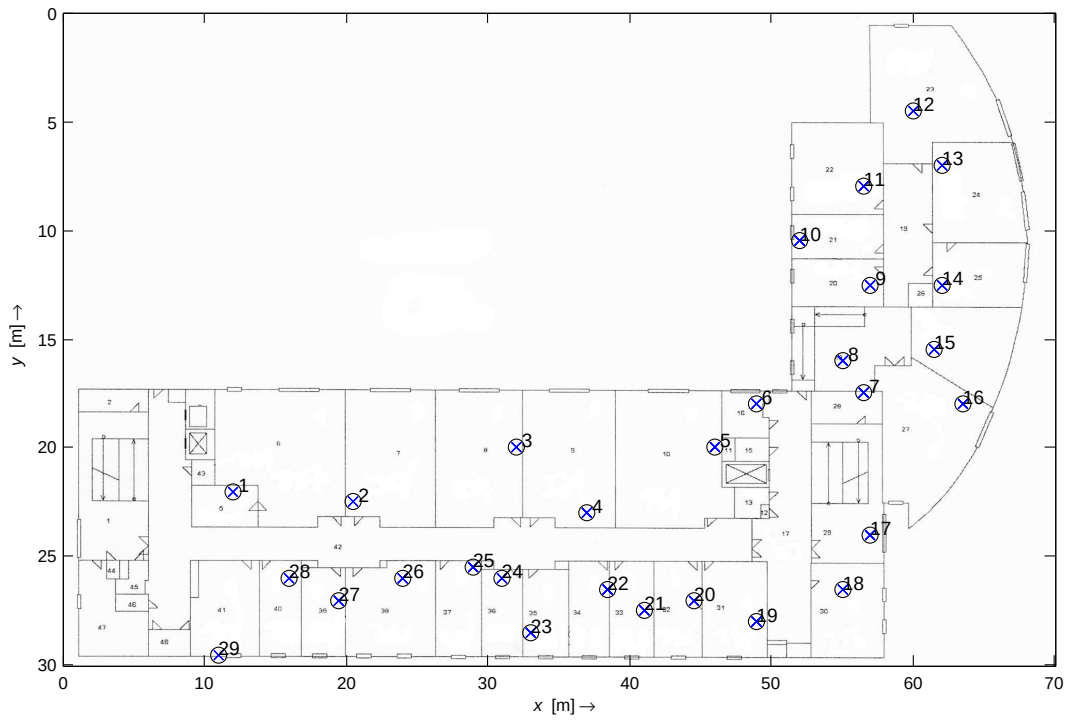
R_{opt}	$[m]$	optimální rádiový dosah dané plochy
Θ	$[m]$	průměr plochy, kde X , Y jsou jednotlivé strany plochy
N	$[-]$	počet sensorových uzlů
n	$[-]$	počet sensorů v rádiovém rozsahu

Parametry simulace	Zadané hodnoty
Počet uzlů	$N=29$
Rádiový dosah	$R[m]=12, 13, 14, 15, 16, 17$
Chyba měření vzdálenosti	$\epsilon_r[\%]=\pm 10, \pm 20, \pm 30, \pm 40, \pm 50$
Počet opakování simulace	50-krát pro každé ϵ_r
Počáteční umístění systému	„DOLE, UPROSTŘED, NAHOŘE“

Tab. 2.1: Simulace jeden senzor v každé místnosti

Počet opakování simulace (50) je volen z důvodu náhodného výpočtu některých částí sensorové sítě (výběr počátečního systému). Umístěním počátečního systému „DOLE, UPROSTŘED, NAHOŘE“ v tabulce 2.1 je myšlena část sítě, ve které je vybrán startovací uzel pro vytvoření systému. Rozdělení plochy školního patra, která je dále použita pro výpočet optimálního rádiového dosahu je rozdělena na dvě části z důvodu nepravidelného tvaru sítě a to na horní (menší) a dolní (větší) část. Dále pro výpočet průměru plochy Θ je uvažována pouze simulující oblast, která obsahuje sensorové uzly. Velikost spodní části strany X je zmenšena na velikost $|65 - 10|$ metrů, příslušná strana Y má velikost $|30 - 17|$ metrů. V horní části sensorové mapy jsou velikosti stran určeny $X = |65 - 50| = 15$ metrů, $Y = |17 - 5| = 12$ metrů. Dosazením do vzorců 2.1 dojde k výpočtu jednotlivých průměrů ploch, které jsou sečteny pro hodnotu průměru celé plochy 75,7244 metrů. Následně dojde k dopočítání optimálního rádiového dosahu pro daný tvar plochy.

Stanovení minimálního použitelného rádiového dosahu bylo vypočteno vzorcem 2.2, výsledná hodnota pouze určí jaka bude horní a dolní mez minimálního R . Pro tento případ je vypočtená hodnota R_{min} rovna 12,7740 metrů. Dolní a horní meze jsou tedy 12 a 13 metrů. Následným odzkoušením těchto hodnot dostaneme požadovaný minimální rádiový dosah, kde jiná menší hodnota R nebude splňovat podmínku zahrnutí požadovaných uzlů n v rádiovém dosahu uzlů. Ověření pro hodnotu rádiového dosahu 11 metrů, která tuto podmínku neplní se simulace nezdařila z důvodu, že daný uzel neobsahoval ve svém rádiovém dosahu trojici kotevních uzlů (viz. obr 2.2). Na tomto obrázku je vidět, že sensorový uzel s $ID = 27$ nemá konektivitu se třemi kotevními uzly, protože vzdálenost mezi uzlem s $ID = 27$ a s $ID = 24$ je 11,5434 metrů. Vzdálenost mezi těmito uzly je tedy větší než zvolený dosah $R = 11$



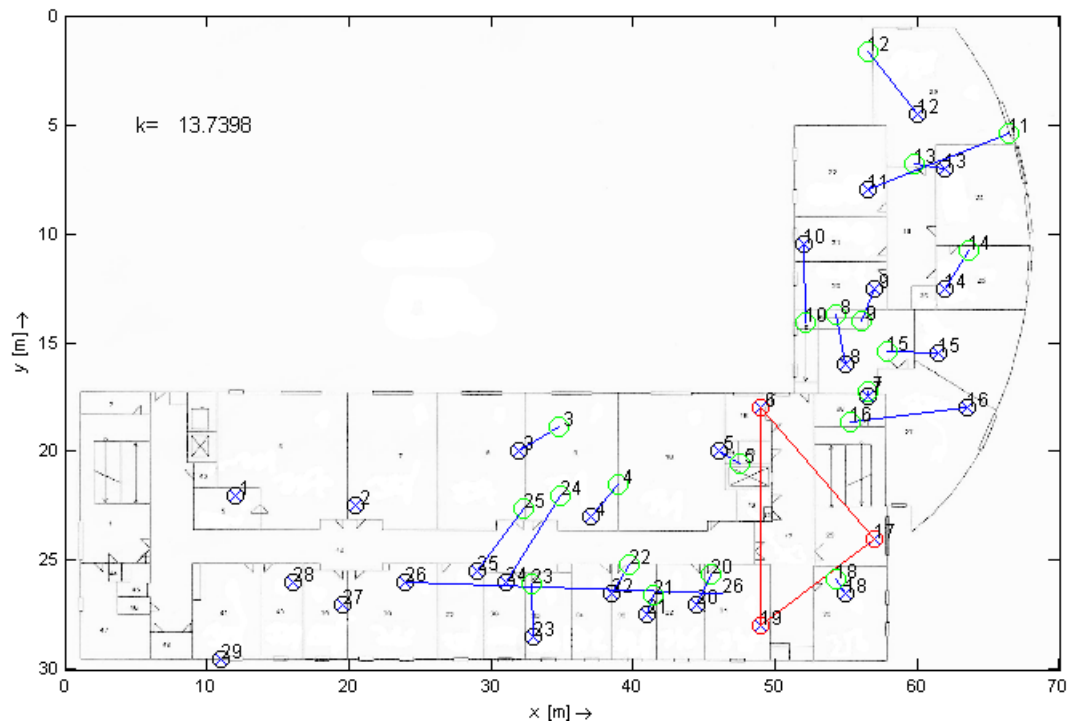
Obr. 2.1: Prostředí s jedním senzorem v místnosti

metrů, který neplní podmínku minimálního použitelného R . Pro předchozí výpočet vzdálenosti je možno použít následující hodnoty s výpočtním vzorcem.

$ID[-]$	24	27
$x[m]$	31	19,5
$y[m]$	26	27

Tab. 2.2: Zobrazení některých souřadnic senzorů

$$d [m] = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (2.3)$$



Obr. 2.2: Stanovení minimálního R

2.1.1 Lokalizace bez omezení výpočtu

V následném výzkumu je použit algoritmus Map-Growing s metodou trilaterace pro výpočet pozic uzlů a tzv. „dobrým“ počátečním systémem. Vyhodnocení celkové simulace algoritmu Map-Growing bez omezení výpočtu je provedeno porovnáním nejlepšího umístění pro každý rádiový dosah (tab. 2.3), podrobné hodnoty jsou zobrazeny v příloze B.1.

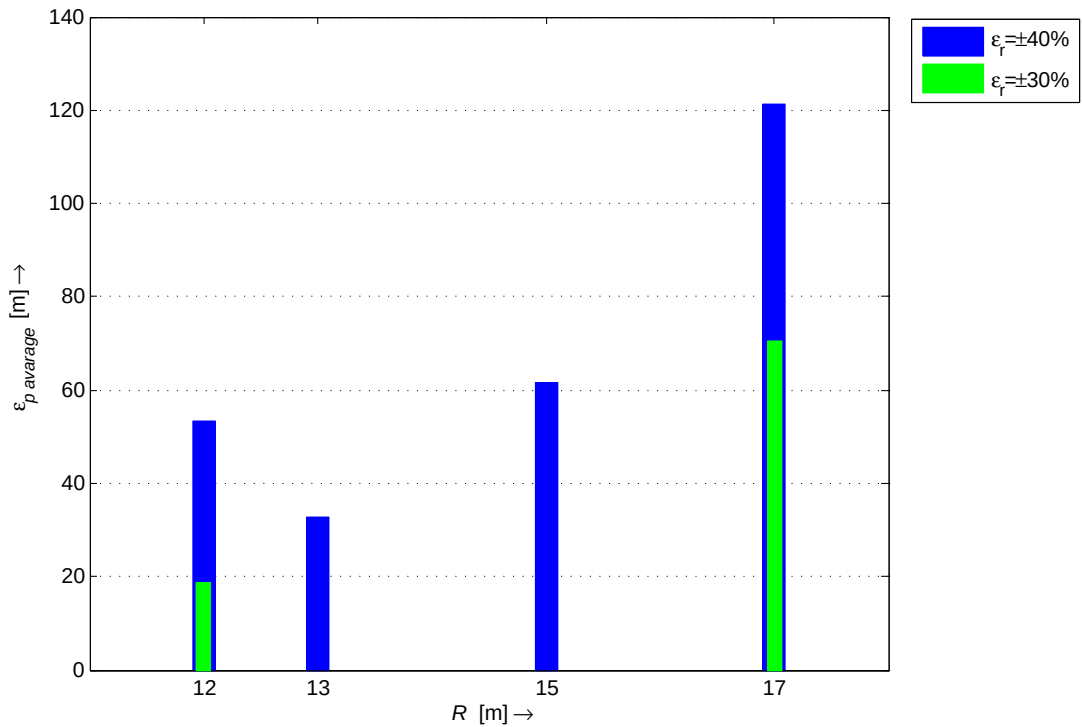
$R[m]$	12	13	14	15	16	17
Vhodné umístění systému	U	U	D	U	U	U

Tab. 2.3: Vyhodnocení nejlepšího umístění počátečního systému

U - umístění počátečního systému do středu sensorové sítě

D - umístění počátečního systému do dolní části sensorové sítě

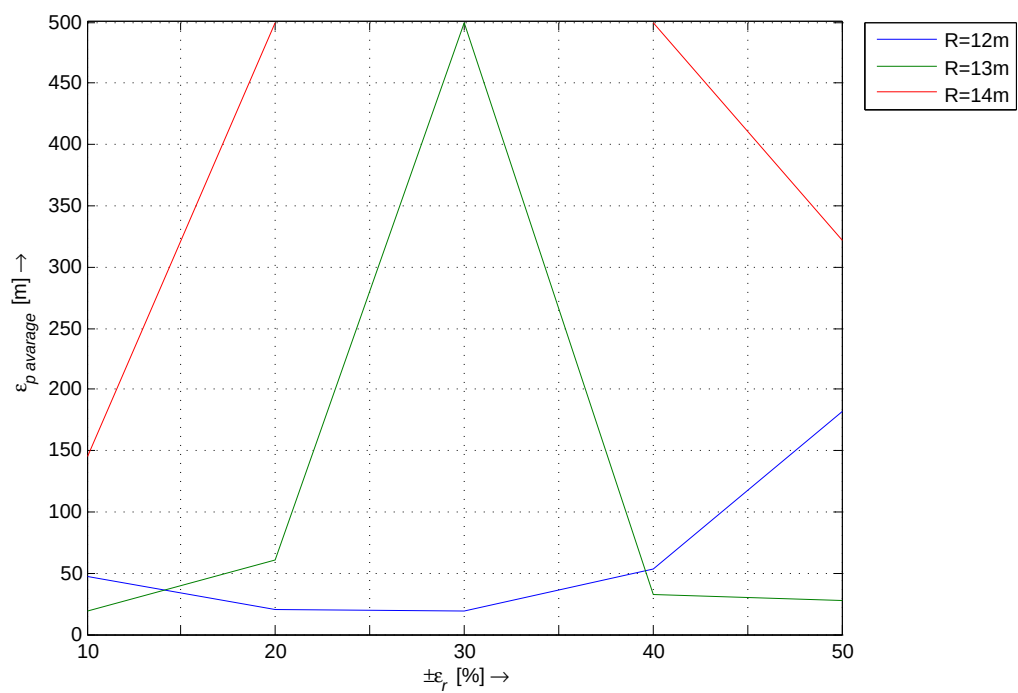
Z předchozího porovnání lze říci, že umístění „UPROSTŘED“ sensorové mapy vykazuje nejlepší výsledky. Dále je pro toto umístění nalezen rádiový dosah, ve kterém je nejmenší lokalizační chyba pro chybovost prostředí $\pm 40\%$ a $\pm 30\%$ (obr. 2.3). Na následujícím obrázku jsou zobrazeny pouze rádiové dosahy, u kterých lokalizační chyby nenabývaly vysokých hodnot, jenž byly způsobeny zrcadlením pozic uzlů.



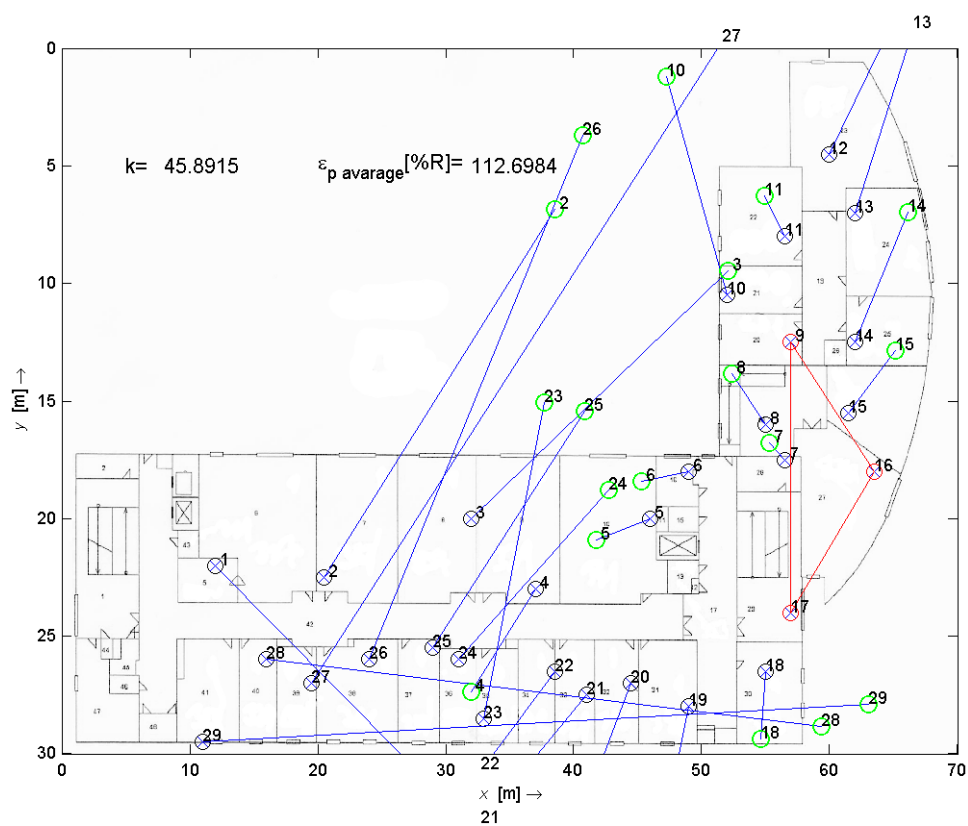
Obr. 2.3: Zhodnocení lokalizačních chyb pro rádiové dosahy při umístění systému uprostřed senzorové sítě a chybovosti univerzitního prostředí

Nárůst lokalizačních chyb není pouze způsoben zvětšujícím se počtem senzorových uzlů, ale také rostoucí chybovosti prostředí. V následujících grafických závislostech lokalizačních chyb na ϵ_r (obr. 2.4, 2.5), lze tento jev vidět pouze u $R = 12m$ a $R = 17m$. Ostatní rádiové dosahy nabývají v určitých případech velice vysokých hodnot, které jsou způsobeny výpočtem metody trilaterace. Tyto vysoké hodnoty jsou v grafu zobrazeny hodnotou 500 kvůli lepší čitelnosti závislosti.

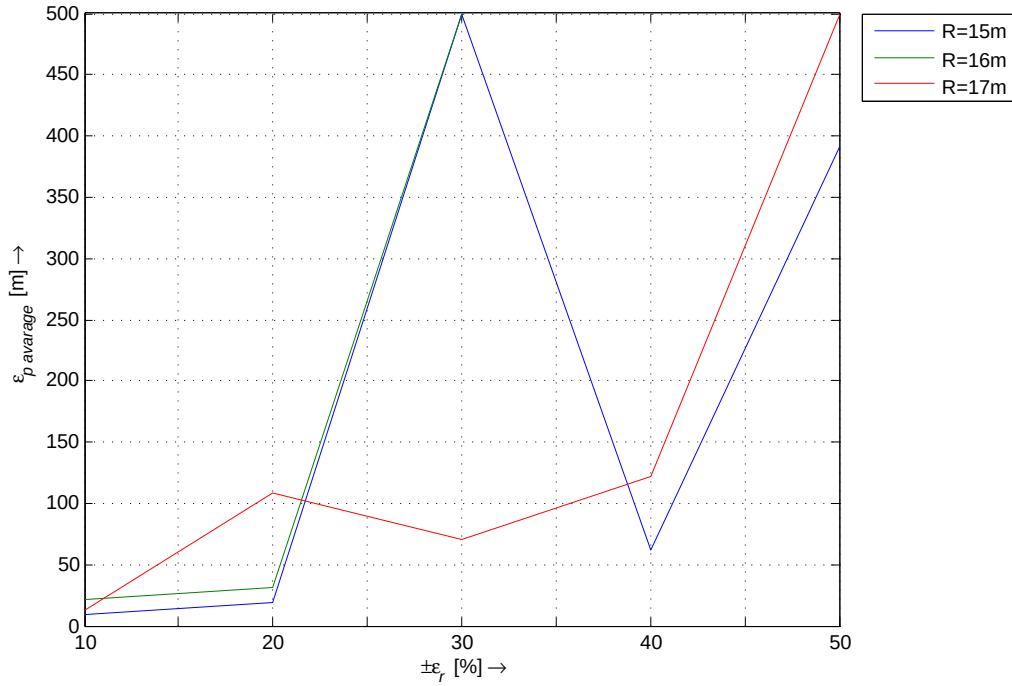
Zhodnocením této studie, která byla provedena pro velký počet opakování, je nalezení nejlepšího systému umístěného ve středu senzorové sítě. Použitím následujícího systému musí lokalizační výpočet vykazovat nejmenší chybu umístění v daném univerzitním prostředí. Počáteční kotevní uzly (9, 16, 17) zakládající počáteční výpočetní systém byly vyhodnoceny jako nejlepší, hodnota parametru kvality je $k[-] = 45.8915$ (obr. 2.6). Lokalizační chyba při $\epsilon_r = +40\%$ a $R = 13m$ se rovná 14,6508 metrů, při $\epsilon_r = -40\%$ 9,7286 metrů. Průměrná lokalizační chyba při zvoleném rozložení senzorové sítě ve vnitřím prostoru univerzity je 12,1897 metrů.



Obr. 2.4: Zobrazení lokalizačních chyb pro různé rádiové dosahy a chybovosti prostředí $\pm 10\%$ až $\pm 50\%$, umístění ve středu sítě



Obr. 2.6: Nejlepší parametry počátečního systému pro $\epsilon_r = +40\%$



Obr. 2.5: Zobrazení lokalizačních chyb pro různé rádiové dosahy a chybovosti prostředí $\pm 10\%$ až $\pm 50\%$, umístění ve středu sítě

Grafické znázornění navržené univerzitní sítě pro $\epsilon_r = -40\%$ je znázorněno na obrázku v příloze (obr. B.3).

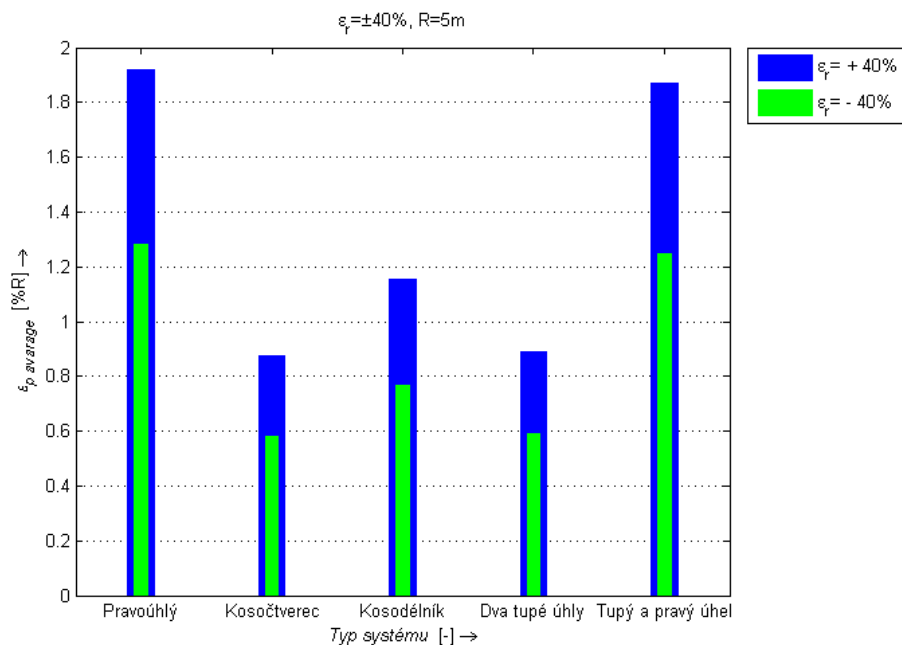
2.2 Použití výpočetní metody multilaterace v algoritmu Map-Growing

Použitím multilateračního algoritmu na stejný scénář jako v případě metody trilaterace, je očekávána menší lokalizační chyba. Přesnější výpočet pozic sensorových uzlů je způsoben využíváním více rovnic při lokalizaci (v grafickém znázornění lze představit zmenšením oblasti průniku rádiových dosahů od jednotlivých uzlů). Při zavedení počátečního čtyř kotevního systému by mělo dojít k minimalizaci výpočtu vysokých chyb. Důvodem této minimalizace je menší pravděpodobnost vzniku jedné přímky tvořené čtyřmi kotevními uzly. Pro následnou studii je využít stejný simulační scénář jako v předchozím případě.

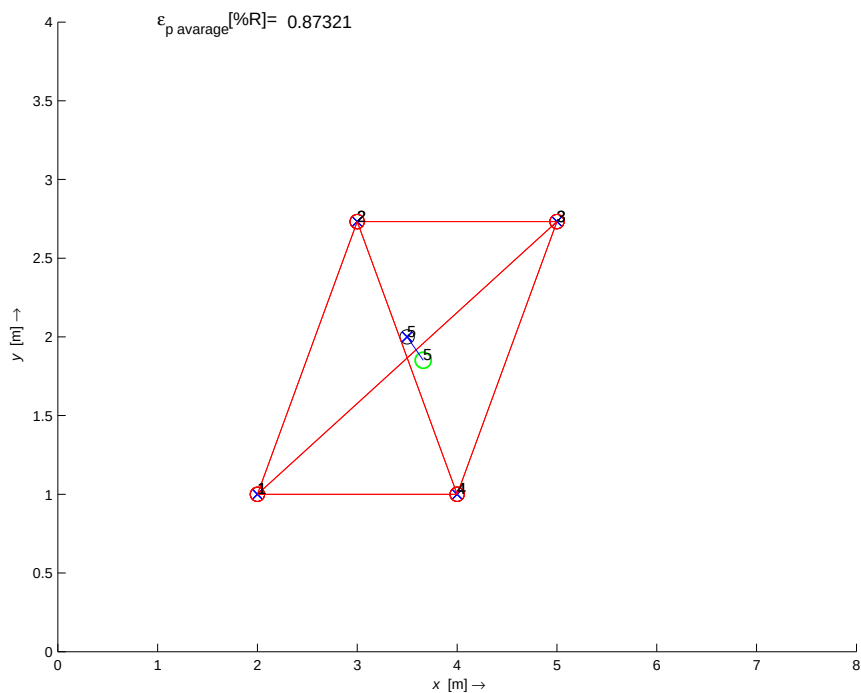
2.2.1 Ohodnocení počátečního čtyř kotevního systému

V této části studie lokalizačního algoritmu bude zkoumán vliv multilaterace na chybu lokalizace pro algoritmus Map-Growing. Pro předpoklad co nejmenších lokalizačních

chyb budou nejprve odsimulovány různé typy počátečních systémů. Následným výzkumem budou různorodé typy počátečních lokalizačních systémů odzkoušeny na návrhu univerzitní senzorové sítě.



Obr. 2.7: Výběr počátečního systému s nejmenší lokalizační chybou



Obr. 2.8: Počáteční systém ve tvaru kosočtverce - $\epsilon_r = +40\%$

Na základě hodnot uvedených v tabulkách A.9 až A.13 a v grafu 2.7 lze říci, že největší chyba lokalizace nastává u počátečních systémů, u kterých některé kotevní uzly svírají pravý úhel. Naopak nejmenší lokalizační chyba je realizována za pomoci systému s tupým úhlem a s poměrem jednotlivých stran mezi kotvami blíží se k hodnotě jedna. Z předchozí studie tedy vyplývá jako nejideálnější počáteční výpočetní systém ve tvaru kosočtverce (obr. 2.8), tento tvar způsobuje nejmenší lokalizační chybu. Tvar systému se dvěma tupými úhly, který se svojí chybou umístění blíží tvaru kosočtverce je mnohem reálnější pro vytvoření v reálné sensorové síti.

2.2.2 Multilaterace - 1 sensorový uzel v každé místnosti bez omezení

U předchozího inkrementálního lokalizačního algoritmu docházelo k velice vysokým lokalizačním chybám. Tento nežádoucí jev je třeba co nejvíce eliminovat. Prvním výzkumem, který bude pro toto použít vychází z rozšíření počátečního systému na systém čtyř kotevních uzlů. Dále pro následnou lokalizaci sensorových uzlů bude již také potřeba čtyř kotevních uzlů. Maximální a minimální rádiové rozsahy uzlů jsou určeny na základě stejné myšlenky jako v předchozím případě. Minimální rádiový dosah zde musí být zvětšen na hodnotu 14 metrů při použití čtyř kotevního systému.

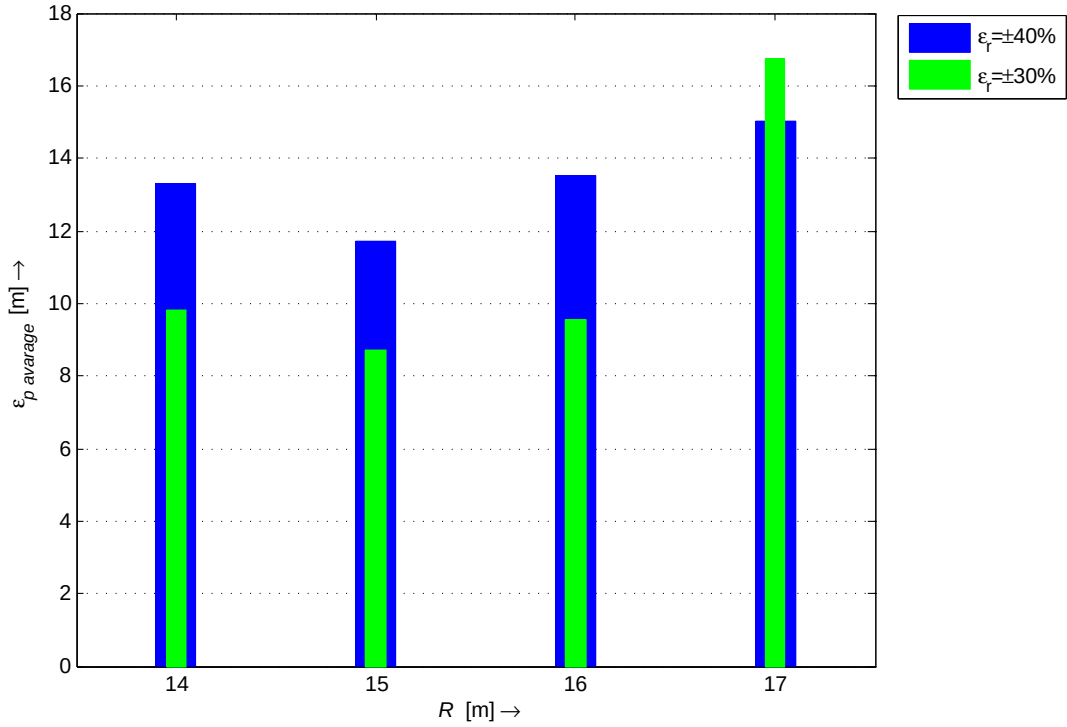
Parametry simulace	Zadané hodnoty
Počet uzlů	$N=29$
Rádiový dosah	$R[m]=14, 15, 16, 17$
Chyba měření vzdálenosti	$\epsilon_r[\%]=\pm 10, \pm 20, \pm 30, \pm 40, \pm 50$
Počet opakování simulace	50-krát pro každé ϵ_r
Počáteční umístění systému	„DOLE, UPROSTŘED, NAHOŘE“

Tab. 2.4: Simulace jeden senzor v každé místnosti

$R[m]$	14	15	16	17
Vhodné umístění systému	U	U	U	U

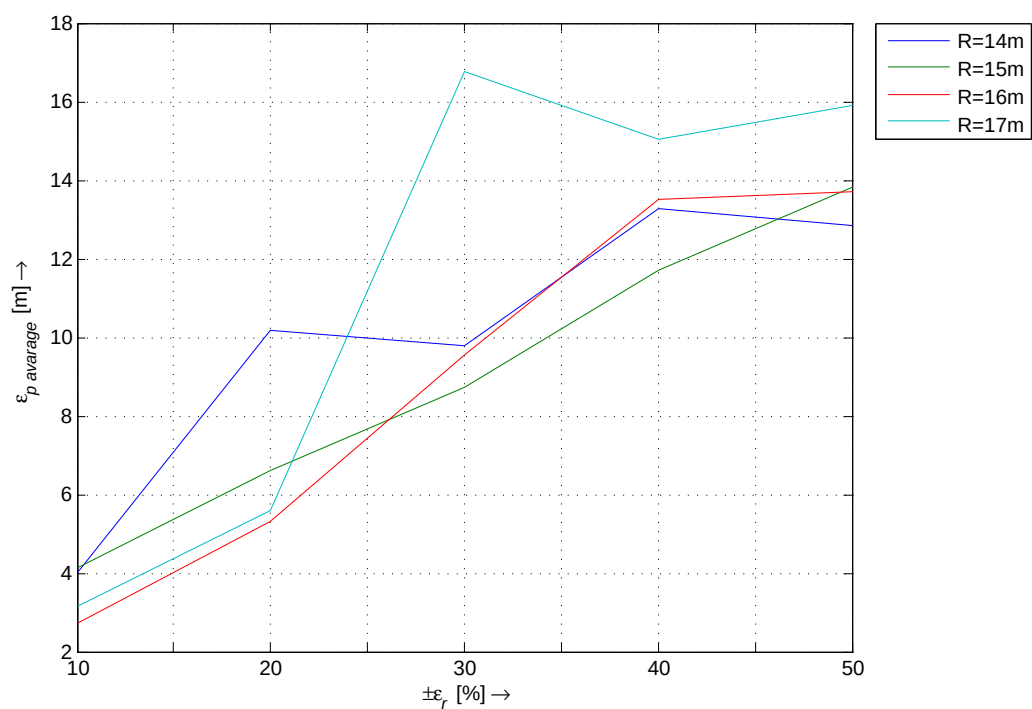
Tab. 2.5: Vyhodnocení nejlepšího umístění počátečního systému

Na následného grafu 2.9 jsou zobrazeny hodnoty lokalizačních chyb pro jednotlivé rádiové dosahy při umístění systému ve středu sítě. Nejmenší lokalizační chyby o tomto scénáři lze dosáhnout, použitím $R = 15\text{ m}$ při $\epsilon_r = \pm 40\%$, o hodnotě 11,6968 metrů. Výběrem nejlepšího případu (obr. 2.11 a B.4) z těchto 50 opakování lze chybu minimalizovat na hodnotu 7,3935 metrů.

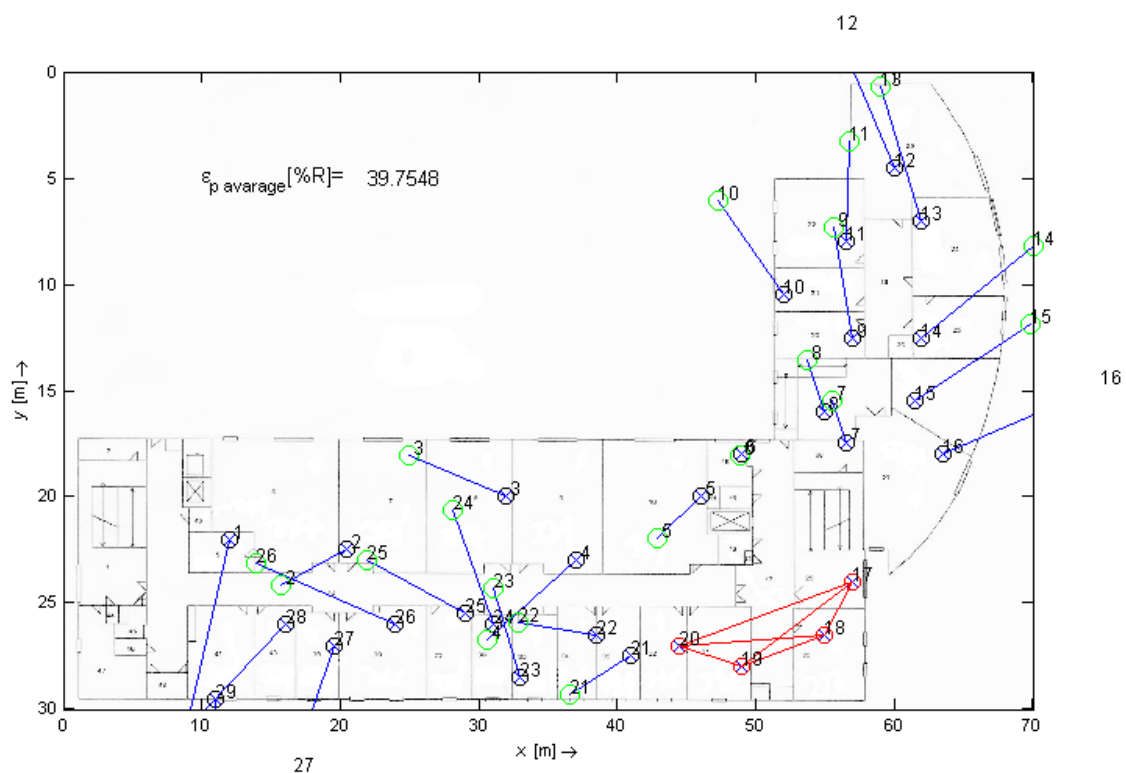


Obr. 2.9: Zhodnocení lokalizačních chyb pro rádiové dosahy při umístění systému uprostřed senzorové sítě a chybovosti univerzitního prostředí

Závěrem lze říci, že při použití čtyř kotevního systému a následné výpočetní metody multilaterace byla dosažena menší chyba v umístění. Dalším pozitivním vlivem tohoto vylepšení byl výpočet, který eliminoval vznik velkých lokalizačních chyb. Při umístění systému do středu senzorové sítě jako v předchozích případech, lze pomocí grafu 2.10 vyhodnotit vhodné rádiové dosahy senzorů pro různé chybovosti prostředí. Na obrázku 2.11 je vybrán nejvhodnější počáteční systém o úhlech $\alpha = 24,7751^\circ$, $\beta = 131,3861^\circ$, $\gamma = 15,2551^\circ$, $\kappa = 140,9061^\circ$. V této studii také došlo k ověření předchozí myšlenky kvality počátečního čtyř kotevního systému, která předpokládala jako nejreálnější systém se dvěma tupými úhly ($\beta = 131,3861^\circ$, $\kappa = 140,9061^\circ$). Z následného grafu je také vidět největší lokalizační chybu v případě $R = 17\text{ m}$, která je způsobena možným výběrem uzlu k lokalizaci, jenž se nachází dále od uzlů kotevních. Poté vlivem chybovosti prostředí narůstá chyba lokalizace.



Obr. 2.10: Zobrazení lokalizačních chyb pro různé rádiové dosahy a chybovosti prostředí $\pm 10\%$ až $\pm 50\%$, umístění ve středu sítě



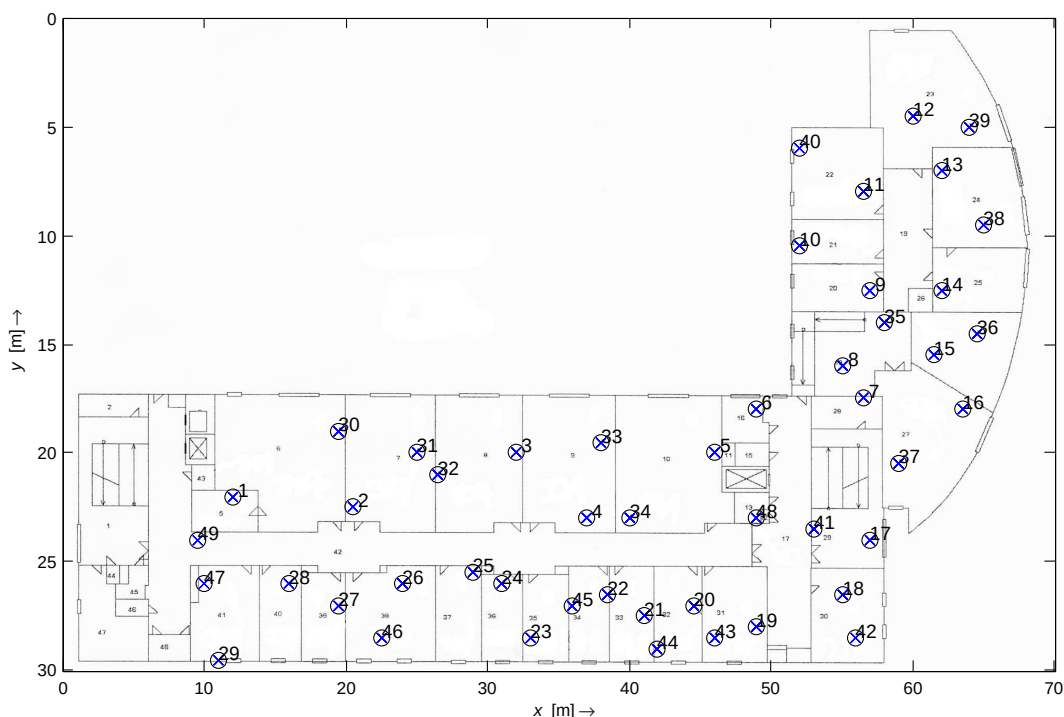
Obr. 2.11: Nejlepší parametry počátečního systému pro $\epsilon_r = +40\%$

2.2.3 Multilaterace - 2 senzorové uzly v každé místnosti bez omezení

Zvětšením senzorové mapy (obr. 2.12), kde do místnostech o větších rozměrech byl přidán další senzor, je hodnota lokalizační chyby očekávána větší než v případě mapy s počtem senzorových uzlů 29. Při testování předchozích dvou případů bylo umístění počátečního systému ve středu mapy vyhodnoceno jako umístění s nejmenší průměrnou lokalizační chybou. V této části bude tedy simulováno pouze toto umístění.

Parametry simulace	Zadané hodnoty
Počet uzlů	$N=49$
Rádiový dosah	$R[m]=12, 13, 14$
Chyba měření vzdálenosti	$\epsilon_r[\%]=\pm 10, \pm 20, \pm 30, \pm 40, \pm 50$
Počet opakování simulace	50-krát pro každé ϵ_r
Počáteční umístění systému	„UPROSTŘED“

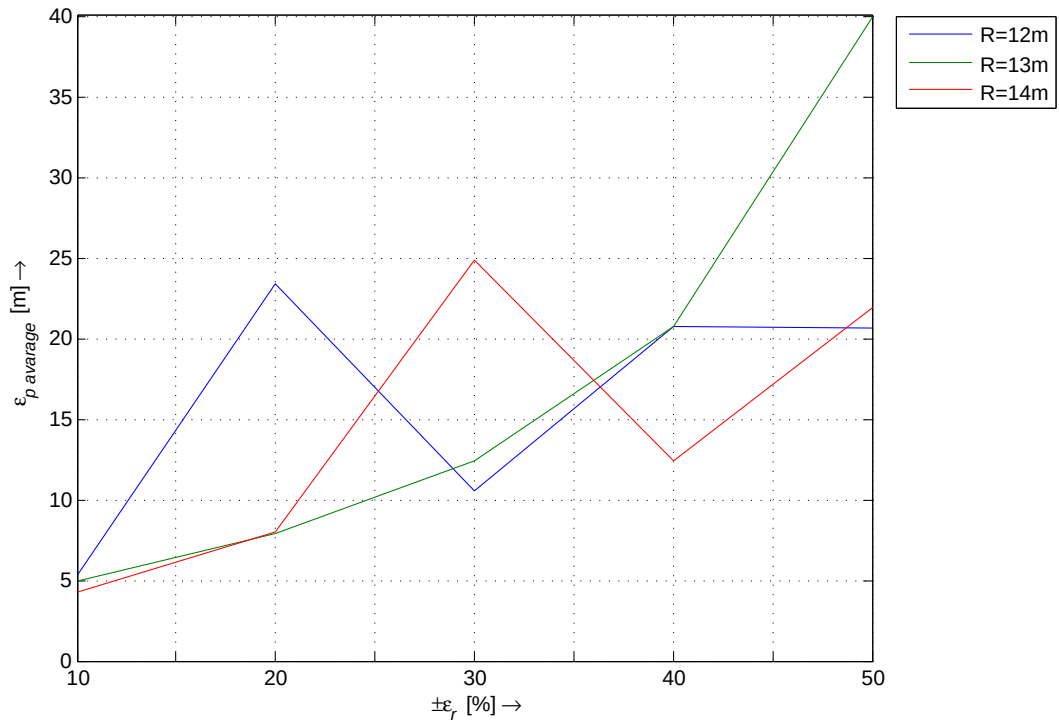
Tab. 2.6: Simulace dva senzory v potřebných místnostech



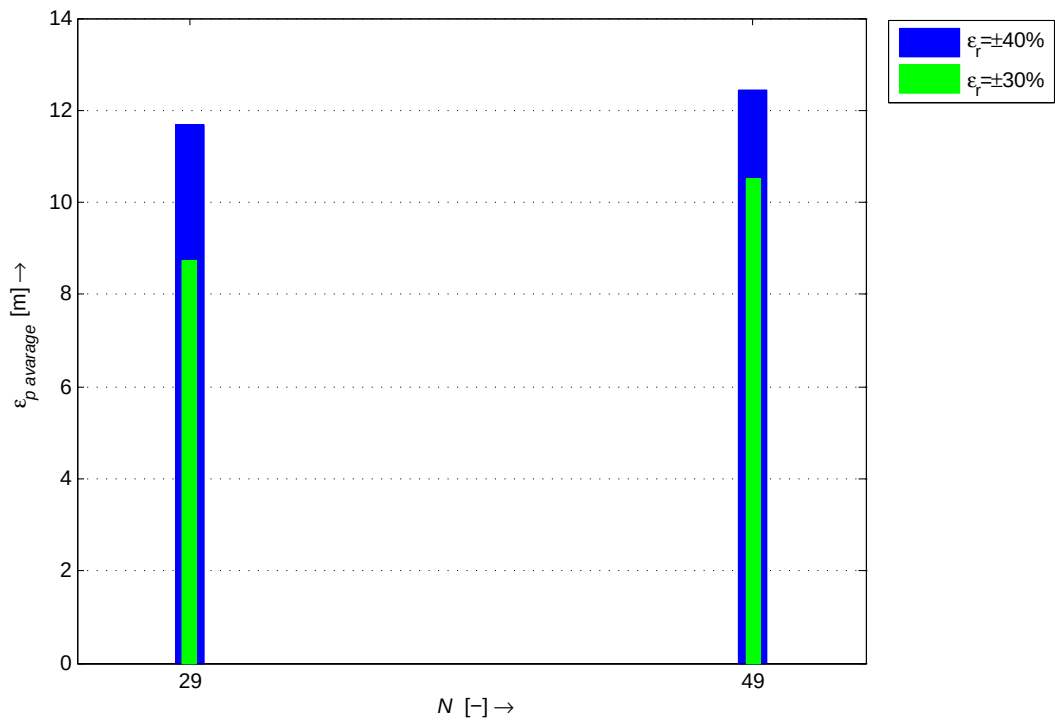
Obr. 2.12: Prostředí se dvěma senzory v potřebných místnostech

Z nasimulovaných hodnot, které jsou uvedeny v tabulkách B.11 až B.13 je vytvořena závislost lokalizační chyby na chybovosti prostředí. Z těchto hodnot lze

vyhodnotit rádiové dosahy dosahující nejmenší chyby umístění pro chybovost univerzitního prostředí ($\epsilon_r = \pm 30\%$, $\epsilon_r = \pm 40\%$). V případě $\epsilon_r = \pm 30\%$ je nejvhodnější hodnota rádiového dosahu 12 metrů, při $\epsilon_r = \pm 40\%$ se $R = 14m$ (obr. 2.13). Výhodou větší hustoty sensorové sítě je možnost použití menšího rádiového dosahu uzlů, dochází tedy k menší energetické náročnosti. Avšak z ekonomického hlediska je takovéto rozšíření sítě finančně náročnější. V porovnání s obrázkem vyhodnocení u algoritmu Map-Growing s multilaterací pro jeden sensorový uzel v místnosti 2.10, dochází u této problematiky k větším lokalizačním chybám. Tyto větší chyby jsou způsobeny šířením se jednotlivých lokalizačních chyb sítě. Tento jev nárůst lokalizační chyby je znázorněn na obrázku 2.14. Při navýšení počtu sensorů o hodnotu 20 došlo ke zhoršení průměrné lokalizační chyby o 0,7495 metrů ($\epsilon_r = \pm 40\%$) či o 1,7967 metrů ($\epsilon_r = \pm 30\%$).



Obr. 2.13: Zobrazení lokalizačních chyb pro různé rádiové dosahy a chybovosti prostředí $\pm 10\%$ až $\pm 50\%$, umístění ve středu sítě



Obr. 2.14: Nárůst lokalizační chyby s hustotou sensorové sítě

2.3 Vývoj možných optimalizačních algoritmů pro návrh univerzitní sítě

Při návrhu určitých zlepšení výpočtu lokalizačního algoritmu byla uvažována myšlenka přeskočení (vynechání) sensorových uzlů. Uzly by byly přeskočeny za podmínky, že vypočtená pozice uzlu by opustila „osobní“ prostor senzoru tzn. jednotlivé vzdálenosti mezi pozicemi kotevních uzlů a pozicí lokalizovaného senzoru by byly větší než rádiový dosah. Toto řešení bylo označeno jako nesprávné z důvodu možného porušení základní podmínky inkrementálních lokalizačních algoritmů. Přeskočení nevhodného sensorového uzlu v menší síti by způsobilo, že potřebný počet kotevních uzlů pro výpočet umístění by neodpovídal. Základní myšlenka následujících optimalizací je založena na porovnání vzdáleností od kotevních uzlů s rádiovým rozsahem senzorů.

2.3.1 Optimalizační algoritmus IMap4-Growing (Improved Map4-Growing)

Optimalizační algoritmus IMap4-Growing vychází z inkrementálního algoritmu Map-Growing, u kterého je použit čtyř kotevní výpočetní systém. Tento systém je na

základě předešlých studií vyhodnocen jako systém vykazující nejmenší lokalizační chybu. Vylepšení bude testováno na senzorových sítích o různé hustotě uzlů.

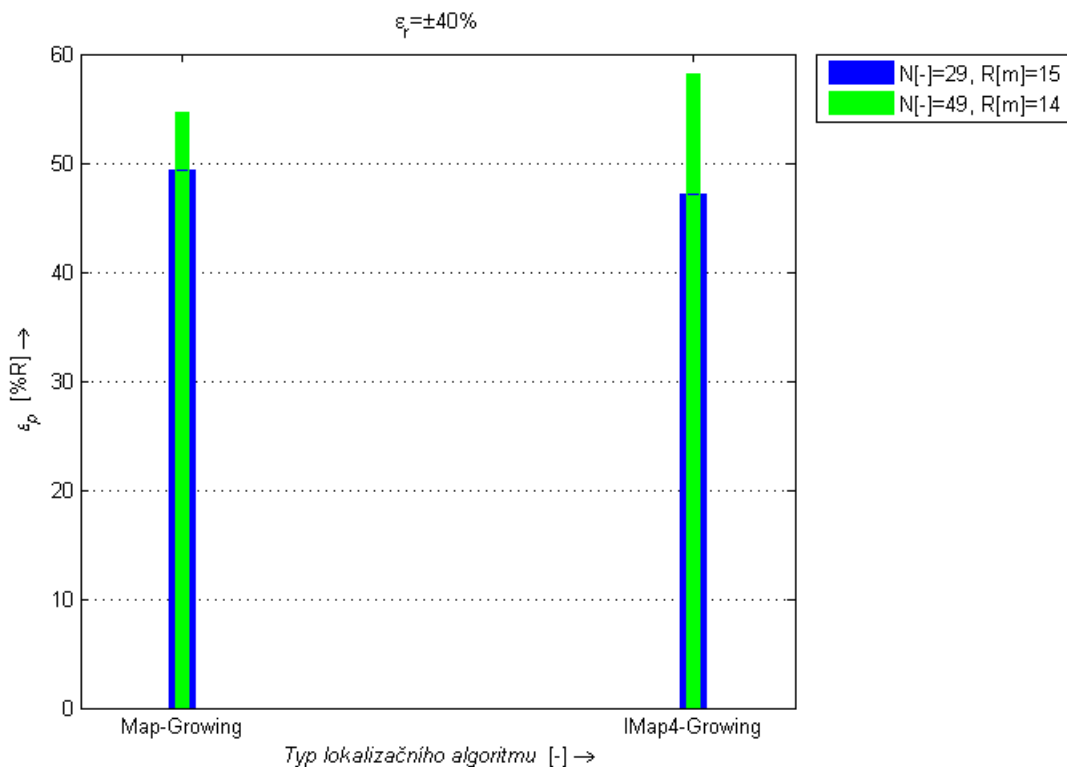
IMap4-Growing s porovnáním vzdáleností s rádiovým dosahem

Algoritmus IMap4-Growing v této části optimalizace pracuje s jednotlivými Eukleidovskými vzdálenostmi od kotevních uzlů, které následně porovnává s rádiovým dosahem senzorů dle algoritmu níže.

```
if (d1>R || d2>R || d3>R || d4>R) && (počet kotev=>5)
    odeber první kotvu;
    znovu vypočítej pozici;
end

if (d1>R || d2>R || d3>R || d4>R) && (počet kotev<5)
    ponechej první vypočtenou pozici;
end
```

Nesplnění ani jedné podmínky znamená, že ani jedna vzdálenost není větší než rádiový dosah senzoru a lokalizační chyba je tedy vyhodnocena jako nejmenší.



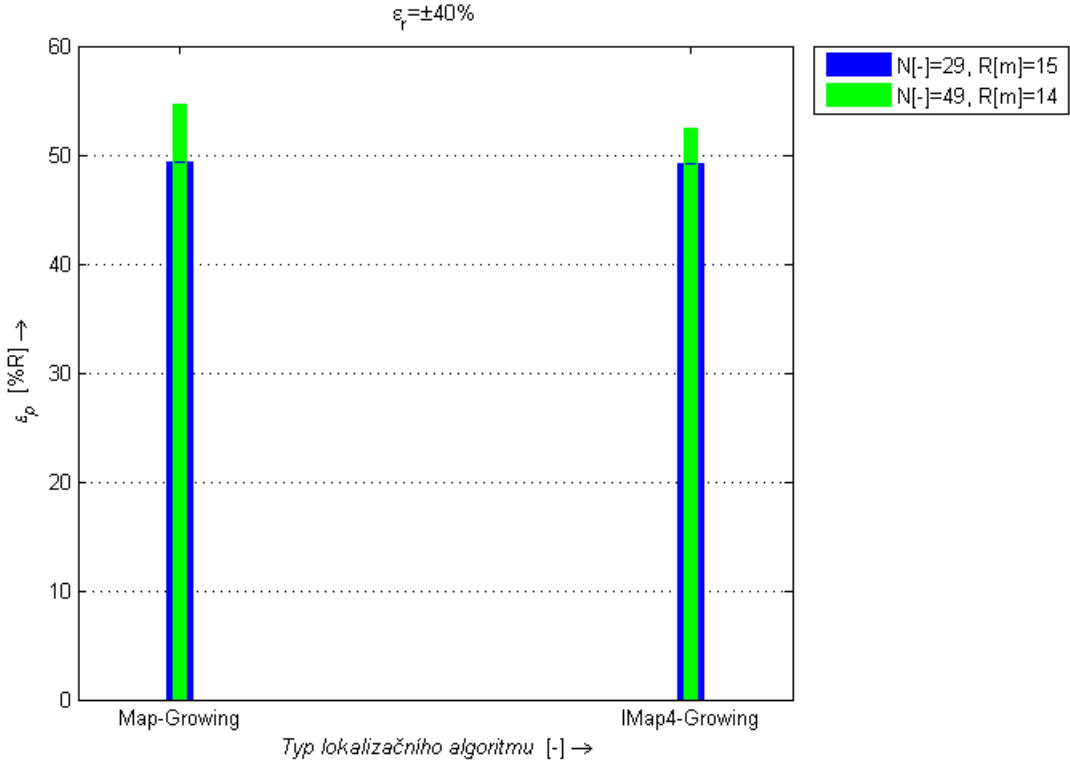
Obr. 2.15: Vliv IMap4-Growing s porovnáním vzdáleností na lokalizační chybu

Graf 2.15 vychází z nasimulovaných hodnot, které byly testovány na scénářích vykazující nejmenší lokalizační chybu při obou typech navržených sensorových map (tab. B.14 až B.15). Algoritmus IMap4-Growing aplikovaný na sensorové mapě s jedním sensorovým uzlem v místnosti vykazoval menší chybu lokalizace než algoritmus Map-Growing s čtyř kotevním výpočetním systémem. Vylepšení vykazuje lokalizační chybu menší o 2,2124 %R, tedy o 0,3319 metrů. Naopak na sensorové síti jejíž počet uzlů je větší o 20 sensorů neplní toto vylepšení požadovanou funkci, zhoršení o 3,4633 %R (o 0,4849 metrů).

IMap4-Growing s porovnáním průměrné vzdálenosti s rádiovým dosahem

Tato optimalizace je navržena z důvodů dosažených výsledků při předchozím vylepšení, které obecně neplatí pro sensorové sítě s různým počtem uzlů. V tomto vylepšení dochází k porovnání průměrné Eukleidovské vzdálenosti od kotevních uzlů s rádiovým dosahem senzoru.

```
dAvarage=(d1+d2+d3+d4)/4;
if (dAvarage>R) && (počet kotev=>5)
    odeber první kotvu;
    znovu vypočítej pozici;
end
if (dAvarage>R) && (počet kotev<5)
    ponechej první vypočtenou pozici;
end
```



Obr. 2.16: Vliv IMap4-Growing s porovnáním průměrné vzdálenosti na lokalizační chybu

Na grafu 2.16 lze vidět menší chybu lokalizace při použití algoritmu IMap4-Growing na obou typech sensorových sítí s odlišnou hustotou uzlů. Na síti o počtu senzorů $N[-] = 29$ je lokalizační chyba vylepšena o 0,0756 %R (o 0,0113 metrů), při $N[-] = 49$ o 2,2371 %R (o 0,3132 metrů). Podrobnější hodnoty této simulace jsou k dispozici v příloze B.4.2.

2.3.2 Optimalizační algoritmus Mass-Spring

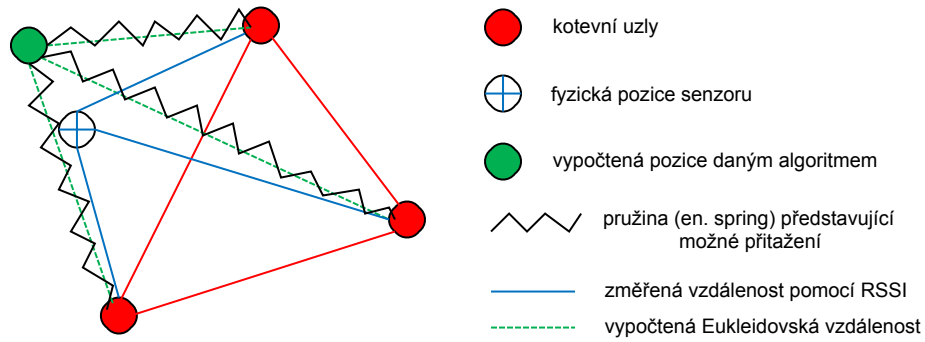
Na základě výsledků optimalizačních algoritmů je v této kapitole popsán již ověřený algoritmus Mass-Spring. Optimalizace Mass-Spring vychází z fyzikálního využití pružiny (en. spring), která je v případě této optimalizace využívána k zachycení a akumulaci sil. Velikost této síly lze vypočítat pomocí vzorce 2.4, potřebné vzdálenosti mezi jednotlivými uzly jsou znázorněny na obrázku 2.17. Modré označení vzdálenosti $r_{i,j}$ mezi kotevním uzlem a uzlem neznámým představuje naměřenou vzdálenost pomocí RSSI. Eukleidovská vzdálenost $\hat{d}_{i,j}$ je vyznačena čerchovanou čarou zelené barvy. Je-li vypočtená vzdálenost $\hat{d}_{i,j}$ mezi těmito dvěma body kratší než vzdálenost změřená pomocí RSSI vzniká síla, která tyto dva body táhne od sebe. Naopak při vypočtení větší vzdálenosti dochází ke vzniku síly táhnoucí senzory blíže

k sobě [9]. Výpočet celkové síly pro posun daného senzoru dle vzorce 2.4.

$$\vec{F}_i = \sum_{i,j} \vec{F}_{i,j} = \sum_{i,j} \hat{v}_{i,j}(\hat{d}_{i,j} - r_{i,j}) \quad (2.4)$$

Jednotkový vektor $\hat{v}_{i,j}$ reprezentuje směr od pozice $\hat{p}_i$ k pozici $\hat{p}_j$. Dále je zde zavedena energie 2.5, která je použita pro vyhodnocení neoptimálnějšího umístění uzlu. [10]

$$E = \sum_i E_i = \sum_{i,j} E_{i,j} = \sum_{i,j} (\hat{d}_{i,j} - r_{i,j})^2 \quad (2.5)$$



Obr. 2.17: Mass-Spring optimalizace

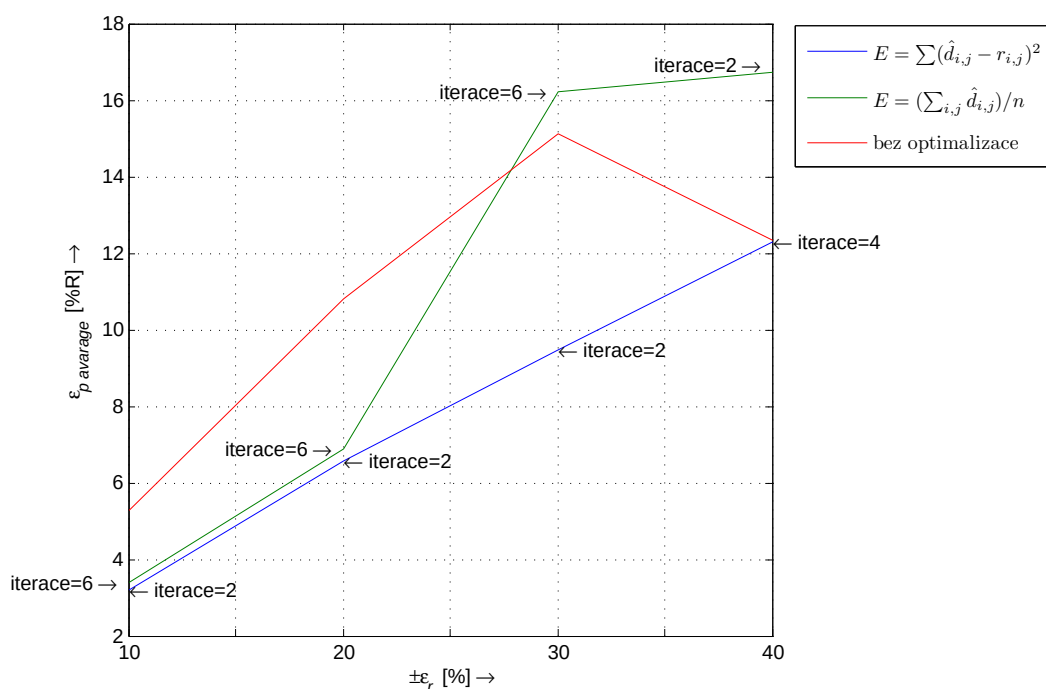
Simulacemi byla odzkoušena i energie 2.6, jejíž myšlenka je založena na předchozích vylepšeních (průměrných Eukleidovských vzdálenostech). Počet použitých kotevních uzlů pro výpočet znázorňuje písmeno n .

$$E = \sum_i E_i = \sum_{i,j} E_{i,j} = \frac{\sum_{i,j} \hat{d}_{i,j}}{n} \quad (2.6)$$

Na obrázku 2.18 jsou vyhodnoceny optimalizace Mass-Spring s použitím různých výpočtů energií, jenž se používá k vyhodnocení neoptimálnějšího umístění daného uzlu. Při použití energie 2.6 pro chybovosti prostředí větší než $\epsilon_r = \pm 20$ [%] ztrácí tato optimalizace své vlastnosti. Dochází k větší lokalizační chybě než při lokalizaci bez použití Mass-Spring optimalizace. Naopak algoritmus s energií 2.5 plní svoji funkci v plném rozsahu zvolených chybovostí prostředí. V grafu je dále zobrazen počet iterací, při kterých bylo dosaženo těchto výsledků.

Zobrazení 2.19, nasimulovaných výsledků pro případ patra univerzitní budovy, ukazuje větší počet iterací pro dosažení menší lokalizační chyby než v případě lokalizačního algoritmu pouze s čtyř kotevním systémem. Lepších hodnot bylo opět dosaženo s použitím energie 2.5 z původního algoritmu Mass-Spring.

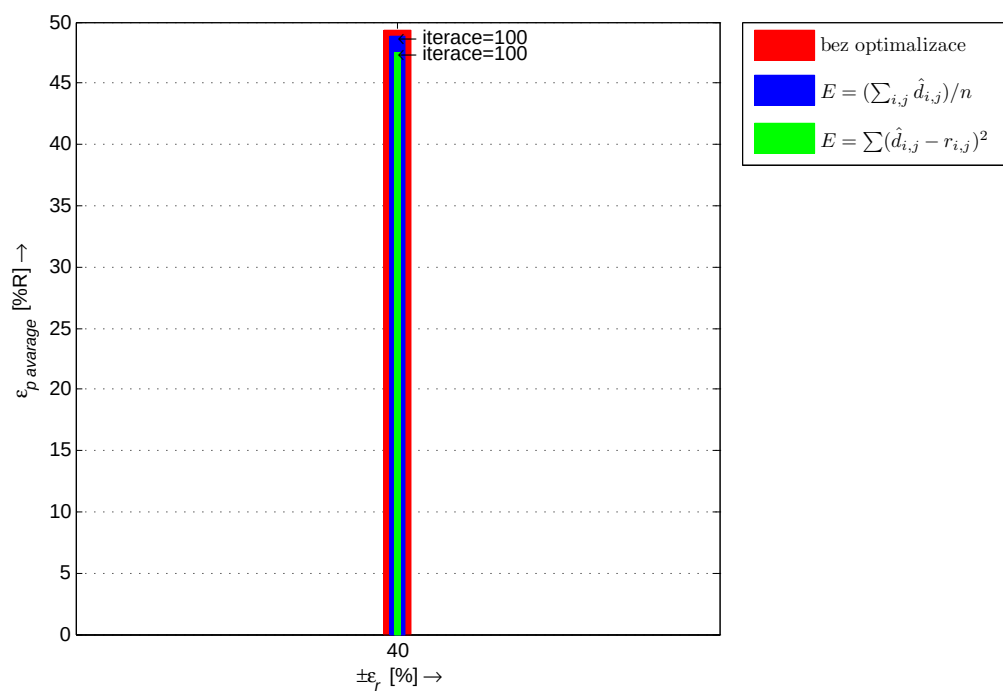
Na znázornění 2.20 jsou zobrazeny lokalizační chyby při různých počtech iterací.



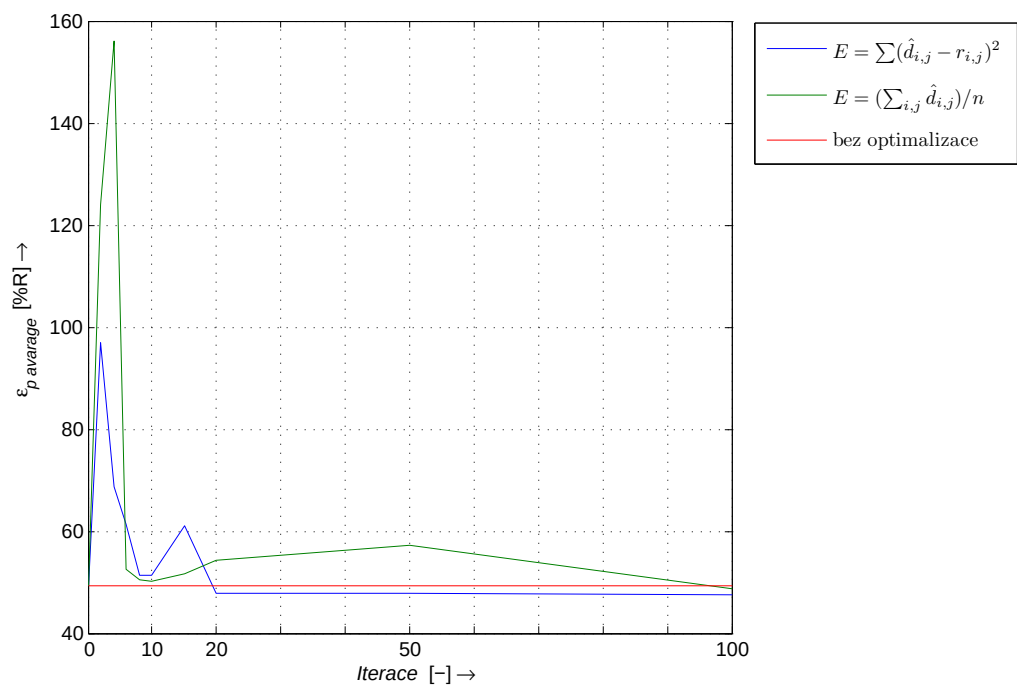
Obr. 2.18: Mass-Spring optimalizace s oběma typy energií

K ustálení menší chyby v lokalizaci, oproti algoritmu bez vylepšení, dochází až při překročení 20 iterací (v případě použití energie z optimalizace Mass-Spring). U energie 2.6 toto nastane pouze až u sté iterace.

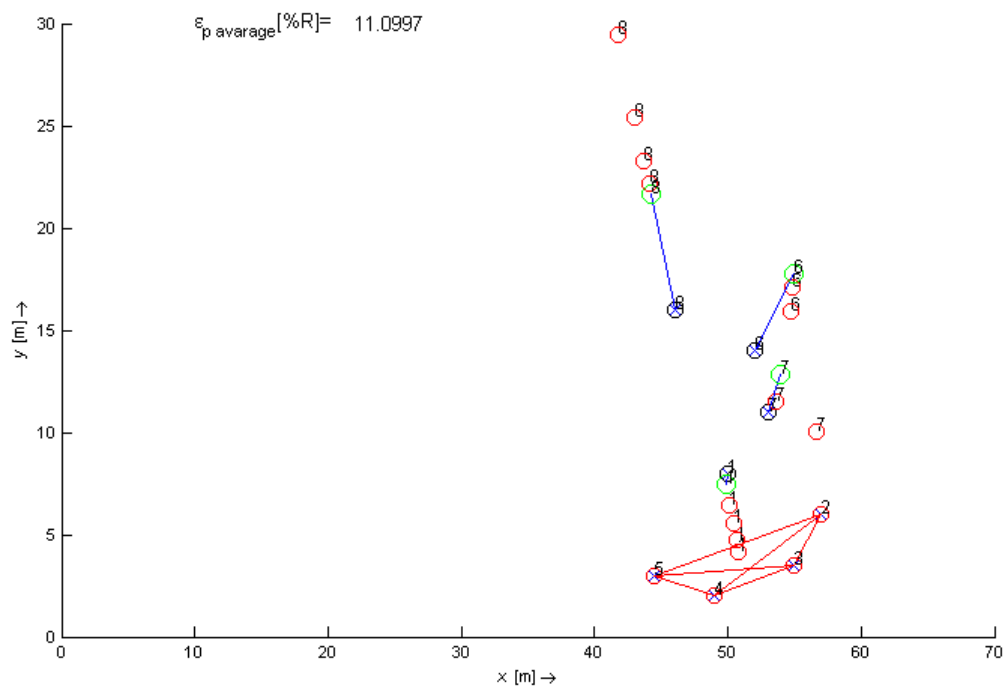
Obecné řešení optimalizace pro sensorovou síť s menším počtem senzorů 2.21. Na obrázku je vidět posun vypočtené pozice daného uzlu. Z důvodu správnosti výpočtu algoritmu Mass-Spring byl z obrázku 2.22 odstraněn náčrt univerzitního patra, který do výpočtu nevnášel žádné výpočetní prvky. V těchto grafech je také vyznačen posun sensorových uzlů (kolečky o červené barvě). Podrobné hodnoty simulací lze vidět v tabulkách přílohy B.4.3. Výsledné sensorové mapy se zápornými chybami prostředí na B.5 a B.6.



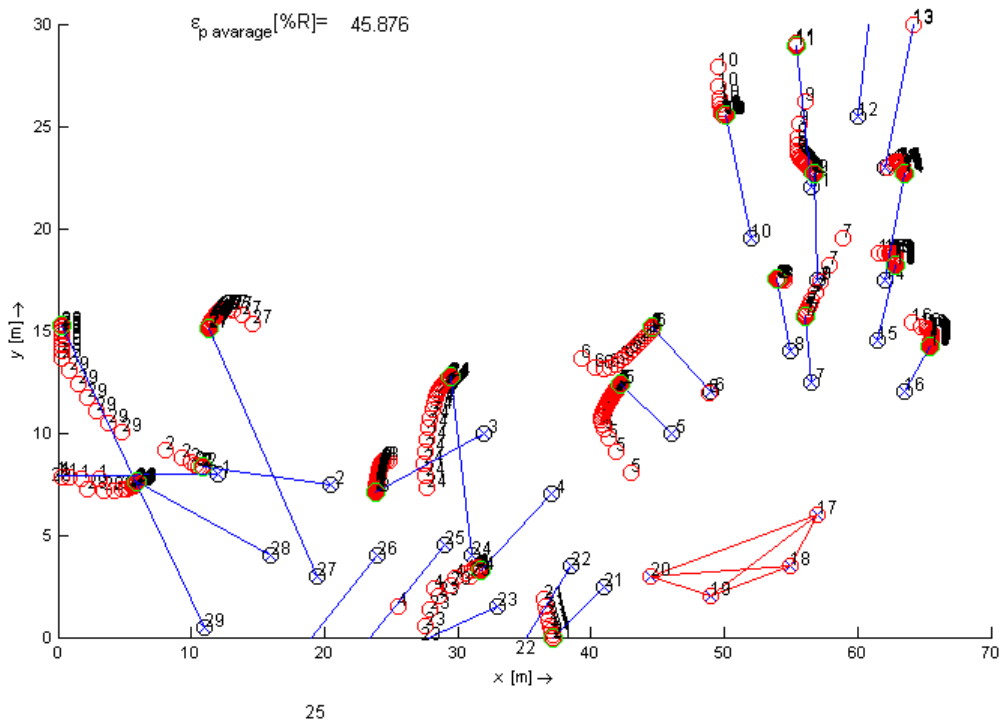
Obr. 2.19: Mass-Spring optimalizace s oběma typy energií pro patro univerzity



Obr. 2.20: Závislost lokalizační chyby na počtu iterací v Mass-Spring pro patro univerzity



Obr. 2.21: Obecné využití optimalizace při chybovosti prostředí +40% a počtu iterací čtyři



Obr. 2.22: Využití optimalizace při chybovosti prostředí +40% a počtu iterací sto - univerzitní budova

3 VÝSLEDKY DIPLOMOVÉ PRÁCE A SROVNÁNÍ SE SVĚTOVÝM VÝVOJEM

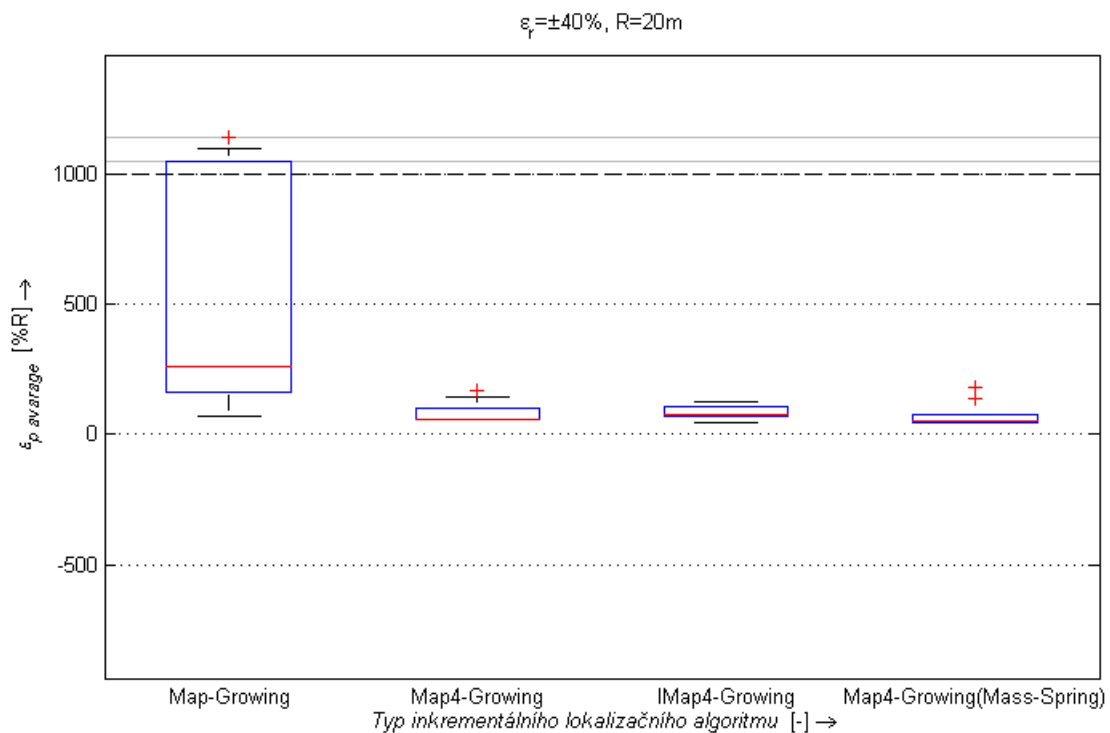
V diplomové práci jsou probrány dosud vyvinuté lokalizační algoritmy a některá možná vylepšení. Porovnání se světovým vývojem vychází z ucelených inkrementálních algoritmů, které bylo možné čerpat z vědeckých publikací. Na následných grafech 3.1, 3.2² je zobrazeno porovnání základního typu lokalizačního algoritmu Map-Growing s rozvinutými typy tohoto lokalizačního postupu, které jsou prezentovány v diplomové práci (Map4-Growing, IMap4-Growing (Improved Map4-Growing), Map4-Growing(Mass-Spring)). Označením Map4-Growing je myšlen základní typ tohoto algoritmu s počátečním čtyř kotevním systémem.

Výsledky pro toto porovnání byly dosaženy a simulovány na deseti různých náhodných senzorových sítích s horším umístěním počátečního systému na okraji sítě. Z grafů lze vyhodnotit jako nejhorší algoritmus Map-Growing s původním tří kotevním systémem pro výpočet pozic senzorových uzlů, kde docházelo již k zmíněným vysokým chybám v lokalizaci. Naopak na detailnějším zobrazení 3.2 mezi inovovanými algoritmy nedocházelo k takto vysokým lokalizačním chybám. U algoritmu IMap4-Growing je rozsah chyb v umístění menší než v případě Map4-Growing. Nejmenší průměrné lokalizační chyby (74, 1157 % R) je dosaženo použitím algoritmu Map4-Growing(Mass-Spring).

Parametry simulace	Zadané hodnoty
Počet uzlů	$N=50$
Rádiový dosah	$R[m]=20$
Chyba měření vzdálenosti	$\epsilon_r[\%]=\pm 40$
Umístění počátečního systému	na okraji sítě
Počet opakování simulace	10

Tab. 3.1: Simulace chyb lokalizace inkrementálních lokalizačních algoritmů

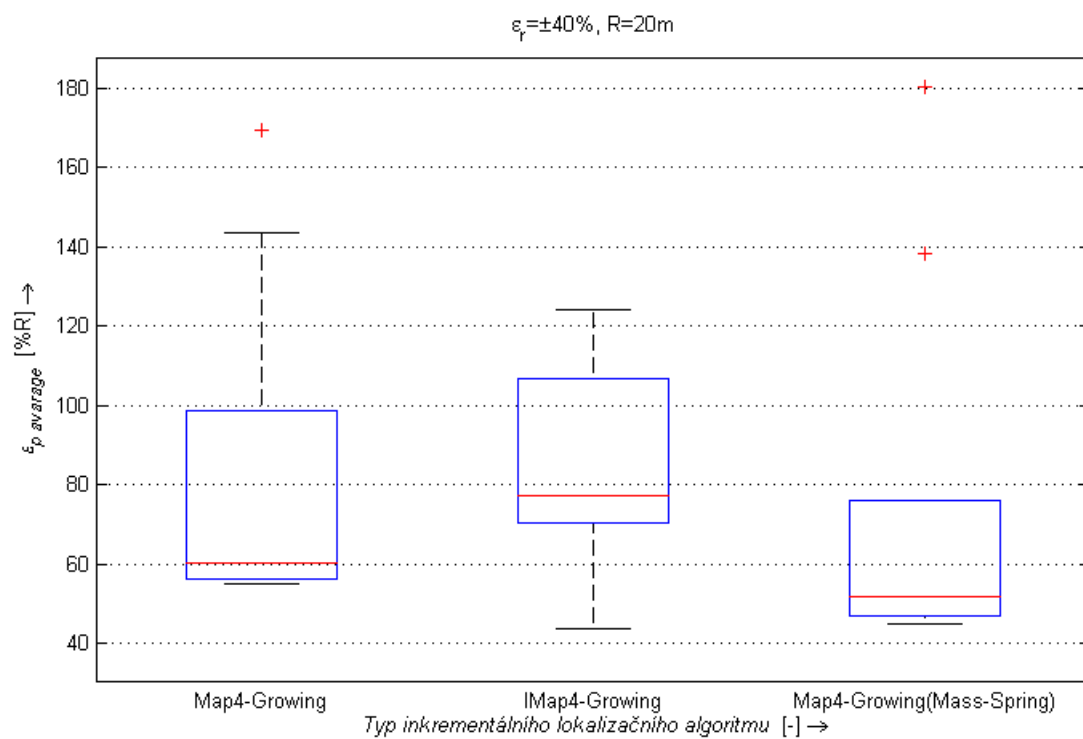
²Hodnota 1000 zde zobrazuje hranici hodnot, nad níž se nacházejí velice vysoké lokalizační chyby.



Obr. 3.1: Lokalizační chyby inkrementálních lokalizačních algoritmů

Map-Growing	Map4-Growing	IMap4-Growing	Map4-Growing (Mass-Spring)
$\epsilon_{p,average} [\%R]$			
309,7634	143,3477	123,9944	138,0639
166,0263	169,2610	70,2327	50,1927
3971,4419	57,0724	81,7095	57,1389
70,9166	56,1479	80,3647	48,6554
87,3124	57,6347	73,3118	45,8867
211,5172	62,5127	68,0822	44,9940
604,4444	98,8233	74,3292	75,9629
2350,1553	55,2086	106,5226	52,9902
13276,6385	54,7467	43,6492	47,0210
159,1418	89,6607	118,1481	180,2517
Celková $\epsilon_{p,average} [\%R]$			
$2,1207 \cdot 10^3$	84,4416	84,0344	74,1157

Tab. 3.2: Podrobné nasimulované hodnoty inkrementální lokalizačních algoritmů



Obr. 3.2: Detailní zobrazení lokalizačních chyb inkrementálních lokalizačních algoritmů

4 ZÁVĚR

Diplomová práce je dělena do jednotlivých kapitol dle postupného řešení problematiky Snížení chyby odhadu pozice u inkrementálních lokalizačních technik. První kapitola je zaměřena na prostudování a popis inkrementálních lokalizačních algoritmů, z kterých je následně vybrán vhodný algoritmus pro simulované prostředí. Dále jsou v této části řešeny simulace na náhodných sensorových sítích pro obecné vyhodnocení algoritmů. Prvním přispěním této práce do problematiky lokalizace v sensorových sítích je zavedení parametru k , který ohodnocuje kvalitu počátečního systému v algoritmu Map-Growing. Lokalizace na základě postupu, který popisuje algoritmus Map-Growing vychází z algoritmu ABC (Assumption Based Coordinates). Vliv těchto lokalizačních postupů na chybu umístění sensorových uzlů je zkoumán v jedné z podkapitol, podobně jako umístění počátečního systému v určitých částech sítě. Po počátečním výběru a odsimulování daného lokalizačního postupu byla na základě zadaného univerzitního prostředí s určitou chybovostí měření vzdálenosti uvedena druhá kapitola. Nejprve je na základě simulací ověřena vhodnost umístění počátečního systému do vybrané části sítě. Po aplikaci algoritmu Map-Growing je zjištěna vysoká lokalizační chyba z důvodů zrcadlení pozic vlivem tří kotevního systému. Pro odstranění je zkoumána výpočetní technika multilaterace. I v tomto případě je zkoumán nejvhodnější tvar počátečního čtyř kotevního systému. Pro následné simulace jsou vytvořeny pevné sensorové sítě, které především vycházejí z jednotlivých rozměrů místností zadaného prostředí. V konečné fázi hledání nejmenší lokalizační chyby jsou také zavedeny vybrané optimalizační metody. Ve výsledném porovnání jsou jednotlivé inkrementální lokalizační techniky srovnávány se základním algoritmem.

Metodika návrhu sensorové sítě pro patro univerzity

Optimální počet sensorových uzlů byl odsimulován na 29, který odpovídá umístění jednoho uzlu do každé místnosti třetího patra. Jednotlivé uzly mají svůj rádiový dosah nastaven na hodnotu 15 metrů. Umístěním počátečního čtyř kotevního systému na rozhraní pravého a levého křídla (do středu) lze zaručit správnost lokalizačního výpočtu (lokalizační chyba nebude dosahovat vysokých hodnot). Při chybovosti prostředí, která dosahuje až hodnoty 40% a algoritmu Mass-Spring, lze chybu lokalizace zmenšit na hodnotu $47,4634\%R$ (7,1195 metrů). Lokalizační chyba bez použití optimalizace činí 7,3935 metrů. Optimalizace není patrná z důvodu velké chybovosti univerzitního prostředí, kde u takto vysokých chyb prostředí ztrácí své vlastnosti (viz. 2.18 pro $\epsilon_r [\%] = \pm 40\%$ s původní energií z Mass-Spring). Dochází zde k špatnému vyhodnocení energie vlivem chyby v měření vzdálenosti metodou RSSI.

LITERATURA

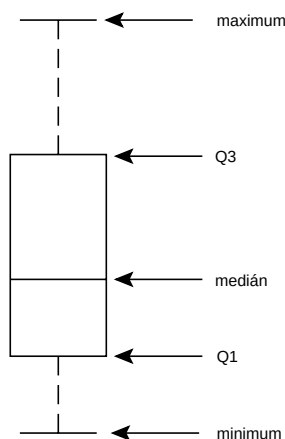
- [1] X. Li, H. Shi, Y. Shang *A Map-growing Localization Algorithm for Ad-hoc Wireless Sensor Networks*, Parallel and Distributed Systems, International Conference on, vol. 0, p. 395, 2004.
- [2] L. Evers, W. Bach, D. Dam, M. Jonker, H. Scholten, P. Havinga *An Iterative Quality-based Localization Algorithm for Ad Hoc Networks*, in 1st Int. Conf. on Pervasive Computing, 2002, pp. 55-61.
- [3] S. Čapkun, M. Hamdi, J.-P. Hubaux *GPS-Free Positioning in Mobile Ad Hoc Networks*, Cluster Computing, vol. 5, no. 2, pp. 157-167, 2002.
- [4] C. S. Jan, J. M. Rabaey *Locationing In Distributed Ad-Hoc Wireless Sensor Networks*, in ICASSP, 2001, pp. 2037-2040.
- [5] L. Wang, Y. Liu, X. Xu, X. Wang *WSN Multilateration Algorithm Based on Landweber Iteration*, The Ninth International Conference on Electronic Measurement and Instruments, 2009.
- [6] J. Pekárek *Lokalizace komunikačních uzlů v bezdrátových senzorových*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 61 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Milan Šimek.
- [7] L. Fang, W. Du, P. Ning *A Beacon-Less Location Discovery Scheme for Wireless Sensor Networks*, s. 11, 2004.
- [8] M. Šimek *Reference Nodes Selection for Anchor-Free Localization in Wireless Sensor Networks*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2010. 105 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Dan Komosný, Ph.D
- [9] Duc A. Tran, Thinh Nguyen *Localization In Wireless Sensor Networks based on Support Vector Machines*. IEEE, s. 13, 2007.
- [10] N. B. Priyantha, H. Balakrishnan, E. Demaine, S. Teller *Anchor-Free Distributed Localization in Sensor Networks*, in *Sensys*, 2003, pp. 340-341.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

WSN	Wireless Sensor Networks
RSSI	Received Signal Strength Indication
IQL	Iterative Quality-based Location Algorithm
WLS	Weighted Least-Square Algorithm
ABC	Assumption Based Coordinates
MLE	Maximum Likelihood Estimation
KPS	deployment Knowledge-based Positioning System
SPA	Self-Positioning Algorithm
GPS	Global Positioning System
APS	Ad hoc Positioning System
IMap4-Growing	Improved Map4-Growing

A PŘÍLOHA A

A.1 Jak jsou zobrazena data pomocí box plotu?



Obr. A.1: Zobrazení dat pomocí nástroje box plot v prostředí Matlab

Box plot umožňuje jednoduše zobrazit určitý počet hodnot v jednom grafu. Medián je hodnota, která dělí řadu podle velikosti seřazených výsledků na dvě stejné poloviny. V případě sudého počtu členů řady je mediánem aritmetický průměr dvou prostředních hodnot. Q_1 a Q_3 jsou kvartily. Kvartil jsou tři hodnoty, které rozdělují řadu hodnot do čtyř stejných částí. Q_1 odděluje první čtvrtinu a Q_3 čtvrtou čtvrtinu od celku. Minimum a maximum grafu nabývá nejmenší resp. největší hodnoty celé řady za předpokladu, že graf neobsahuje hodnoty větší než $1,5 \cdot (Q_3 - Q_1) + Q_3$ nebo hodnoty menší než $Q_1 - 1,5 \cdot (Q_3 - Q_1)$. Pokud graf obsahuje extrémní hodnoty (hodnoty větší než $3 \cdot (Q_3 - Q_1)$ od Q_3 nebo menší než $3 \cdot (Q_3 - Q_1)$ od Q_1) jsou tyto hodnoty zakresleny nad maximum resp. minimum.

A.2 Výsledky algoritmu Map-Growing se dvěma typy počátečních systémů

Výsledky simulace „špatného“ systému	
Hodnota parametru k [–] (viz. 1.22)	$\epsilon_{pavarage} [\%R]$
232,589	210,4230
237,319	650515,7793
95,3925	42,1288
169,9623	315,1722
55,051	54,3087
190,0436	4883,2286
79,8277	179,1555
41,8425	57,2269
223,2639	256,7008
203,5959	100,1547
Celková $\epsilon_{pavarage} [\%R]$	65661,4278
Průměrná hodnota k [–]	152,8887

Tab. A.1: Simulace „špatného“ systému

Výsledky simulace „dobrého“ systému	
Hodnota parametru k [–] (viz. 1.22)	$\epsilon_{pavarage} [\%R]$
40,7439	46,8490
25,4745	148,9984
57,9516	41,0245
34,4158	65,6507
46,4025	55,0842
76,0535	840,1017
89,8619	89,0415
39,9057	87,3371
26,4687	117,8159
52,7555	500,3287
Celková $\epsilon_{pavarage} [\%R]$	149,1903
Průměrná hodnota k [–]	49,0033

Tab. A.2: Simulace „dobrého“ systému

A.3 Výsledky simulace vlivu umístění počátečního systému na chybu lokalizace senzorové mapy

Simulace umístění systému na okraji sítě	
Hodnota parametru k (viz. 1.22)	$\epsilon_{pavarage}$ [%R]
48,9551	309,7634
54,1400	166,0263
73,0343	3971,4419
36,0867	70,9166
51,6202	87,3124
26,5247	211,5172
105,7987	604,4444
95,2759	2350,1553
46,7066	13276,6385
50,4149	159,1418
Celková $\epsilon_{pavarage}$ [%R]	2120,73578
Průměrná hodnota k [–]	58,8557

Tab. A.3: Simulace umístění systému na okraji sítě

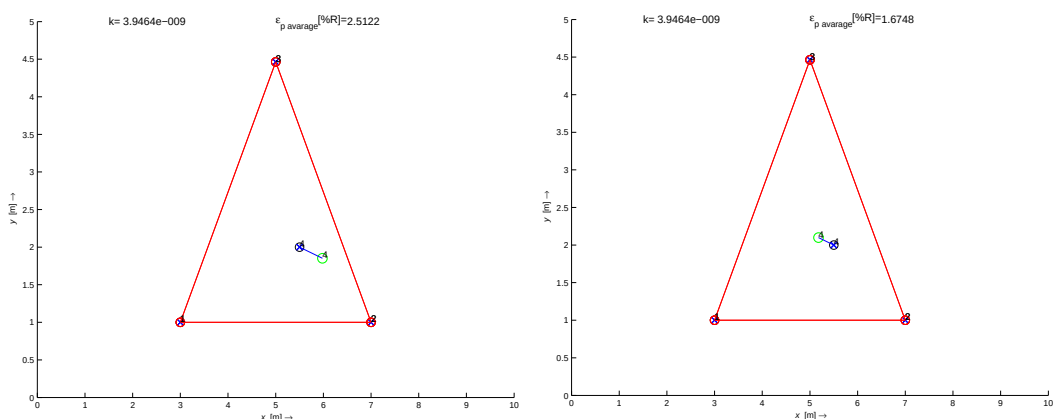
Simulace umístění systému ve středu sítě	
Hodnota parametru k (viz. 1.22)	$\epsilon_{pavarage}$ [%R]
111,6835	148,4859
17,1213	157,5701
33,1122	138,6528
57,7483	33,3712
30,9073	80,7127
62,3132	41,1803
39,1932	99,1547
53,9031	76,8562
25,7088	35,6710
28,9319	2787,1091
Celková $\epsilon_{pavarage}$ [%R]	359,8764
Průměrná hodnota k [–]	46,0623

Tab. A.4: Simulace umístění systému ve středu sítě

A.4 Simulace typů počátečních systémů metody trilaterace

R[m]=5	Rovnostranný počáteční systém $k[-] = 3,94 \cdot 10^{-9}$					
ϵ_r [%]	10	20	30	40	-40	50
$\epsilon_{paverage}$ [%R]	0,5496	1,1514	1,8057	2,5122	1,6748	3,2712

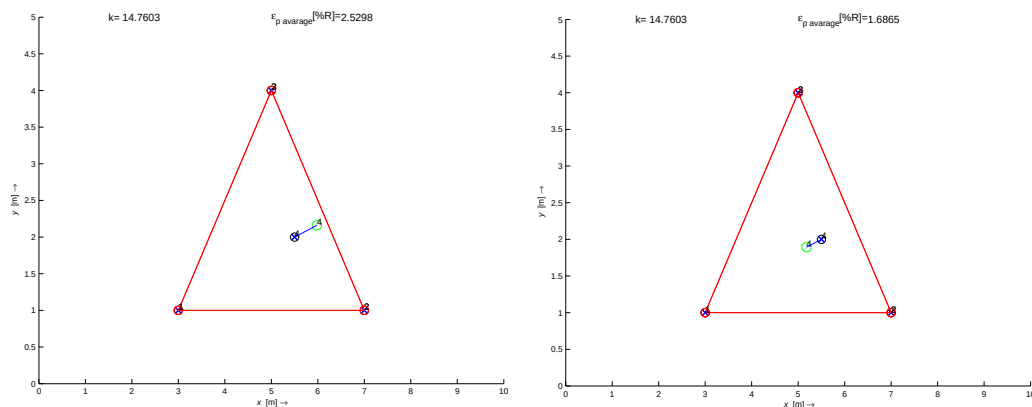
Tab. A.5: Vliv rovnostranného počátečního systému na chybu lokalizace



Obr. A.2: Rovnostranný počáteční systém - $\epsilon_r = +40\%$, $\epsilon_r = -40\%$

R[m]=5	Rovnoramenný systém $k[-] = 14,7603$					
ϵ_r [%]	10	20	30	40	-40	50
$\epsilon_{paverage}$ [%R]	0,5534	1,1595	1,8183	2,5298	1,6865	3,2940

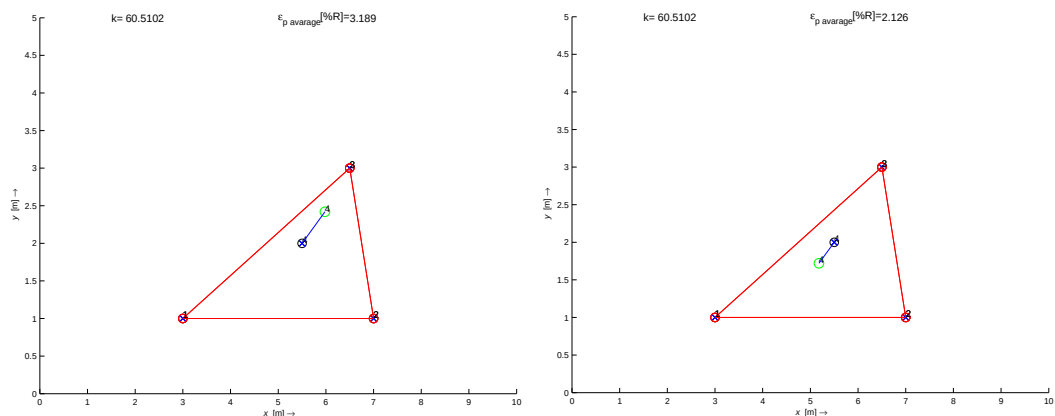
Tab. A.6: Vliv rovnoramenného počátečního systému na chybu lokalizace



Obr. A.3: Rovnoramenný počáteční systém - $\epsilon_r = +40\%$, $\epsilon_r = -40\%$

R[m]=5	Ostroúhlý systém s jedním úhlem $< 30^\circ$ $k[-] = 60,5102$					
ϵ_r [%]	10	20	30	40	-40	50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	0,6976	1,4616	2,2921	3,1890	2,1260	4,1524

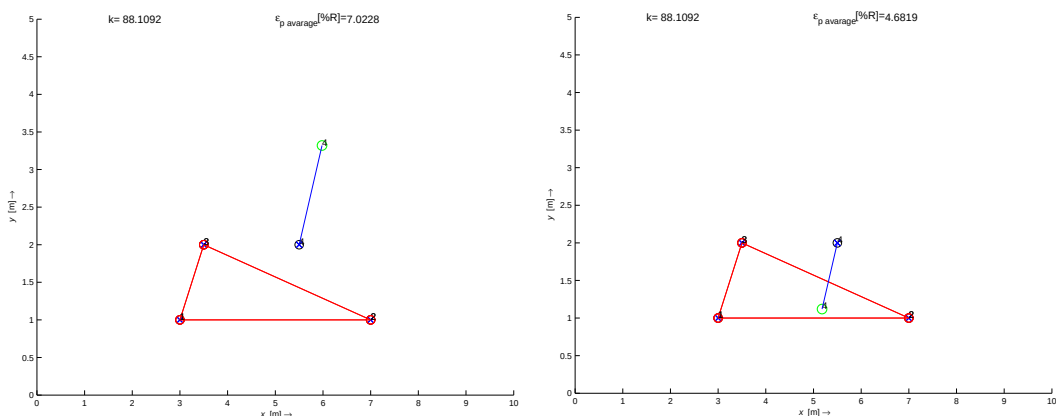
Tab. A.7: Vliv ostroúhlého počátečního systému s úhlem $< 30^\circ$ na chybu lokalizace



Obr. A.4: Ostroúhlý počáteční systém - $\epsilon_r = +40\%$, $\epsilon_r = -40\%$

R[m]=5	Tupoúhlý systém $k[-] = 88,1092$					
ϵ_r [%]	10	20	30	40	-40	50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	1,5362	3,2188	5,0477	7,0228	4,6819	9,1443

Tab. A.8: Vliv tupoúhlého počátečního systému na chybu lokalizace

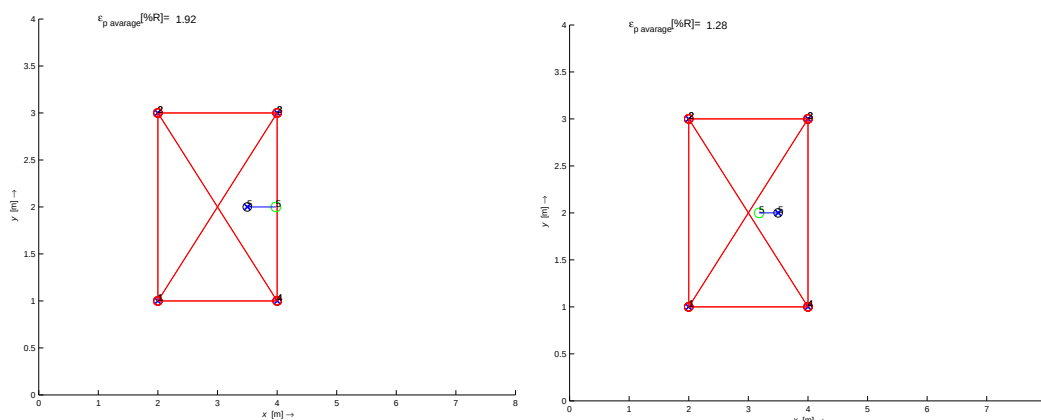


Obr. A.5: Tupoúhlý počáteční systém - $\epsilon_r = +40\%$, $\epsilon_r = -40\%$

A.5 Simulace typů počátečních systémů metody multilaterace

$R[m]=5$	Pravoúhlý počáteční systém					
$\epsilon_r [\%]$	10	20	30	40	-40	50
$\epsilon_{pavarage} [\%R]$	0,42	0,88	1,38	1,92	1,28	2,50

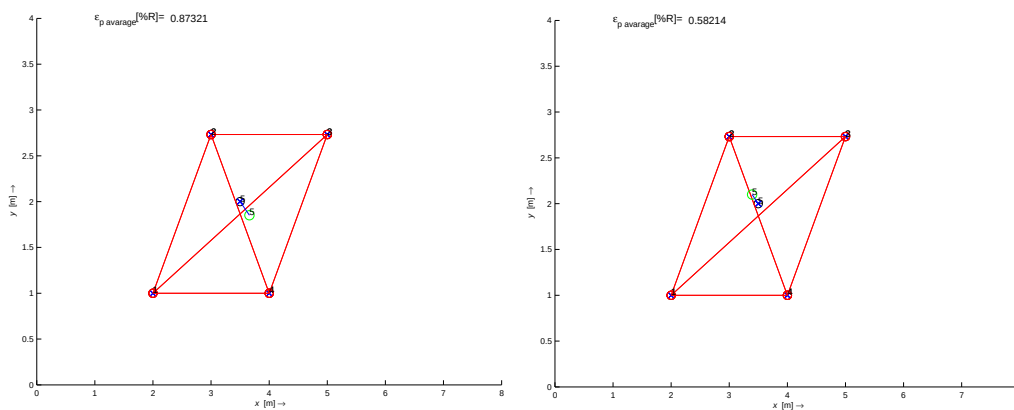
Tab. A.9: Vliv pravoúhlého počátečního systému na chybu lokalizace



Obr. A.6: Pravoúhlý počáteční systém - $\epsilon_r = +40\%$, $\epsilon_r = -40\%$

$R[m]=5$	Počáteční systém ve tvaru kosočtverce					
$\epsilon_r [\%]$	10	20	30	40	-40	50
$\epsilon_{pavarage} [\%R]$	0,1910	0,4002	0,6276	0,8732	0,5821	1,1370

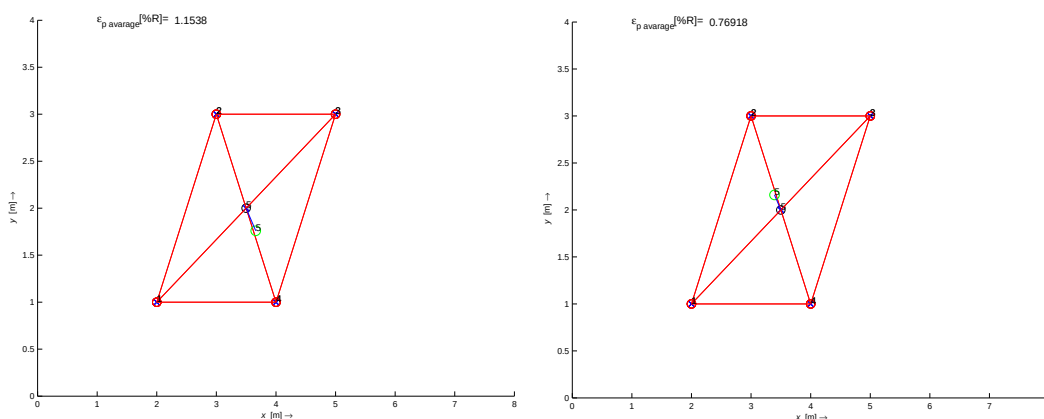
Tab. A.10: Vliv počátečního systému ve tvaru kosočtverce na chybu lokalizace



Obr. A.7: Počáteční systém ve tvaru kosočtverce - $\epsilon_r = +40\%$, $\epsilon_r = -40\%$

$R[m]=5$	Počáteční systém ve tvaru kosodélníku					
$\epsilon_r [\%]$	10	20	30	40	-40	50
$\epsilon_{pavarage} [\%R]$	0,2524	0,5288	0,8293	1,1538	0,7692	1,5023

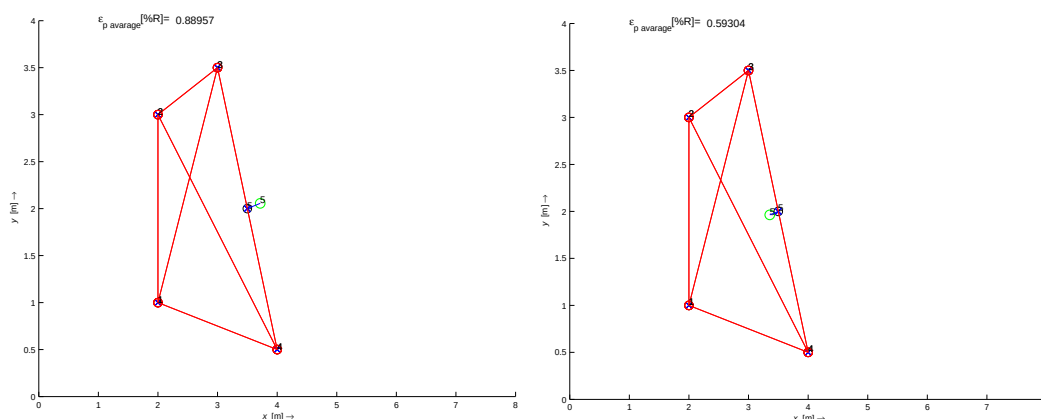
Tab. A.11: Vliv počátečního systému ve tvaru kosodélníku na chybu lokalizace



Obr. A.8: Počáteční systém ve tvaru kosodélníku - $\epsilon_r = +40\%$, $\epsilon_r = -40\%$

$R[m]=5$	Počáteční systém se dvěma tupými úhly					
$\epsilon_r [\%]$	10	20	30	40	-40	50
$\epsilon_{pavarage} [\%R]$	0,1946	0,4077	0,6394	0,8896	0,5930	1,1583

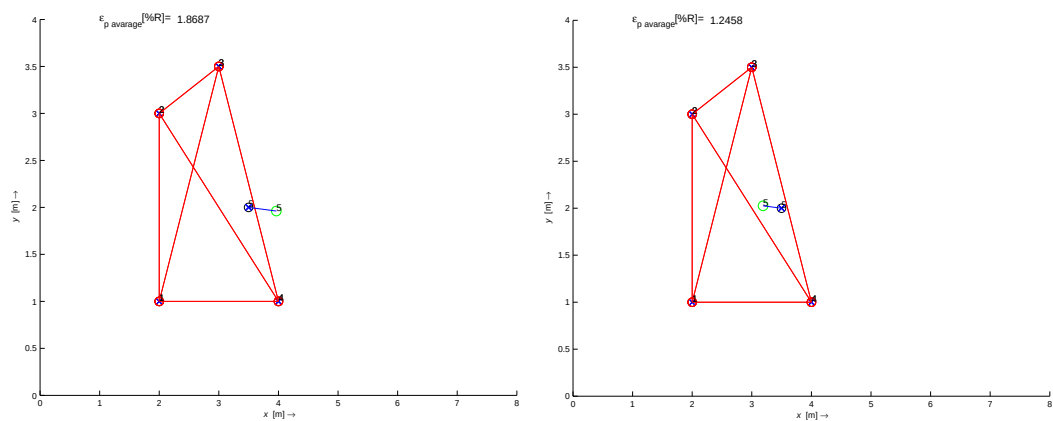
Tab. A.12: Vliv různoběžníkového systému se dvěma tupými úhly na chybu lokalizace



Obr. A.9: Počáteční systém se dvěma tupými úhly - $\epsilon_r = +40\%$, $\epsilon_r = -40\%$

$R[m]=5$	Počáteční systém s tupým a pravým úhlem					
$\epsilon_r [\%]$	10	20	30	40	-40	50
$\epsilon_{pavarage} [\%R]$	0,4088	0,8565	1,3431	1,8687	1,2458	2,4332

Tab. A.13: Vliv počátečního systému s tupým a pravým úhlem na chybu lokalizace



Obr. A.10: Počáteční systém s tupým a pravým úhlem - $\epsilon_r = +40\%$, $\epsilon_r = -40\%$

B PŘÍLOHA B

B.1 Podrobné výsledky simulace algoritmu Map-Growing s trilaterací - místnost 1 senzor

R[m]=12	Počáteční systém umístěn UPROSTŘED sítě				
ϵ_r [%]	± 10	± 20	± 30	± 40	± 50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	398,1291	173,1835	157,2555	443,7020	$1,5147 \cdot 10^3$
$\epsilon_{pavarage}$ [m]	47,7750	20,7820	18,8707	53,2443	181,7640
Počáteční systém umístěn v HORNÍ části sítě					
ϵ_r [%]	± 10	± 20	± 30	± 40	± 50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	$3,6 \cdot 10^3$	$2,33 \cdot 10^4$	$1,45 \cdot 10^7$	$9,37 \cdot 10^6$	$1,66 \cdot 10^5$
Počáteční systém umístěn v DOLNÍ části sítě					
ϵ_r [%]	± 10	± 20	± 30	± 40	± 50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	$3,68 \cdot 10^3$	$1,70 \cdot 10^7$	219,2388	$3,28 \cdot 10^6$	$6,72 \cdot 10^3$
$\epsilon_{pavarage}$ [m]	/	/	26,3087	/	/

Tab. B.1: Lokalizace bez omezení výpočtu pro $R = 12$ m

R[m]=13	Počáteční systém umístěn UPROSTŘED sítě				
ϵ_r [%]	± 10	± 20	± 30	± 40	± 50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	150,4550	468,9508	$1,8716 \cdot 10^5$	252,5517	210,6344
$\epsilon_{pavarage}$ [m]	19,5592	60,9636	24330,8	32,8317	27,3825
Počáteční systém umístěn v HORNÍ části sítě					
ϵ_r [%]	± 10	± 20	± 30	± 40	± 50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	477,2711	$9,3 \cdot 10^3$	$4,9 \cdot 10^6$	$2,49 \cdot 10^5$	$7,46 \cdot 10^6$
$\epsilon_{pavarage}$ [m]	62,0452	1209	/	/	/
Počáteční systém umístěn v DOLNÍ části sítě					
ϵ_r [%]	± 10	± 20	± 30	± 40	± 50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	$3,89 \cdot 10^4$	280,9825	$2,31 \cdot 10^4$	$7,52 \cdot 10^5$	$4,34 \cdot 10^7$

Tab. B.2: Lokalizace bez omezení výpočtu pro $R = 13$ m

R[m]=14	Počáteční systém umístěn UPROSTŘED sítě				
ϵ_r [%]	± 10	± 20	± 30	± 40	± 50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	$1,04 \cdot 10^3$	$4,77 \cdot 10^6$	$5,11 \cdot 10^4$	$6,35 \cdot 10^5$	$2,3002 \cdot 10^3$
$\epsilon_{pavarage}$ [m]	145,012	/	7158,48	/	322,028
Počáteční systém umístěn v HORNÍ části sítě					
ϵ_r [%]	± 10	± 20	± 30	± 40	± 50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	$1,58 \cdot 10^4$	$6,76 \cdot 10^4$	$2,76 \cdot 10^3$	$2,73 \cdot 10^4$	$1,05 \cdot 10^4$
Počáteční systém umístěn v DOLNÍ části sítě					
ϵ_r [%]	± 10	± 20	± 30	± 40	± 50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	88,1494	$2,90 \cdot 10^3$	$4,62 \cdot 10^3$	$1,75 \cdot 10^4$	$1,64 \cdot 10^3$
$\epsilon_{pavarage}$ [m]	12,3409	/	/	/	/

Tab. B.3: Lokalizace bez omezení výpočtu pro $R = 14$ m

R[m]=15	Počáteční systém umístěn UPROSTŘED sítě				
ϵ_r [%]	± 10	± 20	± 30	± 40	± 50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	61,544	126,509	$2,94 \cdot 10^4$	409,945	$2,61 \cdot 10^3$
$\epsilon_{pavarage}$ [m]	9,2317	18,9764	/	61,4918	391,725
Počáteční systém umístěn v HORNÍ části sítě					
ϵ_r [%]	± 10	± 20	± 30	± 40	± 50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	260,2121	$5,14 \cdot 10^5$	$1,80 \cdot 10^4$	$7,3856 \cdot 10^4$	$6,70 \cdot 10^3$
$\epsilon_{pavarage}$ [m]	39,0318	/	/	/	/
Počáteční systém umístěn v DOLNÍ části sítě					
ϵ_r [%]	± 10	± 20	± 30	± 40	± 50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	$7,65 \cdot 10^3$	$2,56 \cdot 10^5$	$5,79 \cdot 10^3$	$1,96 \cdot 10^3$	249,7261
$\epsilon_{pavarage}$ [m]	/	/	/	/	37,4590

Tab. B.4: Lokalizace bez omezení výpočtu pro $R = 15$ m

R[m]=16	Počáteční systém umístěn UPROSTŘED sítě				
ϵ_r [%]	± 10	± 20	± 30	± 40	± 50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	135,8145	195,3711	$8,422 \cdot 10^3$	$6,6349 \cdot 10^4$	$6,0211 \cdot 10^5$
$\epsilon_{pavarage}$ [m]	21,7303	31,2594	/	/	/
Počáteční systém umístěn v HORNÍ části sítě					
ϵ_r [%]	± 10	± 20	± 30	± 40	± 50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	227,9893	$2,5 \cdot 10^5$	$1,6 \cdot 10^6$	461,9454	$2,53 \cdot 10^6$
$\epsilon_{pavarage}$ [m]	36,4783	/	/	73,9112	/
Počáteční systém umístěn v DOLNÍ části sítě					
ϵ_r [%]	± 10	± 20	± 30	± 40	± 50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	$3,13 \cdot 10^3$	$1,26 \cdot 10^5$	$2,37 \cdot 10^3$	$5,174 \cdot 10^4$	$1,08 \cdot 10^3$

Tab. B.5: Lokalizace bez omezení výpočtu pro $R = 16\text{ m}$

R[m]=17	Počáteční systém umístěn UPROSTŘED sítě				
ϵ_r [%]	± 10	± 20	± 30	± 40	± 50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	73,2576	639,3552	415,6535	713,9367	$1,0586 \cdot 10^4$
$\epsilon_{pavarage}$ [m]	12,45	108,6904	70,66	121,3692	/
Počáteční systém umístěn v HORNÍ části sítě					
ϵ_r [%]	± 10	± 20	± 30	± 40	± 50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	128,6524	$1,96 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^4$	$5,02 \cdot 10^5$	$2,8 \cdot 10^3$
$\epsilon_{pavarage}$ [m]	21,8709	/	/	/	/
Počáteční systém umístěn v DOLNÍ části sítě					
ϵ_r [%]	± 10	± 20	± 30	± 40	± 50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	231,69	$9,03 \cdot 10^3$	468,32	189,12	$2,61 \cdot 10^3$
$\epsilon_{pavarage}$ [m]	39,3873	/	79,6144	32,1504	/

Tab. B.6: Lokalizace bez omezení výpočtu pro $R = 17\text{ m}$

B.2 Podrobné výsledky simulace algoritmu Map-Growing s multilaterací - místnost 1 senzor

R[m]=14	Počáteční systém umístěn UPROSTŘED sítě				
ϵ_r [%]	± 10	± 20	± 30	± 40	± 50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	28,7465	72,8238	69,9650	94,9144	91,7061
$\epsilon_{pavarage}$ [m]	4,0245	10,1953	9,7951	13,2880	12,8389
Počáteční systém umístěn v HORNÍ části sítě					
ϵ_r [%]	± 10	± 20	± 30	± 40	± 50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	36,1238	98,9471	86,0697	113,3984	174,8661
$\epsilon_{pavarage}$ [m]	5,0573	13,8526	12,0498	15,8758	24,4813
Počáteční systém umístěn v DOLNÍ části sítě					
ϵ_r [%]	± 10	± 20	± 30	± 40	± 50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	78,4850	100,1756	168,2521	192,0757	193,3624
$\epsilon_{pavarage}$ [m]	10,9879	14,0246	23,5553	26,8906	27,0707

Tab. B.7: Lokalizace bez omezení výpočtu pro $R = 14$ m

R[m]=15	Počáteční systém umístěn UPROSTŘED sítě				
ϵ_r [%]	± 10	± 20	± 30	± 40	± 50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	27,4702	43,9798	58,0942	77,9787	92,2469
$\epsilon_{pavarage}$ [m]	4,1205	6,5970	8,7141	11,6968	13,8370
Počáteční systém umístěn v HORNÍ části sítě					
ϵ_r [%]	± 10	± 20	± 30	± 40	± 50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	48,8625	145,1290	110,8622	125,9898	122,9357
$\epsilon_{pavarage}$ [m]	7,3295	21,7694	16,6294	18,8985	18,4404
Počáteční systém umístěn v DOLNÍ části sítě					
ϵ_r [%]	± 10	± 20	± 30	± 40	± 50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	66,6428	127,6705	112,9724	161,4795	167,6510
$\epsilon_{pavarage}$ [m]	9,9964	19,1506	16,9391	24,2219	25,1477

Tab. B.8: Lokalizace bez omezení výpočtu pro $R = 15$ m

R[m]=16	Počáteční systém umístěn UPROSTŘED sítě				
ϵ_r [%]	± 10	± 20	± 30	± 40	± 50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	17,0374	33,1330	59,6338	84,5372	85,7146
$\epsilon_{pavarage}$ [m]	2,7260	5,3013	9,5414	13,5260	13,7143
Počáteční systém umístěn v HORNÍ části sítě					
ϵ_r [%]	± 10	± 20	± 30	± 40	± 50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	33,1880	119,6268	110,0674	114,3441	143,5005
$\epsilon_{pavarage}$ [m]	5,3101	19,1403	17,6108	18,2951	22,9601
Počáteční systém umístěn v DOLNÍ části sítě					
ϵ_r [%]	± 10	± 20	± 30	± 40	± 50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	66,0513	103,9101	$1,9490 \cdot 10^3$	329,9509	158,5607
$\epsilon_{pavarage}$ [m]	10,5682	16,6256	/	52,7921	25,3697

Tab. B.9: Lokalizace bez omezení výpočtu pro $R = 16$ m

R[m]=17	Počáteční systém umístěn UPROSTŘED sítě				
ϵ_r [%]	± 10	± 20	± 30	± 40	± 50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	18,4610	32,7584	98,6023	88,4805	93,4353
$\epsilon_{pavarage}$ [m]	3,1384	5,5689	16,7624	15,0417	15,8840
Počáteční systém umístěn v HORNÍ části sítě					
ϵ_r [%]	± 10	± 20	± 30	± 40	± 50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	39,9242	230,7563	84,4331	100,5862	112,0160
$\epsilon_{pavarage}$ [m]	6,7871	39,2286	14,3536	17,0997	19,0427
Počáteční systém umístěn v DOLNÍ části sítě					
ϵ_r [%]	± 10	± 20	± 30	± 40	± 50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	41,5010	123,8579	122,1149	167,1634	190,9029
$\epsilon_{pavarage}$ [m]	7,0552	21,0558	20,7595	28,41778	32,4535

Tab. B.10: Lokalizace bez omezení výpočtu pro $R = 17$ m

B.3 Podrobné výsledky simulace algoritmu Map-Growing s multilaterací - místnost 2 senzory

R[m]=12	Počáteční systém umístěn UPROSTŘED sítě				
ϵ_r [%]	± 10	± 20	± 30	± 40	± 50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	44,1588	194,8142	87,6733	172,9057	172,0302
$\epsilon_{pavarage}$ [m]	5,2990	23,3777	10,5208	20,7487	20,6436

Tab. B.11: Lokalizace bez omezení výpočtu pro $R = 12\text{ m}$

R[m]=13	Počáteční systém umístěn UPROSTŘED sítě				
ϵ_r [%]	± 10	± 20	± 30	± 40	± 50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	37,9047	60,7167	95,3875	159,5584	$1,2420 \cdot 10^6$
$\epsilon_{pavarage}$ [m]	4,9276	7,8932	12,4004	20,7426	161460

Tab. B.12: Lokalizace bez omezení výpočtu pro $R = 13\text{ m}$

R[m]=14	Počáteční systém umístěn UPROSTŘED sítě				
ϵ_r [%]	± 10	± 20	± 30	± 40	± 50
$\epsilon_{pavarage}$ [%R]	30,3031	57,3383	177,8150	88,9020	156,4788
$\epsilon_{pavarage}$ [m]	4,2424	8,0274	24,8941	12,4463	21,9070

Tab. B.13: Lokalizace bez omezení výpočtu pro $R = 14\text{ m}$

B.4 Vývoj možných optimalizačních algoritmů

B.4.1 Optimalizace na základě porovnání vzdáleností s rádiovým dosahem

N[-]=29, R[m]=15	Map-Growing	IMap4-Growing
ϵ_p [%R] ($\epsilon_r = +40\%$)	39,7548	35,3301
ϵ_p [%R] ($\epsilon_r = -40\%$)	58,8255	58,8225
ϵ_p [%R] ($\epsilon_r = \pm 40\%$)	49,2902	47,0778

Tab. B.14: Optimalizace - porovnání vzdáleností s rádiovým dosahem, $N[-] = 29$

N[-]=49, R[m]=14	Map-Growing	IMap4-Growing
$\epsilon_p [\%R] (\epsilon_r = +40\%)$	49,0482	56,5715
$\epsilon_p [\%R] (\epsilon_r = -40\%)$	60,2471	59,6515
$\epsilon_p [\%R] (\epsilon_r = \pm 40\%)$	54,6477	58,1115

Tab. B.15: Optimalizace - porovnání vzdáleností s rádiovým dosahem, $N[-] = 49$

B.4.2 Optimalizace na základě porovnání průměrné vzdálenosti s rádiovým dosahem

N[-]=29, R[m]=15	Map-Growing	IMap4-Growing
$\epsilon_p [\%R] (\epsilon_r = +40\%)$	39,7548	39,6036
$\epsilon_p [\%R] (\epsilon_r = -40\%)$	58,8255	58,8255
$\epsilon_p [\%R] (\epsilon_r = \pm 40\%)$	49,2902	49,2146

Tab. B.16: Optimalizace - porovnání průměrné vzdálenosti s rádiovým dosahem, $N[-] = 29$

N[-]=49, R[m]=14	Map-Growing	IMap4-Growing
$\epsilon_p [\%R] (\epsilon_r = +40\%)$	49,0482	45,1697
$\epsilon_p [\%R] (\epsilon_r = -40\%)$	60,2471	59,6515
$\epsilon_p [\%R] (\epsilon_r = \pm 40\%)$	54,6477	52,4106

Tab. B.17: Optimalizace - porovnání průměrné vzdálenosti s rádiovým dosahem, $N[-] = 49$

B.4.3 Optimalizace Mass-Spring

Počet iterací [–]	ϵ_r [%]			
	± 10	± 20	± 30	± 40
	$\epsilon_{pavarage}$ [% R]			
0	5,2889	10,8027	15,1206	12,3524
2	3,1943	6,5750	9,4717	13,5630
4	3,4692	6,9180	9,8178	12,2895
6	3,7955	7,5812	11,0362	13,6294
8	3,9749	7,9524	11,6770	14,6820
10	4,0661	8,1411	11,9697	15,2061
15	4,1400	8,2926	12,2167	15,6248
20	4,1506	8,3134	12,2675	15,7000
50	4,1452	8,2952	12,2670	15,7008
100	4,1448	8,2925	12,2614	15,6899

Tab. B.18: Mass-Spring - obecné řešení s počáteční energií 2.5

Počet iterací [–]	ϵ_r [%]			
	± 10	± 20	± 30	± 40
	$\epsilon_{pavarage}$ [% R]			
0	5,2889	10,8027	15,1206	12,3524
2	3,7431	7,5254	16,8062	16,7225
4	3,4850	7,0073	16,2364	17,2790
6	3,4110	6,8992	16,2211	21,7313
8	3,4733	7,0221	21,4354	21,9465
10	3,5129	7,1066	21,5175	22,0846
15	3,5528	7,2014	21,6310	22,2517
20	3,5618	7,2294	21,6744	22,3129
50	3,5661	7,2453	21,7066	22,3541
100	3,5662	7,2454	21,7067	22,3543

Tab. B.19: Mass-Spring - obecné řešení s energií 2.6

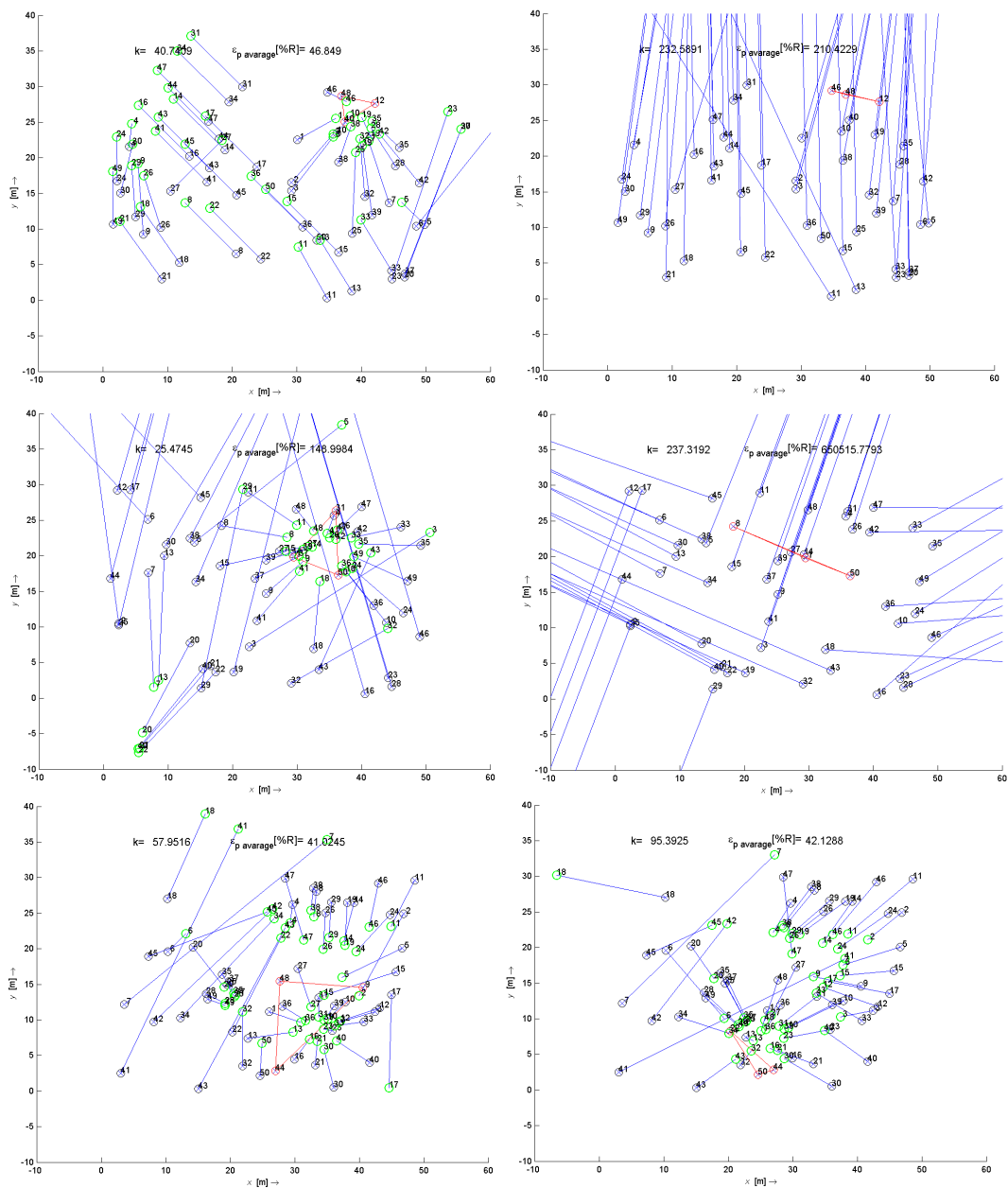
Počet iterací [–]	ϵ_r [%]		
	+40	–40	± 40
	ϵ_p [%R]		
0	39,7548	58,8255	49,2902
2	123,5622	70,2935	96,9279
4	71,9084	65,6928	68,8006
6	69,7021	52,8622	61,2822
8	53,0359	49,4127	51,2243
10	52,9936	49,8342	51,4139
15	72,2660	49,7015	60,9838
20	46,3840	49,3754	47,8797
50	46,0890	49,5629	47,8260
100	45,8760	49,0507	47,4634
200	45,8244	49,4268	47,6256
300	45,8238	49,4245	47,6242

Tab. B.20: Mass-Spring - řešení pro návrh patra univerzity s počáteční energií 2.5

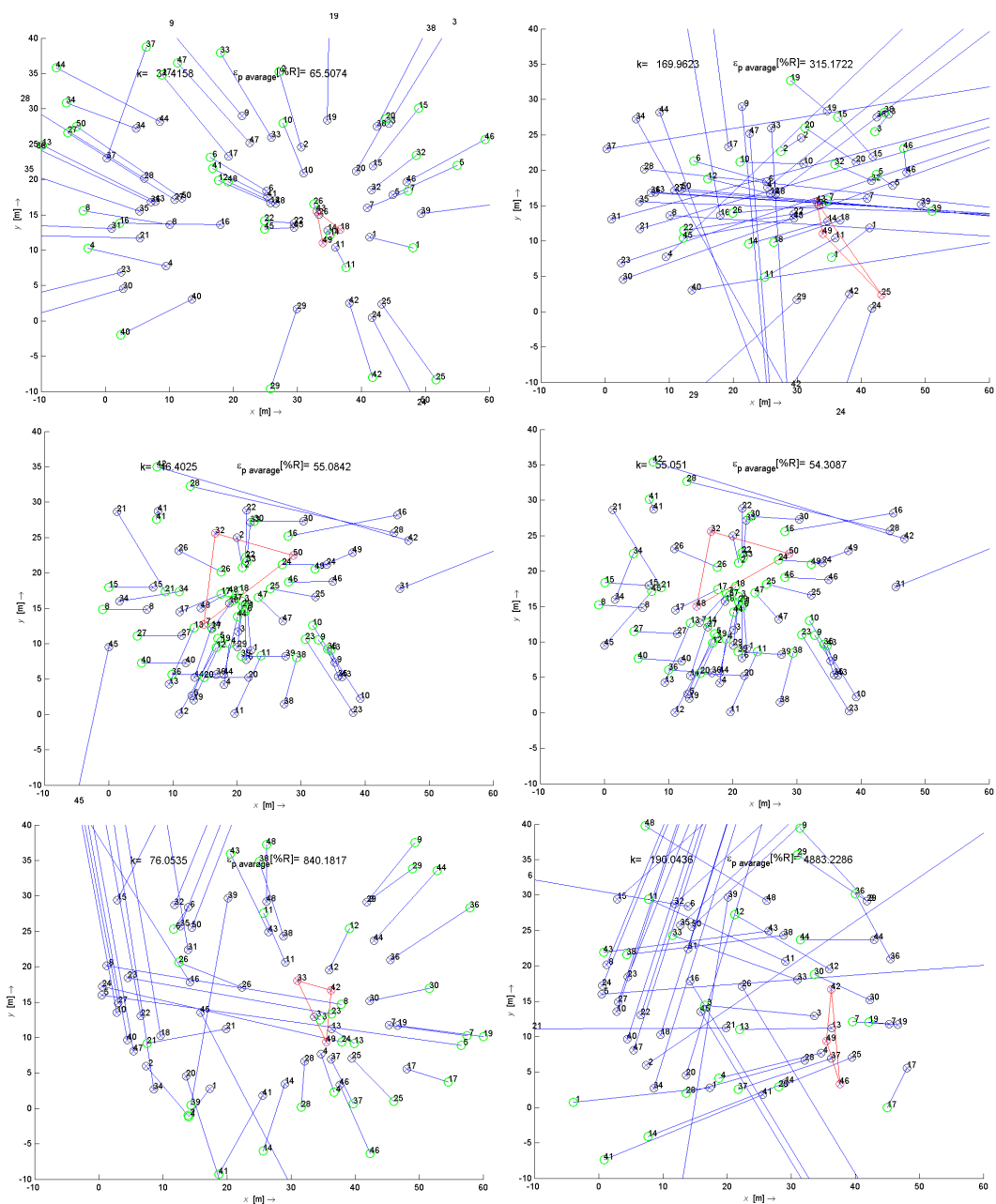
Počet iterací [–]	ϵ_r [%]		
	+40	–40	± 40
	ϵ_p [%R]		
0	39,7548	58,8255	49,2902
2	39,0917	208,9939	124,0428
4	38,4607	273,7669	156,1138
6	39,2875	65,9422	52,6149
8	39,0031	62,1688	50,5860
10	38,7665	61,3636	50,0651
15	42,2796	61,0346	51,6571
20	47,3561	61,3616	54,3589
50	52,7266	61,4353	57,0810
100	36,3071	61,3379	48,8225
200	36,2988	61,3884	48,8436
300	36,2977	61,3845	48,8411

Tab. B.21: Mass-Spring - řešení pro návrh patra univerzity s energií 2.6

B.5 Základní simulace problematiky lokalizace ve WSN

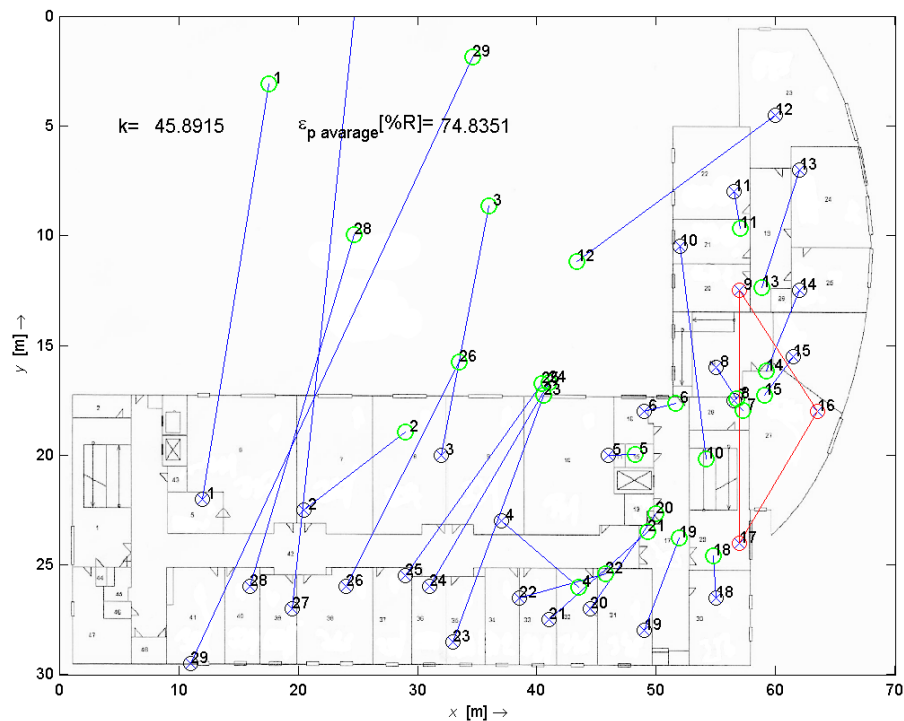


Obr. B.1: Simulace vlivu „dobrého“ a „špatného“ systému na lokalizaci uzlů

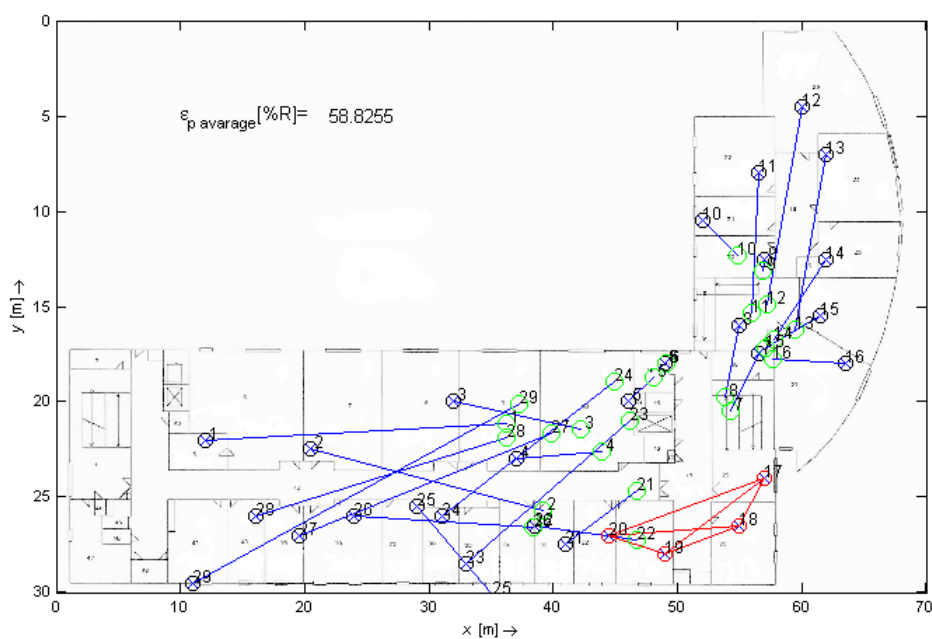


Obr. B.2: Simulace vlivu „dobrého“ a „špatného“ systému na lokalizaci uzlů

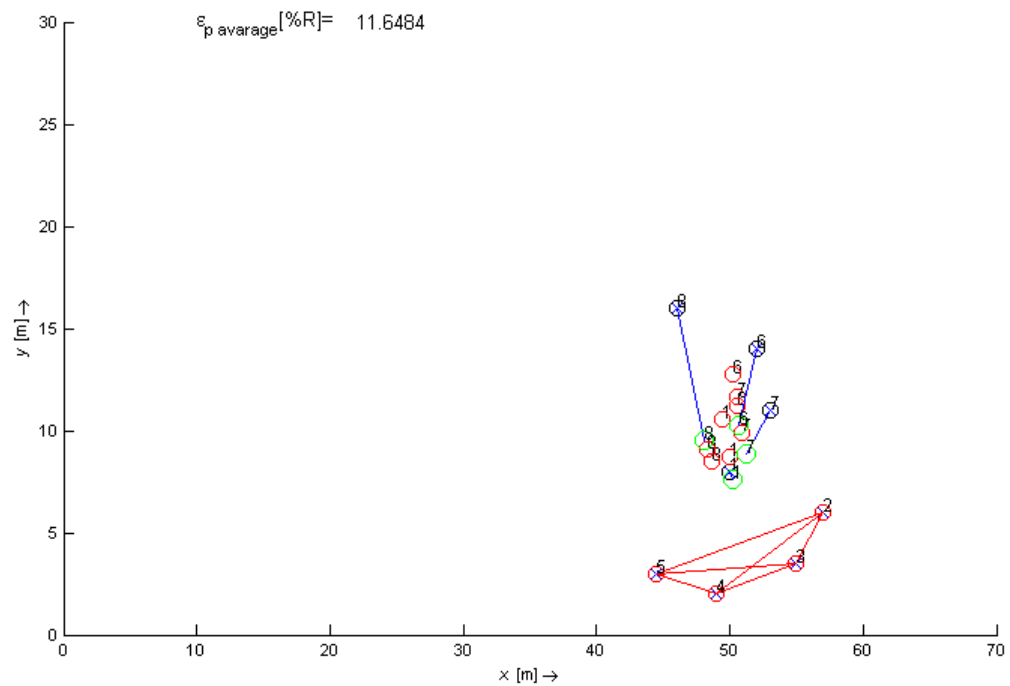
B.6 Nejlepší hodnoty lokalizační chyby pro návrh univerzitní sítě



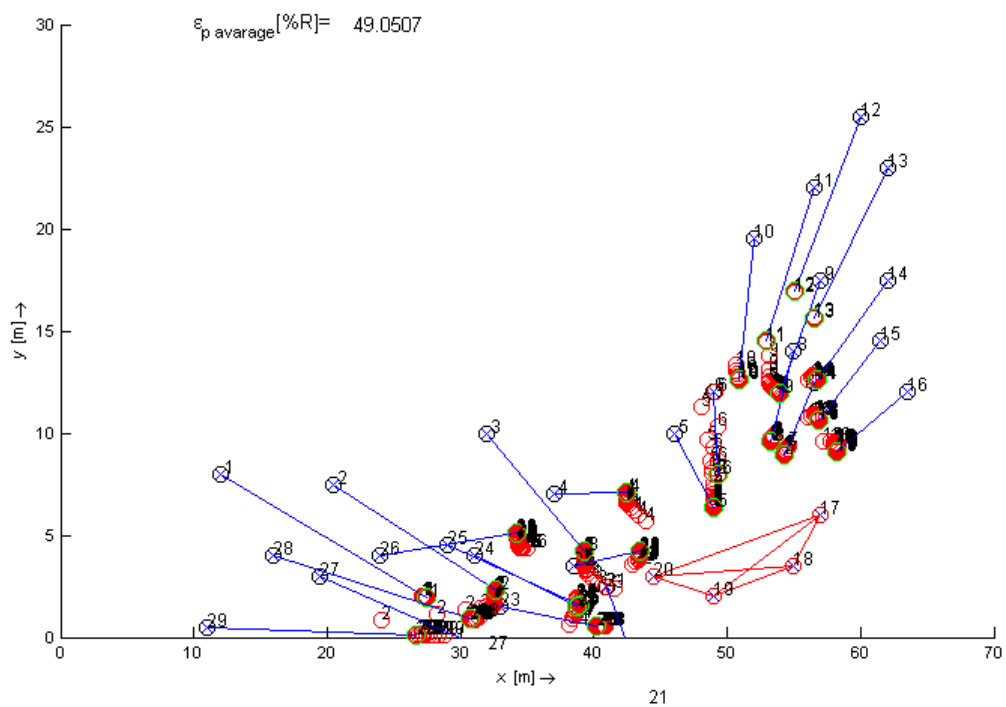
Obr. B.3: Nejlepší parametry trilaterálního počátečního systému pro $\epsilon_r = -40\%$



Obr. B.4: Nejlepší parametry multilaterálního počátečního systému pro $\epsilon_r = -40\%$



Obr. B.5: Obecné využití optimalizace při chybovosti prostředí –40% a počtu iterací dvě



Obr. B.6: Využití optimalizace při chybovosti prostředí –40% a počtu iterací sto - univerzitní budova

C PŘÍLOHA C

Na přiloženém CD jsou uloženy nejdůležitější výsledky jednotlivých simulací, které byly v diplomové práci řešeny. Dále jsou zde uvedeny příslušné soubory *m-file* pro možné prostudování řešení a odsimulování potřebné problematiky. Soubory byly vytvořeny a testovány v softwaru MATLAB 7.9.0(R2009b). Na CD je vytvořena adresářová struktura:

Obecné porovnání lokalizačních algoritmů

Porovnání čtyř kotevních systémů

Potřebné soubory a databáze testovaných sítí

Testování univerzitního patra trilaterací

Fig. soubory.