



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

VÝZKUM VLIVU ROZLOŽENÍ VSTUPNÍ CHYBY NA PRŮBĚH LOKALIZAČNÍHO PROCESU WSN

RESEARCH INTO INFLUENCE OF INPUT ERROR FORMAT ON LOCALIZATION PROCESS WSN

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. ONDŘEJ PEČENKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PAVEL HOLEŠINSKÝ

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Ondřej Pečenka

ID: 83360

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Výzkum vlivu rozložení vstupní chyby na průběh lokalizačního procesu WSN

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je popsat závislost odezvy lokalizačního procesu bezdrátové senzorové sítě (WSN) na rozložení chyby měření vzájemných vzdáleností mezi senzory. Nejdříve je nutné prozkoumat současné lokalizační protokoly, popsat vztahy mezi rozložením vstupní chyby lokalizačního procesu a jeho výsledkem. Na základě těchto vztahů poté navrhnout optimalizace.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] BULUSU N., JHA S., Wireless sensor networks. Boston: Artech House, 2005, 326 stran. ISBN: 978-1580538671.

[2] KUORILEHTO M., KOHVAKKA M., SUHONEN J. Ultra-Low Energy Wireless Sensor Networks in Practice Chichester: Wiley. 368 stran. ISBN: 978-0-470-05786-5.

Termín zadání: 29.1.2010

Termín odevzdání: 26.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Pavel Holešinský

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 je zaměřena na zkoumání dvou lokalizačních algoritmů iteračního algoritmu a spojového algoritmu simulovaných v prostředí MATLAB. Dále se provádí výzkum vlivu vstupních chyb na chyby vzniklé při lokalizaci sensorových uzlů zkoumanými algoritmy a hledání možných závislostí mezi vstupními chybami a lokalizačními chybami. Následně jsou předloženy možné způsoby optimalizace a jejich výsledky.

Klíčová slova: WSN, lokalizace, chyba, sensorový uzel, triangulace

Abstrakt

The diploma thesis is focused on two localization algorithms, iterative algorithm, and a linked algorithm simulated in MATLAB. Further, the investigation of the influence of input errors on the errors in localization of sensor nodes examined algorithms and explore possible relationships between the input errors and localization errors.

Keywords: WSN, localisation, error, sensor node, triangulation

PEČENKA, Ondřej. *Výzkum vlivu rozložení vstupní chyby na průběh lokalizačního procesu WSN*. Brno, 2009. 38 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Holešinský.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „*Výzkum vlivu rozložení vstupní chyby na průběh lokalizačního procesu WSN*“ 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 práce Ing. Pavlu Holešinskému za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce.

V Brně dne

.....

podpis autora

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| Úvod | 8 |
| 1. Úvod do WSN..... | 9 |
| 1.1. Odolnost vůči chybám na různých úrovních | 10 |
| 1.1.1. Hardwarová vrstva | 10 |
| 1.1.2. Softwarová vrstva..... | 11 |
| 1.1.3. Vrstva komunikačního síťového rozhraní..... | 11 |
| 1.1.4. Aplikační vrstva | 12 |
| 1.2. Detekce chyb a zotavení | 12 |
| 1.3. Topologie správy pro bezdrátové senzorové sítě | 13 |
| 2. Lokalizace..... | 15 |
| 3. Iterativní triangulace..... | 16 |
| 4. Triangulace | 17 |
| 4.1. Výpočet souřadnic algoritmem triangulace..... | 17 |
| 4.2. Kritické rozestavění referenčních bodů..... | 18 |
| 4.2.1. Nelokalizovaný uzel se nachází mezi dvěma referenčními body..... | 19 |
| 4.2.2. Dva referenční body mají stejnou y-ovou souřadnici | 19 |
| 4.2.3. Všechny tři referenční body se nacházejí na přímce | 20 |
| 5. Zkoumané lokalizační algoritmy..... | 21 |
| 5.1. Iterační algoritmus | 21 |
| 5.1.1. Chyby u iteračního algoritmu..... | 22 |
| 5.2. Spojový algoritmus | 22 |
| 5.2.1. Chyby u spojového algoritmu | 22 |
| 6. Zkoumání vlivu vstupní chyby | 23 |
| 6.1. Vliv vstupní chyby na iterační algoritmus..... | 23 |
| 6.1.1. Vyhodnocení výsledků u iteračního algoritmu | 24 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 6.2. | Vliv vstupní chyby na spojový algoritmus..... | 25 |
| 6.2.1. | Vyhodnocení výsledků u spojového algoritmu..... | 26 |
| 7. | Optimalizace | 27 |
| 7.1. | Optimalizace iteračního algoritmu | 27 |
| 7.1.1. | Optimalizace vhodným rozmístěním kotevních uzlů..... | 27 |
| 7.2. | Optimalizace spojového algoritmu..... | 30 |
| 7.2.1. | Optimalizace vhodným rozmístěním kotevních uzlů..... | 30 |
| 7.2.2. | Metoda použitá pro optimalizaci..... | 30 |
| 8. | Závěr..... | 35 |
| 9. | Použitá literatura..... | 36 |
| 10. | Seznam obrázků..... | 37 |

Úvod

Pokroky ve výzkumu v bezdrátových komunikacích a elektronice umožnily rozvoj nízko-nákladových, nízko-výkonových a multifunkčních senzorů, které mají malé rozměry a komunikují na malé vzdálenosti. Levné, inteligentní senzory, propojené prostřednictvím bezdrátového spojení, poskytují nebývalé možnosti pro monitorování a kontrolu domova, měst, průmyslu a životního prostředí. Propojené senzory mají široké spektrum využití v oblasti obrany a vytvářejí nové možnosti pro průzkum a dohled.

Senzory jsou většinou rozmístěny tak, že jejich pozice jsou náhodné a neznámé. Ve většině aplikací je potřeba znát souřadnice, kde se daná informace naměřila. Existují určité lokalizační postupy speciálně navržené pro WSN k hledání absolutní pozice senzoru. Správná lokalizace je závislá nejen na algoritmu lokalizace, ale i na jejích vstupních datech zkreslených chybou. Porovnáním závislostí chyb algoritmu lokalizace a chyb, které do něj vstupují, je možno optimalizovat samotný lokalizační algoritmus.

V této práci budou popsány některé algoritmy a metody v bezdrátových senzorových sítích, sloužící k lokalizaci uzlů. Dále bude řešena problematika chyb, týkající se lokalizace uzlů uvnitř sítě. Pomocí poskytnutých simulací v prostředí MATLAB, budou zkoumány dva algoritmy (iterační a spojový algoritmus) s hlavním zaměřením na vztahy mezi rozložením vstupní chyby v lokalizačním procesu a jeho lokalizační chybou.

Dále budou navrhnuty možné optimalizace obou zkoumaných algoritmů a následně v prostředí MATLAB simulovány.

1. Úvod do WSN

Bezdrátové sensorové sítě (WSN Wirelss Sensors Network) se obecně skládají z nezávislých sensorových uzlů, které měří fyzikální veličiny jako je teplota, zvuk, elektromagnetické pole, vibrace, tlak, pohyb nebo ekologické podmínky... Sensorové uzly navzájem spolupracují a plní úkoly jako snímání dat, datovou komunikaci a zpracování dat.

Počet sensorových uzlů se v různých WSN liší. Mohou se pohybovat od desítek až po miliony. Sensory mají (díky bateriovému napájení) omezené možnosti, ale jsou schopny pracovat i bez zásahu lidské obsluhy.

Rozvoj bezdrátových sensorových sítí byl motivován vojenskými aplikacemi ke sledování bojiště. Nyní jsou používány v mnoha průmyslových a civilních aplikačních oblastech. Např. sledování technologických procesů a jejich kontroly, sledování stavu strojů, sledování životního prostředí. WSN se také používají v oblasti zdravotnictví, domácí automatizaci a řízení provozu.

Kromě sensorů (uzlů), které mají ve WSN ještě jiné přídavné funkce (GPS), je každý uzel v síti obvykle vybaven rádiovým vysílačem/přijímačem nebo jiným zařízením pro bezdrátovou komunikaci (optický, zvukový vysílač/přijímač...), malým mikrokontrolérem a zdrojem energie, obvykle baterií. Snímací uzel se může lišit ve velikosti od krabice od bot až do velikosti zrnka prachu. Náklady na sensorové uzly jsou podobně variabilní. Pohybují se od tisíců korun až po pár desítek korun, v závislosti na velikosti senzoru nebo na složitosti (paměť, výpočetní rychlost, energetickou náročnost, šířku pásma atd.) požadované od každého jednotlivého senzoru v síti. Sensorové uzly mohou být nasazeny na zemi, ve vzduchu, ve vozidlech, na subjekty, pod vodou i uvnitř budov.

V bezdrátová komunikační technologie probíhají rychlé pokroky. Posledních několik let zažily prudký růst ve výzkumu v oblasti bezdrátových sensorových sítí. Komunikace ve WSN, probíhá přes prostorově distribuované autonomní uzly vybavené tak, aby byly schopny zpracovávat konkrétní informace.

Ve WSN, zejména v těch, které si získaly značnou popularitu v posledních letech, jsou typu ad-hoc, které přirozeně zdědí řadu vlastností a možností bezdrátové ad-hoc sítě, jako je schopnost infrastruktury - méně nastavení, minimální nebo žádné spoléhání na plánování sítí a schopnost uzlů samo-organizace a samo-nastavení bez účasti centrálního správce sítě jako směrovače, přístupového bodu nebo přepínače. Tyto vlastnosti pomáhají vytvořit WSN rychle

v situacích, kde neexistuje stávající nastavení sítě nebo v době, kdy o zřízení pevné infrastruktury sítě je považováno za neproveditelné. Například v dobách nouze nebo při záchranných operacích.

Uzly ve WSN jsou náchylné k selhání v důsledku vyčerpání energie, selhání hardwaru, chyby komunikačního spojení, zákeřnými útoky... Na rozdíl od celulárních sítí a ad-hoc sítě, které mají v podstatě neomezenou dodávku energie ze základnových stanic či baterie, která může být podle potřeby kdykoli nabita, uzly v senzorových sítích mají velmi omezenou zásobu energie a jejich baterie obvykle nemohou být znovu nabity nebo nahrazeny v důsledku nepřátelské nebo nebezpečného prostředí. Takže jedna z důležitých vlastností senzorových sítí je přísný napájecí management bezdrátových senzorových uzlů.

Senzorový uzel se skládá ze snímače a bezdrátového vysílače, většinou přímo v interakci s prostředím, které je předmětem různých fyzikálních, chemických a biologických faktorů. To vede k nízké spolehlivosti výkonnosti senzorových uzlů. I když stav hardware je dobrý, komunikace mezi senzorem uzlu je ovlivněna mnoha faktory, jako je síla signálu, úhel antény, překážky, povětrnostní podmínky a interference.

Odolnost vůči chybám, je schopnost systému poskytovat požadovanou úroveň funkčnosti za přítomnosti poruch. Vzhledem k tomu, že senzorové uzly jsou náchylné k selhání, mělo by se odolností vůči chybám zabývat v mnoha aplikacích senzorové sítě. Vlastně je to jedno z nejdůležitějších témat ve WSN.

1.1. Odolnost vůči chybám na různých úrovních

Pět úrovní odolnosti byly probírány v. Je to fyzická vrstva, vrstva hardwaru, systémová software vrstva, middleware vrstva a aplikační vrstva. Na základě studie je zařazena odolnost proti chybám ve WSN do čtyř úrovní dle systémového hlediska. Přesněji řečeno, odolnost proti chybám v systému WSN může existovat na hardware vrstvě, na softwarové vrstvě, síťové komunikační vrstvě a aplikační vrstvě.

1.1.1. Hardwarová vrstva

Vady na hardwarové vrstvě mohou být způsobeny poruchou jakékoli hardwarové komponenty senzorového uzlu. Jako je paměť, baterii, mikroprocesor, snímač nebo síťové rozhraní (bezdrátový vysílač). Existují tři hlavní důvody, které způsobí hardwarové selhání uzlů.

První důvod je, že v senzorových sítích jsou obvykle pro komerční použití použita levná čidla. Ne vždy používáme proto návrh senzorového uzlu nejkvalitnější komponenty.

Druhý důvod je, že přísná omezení energie může ohrozit dlouhý a spolehlivý výkon senzorových uzlů. Například výsledky senzoru mohou být nesprávné, když hladina energie baterie senzorového uzlu dosáhne určité úrovně.

Třetí důvod je, že senzorové sítě jsou často rozmístěny v náročných a nebezpečných prostředích, které mají vliv na běžný provoz snímače senzorových uzlů. Vysílače senzorových uzlů jsou vážně ovlivněny těmito faktory prostředí.

1.1.2. Softwarová vrstva

Software senzorového uzlu se skládá ze dvou složek: systémový software, jako jsou provozní systémy a middleware, software pro komunikace, směrování a agregaci. Důležitým prvkem systému je software pro podporu distribuovaných a simultánní provedení lokalizačních algoritmů. Softwarové chyby jsou společným zdrojem chyb ve WSN. Je obtížné stanovit odolnost proti chybám vzhledem k ekonomice jako na hardwarové úrovni. Četné chyby se vyskytují na úrovni middleware. Většina současných aplikací ve WSN jsou jednoduché. Je-li potřeba přizpůsobit aplikace bezdrátových senzorových uzlů reálnému životu, je potřeba budovat mnohem složitější middleware pro WSN

1.1.3. Vrstva komunikačního síťového rozhraní.

Chyby na vrstvě síťové komunikace jsou závady na bezdrátové komunikaci. Za předpokladu, že není poškozen hardware, linkové chyby ve WSN se obvykle týkají okolního prostředí. Kromě toho mohou být poruchy způsobeny také v souvislosti s rádiovým rušením čidla uzlů. Například uzel A nemůže úspěšně získat zprávy z uzlu B, jestliže uzel je rušen řadami dalších uzlů, které vysílají zprávy ve stejnou dobu. Standardním způsobem, s cílem zvýšit výkonnost bezdrátové komunikace, je použití agresivních režimů přenosu a opravy chyb. Tyto metody mohou způsobit další zpoždění provozu. Je třeba zdůraznit, že tam je vždy kompromis mezi odolností a výkonností.

1.1.4. Aplikační vrstva

Odolnosti proti chybám mohou být řešeny i na aplikační vrstvě. Například hledáním více uzlově-disjunktní cesty poskytující odolnost proti chybám ve směrování. Systém může přepínat z nedostupné cesty s nefunkčními odkazy na dostupného kandidáta. Nicméně, může přístup na odolnost proti chybám v žádosti nesmí být přímo použity i na jiných aplikacích. To vyžaduje, správné nastavení odolnost proti chybám podle různých aplikací a to případ od případu. Odolnost proti chybám na aplikační úrovni může být použita na řešení chyb v podstatě z jakýkoliv typu zdroje.

1.2. Detekce chyb a zotavení

Chtějí-li se vyřešit chyby ve WSN, měl by se systém řídit dvěma hlavními kroky.

Prvním krokem je schopnost detekce poruch. To jest zjištění, jestli specifická funkce není chybná, a předpovědět, zda bude i nadále fungovat v blízké budoucnosti. Poté, co systém detekuje chybu, je druhým krokem zotavení po poruše. Systém by měl být schopen se po poruše zotavit z chyb. V zásadě existují dva druhy detekčních metod: vlastní diagnóza a spolupráce při diagnóze. Některé chyby, které mohou být určeny snímačem, může uzel sám přijmout = vlastní diagnóza, detekce. Například závady způsobené vyčerpáním baterie si může sensorový uzel detekovat sám. Zbývající životnost baterie v sensorovém uzlu může být předpověděna na základě měření aktuálního napětí baterie.

Dalším příkladem je detekce selhání spojení. Snímač uzlu může objevit, že některé odkazy na jeden z jeho sousedů jsou chybné, pokud uzel neobdrží zprávu od souseda v předem stanoveném intervalu.

Nicméně existují některé druhy poruch, které vyžadují spolupráci diagnózy skupiny sensorových uzlů. Velká část chyb v WSN jsou tato kategorie. Například detekční metoda mající za úkol identifikovat vadný snímací uzel za použití detekce. Metoda detekce je založena na předpokladu, že sensorový uzel ve stejném oblasti by měl rozpoznat podobné hodnoty pokud je na pomezí oblasti události.

Tato metoda bere výsledky měření od všech sousedních uzlů a používá tyto výsledky pro výpočet pravděpodobnosti poruchy uzlu. Nejčastěji používané metody pro zotavení po poruše jsou replikace nebo propouštění komponent, které jsou náchylné k selhání. Například WSN obvykle slouží k pravidelnému sledování oblasti a k následnému předání dat základnové stanici. Když některé uzly neposkytnou data, základnové stanice ještě může dostat k dispozici

dostatečné údaje, pokud byly nadbytečné snímací uzly rozmístěny v oblasti snímání. Více cest a směřování je jiný příklad. V případě poskytování jednotné trasy, požadavek není možné nastavit nebo jej zachovat, pokud některé navázání vazeb na trase se nezdaří.

Chybový mechanismus v senzorových sítích typu single-hop byl studována v [1]. Základní myšlenkou je rozdělení paměti snímače do dvou částí - datové paměti a redundantní paměti. Datové paměti se používají k ukládání snímaných dat a dat získaných z chyb jiných čidel uzlů. Redundantní paměti slouží k ukládání redundantních dat pro budoucí využití.

1.3. Topologie správy pro bezdrátové senzorové sítě

Sítě vyžadují neustálé sledování, aby byl zajištěn důsledný a efektivní provoz. mezinárodní organizace pro normalizaci (ISO), vyvinula síťový model skládající se z pěti funkčních oblastí: chybový management, správu konfigurace, řízení bezpečnosti, řízení výkonnosti, a vedení účetnictví. Řízení konfigurace s sebou nese první set-síťových zařízení a průběžné sledování a ovládání těchto zařízení. Jedním z klíčových aspektů pro WSN řízení konfigurace je topologie správy, která zná uspořádání uzlů.

Topologie správy je klíčovou součástí řízení bezdrátových senzorových sítí. Primárním cílem topologie správy je, zachovat dostatek energie při udržování spojení k síti. Topologie správy obsahuje znalost fyzického propojení a logických vztahů mezi senzory. Další důležitým provedením topologie správy je podmnožina uzlů aktivně se účastnících pouze v rámci sítě, které tak vytváří méně komunikací a zachovávají energii v uzlech.

Topologie zahrnuje správu sítě stanice nebo základnových stanic, určení organizace nebo topologie uzlů v senzorové síti. Fyzické připojení a / nebo logické vztahy uzlů v síti jsou hlášeny na řídicí stanici, která v sobě udržuje mapu topologie WSN. Základnové stanice nebo správa sítě stanice, vyšle žádost o topologii do sítě. Každý uzel v síti bude reagovat na přijaté informace.

Existují tři základní přístupy považované za topologické. První z nich je přímý přístup. V rámci tohoto přístupu uzel okamžitě posílá odpověď zpět po obdržení topologie žádosti. Odpověď uzlu bude obsahovat informace pouze o tomto konkrétním uzlu.

Druhý přístup je agregovaný přístup. Uzel odešle žádost, ale nebude posílat okamžitě. Místo toho uzel počká, až dostane odpověď na svou žádost od podřízených uzlů. Uzel pak všechny údaje, které obdržel od podřízených uzlů, včetně vlastních informací pošle jako odpověď zpět na svou základovou stanici.

Třetí přístup je sdružený přístup, který tvoří skupiny nebo seskupení z uzlů. Jeden uzel v každé skupině je vybrán jako vůdce. Pouze vedoucí bude moci odpovídat na žádosti o

topologii. Odpověď bude obsahovat topologické informace o všech uzlech ve skupině. Bez ohledu na to, který z přístupů je používán.

Topologii WSN je důležité znát pro účinnou a efektivní správu sítě WSN. Ačkoli znalost topologie přímo neřeší šetrnost energií, znalost topologie WSN mohou být užitečné pro jiné algoritmy, které mají za cíl energii ušetřit. Jedním ze způsobů úspory energie v uzlu, je způsob zapnutí uzlu jen když je ho potřeba. Jinak se uzel vypne nebo zapne do režimu spánku. WSN jsou obvykle velmi hustě pokryty, což znamená, že existuje mnoho uzlů v každé oblasti sítě. Například oblast, která má deset uzlů, ale stačí, aby byly nasazeny pouze tři uzly k získání úplného pokrytí plochy. To znamená, že sedm uzlů odesílá data, která jsou duplicitní nebo nadbytečná. Tyto dodatečné uzly jsou považovány za nadbytečné uzly a nemusí vždy být nutné. Když tyto nadbytečné uzly nejsou potřeba přepnou se do režimu spánku. Určení, které uzly jsou nadbytečné, které uspat, a které probudit, je opět jsou úkolem algoritmů cyklu řízení.

2. Lokalizace

Lokalizace ve WSN je důležitá, pokud jednotlivé sensorové uzly sítě neznají svoji polohu. Pokud se sensorová síť například používá pro monitorování vlhkosti v budově, je pravděpodobné, že budeme znát přesnou polohu každého uzlu. Naopak, je-li sensor sítě používán pro měření v rozlehlé oblasti, mohou být uzly dopraveny na místo například z letadla a přesné umístění většiny sensorů může být neznámé. Problém pak je, že velké množství sensorů je nasazeno náhodně, a jen málo z nich (kotevní uzly) si je vědomo svého umístění (například pomocí GPS). Cílem je určit nejlepší způsob, jak umožnit všem uzlům si odvodit svou vlastní polohu. Účinný lokalizační algoritmus pak může využít veškeré dostupné informace z bezdrátových sensorových uzlů a odvodit polohu jednotlivých zařízení.

Řada metod lokalizace je založena na získávání informace o vzdálenosti od sousedního uzlu nebo o směru odkud signál přichází. Přestože vzdálenosti nelze měřit přímo, mohou být alespoň teoreticky odvozeny z doby šíření signálu mezi dvěma uzly nebo z útlumu signálu. K získání informace o směru, kde se uzel nachází, je potřeba systému směrových antén. V 2D prostoru můžeme lokalizovat uzel třemi metodami.

- 1) Metoda, kdy známe vzdálenost a směr ze známého bodu o známých souřadnicích $[x, y]$
- 2) Metoda, kdy známe směr z různých dvou bodů o známých souřadnicích $[x_1, y_1]$ a $[x_2, y_2]$ (AoA algoritmus)
- 3) Metoda kdy známe vzdálenosti ze tří bodů o známých souřadnicích $[x_1, y_1]$, $[x_2, y_2]$ a $[x_3, y_3]$ (ToA, TDoA, RSS algoritmy)

Metody, které využívají směrových antén, jsou ovšem v praxi velmi nepraktické. Nejjednodušší metodou je metoda vyžadující znalosti o vzdálenosti aspoň tří uzlů se známými pozicemi.

Lokalizace je nepostradatelná také z hlediska energetické úspory, protože s využitím lokalizace mohou být navrženy mechanismy pro vytváření efektivnější hierarchické struktury, které budou směřovat k efektivnějšímu rozložení energetické zátěže mezi uzly a tím prodlužovat bez údržbovou dobu provozu celé sítě a také zkvalitňovat její správu.

3. Iterativní triangulace

Triangulace v 2D prostoru je metoda určení polohy neznámého bodu za pomoci tří dalších bodů (referenční body), u kterých známe jejich polohu. V rozsáhlých sítích na začátku lokalizace uzlů, zná svou polohu jen pár uzlů. A ne všechny uzly leží v komunikačním dosahu tří referenčních uzlů. Proto musí lokalizace proběhnout v několika iteračních kolech, ve kterých se postupně lokalizují i ostatní uzly sítě. U iterační triangulace jednotlivé uzly mohou pracovat v různých režimech.

- Pasivní režim

Uzel odposlouchává pozice od okolních uzlů v dosahu. Následně si určí na základě signálu vzdálenost od okolních uzlů. Pokud získá vzdálenost od tří různých uzlů, je schopen, pomocí triangulace, si určit svou vlastní polohu.

- Aktivní režim

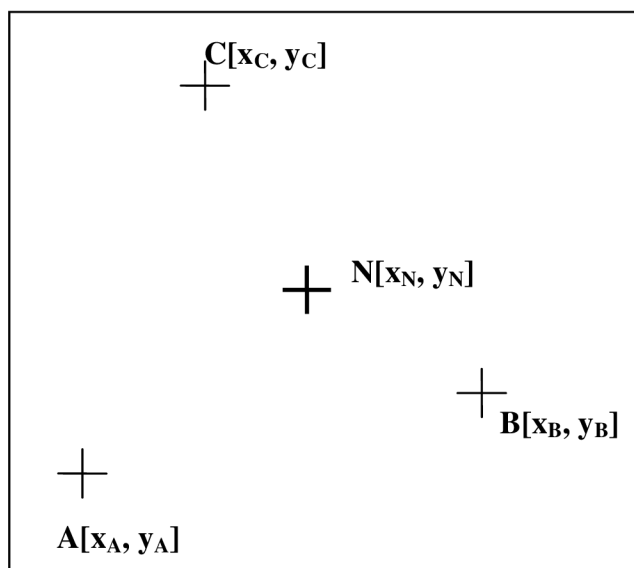
Uzly posílají do všech směrů svoji pozici

4. Triangulace

Je to způsob kde nemá nelocalizovaný uzel informaci o směru od žádného okolního referenčního uzlu, ale zná alespoň svou vzdálenost od tří referenčních uzlů. Samotný výpočet polohy pak využívá Pythagorovu větu.

4.1. Výpočet souřadnic algoritmem triangulace

Nyní bude obecně popsáno, jak pracuje triangulační algoritmus bez reálných vlivů prostředí jako jsou například chyby měření. Mějme nelocalizovaný sensorový uzel N o neznámých souřadnicích $[x_N, y_N]$ a v jeho dosahu je minimální počet referenčních uzlů. Tj. tři referenční uzly např. A, B, C o známých souřadnicích $[x_A, y_A]$, $[x_B, y_B]$ a $[x_C, y_C]$, jak ukazuje (Obr. 1).

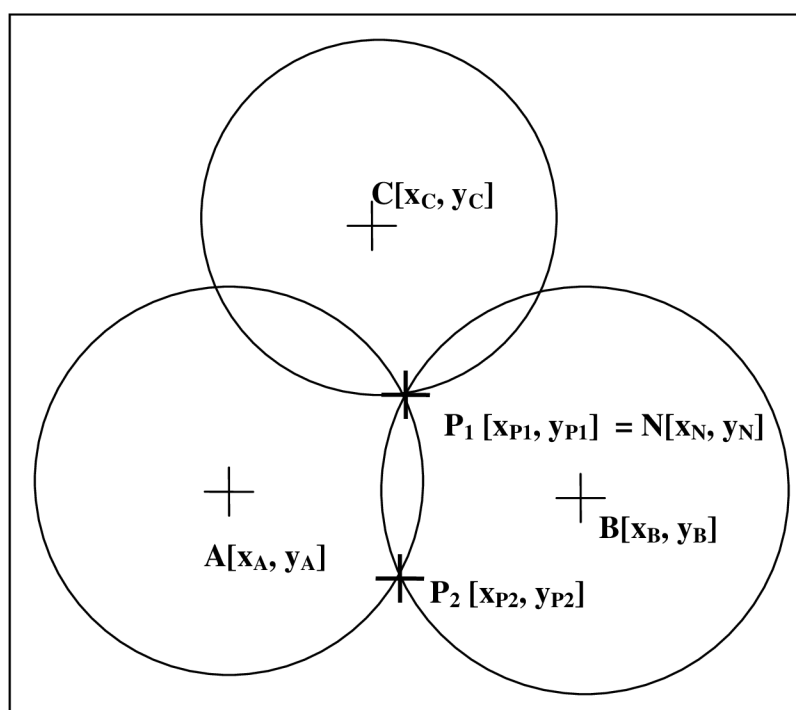


Obr. 1 Rozmístění sensorových uzlů před triangulaci

Aby mohl být zahájen triangulační algoritmus, je zjištěna vzdálenost od každého referenčního uzlu k sensorovému uzlu N. Vzdálenost je zjištěna buď podle doby letu signálu nebo útlumu signálu,.

Poté je vybrán jeden z referenčních uzlů (např. A). Podle vzdálenosti od něj zjištěna

potencionální oblast kde se vyskytuje. Oblastí je kružnice kolem bodu A. Dále je zjištěna potencionální oblast výskytu podle vzdálenosti od druhého referenčního bodu (např. B). Tou je opět kružnice kolem bodu B. Průnikem těchto dvou oblastí (kružnic) vzniknou dva průsečíky $P_1 [x_{P1}, y_{P1}]$ a $P_2 [x_{P2}, y_{P2}]$, neboli dvě možné polohy jeho výskytu o souřadnicích, které lze dopočítat. Souřadnice průsečíku, jehož vzdálenost je rovna vzdálenosti uzlu N od posledního referenčního uzlu C, jsou právě souřadnice nelokalizovaného uzlu N. Grafické znázornění algoritmu triangulace je znázorněné na (Obr. 2).



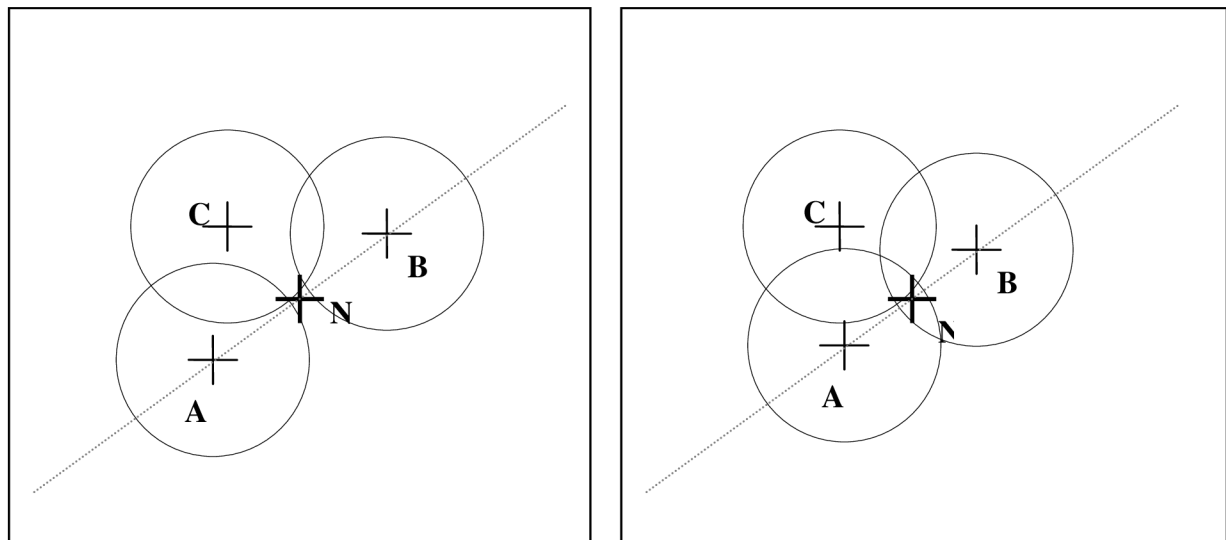
Obr. 2 Grafické znázornění algoritmu triangulace

4.2. Kritické rozestavění referenčních bodů

Jestliže by nedocházelo k chybám v měření vzdálenosti mezi sensorovými uzly, algoritmus triangulace by dokázal přesně určit pomocí referenčních uzlů polohu nelokalizovaného uzlu. Ovšem v praxi vlivem nežádoucích jevů vzniká v samotného měření chyba. Tato chyba je nazývána vstupní chybou, která velmi ovlivňuje proces triangulace a určení přesných souřadnic nelokalizovaného uzlu. Díky chybám měření vzdálenosti, je potřeba optimalizovat algoritmus triangulace při kritických vzájemných polohách nelokalizovaného uzlu a referenčních bodů.

4.2.1. Nelokalizovaný uzel se nachází mezi dvěma referenčními body

V tomto počátečním uspořádání, kdy nelokalizovaný uzel leží na pomyslné přímce mezi dvěma referenčními body nebo velmi blízko pomyslné přímky, mohou vlivem chybného určení vzdálenosti nastat dvě různé situace (Obr. 3).



a) b)
Obr. 3 Nelokalizovaný uzel se nachází mezi dvěma referenčními body

- Součet změřených vzdáleností od dvou referenčních uzlů je menší než součet skutečných vzdáleností (Obr.4a). V této situaci i při malé chybě velmi často dojde k tomu, že se kružnice neprotnou a není proto možné spolehlivě určit průsečík. To by znamenalo, že tento uzel by nemohl být lokalizován.
- Součet změřených vzdáleností od dvou referenčních uzlů je větší než součet skutečných vzdáleností (Obr.4b). V tomto případě, kdy by se bez přítomnosti chyby dotýkaly kružnice tečně (nelokalizovaný uzel leží na přímce) nebo oba průsečíky by byly velmi blízko (nelokalizovaný uzel leží blízko přímky), roste chyba velmi rychle. Tento nežádoucí výsledek do jisté míry je řešen mechanismem rotace referenčních uzlů. [2]

4.2.2. Dva referenční body mají stejnou y-ovou souřadnici

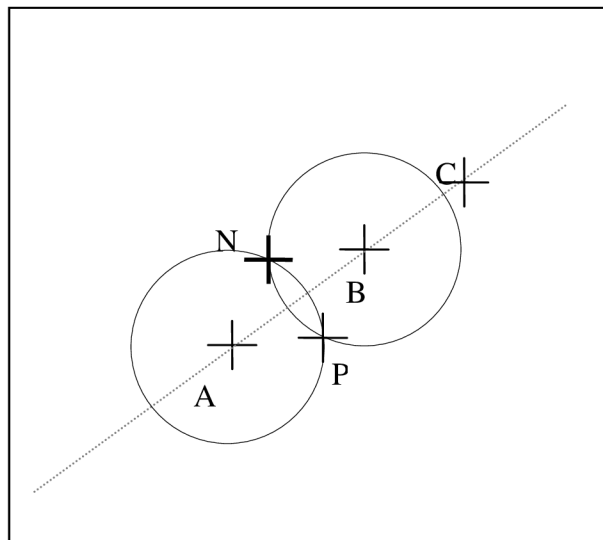
Pokud budou mít dva referenční body přesně stejné y-ové souřadnice, tak může dojít k nalezení pouze jednoho ze dvou možných průsečíků. Druhý průsečík bude ztracen a v případě, že je tím správným, dojde při určení pozice uzlu k velké odchylce.

Tuto situaci je nutné detekovat kontrolou shodnosti souřadnic. V případě většího počtu

dostupných referenčních bodů je řešení možné výběrem takové trojice referenčních bodů, u kterých k této situaci nedochází. Dalším možným řešením je vyřazení problémové dvojice referenčních uzlů ze tří možných kombinací dvojic při využití rotace referenčních bodů. Tento problém je také možné obejít matematicky záměnou x-ové a y-ové osy. Pro jednotlivé hodnoty na y-ové ose se budou počítat příslušející hodnoty x-ové osy[2].

4.2.3. Všechny tři referenční body se nacházejí na přímce

V tomto počátečním uspořádání, kdy všechny tři referenční body leží na přímce, se může v konečné fázi triangulace vybrat nesprávný průsečík. Problém znázorňuje (Obr. 4).



Obr. 4 Tři referenční body na přímce

Proběhne část triangulace, kdy vzniknou dva průsečíky N a P. Bod N je správná poloha sensorového uzlu, bod P je chybný průsečík. Oba jsou ve stejné vzdálenosti, popřípadě velice podobné vzdálenosti od bodu C. Teď se má rozhodnout podle vzdálenosti od třetího referenčního bodu C, který průsečík je správný. Pokud by kvůli chybě měření byla vzdálenost od uzlu N k C naměřena větší, byla by vyhodnocena správná umístění v bodu P. Průsečík N by se zrcadlil na průsečík P. Což by způsobilo chybu rovnu vzdálenosti mezi uzly P a N.

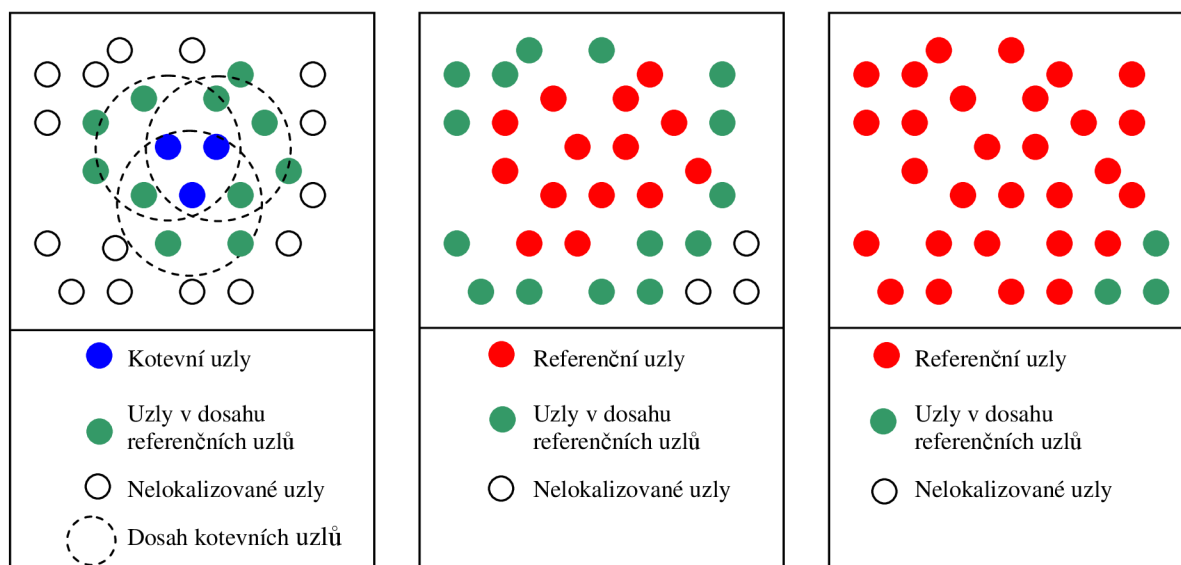
5. Zkoumané lokalizační algoritmy

Vliv rozložení vstupní chyby na lokalizačním procesu měl být určen u dvou lokalizačních algoritmů. Oba tyto algoritmy potřebují ke své činnosti minimální počet kotevních uzlů, které jsou vybaveny GPS modulem a jsou schopny zjistit svou globální geografickou pozici.

5.1. Iterační algoritmus

Podstata iteračního algoritmu je lokalizovat během každé iterace pomocí referenčních uzlů vždy alespoň jeden sensorový uzel. Dokud se postupně lokalizuje celá WSN (Obr. 5).

Na začátku se umístí dovnitř sensorového pole alespoň minimální počet kotevních uzlů potřebných pro triangulaci (tedy tři) vybavené GPS modulem. Tudíž tyto tři kotevní uzly znají jako jediné svou polohu a jsou tedy zatím jedinými referenčními body. Referenční body vysílají signál. Každý nelokalizovaný sensorový uzel naslouchá a může tento signál zachytit a z jeho vlastností si určit vzdálenost od referenčního uzlu. Jestliže si zjistí vzdálenost od tří různých referenčních uzlů, může proběhnout lokalizace triangulačním procesem. Tímto získá uzel svou polohu a stává se referenčním uzlem. Pokud je síť dostatečně hustá tj. každý uzel má ve svém dosahu alespoň tři další, dokážou se lokalizovat všechny uzly ve WSN.



Před 1. iterací

1. iterace

2. iterace

Obr. 5 Iterační algoritmus

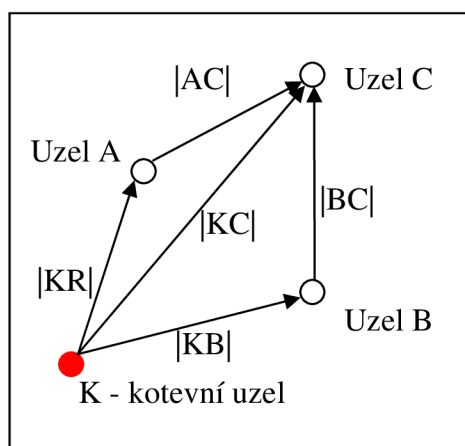
5.1.1. Chyby u iteračního algoritmu

Do každého kroku iterace vstupuje chyba způsobená měřením vzdálenosti nelokalizovaného uzlu k jeho třem referenčním uzlům. To se projeví ve výsledku triangulace a vzniká tzv. lokalizační chyba, která se pak dál šíří sítí a postupně strmě narůstá.

5.2. Spojový algoritmus

U spojového algoritmu musí být rozmístěné alespoň tři kotevní uzly ve WSN, ale na rozdíl od iteračního algoritmu mohou mít jakoukoli polohu. Uzel v dosahu kotevního uzlu si zjistí, jak je od něj vzdálen a tuto informaci dále šíří sítí. Další uzel v dosahu tuto informaci převezme a změří si vzdálenost od uzlu, od kterého informaci přijal. Obě dvě vzdálenosti sečte, čímž zjistí vzdálenost od kotevního uzlu. Uloží ji do paměti a dále šíří sítí. Každý uzel může dostat různé informace o vzdálenosti ke stejnému kotevnímu uzlu. Vybere si proto vždy tu nejkratší. Například z (Obr. 6) vyplývá, že si uzel C uloží vzdálenost $|KA| + |AC|$ od kotevního uzlu K, protože jak je vidět $|KA| + |AC| < |KB| + |BC|$.

Když každý z nelokalizovaných uzlů získá informaci o vzdálenosti ke všem třem kotevním uzlům, metodou triangulace lokalizuje svou absolutní polohu.



Obr. 6 Znárodnění více cestního šíření lokalizační informace

5.2.1. Chyby u spojového algoritmu

Protože u spojového algoritmu je lokalizace každého uzlu závislá pouze na jednom triangulačním procesu, lokalizační chyba tolik neovlivňuje výsledek lokalizace. Ovšem je tu velmi vysoká vstupní chyba, která je způsobena jak chybou měření vzdáleností mezi uzly, tak i způsobem získávání vzdáleností nelokalizovaných uzlů ke kotevním uzlům. Podle (Obr. 6) tato chyba je rovna vzdálenosti $||KA| + |RC| - |KC| |$.

6. Zkoumání vlivu vstupní chyby

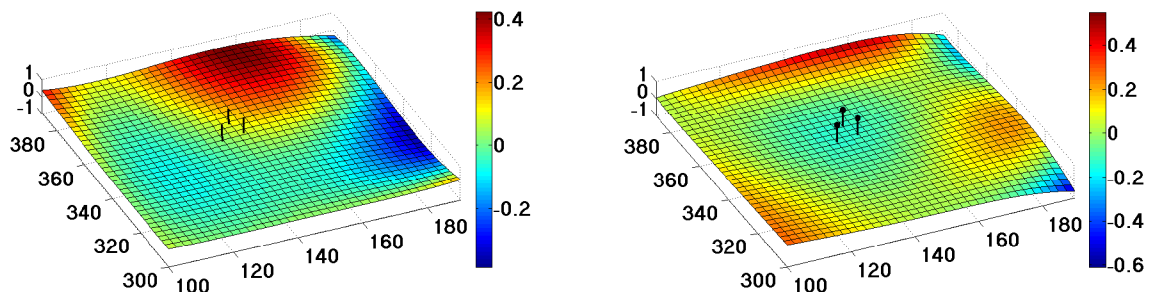
Ke sledování vlivu vstupní chyby na chybu lokalizace, byly k dispozici dvě programové simulace v prostředí MATLAB. Zkoumán byl iterační algoritmus a spojový algoritmus. Jak byly oba algoritmy naprogramovány a co vše zahrnují je uvedeno v [1]. Kvůli zajištění stejných podmínek, velikost vlivu RSSI (Received Signal Strength Indication) je u všech simulací stejná. Z výsledků simulací se vypočítávaly vstupní a lokalizační chyby. Pro zkoumání jsem použil čistě čtvercový typ sítě. „Čtvercová síť poskytuje stálé a opakovatelné vstupní podmínky, důležité pro vývoj, analýzu a vzájemné srovnávání různých lokalizačních algoritmů.“[2].

6.1. Vliv vstupní chyby na iterační algoritmus

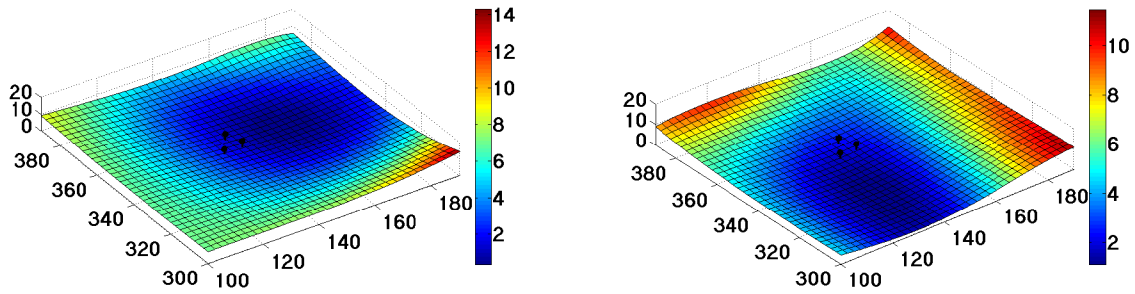
Všem uzlům sítě byla vypočítána a přiřazena vstupní chyba a lokalizační chyba. A to tak, že ke každému uzlu byly měřeny tři vzdálenosti. Tj. tři vzdálenosti zatížené chybou měření od třech referenčních uzlů, které se podílely na jeho lokalizaci. Vstupní chyba byla pak počítána jako aritmetický průměr těchto tří chyb.

Lokalizační chyba byla vypočítána jako vzdálenost mezi skutečnou pozicí sensorového uzlu a polohou odhadnutou iteračním algoritmem.

Tímto byly získány dvě matice – matice vstupních chyb a matice chyb lokalizace, které popisovaly plošné rozložení chyb ve čtvercové WSN. Na (Obr. 7) a (Obr. 8) jsou ukázky chyb v sensorových polích. Umístění velikostí vstupních chyb je náhodné. Způsobuje to náhodný vliv RSSI. Kdežto lokalizační chyba je nejmenší v okolí kotevních uzlů (označené jako tři tečky uprostřed) a zvětšuje se ke kraji sítě. Důvodem je její nárůst při každé iteraci.

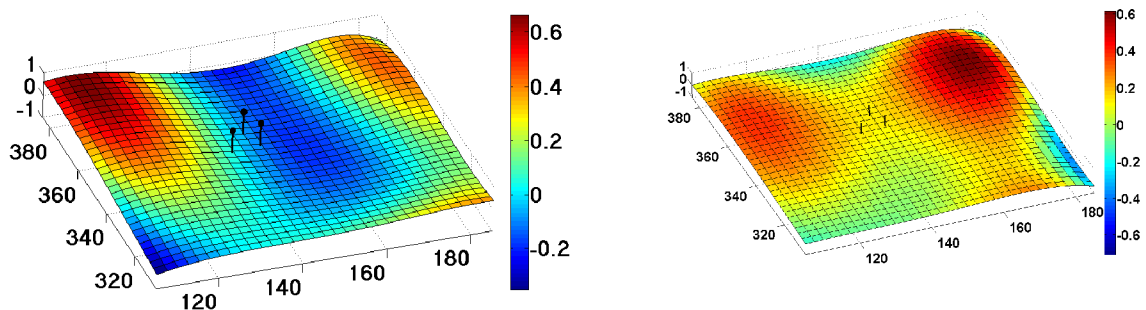


Obr. 7 Plošné rozložení vstupní chyby – iterační algoritmus



Obr. 8 Plošné rozložení lokalizační chyby – iterační algoritmus

Pro porovnání vzájemného vlivu byl v prostředí MATLAB vytvořen program. V něm byly obě matice korelovány maskou 2x2 postupně po řádcích přes celé sensorového pole, aby byla získána pouze lokální podobnost obou matic (Obr. 9).



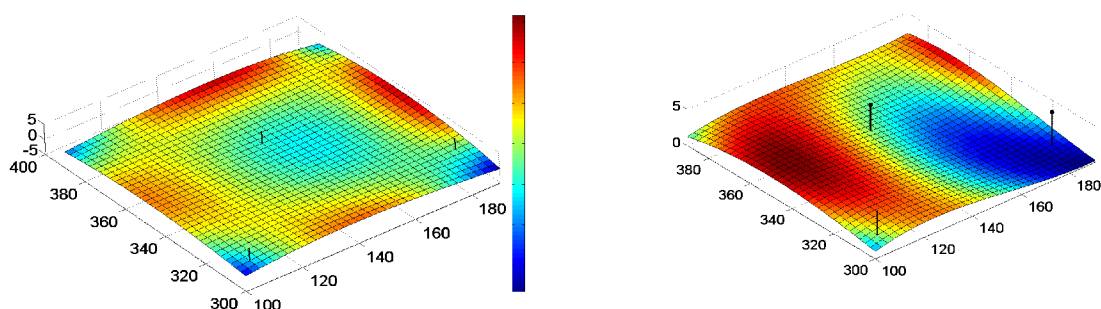
Obr. 9 Plošné rozložení závislosti lokalizační chyby a vstupní chyby – iterační algoritmus

6.1.1. Vyhodnocení výsledků u iteračního algoritmu

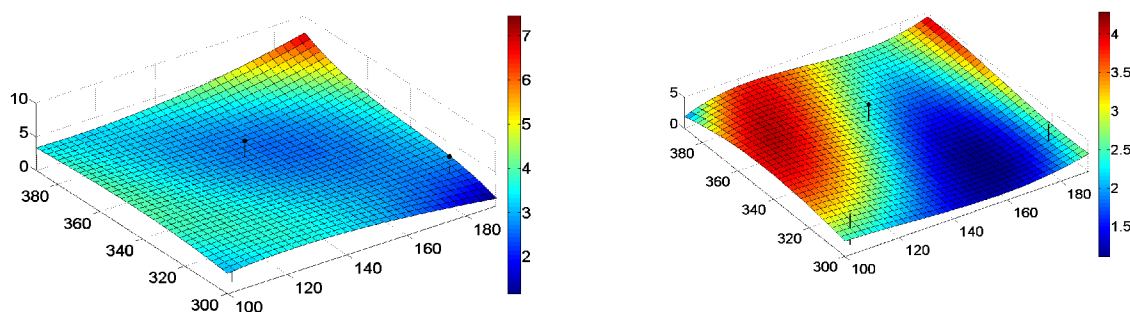
Pozorováním výskytu a velikosti vstupní a lokalizační chyby u mnoha simulací, nebyla zpozorována příliš významná závislost. Různě velké vstupní a výstupní chyby se objevovaly u různých simulací na odlišných místech. Malou podobnost potvrzovaly i koeficienty ve výsledných korelačních maticích. Vysoké korelační koeficienty se vyskytovaly jen v několika lokacích.

6.2. Vliv vstupní chyby na spojový algoritmus

Opět byly přiděleny každému uzlu sítě obě chyby a vytvořeny tak dvě matice vstupních a lokalizačních chyb. Vstupní chyba byla počítána jako aritmetický průměr třech chyb u měření vzdáleností od uzlu ke všem třem kotevním uzlům. Lokalizační chyba se vypočetla stejně jako u iteračního algoritmu. Na (Obr. 10) a (Obr. 11) jsou vidět příklady rozložení těchto chyb u spojového algoritmu.

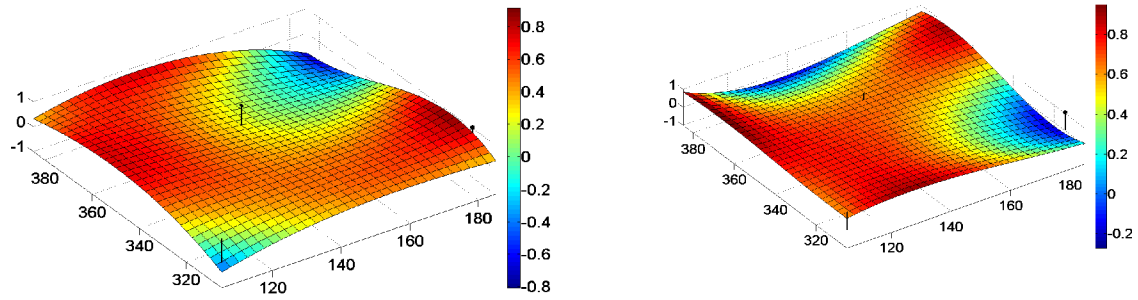


Obr. 10 Plošné rozložení vstupní chyby – spojový algoritmus



Obr. 11 Plošné rozložení lokalizační chyby – spojový algoritmus

Matice se opět korelují postupně maskou 2x2. Dostáváme pak závislost těchto dvou chyb na rozložení v ploše (Obr. 12).



Obr. 12 Plošné rozložení závislosti lokalizační chyby a vstupní chyby – spojový algoritmus

6.2.1. Vyhodnocení výsledků u spojového algoritmu

Ve zkoumané simulaci spojového algoritmu už lze najít pozorováním výsledků daleko vyšší zákonitosti než tomu tak bylo u iteračního algoritmu. Dokazují to i výsledky korelací mezi oběma chybami v mnoha simulacích. Za povšimnutí stojí, že vysoké korelační hodnoty se vyskytují v podobných oblastech ve vztahu s polohami kotevních uzlů. Což by se mohlo také využít v optimalizaci algoritmu.

7. Optimalizace

Aby bylo možné optimalizovat úlohu, je k tomu potřeba soubor proměnných nebo vlastností týkajících se daného problému. Zkoumáním vlivu jednotlivých proměnných na danou úlohu lze najít nebo vypočítat jisté zákonitosti, které lze k optimalizaci použít.

U algoritmů, které se používají k lokalizaci senzorů je těchto vstupních veličin velice málo, obzvláště ve WSN sítích se senzory používající jen jednoduché funkce určené k lokalizaci.

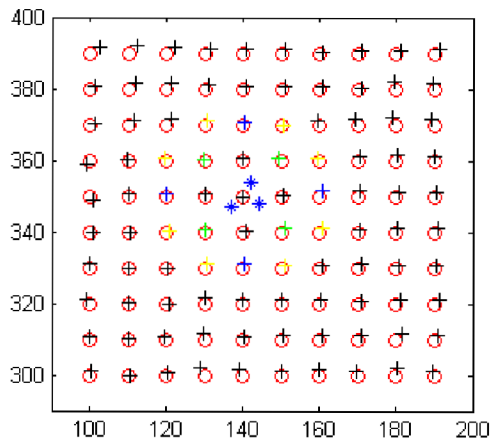
Nejednodušší možnost optimalizace u obou uvedených algoritmů se nabízí optimalizace přidáním více kotevních uzlů a jejich vhodným rozmístěním po sensorovém poli. Vhodným rozmístěním je v případě spojového algoritmu myšleno nenahustit jednotlivé kotevní uzly na jedno místo, ale rozmístit je rovnoměrně po celé WSN. Tímto se dosáhne, že naměřené vzdálenosti potřebné k lokalizačnímu procesu se zmenší a tudíž budou i menší chyby vstupující do průběhu lokalizace. Ovšem za cenu vyššího počtu kotevních uzlů a tudíž i vyšší ceny. U iteračního algoritmu až trojnásobného počtu oproti spojovému algoritmu, protože na rozběhnutí lokalizace potřebuje právě tři u sebe rozmístěné kotevní uzly. Kdežto u spojového algoritmu rozmístění kotevních uzlů funkčnost neovlivňuje.

Bude se tedy předpokládat jistá hustota rozmístění kotevních uzlů. Protože u obou algoritmů je nejmenší možný počet, z důvodu funkčnosti, tři kotevní uzly. Celá WSN se dá rozdělit na jednotlivé menší WSN, které budou obsahovat právě jenom tři kotevní uzly. Optimalizována bude síť s hustotou tří kotevních uzlů na sto nelokalizovaných sensorových uzlů.

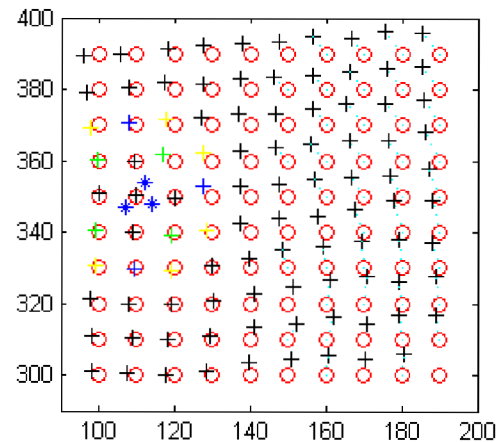
7.1. Optimalizace iteračního algoritmu

7.1.1. Optimalizace vhodným rozmístěním kotevních uzlů

Jak už bylo řečeno iterační algoritmus je vysoce závislý na šířící se lokalizační chybě v každém iteračním kole. Je zapotřebí zajistit, aby počet iterací, za které se pole WSN celé lokalizuje, byl co nejmenší. Z tohoto vyplývá, že kotevní uzly musí být umístěny ve středu WSN. Předpoklad nám potvrzuje Obr. 13. Simulace byla provedena s mírně nepravidelnou čtvercovou sítí a s chybovostí 10%.



a) Kotevní uzly ve středu pole

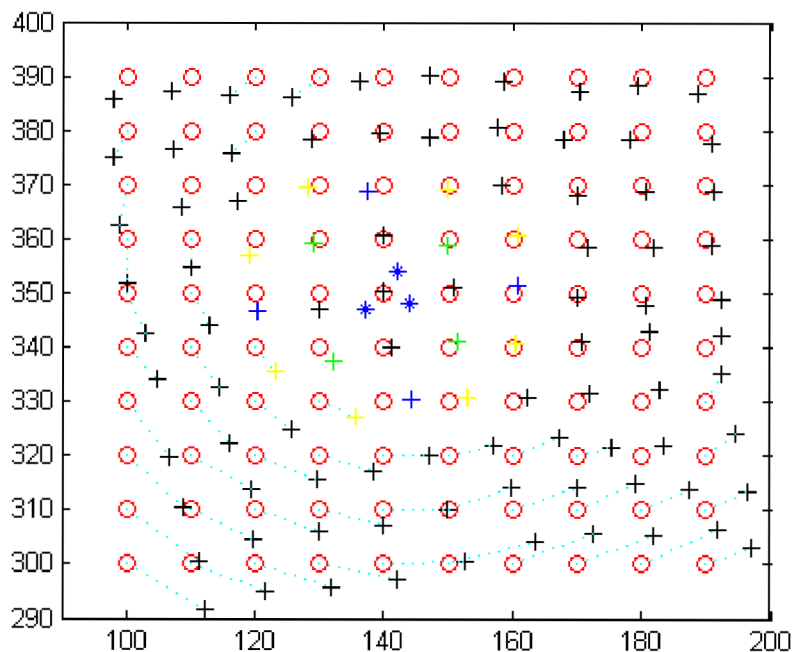


b) Kotevní uzly mimo střed

Obr. 13 Kotevní uzly podle umístění ve WSN

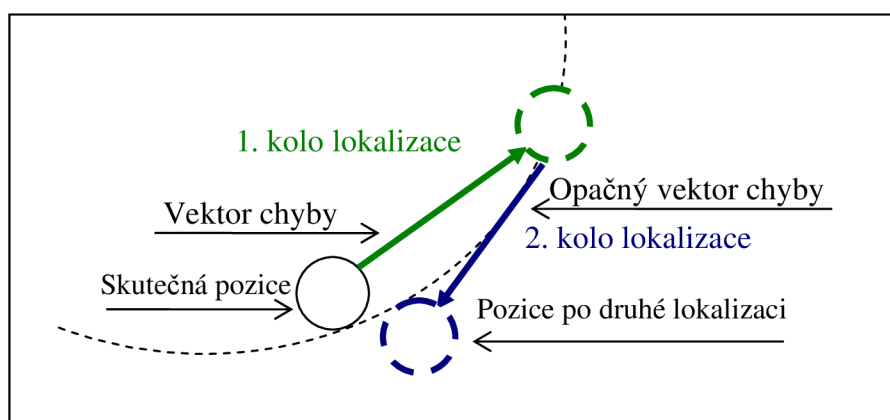
Další pokusy o optimalizaci iteračního algoritmu byly prováděny s kotevními uzly uprostřed sensorového pole.

Na Obr. 14 je příklad zobrazení pozic sensorů po lokalizaci iteračním algoritmem s velkou vstupní chybou. Je zde vidět jak velikost lokalizační chyby, tak i její směr – vektory chyb. Lze si povšimnout že směr chyb se velmi podobá směru tečen ke kružnici se středem mezi kotevními uzly. Velikost chyb se s rostoucí vzdáleností zvětšuje.



Obr. 14 Vektory chyb iteračního algoritmu

Toho by bylo možné využít, kdyby některé vektory chyb nesměřovaly na opačnou stranu. Pokud by šlo ovlivnit, aby měly vektory chyb stejný směr a zjistila se přibližná závislost velikosti chyby na vzdálenosti od středu kotevních uzlů, potom by si každý senzor vypočetl vektor chyby na svých souřadnicích určených lokalizací a následně provedl korekci odečtením vektoru chyby od svých vypočtených souřadnic a tím upřesnil odhad své pozice jak ukazuje Obr. 15.



Obr. 15 Možná optimalizace iteračního algoritmu

Směr vektorů chyb jednotlivých senzorů, závisí nejspíše na směru vektoru chyby referenčních bodů, pomocí kterých byl uzel lokalizován.

Protože každou iterací se chyba zvětšuje a její směr se většinou nemění, stačilo by u prvních iterací „řídít“ směr chyb záměrným přidáním malého vektoru chyb o známém směru. Tato metoda se ovšem neosvědčila. Nebylo pokaždé docíleno „řízení“ směru vektorů chyb. A přidáním chyby se ještě více zhoršila přesnost lokalizace.

Jako další nápad, jak dosáhnout stejného směru vektorů chyb bylo najít specifický tvar trojúhelníku s kotevními uzly jako vrcholy s případným otočením vůči sensorovému poli. Tato metoda se také neosvědčila.

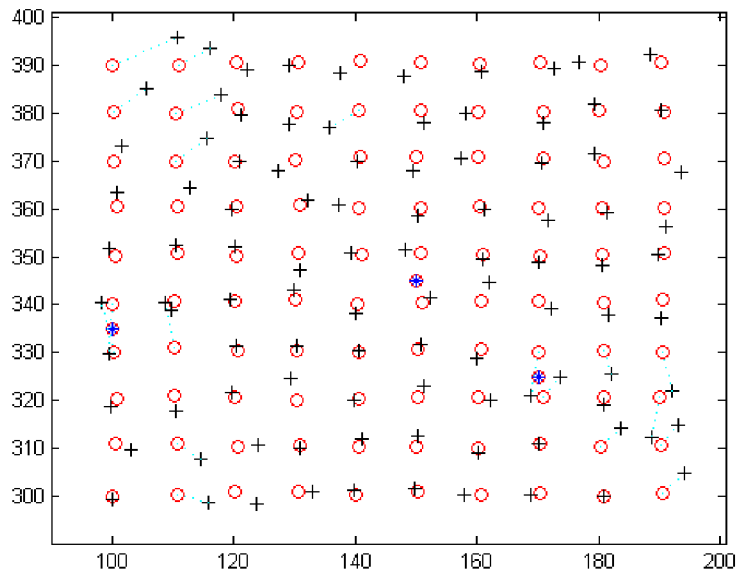
Jak už vyplývá ze zkoumání závislostí vstupní a lokalizační chyby, iterační algoritmus i přes veškeré pokusy nebylo možné optimalizovat. Velkou roli zde hraje zejména malý počet známých veličit a mnohé náhodné vlivy. Tudíž najít nějakou závislost a využít ji pro optimalizaci je skoro nemožné.

7.2. Optimalizace spojového algoritmu

7.2.1. Optimalizace vhodným rozmístěním kotevních uzlů

Z principu algoritmu je možné rozmístit kotevní uzly kdekoli po síti. Avšak je třeba dát pozor, na nesprávné rozmístění uzlů popsané v kapitole 3.2. Kritické rozestavění referenčních bodů. Kde se zejména musí dát pozor, aby všechny kotevní uzly nebyly v jedné přímce. Případně, aby se rozmístění ani přímce neblížilo. Možné rozestavění kotevních uzlů ukazuje Obr. 16 .

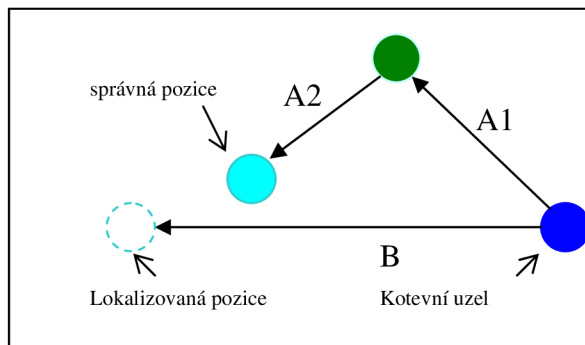
Jako nejvýhodnější rozestavění kotevních uzlů bylo rozestavení do rovnostranného trojúhelníku s vrcholy poblíž okrajů WSN sítě.



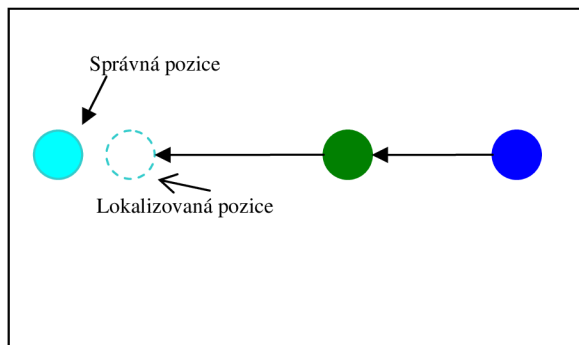
Obr. 16 Možné rozmístění kotevních uzlů u spojovacího algoritmu

7.2.2. Metoda použitá pro optimalizaci

U spojového algoritmu je nepřesnost lokalizace dána příliš velkou vstupní chybou. Vstupní chyba má dvě složky. Chybovost vlivem RSSI a chyba vlivem spojového zjišťování vzdálenosti senzoru od kotevního uzlu. Druhá uvedená chyba je u většiny lokalizovaných senzorů dominantní složkou celkové vstupní chyby a její odstranění nebo alespoň zmenšení, by vysoce zpřesnilo proces lokalizace.



a) Kladná chybovost



b) Záporná chybovost

Vycházelo se z plošného rozložení závislosti lokalizační chyby a vstupní chyby. Příklad rozložení je na obrázku Obr. 12. V mnoha simulacích se pravidelně objevovaly vysoké závislosti lokalizační chyby a vstupní chyby ve stejných oblastech WSN. Zejména v oblastech WSN, kde uzly, po kterých se spojově měřilo, ležely přibližně v přímce. Což byly oblasti vždy mezi dvěma kotevními uzly. Zde se totiž zpravidla uplatňovala záporná chybovost RSSI, protože spojové měření po senzorech v jedné linii negeneruje žádnou chybu.

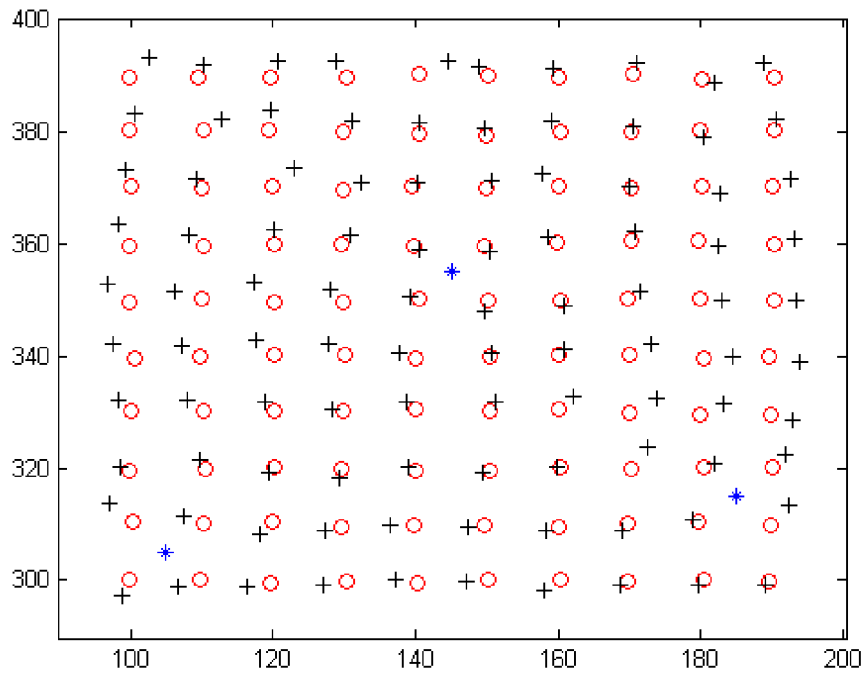
Mnou navržená metoda optimalizace spojového algoritmu používá dvě kola lokalizace.

V prvním kole se senzory lokalizují nejdříve pomocí neoptimalizovaného algoritmu. Určí se nejkratší cesta od každého ze tří kotevních uzlů a délky cest ($A1+A2$) budou použity k lokalizování senzorů. Po proběhnutí lokalizaci, kdy už znají všechny senzory svoje souřadnice si každý Pythagorovou větou vypočítá přímou vzdálenost od každého kotevního uzlu (B). Dále se vypočítá rozdíl $(A1+A2) - B$.

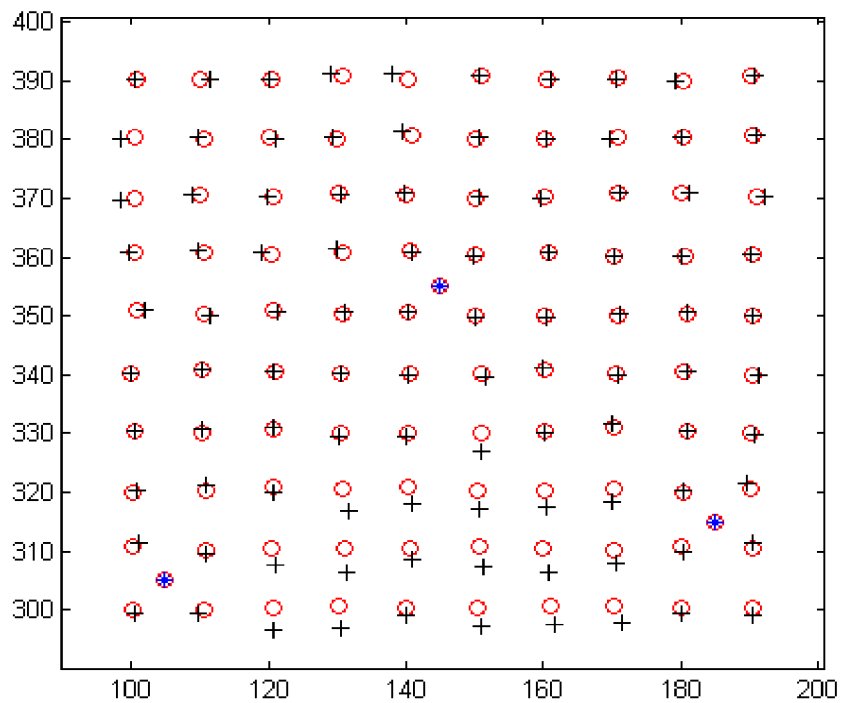
Pokud je rozdíl vzdáleností kladný, znamená to, že vliv RSSI je malý a dominantní chybou je chyba spojového měření – *kladná chyba*.

Pokud je rozdíl vzdáleností záporný, znamená to, že dominantní vliv má záporná chybovost RSSI – *záporná chyba*.

Před druhým kolem lokalizace se nepoužijí původní naměřené vzdálenosti od kotevních uzlů z prvního kola lokalizace, ale provede se jejich korekce tj. pokud se zjistí *kladná chyba* odečte se její absolutní hodnota od původní naměřené vzdálenosti. Pokud se zjistí *záporná chyba* přičte se její absolutní hodnota k původní naměřené vzdálenosti. Po korekci proběhne druhá lokalizace.



Obr. 17 Výsledek lokalizace spojového algoritmu před optimalizací



Obr. 18 Výsledek lokalizace optimalizovaného spojového algoritmu

Předchozí obrázky Obr. 17 a Obr. 18 ukazují pouze výsledek jedné simulace. Protože do každé vstupuje náhodný prvek vstupní chyby nemají algoritmy zajištěné stejné podmínky.

Aby bylo možné oba algoritmy objektivně porovnat, provedlo se s každým 100 simulací. V každé simulaci byla počítána průměrná chyba jako součet všech výstupních chyb podělených počtem senzorů. Dále byla v každé simulaci počítána největší lokalizační chyba. Po proběhnutí 100 simulací. Po proběhnutí sta simulací se i z těchto dvou parametrů vypočítal průměr. Simulace byly provedeny pro různé vlivy RSSI. Výsledky znázorňují následující tabulky.

| Vliv RSSI = 0% | Neoptimalizovaný algoritmus | Optimalizovaný algoritmus |
|---------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| Průměrná chyba | 3,0386 | 3,3829 |
| Průměrná maximální chyba | 6,1793 | 8,2282 |

| Vliv RSSI = 10% | Neoptimalizovaný algoritmus | Optimalizovaný algoritmus |
|---------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| Průměrná chyba | 2.9634 | 1,3498 |
| Průměrná maximální chyba | 7.0210 | 4,8062 |

| Vliv RSSI = ±15% | Neoptimalizovaný algoritmus | Optimalizovaný algoritmus |
|---------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| Průměrná chyba | 3,0836 | 1,6367 |
| Průměrná maximální chyba | 7,4162 | 7,6005 |

| Vliv RSSI = ±20% | Neoptimalizovaný algoritmus | Optimalizovaný algoritmus |
|---------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| Průměrná chyba | 3,1205 | 2.1609 |
| Průměrná maximální chyba | 10,6095 | 7.8156 |

Z tabulek je vidět, že optimalizovaný algoritmus vykazuje dobré lokalizační výsledky při chybovosti $\pm 10\%$. Může se zdát zajímavé, že průměrná chyba při chybovosti $\pm 10\%$ je u obou algoritmů menší než průměrná chyba při nulové chybovosti. Tato skutečnost je dána tím, že u

spojového algoritmu jsou dvě vstupní chyby - chyba vlivem RSSI a chyba daná spojovým měřením vzdáleností mezi uzly. Celková vstupní chyba se pak počítá jako součet těchto dvou chyb. Chyba způsobená spojovým měřením může být jen nezáporná. Chyba vlivem RSSI však může být jak kladná, tak i záporná. Pokud je chyba záporná zmenšuje tak celkovou vstupní chybu a tudíž má i pozitivnější vliv na výsledek lokalizace.

U optimalizovaného spojového algoritmu je rozdíl ještě patrnější, neboť u něj v části korekce je snaha co nejvíce eliminovat chybu způsobenou spojovým měřením, aby do druhého lokalizačního procesu už vcházela jen chyba způsobená RSSI.

8. Závěr

V diplomové práci byl popsán princip iteračního a spojového algoritmu a metod v bezdrátových senzorových sítích, sloužící k odstranění nebo prevence vzniku chyb a metody sloužící k lokalizaci uzlů. Dále je řešena problematika chyb, týkající se lokalizace uzlů uvnitř sítě. Pomocí poskytnutých simulací v prostředí MATLAB, byly zkoumány dva algoritmy (iterační a spojový algoritmus) s hlavním zaměřením na vztahy mezi rozložením vstupní chyby v lokalizačním procesu a jeho lokalizační chybou a následnou optimalizací podle výsledků.

Pro popsání závislostí mezi vstupní a lokalizační chybou byly použita korelace. U iteračního algoritmu se objevila závislost mezi oběma chybami jen místy. Porovnávání u spojového algoritmu však vykazovaly lepší výsledky. Podle výsledků rozložení závislostí chyb se daly určit oblasti, které vykazovaly zákonitost mezi polohou uzlů a jejich lokalizačními chybami.

Iterační algoritmus měl horší podobnosti ve výskytu těchto oblastí. I když měl daleko lepší závislost velikosti vstupní chyby a jejího směru na poloze lokalizovaných uzlů, při pokusech o optimalizaci to ovšem nestačilo. Což se projevilo výskytem nečekaných velkých chyb.

Spojový algoritmus naopak neměl žádné pozorovatelné zákonitosti mezi velikostí chyb nebo jejich směrem a polohou uzlu. Prokazoval však na určitých místech WSN stabilní podobnosti u všech simulací. Po prozkoumání výsledků, byl navržen optimalizovaný spojový algoritmus, využívající místo jednoho kola lokalizace dvě kola lokalizace. Sice se tím zvýšila vytíženost sítě, při chybovosti kolem $\pm 10\%$ vykazoval optimalizovaný algoritmus velmi dobré výsledky s porovnáním se starým algoritmem. V oblastech s vyšší chybovostí měl také lepší výsledky lokalizace.

9. Použitá literatura

- [1] BULUSU, N; JHA, S. *Wireless sensor networks*. Boston : Artech House, 2005. 326 s. ISBN 978-1580538671.
- [2] HOLEŠINSKÝ, PAVEL. *VÝZKUM LOKALIZAČNÍCH ALGORITMŮ PRO BEZDRÁTOVÉ SENZOROVÉ SÍTĚ*. [s.l.], 2009. 48 s. Diplomová práce.
- [3] CHANG, Y. *Securing Emerging Wireless Systems*. Hardcover : Springer Netherlands, 2007. 542 s. ISBN :978-1-4020-6455-5.
- [4] CHIANG, S; WANG, J. *Lecture Notes in Computer Science*. Heidelberg : Springer Berlin, 2009. 333 s. ISBN 978-3-642-04591-2.
- [5] KUORILEHTO, M; KOHVAKKA, M; SUHONEN, J. *Ultra-Low Energy Wireless Sensor Networks in Practice*. Chichester : Wiley, 2007. 368 s. ISBN 978-0-470-05786-5.
- [6] PERKINS, D; TUMATI, R; WU, H. *Resource Management in Wireless Networking*. Lafayette : Springer US, 2005. 542 s. ISBN 978-0-387-23807-4.

10. Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| OBR. 1 ROZMÍSTĚNÍ SENZOROVÝCH UZLŮ PŘED TRIANGULACI | 17 |
| OBR. 2 GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ALGORITMU TRIANGULACE | 18 |
| OBR. 3 NELOKALIZOVANÝ UZEL SE NACHÁZÍ MEZI DVĚMA REFERENČNÍMI BODY | 19 |
| OBR. 4 TŘI REFERENČNÍ BODY NA PŘÍMCE..... | 20 |
| OBR. 5 ITERAČNÍ ALGORITMUS | 21 |
| OBR. 6 ZNÁZORNĚNÍ VÍCE CESTNÍHO ŠÍŘENÍ LOKALIZAČNÍ INFORMACE | 22 |
| OBR. 7 PLOŠNÉ ROZLOŽENÍ VSTUPNÍ CHYBY – ITERAČNÍ ALGORITMUS | 23 |
| OBR. 8 PLOŠNÉ ROZLOŽENÍ LOKALIZAČNÍ CHYBY – ITERAČNÍ ALGORITMUS . | 24 |
| OBR. 9 PLOŠNÉ ROZLOŽENÍ ZÁVISLOSTI LOKALIZAČNÍ CHYBY A VSTUPNÍ CHYBY – ITERAČNÍ ALGORITMUS | 24 |
| OBR. 10 PLOŠNÉ ROZLOŽENÍ VSTUPNÍ CHYBY – SPOJOVÝ ALGORITMUS | 25 |
| OBR. 11 PLOŠNÉ ROZLOŽENÍ LOKALIZAČNÍ CHYBY – SPOJOVÝ ALGORITMUS | 25 |
| OBR. 12 PLOŠNÉ ROZLOŽENÍ ZÁVISLOSTI LOKALIZAČNÍ CHYBY A VSTUPNÍ CHYBY – SPOJOVÝ ALGORITMUS | 26 |
| OBR. 13 KOTEVNÍ UZLY PODLE UMÍSTĚNÍ VE WSN | 28 |
| OBR. 14 VEKTORY CHYB ITERAČNÍHO ALGORITMU | 28 |
| OBR. 15 MOŽNÁ OPTIMALIZACE ITERAČNÍHO ALGORITMU | 29 |
| OBR. 16 MOŽNÉ ROZMÍSTĚNÍ KOTEVNÍCH UZLŮ U SPOJOVACÍHO ALGORITMU | 30 |
| OBR. 17 VÝSLEDEK LOKALIZACE SPOJOVÉHO ALGORITMU PŘED OPTIMALIZACÍ..... | 32 |
| OBR. 18 VÝSLEDEK LOKALIZACE OPTIMALIZOVANÉHO SPOJOVÉHO ALGORITMU | 32 |