

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

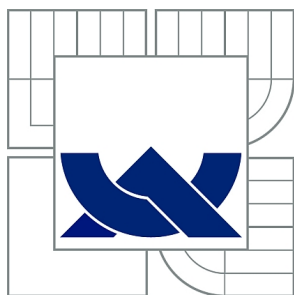
VÝZKUM SYSTÉMU GPS PRO LOKALIZACI BEZDRÁTOVÝCH
SENZOROVÝCH UZLŮ

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

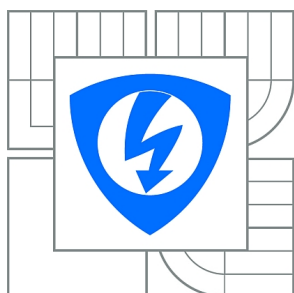
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAN JURAČKA

BRNO 2012



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 SYSTÉMU GPS PRO LOKALIZACI BEZDRÁTOVÝCH SENZOROVÝCH UZLŮ

RESEARCH INTO GPS SYSTEM USED FOR WIRELESS SENSOR NODE LOCALIZATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

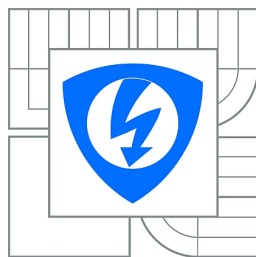
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAN JURAČKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MILAN ŠIMEK, Ph.D.

BRNO 2012



**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 Juračka

ID: 106508

Ročník: 2

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Výzkum systému GPS pro lokalizaci bezdrátových senzorových uzlů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce je výzkum využití GPS systému v bezdrátových senzorových sítích a porovnání jeho přesnosti a energetických nároků s lokalizačními systémy pracujícími s kotevními trilaterálními metodami. Student dostane k dispozici komunikační moduly IRIS a GPS moduly U-blox Lea-4A od společnosti Crossbow. Úkolem studenta bude realizace lokalizačního systému pomocí GPS modulů a analýza jeho přesnosti a převážně také energetický nároků. Výstupem diplomové práce je tedy výzkum energetických nároků a přesnosti dvou lokalizačních technik – GPS a lokální trilaterace. Součástí práce budou experimentální testy ve venkovních podmínkách. Student v rámci diplomové práce vyvine aplikaci pro zobrazování souřadnic bezdrátového uzlu.

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: 6.2.2012

Termín odevzdání: 24.5.2012

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

Konzultanti diplomové práce:

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

Tématem diplomové práce je výzkum a možnosti využití GPS systému pro lokalizaci v bezdrátových senzorových sítích. Práce se zabývá otázkou přesnosti a energetickou náročností GPS lokalizace. Práce také řeší určování polohy pomocí trilaterace v lokálním kotevním systému. V teoretické části práce je popsán použitý standard IEEE 802.15.4, možnosti jednotlivých uzlů a možnost určování polohy ze znalosti RSSI parametru.

KLÍČOVÁ SLOVA

Lokalizace, trilaterace, WSN, GPS, IRIS, MTS420cc, Tiny Os, RSSI, IEEE 802.15.4

ABSTRACT

Theme of the thesis is research and possibility of using GPS system from localization in wireless sensor network. Paper deals with the accuracy and energy consumption of GPS localization. Thesis also solve using of localization in local anchor system. Theoretical part describes IEEE 802.15.4 standard, capability of used nodes and describe ways how to use RSSI value to resolve location

KEYWORDS

Localization, trilateration, WSN, GPS, IRIS, MTS420cc, Tiny Os, RSSI, IEEE 802.15.4

JURAČKA, Jan *Výzkum systému GPS pro lokalizaci bezdrátových senzorových uzlů*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2012. 63 s. Vedoucí práce byl Ing. Milan Šimek, Ph.D.

Výzkum popsáný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Výzkum systému GPS pro lokalizaci bezdrátových senzorových uzlů“ 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/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing Milanu Šinkovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	13
1 Bezdrátové senzorové sítě	14
2 Standard IEEE 802.15.4	15
2.1 Fyzická vrstva v 802.15.4	15
2.2 MAC vrstva v 802.15.4	15
2.3 Typy síťových zařízení	15
2.4 Síťová topologie	16
2.5 Adresace sítě	17
3 Lokalizace	18
3.1 Triangulace	18
3.2 Trilaterace	19
3.2.1 Vyjádření rovnic pro výpočet x, y, z	20
3.3 Lokalizace pomocí globálního systému	21
3.3.1 GPS lokalizace	21
3.3.2 DGPS	21
3.4 Lokalizace pomocí lokálního systému	22
4 Výkonová úroveň signálu	23
4.1 Teoretické určení vzdálenosti na síle přijatého signálu	23
4.1.1 Index ztrátovosti prostředí η	25
5 Použité prvky pro praktickou realizaci zadání	26
5.1 Crossbow IRIS – XM2110	26
5.1.1 Zjišťování hodnoty RSSI	27
5.2 Crossbow MTS 420cc	28
5.2.1 GPS modul ublox LEA4-A	28
5.2.2 Senzor teploty a vlhkosti	29
5.2.3 Tlakové a teplotní čidlo	30
5.2.4 Senzor osvětlení	30
5.2.5 Dvouosý akcelerometr	30
5.3 Crossbow MIB 520	31
5.4 Trimble GeoExplorer 2008	32

6	Použité aplikace	33
6.1	Tiny Os	33
6.1.1	Tiny Os 1.x	33
6.1.2	Tiny Os 2.x	34
6.2	Aplikace použité pro zobrazení a porovnání získaných dat	35
6.2.1	Aplikace pro zobrazení RSSI a vzdálenosti	35
6.2.2	Aplikace pro trilateraci	36
6.2.3	Aplikace pro referenční ověření a porovnání	36
7	Praktické výsledky diplomové práce	38
7.1	Prostory realizace	38
7.2	Lokalizace uzlů pomocí GPS	39
7.2.1	Energetická náročnost při použití GPS	39
7.3	Lokalizace pomocí trilaterace	40
7.3.1	Přepočtené hodnoty pro trilateraci	41
7.3.2	Energetická náročnost trilaterace	42
7.4	Porovnání přesnosti	44
7.4.1	Vyhodnocení přesnosti GPS přijmače MTS420cc	44
7.4.2	Vyhodnocení přesnosti trilaterací metody	46
7.5	Zhodnocení použitých metod, jejich výhody a nevýhody	48
7.5.1	Použití GPS k určování polohy	48
7.5.2	Použití kotevního systému k určování polohy	48
7.5.3	Vyhodnocení energetické náročnosti a přesnosti obou metod	49
7.5.4	Výhody a nevýhody jednotlivých metod	50
8	Závěr	52
	Literatura	53
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	55
	Seznam příloh	56
A	Tabulky se změřenými daty	57
A.1	Data změřená pomocí senzorové desky MTS420cc	57
A.2	Data získaná trilaterací	58
A.3	Trilaterační data převedená na souřadnice	59
B	Porovnání lokalizačních metod a zobrazení bodů	60
B.1	Zobrazení všech bodů v mapě	60

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Topologie zapojení stromu definovaná v IEEE 802.15.4	16
3.1	Zobrazení vztahů platných pro triangulaci v trojúhelníku	18
3.2	Určení pozice neznámého bodu pomocí trilaterace	19
5.1	Obecné schéma zapojení při měření	26
27	figure.43	
5.3	Senzorová deska MTS420cc s GPS čipem ublox LEA-4A, převzato z [9]	28
5.4	Blokové schéma zapojení GPS čipu převzato z [16]	29
5.5	USB brána MIB520 převzato z [6]	31
5.6	Trimble GeoExplorer 2008 GeoXM převzato z [15]	32
6.1	Diagram propojených komponent aplikace brány	34
6.2	Diagram propojených komponent aplikace kotevního uzlu	35
7.1	Mapa letiště, zdroj [www.akmedlanky.cz, www.mapy.cz]	39
7.2	Graf závislosti úbytku napětí na čase při použití GPS čipu v MTS420cc	40
7.3	Vzorové schéma rozmístění kotev a neznámého uzlu	41
7.4	Graf závislosti RSSI na vzdálenosti pro prostory letiště	41
7.5	Graf aproximované funkce a skutečných hodnot pro určení vzdálenosti	42
7.6	Úbytek napětí v čase u kotevního uzlu ID1	43
7.7	Úbytek napětí v čase u uzlu trilaterační brány	43
7.8	Zobrazení kotevních, referenčních a bodů z MTS420cc v mapovém podkladu	45
7.9	Zobrazení kotevních, referenčních a vypočtených bodů v prostoru . .	47
7.10	Graf chybovosti měření pro obě použité lokalizační metody	49
7.11	Graf úbytků napětí pro obě použité metody	50
B.1	Jednotlivé body vložené do mapy pomocí GoogleEarth	60
B.2	Výřez bodů z B.1 v prvním měřeném kvadrantu	61
B.3	Výřez bodů z B.1 v druhém měřeném kvadrantu	61
B.4	Výřez bodů z B.1 ve třetím měřeném kvadrantu	62
B.5	Výřez bodů z B.1 ve čtvrtém měřeném kvadrantu	62
C.1	Soupis dat obsažených na příloženém DVD	63

SEZNAM TABULEK

7.1	Tabulka chybovosti měření pro jednotlivé body	44
7.2	Souhrnná tabulka chybovosti měření senzorové desky	44
7.3	Tabulka chybovosti měření jednotlivých bodů u trilaterace	46
7.4	Souhrnná tabulka chybovosti měření pro trilateraci	46
7.5	tabulka chybovosti měření jednotlivých bodů pro obě metody	49
A.1	GPS souřadnice změřené pomocí MTS420cc	57
A.2	Změřené hodnoty RSSI a jejich přepoččet na vzdálenost dle 7.5	58
A.3	Přepočtené hodnoty GPS souřadnic z trilateračních bodů	59

ÚVOD

Tato diplomová práce popisuje možnosti a způsoby využití bezdrátových senzorových sítí v dnešní moderní době. Tyto sítě se v dnešní době začínají velmi prosazovat v oblasti průmyslové automatizace, lékařství, projektech inteligentních budov a v mnoha dalších odvětvích. Řada výzkumných týmů a institucí v současné době řeší nejen problematiku začleňování a budování nových sítí, ale i možnosti různého rozšíření těchto sítí (např. implementaci IPv6 protokolu, kdy uzly mohou být celosvětově dostupní z internetu).

Teoretická část podrobně popisuje jak standardy platné v bezdrátových senzorových sítích, tak i možnosti použití jednotlivých prvků. V této části práce je také popsána problematika lokalizace a její implementace pomocí lokálních nebo globálních lokalizačních systémů. Součástí je také podrobný popis a možnosti využití jednotlivých prvků, které byly použity pro praktickou realizaci bodů zadání.

Praktická část je zaměřena na konkrétní realizaci určování polohy pomocí globálního lokalizačního systému a na určování polohy pomocí lokálního kotevního systému. Jsou zde popsány jednotlivé body návrhu a realizace těchto metod a jejich dosažené výsledky. Součástí práce je také zhodnocení použitých metod co se týče energetické náročnosti a přesnosti.

1 BEZDRÁTOVÉ SENZOROVÉ SÍTĚ

Bezdrátové senzorové sítě WSN (Wireless Sensor Network), jsou sítě skládající se z bezdrátových senzorů rozmístěných v prostoru. Úkolem těchto sítí je monitorování a zpracování fyzikálních veličin. Nejčastějšími sledovanými veličinami jsou teplota, tlak, změna polohy a další. Původně byly WSN sítě vyvíjeny pro vojenské účely jako většina dnes dostupných technologií. V dnešní době mají ale WSN sítě uplatnění v průmyslových i osobních aplikacích. Počínaje kontrolou životního prostředí, automatizovaného řízení dopravy, průmyslové i domácí automatizace. Základními stavebními prvky WSN sítí jsou:

- **Komunikační jednotka**
 - obstarává a řídí komunikaci s ostatními jednotkami sítě
 - stará se o přenos naměřených dat pro další zpracování
- **Senzor**
 - Konkrétní senzor, nebo skupina senzorů, zajišťující monitorování požadovaných fyzikálních veličin nebo parametrů

Kategorií a zařazením se WSN řadí do skupiny tzv. nízkovýkonových osobních sítí (z anglického Low-Power Wireless Personal Area Network). Chování těchto sítí popisuje standard rodiny IEEE 802.15.4 viz [7].

V současné době nacházejí aplikace bezdrátových senzorových sítí stále větší uplatnění v praxi. Jedná se zejména o monitorování životního prostředí, kdy prvky například monitorují vznik možného požáru v lese, nebo hlídají stav vody a hlásí možný povodňový stav. Velmi často jsou tyto sítě nasazovány také do průmyslu a umožňují zvýšit míru automatizace.

2 STANDARD IEEE 802.15.4

Aby byla zajištěna univerzální kompatibilita napříč spektrem různých výrobců a dodavatelů, je pro použití ve WSN sítích definován a používán tento standard. Tento standard viz [7] specifikuje a popisuje chování fyzické vrstvy a vrstvy řízení přístupu k médiu. Dále tento standart definuje typy síťových zařízení, síťovou topologii a určuje adresaci zařízení.

2.1 Fyzická vrstva v 802.15.4

Vrstva IEEE modelu, která se stará a definuje vlastnosti rádiového kanálu, který se využívá pro přenos dat. Vrstva se stará o aktivaci a deaktivaci rádiové části zařízení v případě že toto rozhraní není využíváno. Dále se tato vrstva stará o výběr vhodného frekvenčního kanálu, zjišťuje kvalitu již přijatých paketů, vyhledává volné kanály pro přenos. Samozřejmě se také stará o samotné odesílání a příjem paketů.

2.2 MAC vrstva v 802.15.4

Vrstva která řídí přístup na přenosové médium. Stará se o dělbu komunikačního pásma mezi všechny účastníky komunikace, také vytváří a spravuje infrastrukturu sítě. Potvrzuje a vyhodnocuje správnost přijatých dat.

2.3 Typy síťových zařízení

Standard IEEE 802.15.4 specifikuje dva typy možných zařízení:

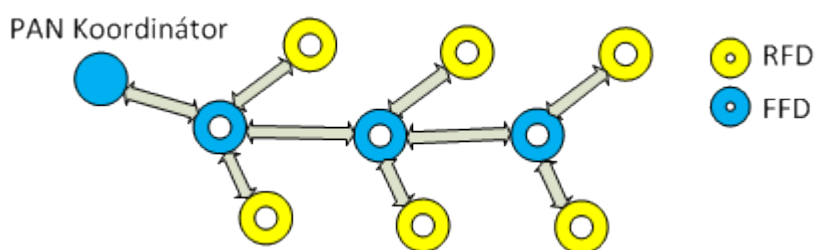
- **FFD (Fully Function Device)** je plnohodnotné síťové zařízení. Toto zařízení může plnit funkci koordinátora sítě, směrovače nebo koncového prvku.
 - **PAN Koordinátor** – uzel, který řídí celou WPAN síť, kdy je většinou i konfigurován jako brána do jiných sítí (např. internetu). Každá síť obsahuje pouze jeden uzel, který plní roli koordinátora. Koordinátor dále inicializuje vytvoření sítě a stará se o její organizaci a synchronizaci pravidelným vysíláním tzv. beacon rámce.
 - **Koordinátor** – má na starost směrování dat a organizaci sítě. Může plnit i úlohu koncového zařízení. Směrovač může komunikovat jak s koncovým zařízením tak s koordinátorem sítě.

- **RFD (Reduced Function Device)** – Zařízení plnící jednoduchou úlohu čidla, které v síti může pouze sbírat data, která poté zasílá koordinátorovi. Přímá komunikace dvou RFD není možná, jejich vzájemnou komunikaci musí realizovat koordinátor.

2.4 Síťová topologie

IEEE 802.15.4 definuje následující tři základní síťové topologie.

- **Hvězda** – tato síťová topologie zajišťuje centralizovanou komunikaci, kdy všechna zařízení posílají data centrálnímu uzlu, který plní roli PAN koordinátora sítě. Nevýhodou této topologie je malý rozsah pokrytí území.
- **Obecná mesh síť** – Topologie kdy každý uzel může komunikovat s ostatními uzly přes mezilehlé uzly. Nevýhodou je převážně nárůst režijních dat směrovacího protokolu, který zajišťuje přenos dat sítí.
- **Strom** – Konkrétní uspořádání obecné mesh topologie do tvaru, kdy síťová topologie připomíná strukturu stromu. Koncové prvky sítě představují pomyslné listy stromu. Směrovače a koordinátor potom představují kořeny stromu. Toto uspořádání se díky hierarchickému uspořádání využívá kvůli jednodušším směrovacím protokolům, které v síti pracují. Obrázek zapojení prvků do stromu zobrazuje obrázek 2.1.



Obr. 2.1: Topologie zapojení stromu definovaná v IEEE 802.15.4

2.5 Adresace sítě

V IEEE 802.15.4 [7] jsou definovány dva typy možných adres.

- **Zkrácená adresa** – Jedná se o 16 bitovou adresu zařízení. Tato adresa unikátní v rámci jedné WSN sítě. Většinou je adresa generována pro zařízení dynamicky koordinátorem sítě, nebo může zařízení požádat o schválení vlastní vygenerované adresy.
- **Globální adresa** – Celosvětově unikátní adresa síťového prvku. Jedná se o 64 bitů dlouhou adresu, kdy prvních 24 bitů je přiděleno výrobcí nebo dodavateli organizací IEEE. IEEE spravuje seznam vydaných identifikátorů, a zajišťuje aby přidělený bitový blok byl vždy unikátní. Zbylých 40 bitů slouží pro adresu samotného zařízení.

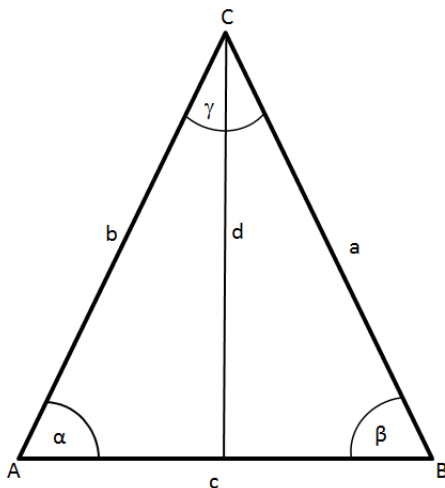
Z důvodů kratší adresy a tím i menší energetické náročnosti při přenosu se většinou využívá zkrácené 16 bitové adresy.

3 LOKALIZACE

Pod pojmem lokalizace si lze představit proces, při kterém určujeme polohu požadovaného objektu. V případě této práce se jedná o určování polohy prvku bezdrátové senzorové sítě. K procesu lokalizace objektů se nejčastěji využívá metod triangulace a trilaterace.

3.1 Triangulace

Lokalizační metoda zjišťování polohy založená na znalosti dvou pevných bodů. Pozice třetího neznámého bodu se určuje dle trigonometrického výpočtu. Pozici třetího bodu lze získat sestrojením pomyslného trojúhelníku mezi body A, B, C, kde vrcholy bodů A, B známe a třetí vrchol lze poté dopočítat ze znalostí obou pevných bodů a výpočtu úhlů v trojúhelníku.



Obr. 3.1: Zobrazení vztahů platných pro triangulaci v trojúhelníku

Úhly v trojúhelníku (viz obrázek 3.1) lze poté dopočíst dle sinové věty:

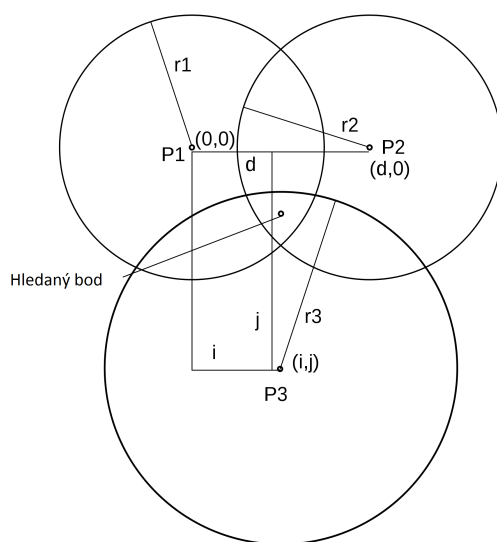
$$\frac{\sin \alpha}{a} = \frac{\sin \beta}{b} = \frac{\sin \gamma}{c}, \quad (3.1)$$

kde a je vzdálenost mezi body B, C, b je vzdálenost mezi BC a c je vzdálenost mezi AB. Z platných vztahů lze dle 3.2 dopočítat vzdálenost d :

$$\sin \beta = \frac{d}{a}, \quad \sin \alpha = \frac{d}{b} \quad (3.2)$$

3.2 Trilaterace

Metoda, která také vychází ze vztahů které platí v trojúhelníku. Na rozdíl od triangulace nevychází z výpočtu pomocí úhlů, ale k určení polohy využívá dvou a více bodů, u kterých jsou známy souřadnice a změřenou vzdálenost mezi těmito body a hledaným objektem.



Obr. 3.2: Určení pozice neznámého bodu pomocí trilaterace

Z obrázku 3.2 lze odvodit následující rovnice:

$$r_1^2 = x^2 + y^2 + z^2 \quad (3.3)$$

$$r_2^2 = (x - d)^2 + y^2 + z^2 \quad (3.4)$$

$$r_3^2 = (x - i)^2 + (y - j)^2 + z^2, \text{ kde :} \quad (3.5)$$

x, y, z - souřadnice hledaného bodu

d, i, j - posuny polohy kružnic

r_1, r_2, r_3 - poloměry kružnice

3.2.1 Vyjádření rovnic pro výpočet x, y, z

V této části je podrobně rozepsán postup vyjádření rovnice 3.9, ze zadaných rovnic 3.3, 3.4 a 3.5. Obdobným způsobem lze odvodit postup k odvození rovnic 3.10 a 3.11, které slouží pro určení souřadnic hledaného bodu.

Vyjádřením proměnné z^2 z rovnice 3.5 a poté y z rovnice 3.4, do které dosadíme 3.6. Získáme rovnici 3.7.

$$z^2 = r_3^2 - (x - i)^2 - (y - j)^2 \quad (3.6)$$

$$y = \frac{r_2^2 + 2xd - 2xi - d^2 - r_3^2 + i^2 + j^2}{2j} \quad (3.7)$$

Dosazením rovnic 3.6 do rovnice 3.3 získáme rovnici 3.8.

$$r_1^2 = x^2 + y^2 + r_3^2 - x^2 + 2xi - i^2 - y^2 + 2yi - j^2$$
$$r_1^2 = r_3^2 + 2xi + 2yj - i^2 - j^2 \quad (3.8)$$

Poté dosazením 3.7 do rovnice 3.8 získáme vzorec 3.9 pro výpočet x .

$$r_1^2 = r_3^2 + 2xi - i^2 - j^2 + r_2^2 + 2xd - 2xi - d^2 - r_3^2 + i^2 + j^2$$
$$r_1^2 = r_2^2 + 2xd - d^2$$
$$x = \frac{r_1^2 - r_2^2 + d^2}{2d} \quad (3.9)$$

$$y = \frac{r_2^2 - r_1^2 + d \cdot (r_1^2 - r_3^2 + i^2 + j^2)}{2jd} \quad (3.10)$$

$$z = \sqrt{r_1^2 - x^2 - y^2} \quad (3.11)$$

3.3 Lokalizace pomocí globálního systému

Jedná se o lokalizační techniky založené na získávání dat pro určení polohy z globálních zdrojů dat. Takovýto zdroj dat lze získat nebo určit na libovolném místě na Zemi.

3.3.1 GPS lokalizace

GPS (Global Positioning System) je vojenský globální družicový lokalizační systém provozovaný a spravovaný armádou Spojených států amerických. GPS systémem lze určit polohu a přesný čas na jakékoli části Země nebo i ve vzduchu. Přesnost systému určení polohy je v řádu desítek metrů. Tato přesnost se odvíjí od množství faktorů ovlivňující kvalitu příjmu GPS signálu. Systém využívá k určení polohy objektu triangulační metodu. Přijímač GPS signálu, který hraje roli nelokalizovaného prvku v prostoru získává z družic umístěných na oběžné dráze v pravidelných intervalech informace o jejich umístění a přesném času (družice obsahují atomové hodiny). Se znalostí času a polohy družic dokáže potom přijímač dopočítat svoji polohu v prostoru.

Jednou z možností zpřesnění výsledku měření GPS pozice na řád jednotek metrů až centimetrů je použití DGPS metody popřípadě jiných metod korigujících GPS chybu.

3.3.2 DGPS

Rozšiřující systém systému GPS, který slouží k zpřesnění určování polohy v nejlepším případě až k řádu desítek centimetrů. Systém využívá na Zemi pevně umístěných referenčních stanic, které vysílají rozdíl mezi pozicí zaměřenou systémem GPS a známou referenční pozicí, na které je stanice umístěna. Na území Evropy lze ke zpřesnění metodou DGPS využít data poskytovaná ze systému EGNOS.

Více podrobností o DGPS korekci a dalších možnostech zpřesňování polohy lze čerpat z [8].

3.4 Lokalizace pomocí lokálního systému

Jedná se o lokalizační techniky založené na získávání dat pro určení polohy z lokálních zdrojů dat. Technika kdy ze získaných dat lze lokalizovat bod v daném systému.

Referenčními body těchto systémů jsou prvky s pevně danou a známou pozicí. Tyto prvky pak na základě použité technologie zjišťují pozici neznámého prvku v síti.

K určení této vzdálenosti lze využít například metody TOA (Time Of Arrival) kdy se měří časový úsek cesty signálu od vysílače k přijímači. Další možnou metodou určení vzdálenosti je pomocí ultrazvuku, kdy se porovnává zpoždění příchodu ultrazvuku s rádiovým signálem.

Další z možností jak zjistit vzdálenost uzlu je pomocí RSSI. Parametr RSSI vyjadřuje výkonovou úroveň přijatého signálu.

Matematicky lze poté pro všechny tyto metody popsat rovnice získaného signálu (ať už se jedná o čas, rozdíl zpoždění příchodu prvků nebo úroveň signálu) a odvodit z nich převodní vztah na určení vzdálenosti.

Pro výsledné určení souřadnic neznámého bodu v systému, se na základě známých vzdáleností od referenčních bodů pomocí trilaterace určí výsledné souřadnice uzlu pomocí rovnic 3.9, 3.10 a 3.11.

4 VÝKONOVÁ ÚROVEŇ SIGNÁLU

Za předpokladu správného nastavení a kalibrace WSN sítě lze podle parametru RSSI (Radio Strength Signal Indicator) na základě praktického měření zjistit matematický vztah popisující závislost hodnoty RSSI na vzdálenosti. Zjištění hodnoty RSSI je v případě použití uzlů IRIS XM2120 velmi jednoduché, protože jednotky v sobě obsahují registr PHY_RSSI. Přijatý výkon signálu na rozhraní uzlu je zpracován a jeho hodnota je uložena do tohoto registru. Problémem při určování funkce závislosti vzdálenosti na RSSI je nehomogenita a dynamická změna prostředí v kterém měření probíhá. Parametr RSSI může také ovlivňovat směr příjmu signálu, rušení ostatními zařízeními (jednotky pracují v ISM pásmu), příjem odrazu signálu a další.

4.1 Teoretické určení vzdálenosti na síle přijatého signálu

Určení vychází z ideálního stavu, kdy velikost přijaté energie signálu je funkcí vysílaného výkonu a vzdáleností mezi vysílačem a přijímačem. Tato funkce ideálně klesá s druhou mocninou vzdálenosti dle Frissovy rovnice 4.1 uvedené v [3].

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi d)^2} \quad [\text{mW}], \text{ kde :} \quad (4.1)$$

P_T - je vysílaný výkon

P_R - je přijímaný výkon

G_T - je zisk vysílací antény

G_R - je zisk přijímací antény

λ - vlnová délka

d - vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem

Pro popis modelu ztrátovosti prostředí, který reprezentuje rádiové prostředí je použita rovnice 4.2. Tato rovnice popisuje tzv. *Logaritmický ztrátový model*, který se velmi často používá. Rovnice je převzata z [10].

$$P_r(d) = P_r(d_0) - 10\eta \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\delta, \text{ kde :} \quad (4.2)$$

$P_r(d)$ - síla přijatého signálu ve vzdálenosti d [mW]

$P_r(d_0)$ - síla přijatého signálu v referenční vzdálenosti d_0 [mW]

η - parametr popisující ztrátovost okolního prostředí
 d - skutečná vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem [m]
 d_0 - referenční vzdálenost [m]
 X_δ - hodnota nejistoty [mW]

Úpravou rovnice 4.2 lze vyvodit vztah pro určení vzdálenosti na základě znalosti referenční hodnoty a síly přijatého signálu 4.3.

$$\begin{aligned}
 P_r(d) &= P_r(d_0) - 10\eta \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \\
 P_r(d) - P_r(d_0) &= -10\eta \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \\
 P_r(d_0) - P_r(d) &= 10\eta \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \\
 \frac{P_r(d_0) - P_r(d)}{10 \cdot \eta} &= \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \\
 10^{\left(\frac{P_r(d_0) - P_r(d)}{10 \cdot \eta}\right)} &= \left(\frac{d}{d_0}\right) \\
 d &= d_0 \cdot 10^{\left(\frac{P_r(d_0) - P_r(d)}{10 \cdot \eta}\right)} \quad [\text{m}; \text{m}, \text{mW}, \text{mW}]
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

Ze znalosti vzorce pro výpočet hodnoty RSSI viz 4.4 lze poté vzorec 4.3 upravit na tvar viz rovnice 4.5.

$$RSSI = 10 \cdot \frac{P}{0,001} \quad [\text{dBm}; \text{W}] \tag{4.4}$$

$$d = d_0 \cdot 10^{\left(\frac{RSSI(d_0) - RSSI(d)}{10 \cdot \eta}\right)} \quad [\text{m}; \text{m}, \text{dBm}, \text{dBm}] \tag{4.5}$$

4.1.1 Index ztrátovosti prostředí η

Pro možnost určení vzdálenosti na RSSI je potřeba znát vzájemný vztah mezi vysílaným a přijímaným signálem a také jejich vzájemnou vzdálenost. Tento vztah definuje rovnice 4.6 převzatá z [18].

$$P_r = P_t \cdot \left(\frac{1}{d}\right)^\eta \quad [mW]$$
$$\eta = \frac{\log\left(\frac{P_r}{P_t}\right)}{\log\left(\frac{1}{d}\right)} \quad [-], \quad kde : \quad (4.6)$$

P_r - je hodnota přijatého výkonu

P_t - je hodnota vysílaného výkonu

d - je vzdálenost mezi komunikačními uzly

η - je index ztrátovosti prostředí.

Hodnota parametru η vždy silně závisí na daném prostředí v kterém měření probíhá. Praktické určování hodnoty parametru η se většinou provádí tak, že pro všechny známá data měření jako je vzdálenost uzlů a přijímaný výkon se postupně volí hodnoty parametru d_0 a η pro které se dopočítává aproximovaný model, který musí být co nejvíce podobný vstupním datům.

5 POUŽITÉ PRVKY PRO PRAKTICKOU REALIZACI ZADÁNÍ

Pro praktickou realizaci byly použity prvky pro stavbu bezdrátových senzorových sítí od firmy Crossbow. Použití těchto prvků bylo z důvodu jejich vysoké dostupnosti, jelikož se jich v hojné míře využívá ve výuce na ústavu telekomunikací. Jako základní komunikační jednotka je použit model IRIS -XM2110. Jako senzor poskytující GPS data slouží model MTS 420cc. Pro programování a přenos dat z a do jednotek byla použita USB brána MIB 520. Dále bylo použito nezávislého GPS lokátoru Trimble GeoExplorer 2008. Obecné schéma zapojení prvků pro realizaci měření zobrazuje obrázek 5.1.



Obr. 5.1: Obecné schéma zapojení při měření

5.1 Crossbow IRIS – XM2110

Bezdrátový komunikační uzel pracující v pásmu 2,4 GHz. Napájení tohoto modulu je zajištěno pomocí 2x AA akumulátorů. Komunikační uzel je vybaven mikrokontrolérem ATmega AVR 1281. Uzel disponuje 512 kB datové a 128 kB operační paměti. Součástí uzlu je 10 bitový ADC převodník a rádiový čip AT86RF230 vyhovující normě IEEE 802.15.4. Pro implementaci vyšších vrstev modul osazen také mikrokontrolérem Atmel ATmega 1281. IRIS jednotka je osazena 51 pinovým rozšiřujícím konektorem, který poskytuje analogové výstupy, I2C sběrnici, digitální V/V rozhraní, SPI a UART rozhraní. V mikrokontroléru ATmega 1281 je implementován operační systém TinyOS, který je vyvíjen na platformy, které pracují s bezdrátovými senzorovými sítěmi.



Obr. 5.2: Komunikační uzel IRIS-XM2110 s pohledem na stranu rozšiřujícího konektoru a stranu spojů, převzato z [5]

5.1.1 Zjišťování hodnoty RSSI

Bezdrátový uzel IRIS je osazen rádiovým čipem AT86RF230. Tento čip obsahuje registr pojmenovaný jako PHY_RSSI do kterého v pravidelných intervalech ukládá hodnotu parametru RSSI. Hodnota v tomto registru se dle [1] obnovuje každé 2 μ s. Čip měří výkon přijímaného signálu po dobu 128 μ s u každého přijatého rámce. A jeho průměrováním potom určí hodnotu RSSI. Hodnota uložená v registru reprezentuje 5 bitové číslo v intervalu 0 až 28. Hodnota 0 reprezentuje sílu signálu menší než minimální citlivost přijímače (v případě uzlů IRIS je tato hodnota rovna -91 dBm). Pro přepočet hodnoty uložené v registru PHY_RSSI slouží vzorec 5.1. Tento vzorec se liší v závislosti na použitém rádiovém čipu modulu, je udávám výrobcem a lze jej najít v katalogovém listě použitého čipu [1].

$$RSSI = RSSI_{BASE} + 3 \cdot (RSSI_{PHY} - 1) \quad [\text{dBm}], \text{ kde :} \quad (5.1)$$

$RSSI_{BASE}$ - minimální citlivost přijímače, pro AT86RF230 dle [1] je -91dBm

$RSSI_{PHY}$ - hodnota registru PHY_RSSI

5.2 Crossbow MTS 420cc

Rozšiřující sensorový modul kompatibilní s komunikačním modulem IRIS. Jedná se o desku vybavenou senzory pro měření teploty, vlhkosti, atmosferického tlaku, osvětlení. Součástí desky je také dvouosý akcelerometr a GPS čip. Vzhled desky zobrazuje 5.3. Osazení desky všemi těmito senzory umožňuje její nasazení pro širokou škálu aplikací od jednoduché meteostanice až po plně funkční GPS monitorovací zařízení.



Obr. 5.3: Sensorová deska MTS420cc s GPS čipem ublox LEA-4A, převzato z [9]

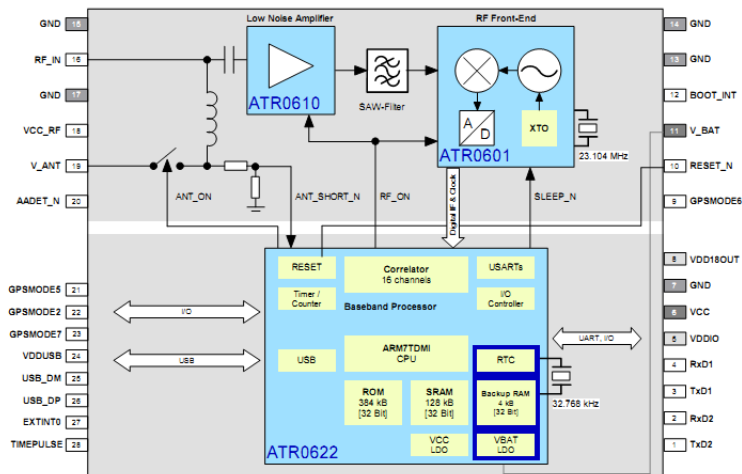
5.2.1 GPS modul ublox LEA4-A

Rozměrově největší sensor na desce, který se stará o zpracování GPS signálu. Jde o 16-ti kanálový přijímač založený na ANTARIS 4 GPS chipsetu. Sensor je navržen pro velmi malou spotřebu energie, a je vybaven jedním USB a dvěma UART porty. Přijímač také podporuje DGPS korekci. Samozřejmostí pro použití v bezdrátových sensorových sítích je úsporný mód. Modul je také vybaven ochranou detekcí zapojení antény nakrátko a naprázdno. Modul je uzpůsoben pro práci v teplotním rozpětí -40°C až 85°C . Blokové schéma osazení GPS čipu zobrazuje 5.4. Nejdůležitější hodnoty uváděné v katalogovém listu [16]:

- Přesnost určení polohy: až 3 metry
- Rozsah napájecího napětí: 3,6V až 1,65V
- Průměrný proudový odběr¹: 35mA při $V_{cc} = 3\text{V}$

¹Průměrný proudový odběr při kontinuálním sledování polohy, obnovovací kmitočet 1Hz, 9 kanálů použito pro určování polohy a 3 kanály nastaveny na vyhledávání nových satelitů

- Špičkový proudový odběr ²: 70mA při $V_{cc} = 3,3V$
- Proudová spotřeba v úsporném režimu: 80 μ A při $V_{cc} = 3V$
- Provozní napětí V_{cc} : 2,7V až 3,3V



Obr. 5.4: Blokové schéma zapojení GPS čipu převzato z [16]

5.2.2 Senzor teploty a vlhkosti

Čidlo Sensirion SHT11 umožňující měření teploty a vlhkosti na jednom čipu. Čidlo je vybaveno čtrnácti bitovým analogově-digitálním převodníkem a lze jej dle potřeby kalibrovat. Katalogové hodnoty převzaty z [9]:

- Měření vlhkosti:
 - Rozsah: 0 až 100%
 - Přesnost: $\pm 3,5\%$ relativní vlhkosti
- Měření teploty:
 - Rozsah: $-40^{\circ}C$ až $80^{\circ}C$
 - Přesnost: $\pm 2^{\circ}C$
- Provozní napětí V_{cc} : 2,4V až 3,6V

²Špičkový proudový odběr při inicializační fázi GPS přijímače, tato fáze může v závislosti na prostředí a nastavení trvat až 41 vteřin

5.2.3 Tlakové a teplotní čidlo

Čidlo Intersema MS55ER, které je konstruováno jako hybridní SMD čip obsahující piezo-rezistivní tlakový senzor a ADC převodník. Čidlo poskytuje šestnácti bitový výstup. Katalogové hodnoty převzaty z [9]:

- Měření tlaku:
 - Rozsah: 110 mbar až 300 mbar
 - Přesnost: $\pm 3,5\%$
- Měření teploty:
 - Rozsah: -10°C až 60°C
 - Přesnost: $\pm 2^{\circ}\text{C}$
- Provozní napětí V_{cc} : 2,2 V až 3,6 V

5.2.4 Senzor osvětlení

Čidlo TAOS TLS2550, které je složeno ze dvou fotodiod a rozdílového ADC převodníku integrovaném na jednom CMOS čipu. První fotodioda je nastavená pro příjem jak viditelného, tak i infračerveného spektra, druhá fotodioda pouze na infračervené spektrum. Katalogové hodnoty převzaty z [9]:

- Měření osvětlení:
 - Rozsah analyzovaného spektra: 400nm až 1000nm
- Provozní napětí V_{cc} : 2,7V až 3,6V

5.2.5 Dvouosý akcelerometr

Čidlo ADXL202JE výrobce Analog Devices, které umožňuje měření vibrací, seismické činnosti nebo náklonu. Čidlo je vybaveno dvoukanálovým ADC převodníkem, kdy každý převodník zpracovává data z jedné akcelerační osy. Katalogové hodnoty převzaty z [9]:

- Měření osvětlení:
 - Rozsah hodnot: $\pm 2 \text{ G}$ ($1 \text{ G} = 9,81 \text{ m/s}^2$)
 - Citlivost: 167 mV/G, $\pm 17\%$
 - Rozlišení: 2 mG RMS
- Provozní napětí V_{cc} : 3,0V až 3,6V

5.3 Crossbow MIB 520

Jedná se o USB bránu, která poskytuje připojení k IRS uzlům. Tato brána umožňuje jak programování jednotlivých připojených uzlů, nebo může sloužit jako základnová stanice sloužící pro propojení uzlu s počítačem. Brána je vybavena dvěma porty. První port slouží pro programování uzlů, druhý port slouží k ovládání a získávání dat z uzlu. Brána je kompletně napájena z USB portu a zajišťuje i napájení připojeného uzlu přes připojovací konektor. Brána je také vybavena JTAG konektorem, který slouží pro optimalizaci programového kódu. Vzhled USB brány je zobrazen na obrázku 5.5.



Obr. 5.5: USB brána MIB520 převzato z [6]

5.4 Trimble GeoExplorer 2008

Pro porovnání a určení referenčních souřadnic byl použit GPS přístroj Trimble GeoExplorer 2008 GeoXM. Jedná se zařízení platformy Pocket PC sloužící pro vysoce kvalitní sběr GPS dat pro systémy GIS. Zařízení je schopno určovat souřadnice s přesností v rozsahu 60 centimetrů až 3 metrů díky použití DGPS korekcí přijímaných ze systému EGNOS. Zařízení umožňuje sběr dat a buď jejich automatickou real-time DGPS korekci nebo je možné data pouze uložit a jejich korekci provést podle aktuálních korekčních souborů dostupných z internetu. Vzhled přístroje zobrazuje obrázek 5.6.



Obr. 5.6: Trimble GeoExplorer 2008 GeoXM převzato z [15]

6 POUŽITÉ APLIKACE

6.1 Tiny Os

TinyOs je open source operační systém implementovaný a vyvíjený v programovacím jazyku nesC¹. Podle názvu se jedná o velmi malý operační systém, kde jádro samotného systému má méně než 400 bajtů. Aktuálně je systém dostupný ve verzi 1.x a 2.x, kdy každá verze poskytuje jiný přístup k prvkům a jednotlivé verze mezi sebou nejsou kompatibilní. Podrobný popis obou verzí systému, jejich využití, zdrojové kódy a instalační pokyny lze nalézt na webových stránkách². Programy a aplikace využívají softwarové komponenty, které mají za úkol prezentovat softwarovou a hardwarovou abstrakci. Komponenty lze propojovat a řetězit pomocí poskytovaných rozhraní. Tiny Os obsahuje komponenty rozhraní pro snímání dat ze senzorů, ovládání prvků, paketovou komunikaci.

6.1.1 Tiny Os 1.x

Tiny Os ve verzi 1.x byl použit při vypracovávání semestrálního projektu, který navazoval na tuto diplomovou práci. Sloužil k prvotnímu seznámení se s programovacím jazykem a jeho použitím. V tomto jazyce byly napsány a použity aplikace pro obsluhu senzorové desky MTS420cc a komunikačního uzlu, který předával data po sériovém rozhraní do počítače.

Nevýhodou tohoto systému, který např. firma Crossbow dodává jako vývojovou softwarovou platformu spolu s IRIS uzly pod názvem MoteWorks je pouze textově orientované programování, které snižuje čitelnost a orientaci v kódu.

Aplikace pro ovládání senzorové desky MTS420cc

Program aplikace, která ovládá a přenáší přes rádiové rozhraní všechny údaje ze senzorové desky je v balíku MoteWorks obsažena jako vzorový příklad. Pro použití dle zadání byla tato aplikace upravena tak, aby se zasílali pouze data z GPS čipu v 5 vteřinových intervalech.

¹zkratka pro Network embedded system C

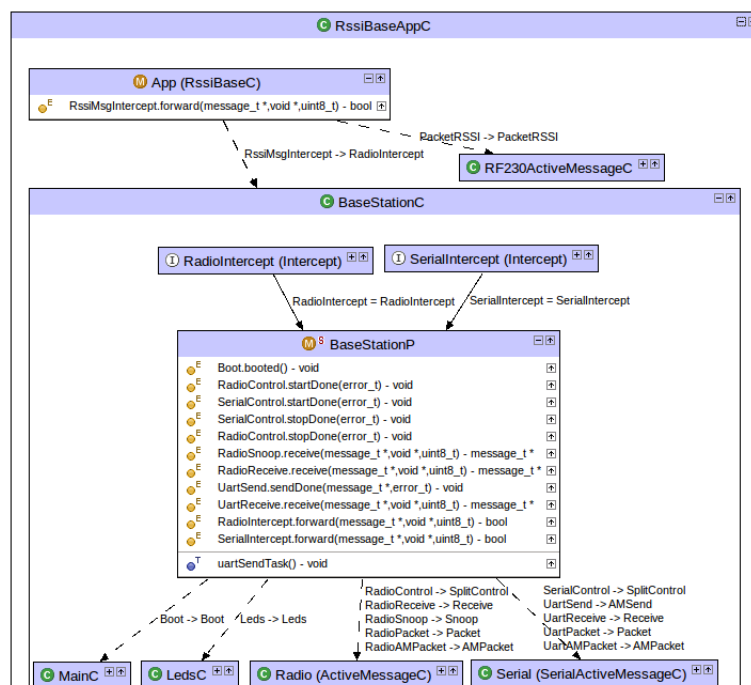
²Webové stránky operačního systému Tiny OS dostupné na <http://www.tinyos.net/>

6.1.2 Tiny Os 2.x

Tiny Os ve verzi 2.x vychází z verze 1.x, ale je upraven a vylepšen tak, že inovuje a mění limitující vlastnosti Tiny Os 1.x. Z tohoto důvodu verze 2 není zpětně kompatibilní s verzí 1. Také tento systém nemá v základu implementovanu podporu starších typů zařízení, která byla podporována ve verzi 1.x.

RSSI brána

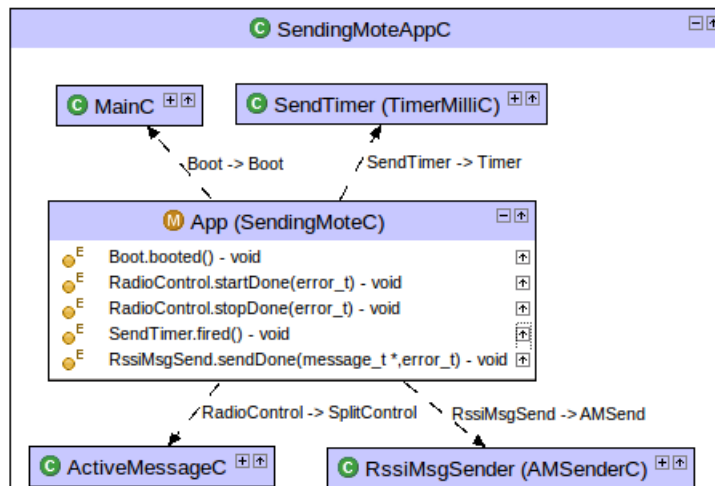
Aplikace nahraná v komunikačním uzlu, která slouží pro propojení bezdrátové senzorové sítě s počítačem. Tato aplikace nijak nezasahuje do bezdrátové komunikace. Brána přeposílá data přijaté rádiovým rozhraním na sériový port. Po příjmu prázdného paketu, který obsahuje pouze číslo odesílacího uzlu, je vyvoláno přerušení, ve kterém je z paketu načtena hodnota PHY_RSSI a proveden její přepočet na RSSI. Hodnota RSSI je poté podle 4.3 přepočtena na vzdálenost. Tato přepočtená hodnota vzdálenosti je poté připojena do datové části paketu, který je odeslán na sériové rozhraní. Aplikace vychází z dostupné vzorové ukázky RssiDemo dostupné ve zdrojových kódech TinyOs 2.x. Tato vzorová aplikace však nepodporuje komunikační jednoty IRIS a na sériové rozhraní zasílá pouze hodnotu registru PHY_RSSI. Tato vzorová aplikace proto byla upravena tak, aby fungovala na dané platformě a byla rozšířena o funkci přepočtu hodnoty PHY_RSSI na vzdálenost.



Obr. 6.1: Diagram propojených komponent aplikace brány

RSSI kotevní uzel

Aplikace nahraná v kotevních uzlech, která v pravidelných časových intervalech zasílá přes rádiové rozhraní uzlu prázdný datový rámec.



Obr. 6.2: Diagram propojených komponent aplikace kotevního uzlu

6.2 Aplikace použité pro zobrazení a porovnání získaných dat

V následujících odstavcích je krátký popis všech použitých aplikací, pomocí kterých byly data potřebná pro vypracování této práce získávána a porovnávána.

6.2.1 Aplikace pro zobrazení RSSI a vzdálenosti

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole RSSI brána, která je připojená k počítači zasílá na sériové rozhraní data s informacemi o čísle uzlu a hodnotu RSSI přepočtenou na vzdálenost k tomuto uzlu. Pro zobrazení těchto dat slouží aplikace napsaná v jazyce JAVA. Pro funkčnost této aplikace je potřeba mít spuštěnou aplikaci `SerialForwarder` (standardně součástí instalace Tiny Os 2.x), která přichází data na sériovém rozhraní zpřístupňuje na lokálním UDP portu.

6.2.2 Aplikace pro trilateraci

Jedná se o zdrojový kód v jazyce Python, který po zadání tří souřadnic referenčních kotev a vzdáleností hledaného neznámého uzlu k těmto kotvám provede na základě trilaterace určení polohy tohoto neznámého uzlu.

Zadání souřadnic referenčních kotev je ve WGS 1984 formátu, vzdálenost hledaného bodu ke kotvám je zadávána v metrech. Algoritmus poté provede konverzi WGS 1984 souřadnic do kartézského souřadnicového systému ECEF. V tomto formátu se provede určení polohy hledaného bodu. Rovnice pro určení této polohy jsou popsány v kapitole 3.2 a 3.2.1. Souřadnice hledaného bodu jsou poté převedeny zpět do WGS 1984 formátu, který je i výstupem programu.

Všechny souřadnice vypočtených bodů pomocí tohoto algoritmu jsou přehledně zobrazeny v tabulce A.3. Zdrojový kód programu je uložen na DVD, které je připojeno k tištěné verzi práce.

6.2.3 Aplikace pro referenční ověření a porovnání

PathFinder Office

Jedná se o aplikační balík kancelářských programů, který umožňuje pracovat s GPS daty. Pomocí toho softwaru lze importovat a zpracovat uložená data ze zařízení Trimble GeoExplorer. U získaných dat lze provádět diferenční zpracování a provést tak další zpřesnění naměřených dat pomocí aktuálně stažených volně dostupných korekčních dat z internetu. Programový balík také umožňuje export všech bodů do obecné databázové struktury.

Program byl při praktické realizaci použit k přenosu změřených dat z GeoExploreru a následně pomocí dostupných možností bylo provedeno zpřesnění těch dat. Tyto data byly potom exportovány do obecného databázového souboru.

ArcGIS

Jeden z nejrobustnějších komplexních programů pro tvorbu a správu map a jejich podkladů pro geoinformační technologie. Tímto programem lze provádět zobrazení a editaci vektorových dat nad mapovými daty. Pomocí tohoto systému lze importovat jakoukoli souborovou databázi, která obsahuje data sesbíraných bodů nebo mapových podkladů.

Pomocí toho programu bylo provedeno načtení jak databáze referenčních bodů exportovaných z GPS PathFinderu, tak i vložení samostatných tabulkových souborů, které obsahovali souřadnice změřené pomocí senzorové desky MTS420cc a přepočtené doby trilaterací algoritmu.

Jelikož program ve zkušební verzi umožňuje zobrazit mapové podklady pouze na území Severní Ameriky byly výsledné body ze všech importovaných databází exportovány do KML formátu. Výstup z tohoto programu je zobrazen na obrázcích 7.8 a 7.9.

Google Earth

Volně dostupný program pro zobrazení tzv. virtuálního 3D glóbusu. Umožňuje zobrazit virtuální mapu celého světa poskládanou z družicových snímků. Tento program byl použit pro zobrazení veškerých bodů na mapovém podkladu. Obrázek výsledného zobrazení bodů je na obrázku B.1.

7 PRAKTICKÉ VÝSLEDKY DIPLOMOVÉ PRÁCE

Zadáním této práce byl výzkum využití GPS v bezdrátových senzorových sítích, porovnání jeho energetické náročnosti a přesnosti s lokalizačním systémem pracujícím s kotevní trilaterální metodou. V následujících odstavcích jsou popsány jednotlivé metody, a dosažené výsledky. Měření probíhalo tak, že bylo náhodně zvoleno 20 bodů v okolí zvoleného referenčního prostoru. Pro každý takto zvolený bod se provedlo:

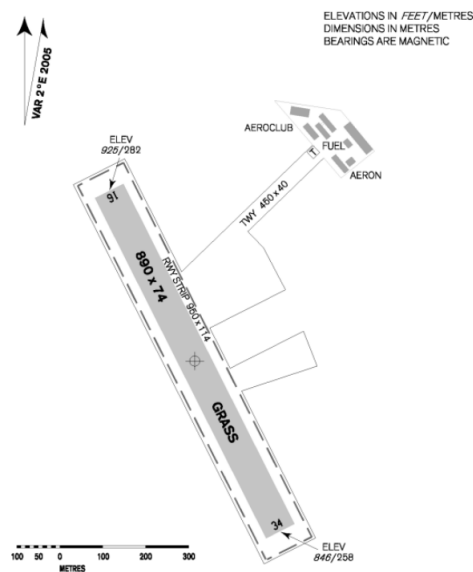
- Měření GPS souřadnic pomocí senzorové desky MTS420cc
- Měření výkonové úrovně signálu přijatého z kotev
- Měření GPS souřadnic pomocí Trimble GeoExploreru

7.1 Prostory realizace

Pro realizaci venkovního měření GPS i trilaterální lokalizace bylo zvoleno okolí medláneckého letiště na okraji Brna. Travnatá přistávací dráha má rozměry 890 x 74 metrů, sousední modelářská dráha, na které bylo prováděno měření se rozkládá na rozměrech 80 x 40 metrů. Areál letiště je pro pěší přístupný z komínského sídliště po polní cestě, pro cyklisty a motoristy se lze k areálu dostat po ulici Turistická. Letiště bylo zvoleno z následujících důvodů:

- V okolí letiště je pouze drobná zástavba
- Udržovaná travní plocha
- Rovný terén

Pro realizaci byl zvolen prostor o rozměrech 40 x 40 metrů na okraji modelářské dráhy. Tento prostor je zobrazen na obrázku 7.1(b). V okolí letiště bylo nejdříve provedeno měření výkonové úrovně signálu na vzdálenosti, které je podrobněji popsáno v kapitole 7.3.



(a) Letecká mapa letiště



(b) Zaznačený prostor kde probíhalo měření

Obr. 7.1: Mapa letiště, zdroj [www.akmedlanky.cz, www.mapy.cz]

7.2 Lokalizace uzlů pomocí GPS

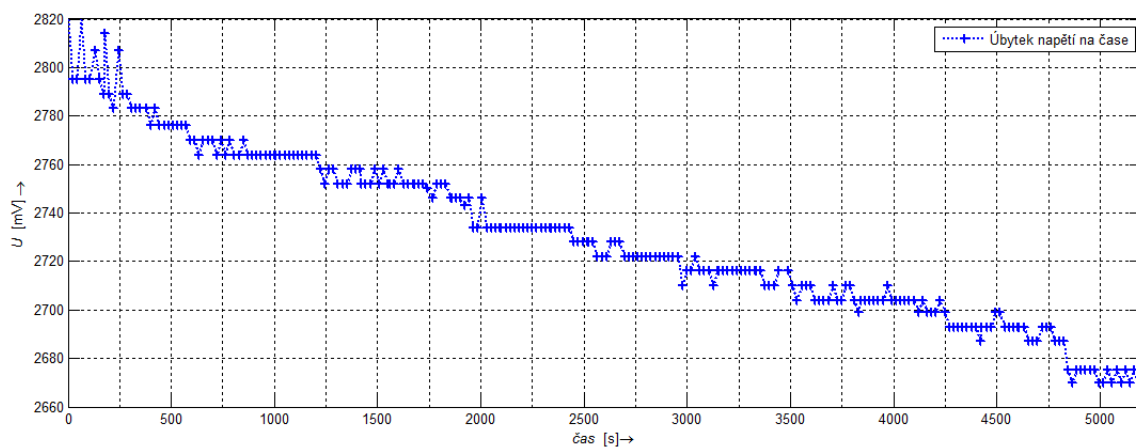
Tabulka A.1 v příloze souhrnně zobrazuje změřené GPS souřadnice, které byly zaznamenány pomocí sensorové desky MTS420cc. Podrobný popis a možnosti použití této desky jsou popsány v kapitole 5.2.

Komunikační jednotka byla naprogramována tak, aby každých 5 vteřin načetla informace z GPS čipu a odeslala je rádiovým rozhraním. K počítači připojený uzel v USB bráně MIB520 viz schéma 5.1 byl naprogramován jako bridge, kdy veškerá data která přijme přes rádiové rozhraní odešle na rozhraní sériové. Pro zachytávání dat ze sériového rozhraní byl využit program xserve, který je součástí vývojového prostředí TinyOs 1.0.

7.2.1 Energetická náročnost při použití GPS

Graf 7.2 zobrazuje úbytek napětí baterií komunikačního modulu vybaveného MTS420cc sensorovou deskou se zapnutým GPS čipem. Uzel byl kontinuálně napájen pomocí dvou nabíjecích NiMH baterií, jejichž napětí je 1.2 V a mají udávanou kapacitu 2600 mAh. Komunikační uzel se sensorovou deskou byl nastaven tak, že GPS čip byl kontinuálně napájen (druhou možností je nastavení vypnutí čipu v neaktivní době). Paket se odesílal každých 5 vteřin a jeho velikost je 50B. Ze získaných dat lze odvodit, že při kontinuálním napájení GPS přijímače poklesne napětí baterií

za jednu hodinu o 86,8 mV. Měřením bylo také zjištěno že při poklesu napětí baterií pod hodnotu 2670 mV dojde k odpojení GPS čipu.

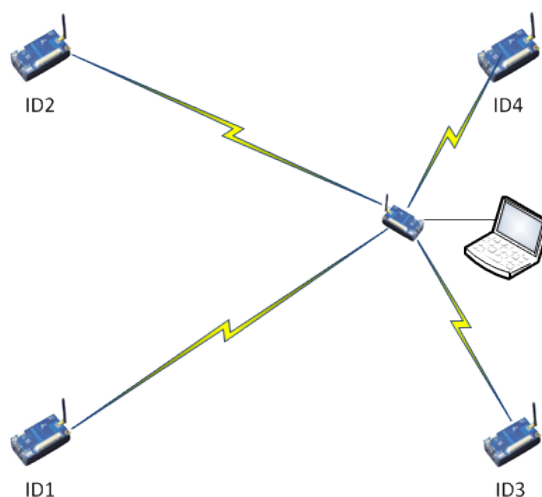


Obr. 7.2: Graf závislosti úbytku napětí na čase při použití GPS čipu v MTS420cc

7.3 Lokalizace pomocí trilaterace

Pro možnosti zjišťování polohy uzlu na základě trilaterace, která pracuje s hodnotou RSSI bylo potřeba nejdříve provést měření závislosti RSSI na vzdálenosti pro daný prostor. Toto měření bylo provedeno z důvodu určení parametrů $P0, d0, \eta$, které byly použity k určení aproximační funkce.

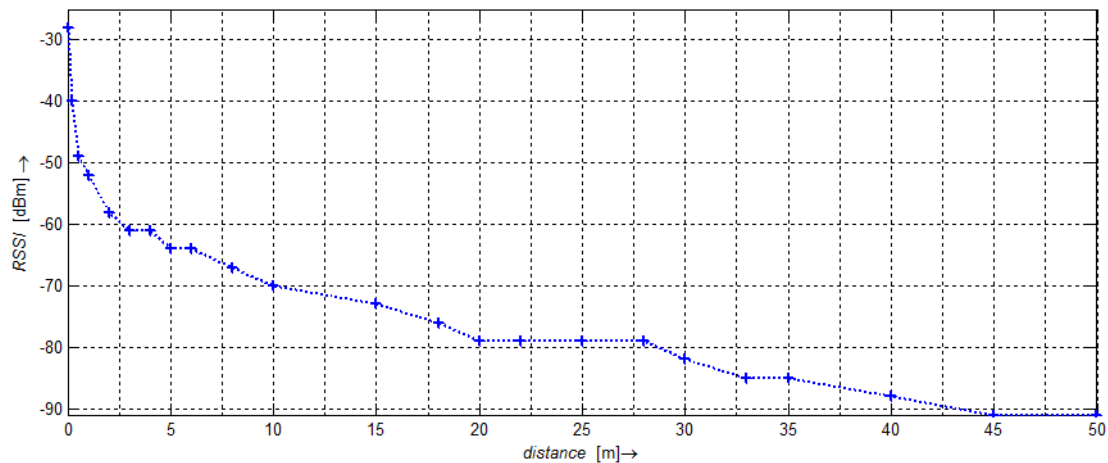
Změřené hodnoty zobrazuje graf 7.4. Z hodnot, které jsou zobrazeny v grafu je patrné, že nejvýznamnější rozdíly výkonové úrovně signálu jsou do hodnoty 20 metrů. Za hranicí 20 metrů se již hodnota RSSI na vzdálenosti mění velmi pozvolna. Na základě tohoto zjištění byla jako mezní vzdálenost mezi dvěma kotvami po konzultaci s vedoucím práce stanovena na 20 metrů. Z tohoto důvodu byl poté prostor letiště, na kterém probíhalo měření rozdělen na 4 části ve tvaru čtverce s délkou strany 20 metrů. Schéma vzorově rozmístěných kotevních prvků a hledaného bodu pro možnosti měření trilaterace zobrazuje 7.3.



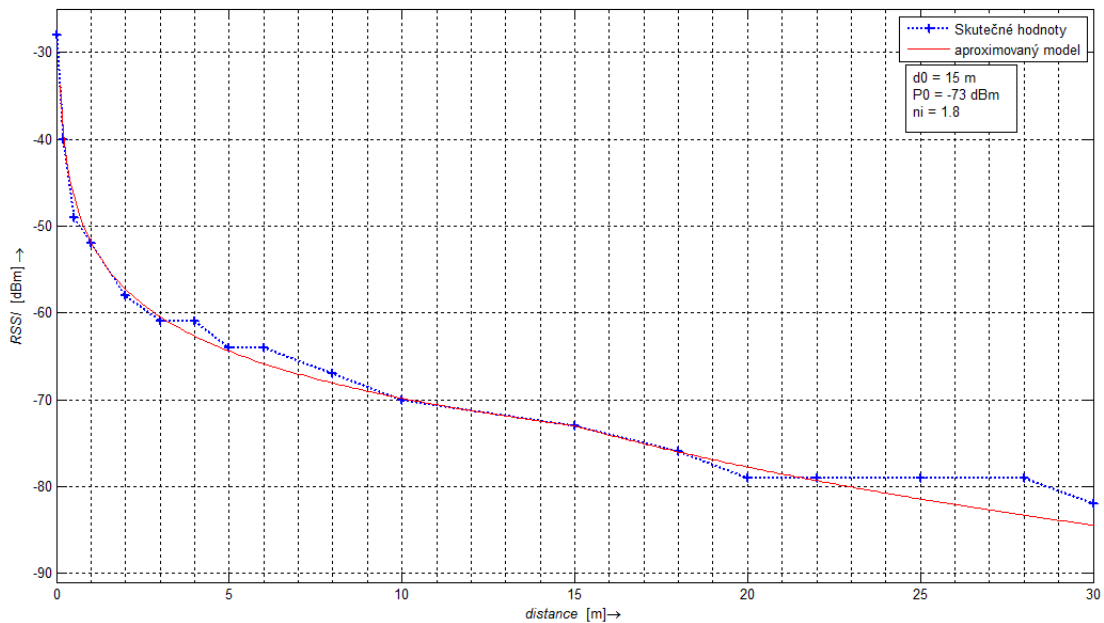
Obr. 7.3: Vzorové schéma rozmístění kotev a neznámého uzlu

7.3.1 Přepočtené hodnoty pro trilateraci

Tabula A.2 v příloze přehledně zobrazuje změřené hodnoty parametru RSSI v jednotlivých bodech, a jejich přepočet na vzdálenost podle použitého vzorce z 4.3 pro hodnoty P_0 , d_0 , η určené podle grafu 7.5.



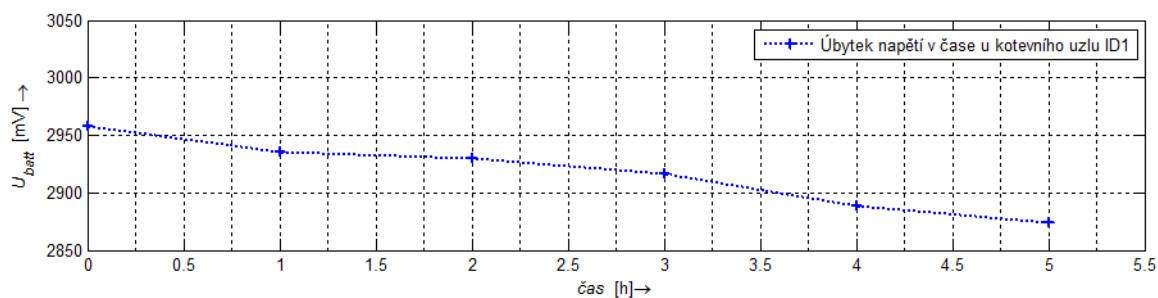
Obr. 7.4: Graf závislosti RSSI na vzdálenosti pro prostory letiště



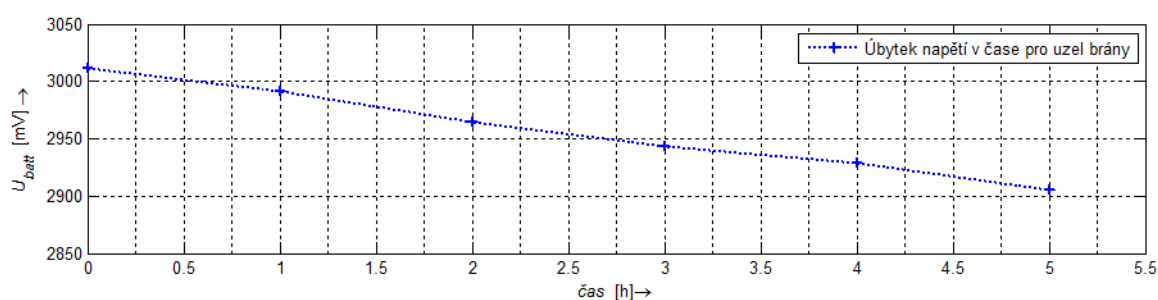
Obr. 7.5: Graf aproximované funkce a skutečných hodnot pro určení vzdálenosti

7.3.2 Energetická náročnost trilaterace

Pro určení energetické náročnosti při použití kotevní trilaterální metody bylo měřeno napětí baterií jak jednoho kotevního uzlu, tak základnové stanice, která prováděla přepoččet přijatých RSSI dat a jejich zasílání po sériovém rozhraní. Ze schématu 7.3 je patrné, že uzel brány je připojen a zároveň i napájen pomocí programovacího modulu MIB520 k počítači. Pro možnost určení úbytku napětí v čase na tomto uzlu bylo potřeba naprogramovat identicky další uzel, který by byl napájen z baterií. Tento uzel byl poté umístěn vedle uzlu připojeného přes MIB520. Kotevní uzel byl nastaven tak, že v pravidelném intervalu 5 s odesílal prázdný paket o velikosti 50B. Pro oba uzly probíhalo měření úbytku napětí tak, že se u obou uzlů změřila hodnota napětí baterií před samotným zahájením měření, a další hodnoty napětí se odečítaly po hodinových intervalech. Graf úbytku napětí pro jednotlivé uzly zobrazuje obrázek 7.6 a 7.7.



Obr. 7.6: Úbytek napětí v čase u kotevního uzlu ID1



Obr. 7.7: Úbytek napětí v čase u uzlu trilaterační brány

Z hodnot zobrazených v grafech 7.6 a 7.7 lze potom určit že pokles napětí baterií pro kotevní uzel za 1 hodinu je 14 mV. U uzlu který sloužil jako brána pokleslo napětí baterií za 1 hodinu o 22 mV.

7.4 Porovnání přesnosti

7.4.1 Vyhodnocení přesnosti GPS přijmače MTS420cc

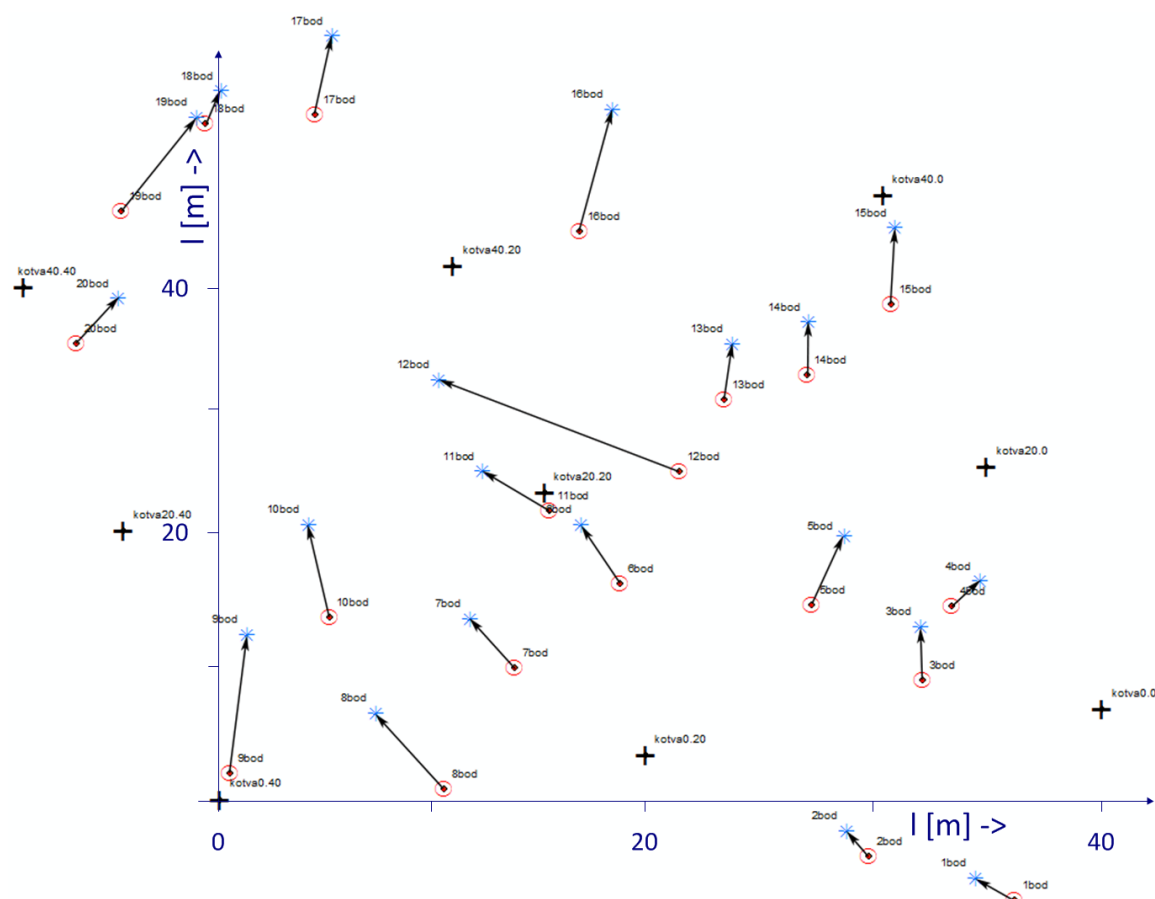
Pro určení přesnosti měření byly stanoveny jako referenční a skutečné body od kterých se měřila odchylka body změřené pomocí Trimble GeoExploreru. Při zaměřování těchto bodů byla chybovost před korekcí v TerraSync programu v rozmezí 86 centimetrů až 1,1 metru. Zobrazením jak referenčních, tak i změřených GPS bodů v programu ArcMap a GoogleEarth umožňuje určit jejich absolutní rozdíl. Obrazové podklady jednotlivých zobrazení jsou součástí 7.8 a B.1 přílohy. V podkladech jsou křížkem znázorněny kotevní body, červeně jednotlivé referenční body a modře hodnoty změřené sensorovou deskou. Z takto zobrazených dat lze pomocí dostupných nástrojů určit absolutní chybu mezi referenčními a změřenými body. Nejnížší chyba je 1,89 metru, nejvyšší chyba je 9,8 metru. Průměrná odchylka referenčních a změřených bodů je 4,51 metry.

Tab. 7.1: Tabulka chybovosti měření pro jednotlivé body

Bod	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
δ [m]	2,34	1,89	3,65	2,08	2,89	4,51	3,99	6,24	9,8	6,5
Bod	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
δ [m]	4,19	9,6	3,9	3,83	5,48	8,61	5,4	2,39	7,53	3,73

Tab. 7.2: Souhrnná tabulka chybovosti měření sensorové desky

-	min	avg	max
δ [m]	1,89	4,51	9,80



Obr. 7.8: Zobrazení kotevních, referenčních a bodů z MTS420cc v mapovém podkladu, černě poloha kotevních uzlů, červeně referenční body, modře body získané pomocí MTS420cc

7.4.2 Vyhodnocení přesnosti trilaterací metody

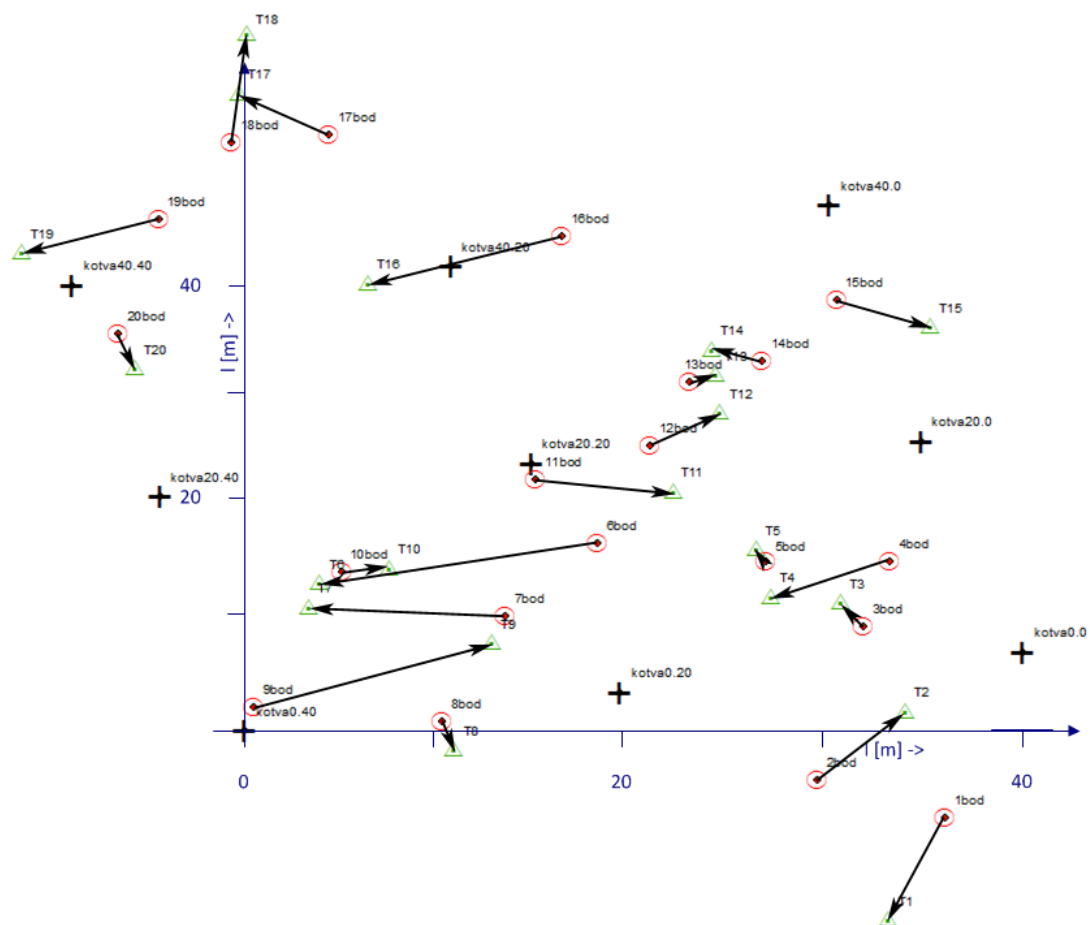
Tabulka A.3 zobrazuje pro jednotlivé měřené trilaterací body přepočtené GPS souřadnice. Tyto hodnoty byly přepočteny ze znalosti vzdáleností bodů k referenčním kotvám. Všechny tyto vzdálenosti jsou obsaženy v tabulce A.2. Pro přesnější přepočet souřadnic, byly u všech bodů vybrány vždy 3 hodnoty, jejichž vzdálenost k referenčním kotvám je co nejmenší. Tímto výběrem není metoda trilaterace nijak ovlivněna, jelikož pro správné určení bodu v prostoru potřebuje minimálně 3 hodnoty. Bylo tím ale dosaženo určité selekce a eliminace hodnot, které by zvětšovaly chybu určování polohy. Pro určení přesnosti měření byly stejně jako v předchozích bodech za referenční hodnoty zvoleny data Trimble GeoExploreru. Grafické znázornění polohy referenčních a přepočtených trilaterací bodů je zobrazeno v mapovém podkladu na obrázcích 7.9 a B.1, které jsou umístěny v příloze. V obrázcích jsou křížkem vyznačeny polohy kotev, červeně jednotlivé referenční body a zeleně přepočtené trilaterací body. Nejnižší chyba je 1,1 metru, průměrná odchylka referenčních a vypočtených bodů je 6,98 metru. Maximální rozdíl je 15,92 metrů.

Tab. 7.3: Tabulka chybovosti měření jednotlivých bodů u trilaterace

Bod	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
δ [m]	8,76	7,36	2,30	6,82	1,10	15,92	10,28	2,40	13,57	2,52
Bod	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
δ [m]	7,29	4,54	1,54	2,88	5,38	10,92	9,38	8,82	7,81	3,00

Tab. 7.4: Souhrnná tabulka chybovosti měření pro trilateraci

-	min	avg	max
δ [m]	1,10	6,98	15,92



Obr. 7.9: Zobrazení kotevních, referenčních a trilaterálních bodů v prostoru, černě poloha kotevních uzlů, červeně referenční body, zeleně body přepočtené trilateracním algoritmem

7.5 Zhodnocení použitých metod, jejich výhody a nevýhody

7.5.1 Použití GPS k určování polohy

Z výsledků obsažených v této práci lze říci, že pro určování polohy neznámého uzlu pomocí GPS souřadnic, které byly získávány pomocí sensorové desky MTS420cc, která je popsána v kapitole 5.2 je průměrná chyba určování polohy 4,51 metru. Z grafu 7.2 lze určit že pokles napětí baterií za jednu hodinu je 86,8 mV. Tyto hodnoty platí za situace, kdy uzel odesílá data z GPS čipu každých 5 vteřin a GPS čip je i během neaktivní doby kontinuálně napájen z baterií.

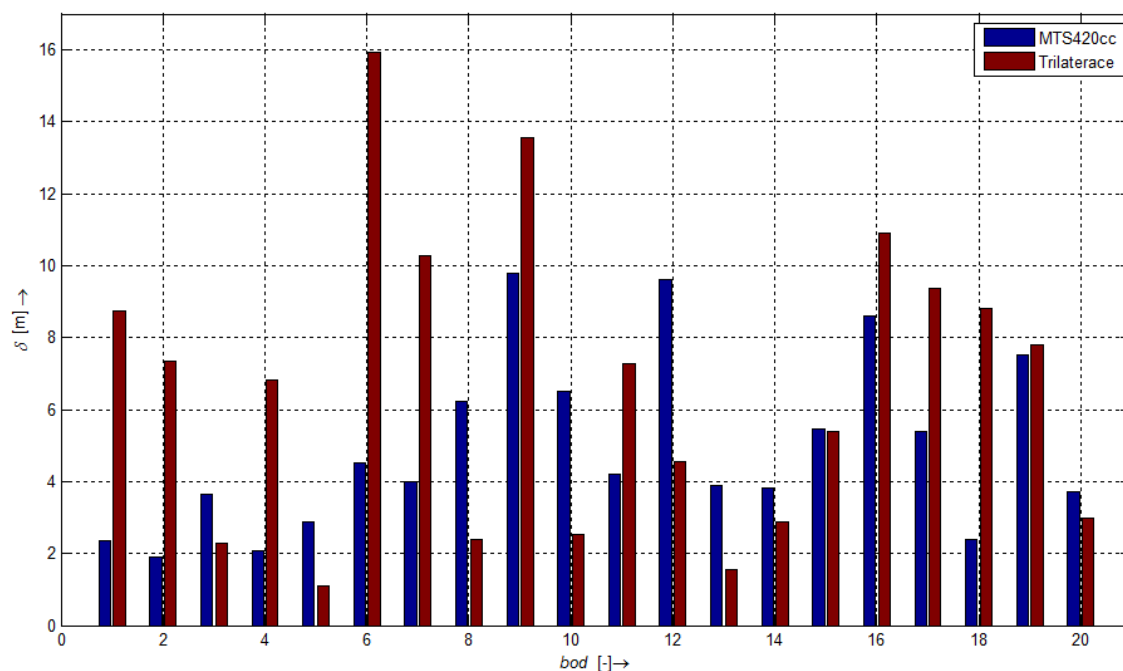
K realizaci a funkčnímu provozu bezdrátové sensorové sítě, která zasílá GPS data ze sensorové desky je zapotřebí minimálně 2 uzlů. Jeden uzel slouží jako brána připojená k počítači, která zobrazuje nebo zaznamenává data. Druhý uzel je osazen sensorovou deskou a ve stanovených intervalech zasílá požadovaná data. Těchto uzlů může být v síti několik. Limitujícím faktorem realizace takovéto sítě je pouze vzdálenost mezi kterou mohou uzly navzájem komunikovat.

7.5.2 Použití kotevního systému k určování polohy

Z výsledků obsažených v této práci lze říci, že pro určení polohy neznámého uzlu pomocí kotevního trilaterálního algoritmu je průměrná chyba určení polohy 6,89 metru. Z grafů 7.6 a 7.7 lze určit, že pokles napětí na bateriích pro uzel kotvy je 14 mV za hodinu a pro uzel brány 22 mV za hodinu. Útlumový profil rádiového prostředí místa kde probíhala lokalizace a jeho aproximovaný model zobrazuje graf 7.4 a 7.5. K realizaci a funkčnímu provozu bezdrátové sensorové sítě, ve které se má provádět tato lokalizace jsou potřeba minimálně 4 uzly. Minimálně 3 uzly (v našem případě 4) uzly slouží jako pevně zvolené referenční kotevní body. Jeden nebo více uzlů potom lze v takto vytvořené síti lokalizovat. Omezujícími faktory této realizace je velká proměnnost a nestálost parametrů útlumového modelu. Tento model je vždy unikátní pro dané rádiové prostředí. Model je závislý nejen na dané lokalitě ale i na vlastnostech okolí. Nestálost a proměnnost tohoto modulu je podrobně popsána a zhodnocena v článku [17]. Například pouhý výškový rozdíl 6 centimetrů mezi uzly nebo nárůst trávy mají značný vliv na výslednou hodnotu RSSI.

7.5.3 Vyhodnocení energetické náročnosti a přesnosti obou použitých metod

Graf 7.10 a tabulka 7.5 přehledně zobrazují výslednou chybovost měření pro zadané referenční body u obou použitých metod.

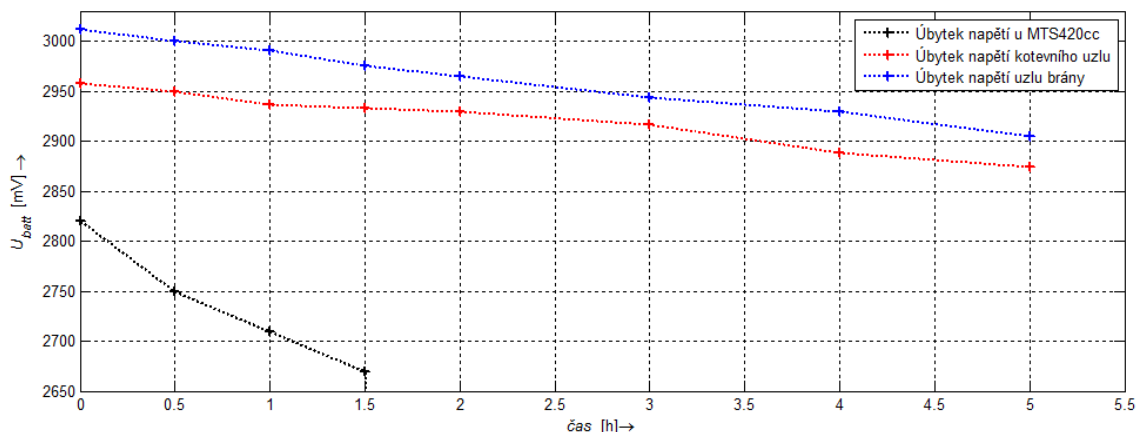


Obr. 7.10: Graf chybovosti měření pro obě použité lokalizační metody

Tab. 7.5: tabulka chybovosti měření jednotlivých bodů pro obě metody

Bod	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
δ_{MTS420} [m]	2,34	1,89	3,65	2,08	2,89	4,51	3,99	6,24	9,80	6,50
$\delta_{trilaterace}$ [m]	8,76	7,36	2,30	6,82	1,10	15,92	10,28	2,40	13,57	2,52
Bod	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
δ_{MTS420} [m]	4,19	9,60	3,90	3,83	5,48	8,61	5,40	2,39	7,53	3,73
$\delta_{trilaterace}$ [m]	7,29	4,54	1,54	2,88	5,38	10,92	9,38	8,82	7,81	3,00

V grafu 7.11 je přehledně zobrazena energetická náročnost pro obě použité lokalizační metody. Z grafu je patrné že pokles napětí baterií uzlu s připojenou senzorovou deskou MTS420cc je téměř čtyřikrát větší než u uzlů bez této desky.



Obr. 7.11: Graf úbytků napětí pro obě použité metody

7.5.4 Výhody a nevýhody jednotlivých metod

GPS lokalizace

Výhodou GPS lokalizace je její snadné a rychlé nasazení. GPS souřadnice zasílané uzlem lze přímo použít pro zobrazení v mapě, a určování změny pohybu uzlu.

Nevýhodou můžou být nemalé finanční náklady, které je potřeba investovat do senzorové desky poskytující GPS data pro každý uzel. Omezujícím faktorem je také to, že při poklesu napětí baterií pod hodnotu 2670 mV dojde k odpojení GPS čipu na senzorové desce viz [16].

Velkou nevýhodou je také to že GPS lokalizaci lze využívat pouze ve venkovních prostorech. Měřením bylo zjištěno, že průměrná chybovost určení vzdálenost byla 4,5 metru.

Lokalizace pomocí kotevního systému

Jako výhodou této metody lze vzít v úvahu jednoduchost řešení, kdy k určování polohy využíváme dostupných parametrů, které uzly samy zjišťují a není potřeba žádné další investice do rozšiřující senzorové desky. Další výhodou je fakt, že tato metoda určování polohy může být použita i v uzavřených prostorech např. k určování polohy zboží ve výrobní hale nebo sledování polohy osob uvnitř budov.

Nevýhodou tohoto řešení je, že pro samotnou realizaci musí být nejdříve určeny konkrétní parametry P_0, d_0, η popisující daný prostor, ve kterém měření probíhá. Další nevýhodou tohoto systému je nepředvídatelná změna těchto parametrů. Měřením bylo zjištěno že průměrná chybovost určení vzdálenosti byla téměř 7 metrů, což je skoro dvojnásobná hodnota chyby oproti GPS lokalizaci. Na velikosti této chyby se podepisuje řada parametrů. Jedná se například o proměnnost parametru RSSI v čase, který nemusí odpovídat modelu popsáném v 7.5, dále zdrojem chybovosti může být i nepatrná změna polohy a natočení antény jak kotevních uzlů tak i uzlu brány. V neposledním bodě se na velikosti této chyby podepisuje rozlišovací schopnost určení hodnoty RSSI, která je pro použité IRIS uzly podle rovnice $5.1 \pm 3 \text{ dBm}$.

8 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo navázat na výsledky a poznatky získané ze semestrálního projektu a provést výzkum a zhodnocení energetické náročnosti při použití globální lokalizační techniky a lokální kotevní trilaterační techniky v bezdrátové senzorové síti. Realizace obou těchto lokalizačních metod byla provedena na otevřeném prostoru.

Měřením bylo zjištěno že při použití GPS čipu ublox LEA-4A, který je osazen na senzorové desce MTS420cc ze dosáhnout průměrné chyby určení polohy 4,5 metru. Pokles napětí na bateriích při tomto měření za jednu hodinu je 86,8 mV viz graf 7.2. Z měření také vyplynulo, že při poklesu napájecího napětí připojených akumulátorů pod hodnotu 2670 mV dojde k odpojení GPS čipu. V našem případě, kdy byl čip kontinuálně napájen pomocí dvou nabíjecích NiMH baterií s kapacitou 2600 mAh a data o poloze se zasílala každých 5 vteřin došlo k odpojení čipu po 1 hodině a 20 minutách.

Pro lokální lokalizační systém, který pracoval na určování vzdálenosti ze znalosti hodnoty RSSI byla určena průměrná chyba určení polohy téměř 7 metrů. Před možností určování polohy pomocí této metody, bylo provedeno zaměření prostorů a určení parametrů P_0, d_0, η pro prostory letiště. Pro prostory letiště byly hodnoty následující $P_0 = -73 \text{ dBm}, d_0 = 15 \text{ m}, \eta = 1,8$. Tyto hodnoty byly změřeny dne 8.5.2012 a jsou platné pouze pro lokalitu kde probíhalo měření. Pokles napětí na bateriích za jednu hodinu při tomto měření dosahoval úbytku 22 mV pro uzel brány a 14 mV pro kotevní uzel. Z poznatků viz 7.6 a 7.7 a výsledků studie [12] lze říci, že IRIS uzel bez připojené senzorové desky dokáže pracovat více než 6 dní. Nevýhodou této metody je nutnost kalibrace a nastavení senzorové sítě před samotným rozmístěním a měřením z důvodů různých hodnot P_0, d_0, η pro každé prostředí. Limitující je také rozlišovací schopnost určení RSSI parametru, která pro IRIS uzly je dle $5.1 \pm 3 \text{ dBm}$. Výhodou je naopak možnost provozovat tento systém i uvnitř budov, kde systém GPS z principu nemůže fungovat.

Tato práce používá k odhadu vzdálenosti parametr RSSI, který je určen jako medián všech přijatých RSSI hodnot. Námětem na další práci by tak mohla být implementace určování parametru RSSI pomocí Gaussovy metody nebo pomocí DBFM metody. Implementace těchto metod by měla vést k podstatnému zpřesnění výsledků lokalizace, které by se poté mohly blížit přesnosti GPS lokalizace.

LITERATURA

- [1] Atmel: *AT86RF230 datasheet* [online] [s.l.] : [s.n.], 2009. 98 s. Dostupné z URL: <http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc5131.pdf>.
- [2] Atmel: *ATmega 1281 datasheet* [online] [s.l.] : [s.n.], 2011. 386 s. Dostupné z URL: <http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2467.pdf>.
- [3] BLUMENTHAL, J., et al. *Weighted Centroid Localization in Zigbee-based Sensor Networks. Intelligent Signal Processing* [online]. 2007. Dostupné z URL: <ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4447528&isnumber=444749>.
- [4] BOTTA, Miroslav. *Optimalizace odhadu vzdálenosti v bezdrátové ad-hoc síti*, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. 2011. 62 s. Diplomová práce. Dostupné z URL: <https://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace?zp_id=39818>
- [5] Crossbow. *IRIS-XM2110 datasheet* [online]. [s.l.] : [s.n.], 2010. Dostupné z URL: <http://www.dinesgroup.org/projects/images/pdf_files/iris_data-sheet.pdf>.
- [6] Crossbow. *MIB520 datasheet* [online]. [s.l.] : [s.n.], 2007. Dostupné z URL: <http://bullseye.xbow.com:81/Products/Product-pdf_files/Wireless_pdf/MIB520.Datasheet.pdf>.
- [7] IEEE Computer Society. *Standard 802.15.4 Wireless Medium Access Control and Physical Layer Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)* [online]. [s.l.] : [s.n.], 2006. Dostupné z URL: <<http://voiplab.niu.edu.tw/IEEE/802.15/802.15.4-2006.pdf>>. ISBN 0-7381-4997-7.
- [8] KAPLAN, Elliott D; HEGARTY, Christopher J. *Understanding GPS : principles and applications*. [s.l.]: 2nd ed. Boston: Artech House, 2006. 703 s. ISBN 15-805-3894-0.
- [9] MEMSIC. *MTS/MDA Sensor Board Manual* [online]. [s.l.] : [s.n.], Dostupné z URL: <<http://www.memsic.com/support/documentation/wireless-sensor-networks/category/6-user-manuals.html?download=62%3Amts-mds-sensor-board-user-s-manual>>.

- [10] PATWARI, N. et al. *Locating the Nodes: Cooperative localization in wireless sensor networks IEEE Signal Processing Magazine, July 2005*. [s.l.] : [s.n.], July 2005. Dostupné z URL: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.59.692>>
- [11] SILVA, Ricardo, et al. *Use of GPS and 6LowPAN in Mobile Multi-Sink Wireless Sensor Networks - Issues and Feasibility* [s.l.] : [s.n.], 2009. Dostupné z URL: <http://www.ict-ginseng.eu/documents/md_12_use_of_gps_and_6lowpan_in_mobile_multi-sink_wireless_sensor_networks_-_issues_and_feasibility.pdf>.
- [12] SIMEK, Milan *Výběr referenčních uzlů pro bezkotevní lokalizační techniky v bezdrátových senzorových sítích* : Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2010, 105 s. Dizertační práce. Dostupné z URL: <<https://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace?zpid=34106>>.
- [13] STOJMENOVIC, I. *Handbook of Sensor Networks*. [s.l.]: Wiley, 2005. 552 s. ISBN-13: 978-0-471-68472-5.
- [14] SWAMI A., Zhao Q., Hong Y., Tong L. *Wireless Sensor Networks: Signal Processing and Communications Perspectives*. [s.l.]: Wiley, 2007. 416 s. ISBN-13: 978-0-0470-03557-3.
- [15] Trimble. *GeoExplorer® 2008 Series User Guide* [online]. [s.l.] : [s.n.], 2009. Dostupné z URL: <http://bss.sfsu.edu/jdavis/field/GeoExpl2008_100C-%20UserGde_ENG.pdf>.
- [16] ublox. *LEA-4A ANTARIS® 4 ROM-Based GPS Module*. [online]. [s.l.] : [s.n.], 2008. Dostupné z URL: <<http://www.datasheetarchive.com/indexdl/Datasheet-035/DSA0015849.pdf>>.
- [17] WHITEHOUSE, Ramin, et al. *A Practical Evaluation of Radio Signal Strength for Ranging-based Localization* Special Issue on Localization Technologies and Algorithms, 2007. Dostupné z URL: <<http://www.cs.virginia.edu/whitehouse/research/localization/whitehouse07practical.pdf>>.
- [18] XU, Jiuqiang, et al. *Distance Measurement Model Based on RSSI in WSN* [online]. [s.l.] : [s.n.], 2011. Dostupné z URL: <<http://www.scirp.org/journal/wsn/>>. ISSN: 1945-3086.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

ECEF	Earth Centered, Earth Fixed
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
FFD	Fully Function Device
GPS	Global Positioning System
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISM	Industrial, scientific and medical
JTAG	Joint Test Action Group
MAC	Medium Access Control
NiMH	Nickel-Metal Hydride
RFD	Reduced Function Device
RSSI	Received Signal Strength Indication
SMD	Surface mount device
SPI	Serial Peripheral Interface
TOA	Time Of Arrival
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
USB	Universal Serial Bus
WSN	Wireless Sensor Network

SEZNAM PŘÍLOH

A	Tabulky se změřenými daty	57
A.1	Data změřená pomocí senzorové desky MTS420cc	57
A.2	Data získaná trilaterací	58
A.3	Trilaterační data převedená na souřadnice	59
B	Porovnání lokalizačních metod a zobrazení bodů	60
B.1	Zobrazení všech bodů v mapě	60
C	Obsah dat na přiloženém DVD	63

A TABULKY SE ZMĚŘENÝMI DATY

A.1 Data změřená pomocí senzorové desky MTS420cc

Tab. A.1: GPS souřadnice změřené pomocí MTS420cc

Bod	Latitude	Longitude
1	49° 14,17520	49° 33,55630
2	49° 14,17700	16° 33,55139
3	49° 14,18480	16° 33,55419
4	49° 14,18655	16° 33,55649
5	49° 14,14200	16° 33,56340
6	49° 14,18870	16° 33,54125
7	49° 14,18510	16° 33,53700
8	49° 14,18150	16° 33,53340
9	49° 14,18450	16° 33,52849
10	49° 14,18870	16° 33,53080
11	49° 14,19070	16° 33,53749
12	49° 14,19420	16° 33,53580
13	49° 14,19560	16° 33,54700
14	49° 14,19645	16° 33,54994
15	49° 14,20000	16° 33,55329
16	49° 14,20450	16° 33,54249
17	49° 14,20735	16° 33,53174
18	49° 14,20525	16° 33,52754
19	49° 14,20420	16° 33,52655
20	49° 14,19735	16° 33,52359

A.2 Data získaná trilaterací

Tab. A.2: Změřené hodnoty RSSI a jejich přepočet na vzdálenost dle 7.5

-	RSSI [dBm]				l [m]			
Kotva/Bod	ID 1	ID 2	ID 3	ID 4	ID 1	ID 2	ID 3	ID 4
1 bod	-76	-79	-82	-82	17,99	21,58	25,88	25,88
2 bod	-67	-73	-79	-82	6,96	15,00	21,58	25,88
3 bod	-64	-70	-70	-73	4,74	10,22	10,22	15,00
4 bod	-64	-73	-67	-70	4,74	15,00	6,96	10,22
5 bod	-73	-67	-61	-67	15,00	6,96	3,23	6,96
6 bod	-73	-67	-70	-58	15,00	6,96	10,22	2,20
7 bod	-73	-64	-76	-67	15,00	4,74	22,02	6,96
8 bod	-64	-67	-76	-79	4,74	6,96	22,02	32,32
9 bod	-76	-55	-73	-73	22,02	1,50	15,00	15,00
10 bod	-76	-70	-73	-67	22,02	10,22	15,00	6,96
11 bod	-70	-52	-76	-73	10,22	1,02	22,02	15,00
12 bod	-64	-64	-73	-85	4,74	4,74	15,00	69,62
13 bod	-64	-64	-70	-79	4,74	4,74	10,22	32,32
14 bod	-67	-67	-67	-67	6,96	6,96	6,96	6,96
15 bod	-61	-76	-67	-85	3,23	22,02	6,96	69,62
16 bod	-70	-79	-64	-73	10,22	32,32	4,74	15,00
17 bod	-79	-79	-73	-73	32,32	32,32	15,00	15,00
18 bod	-79	-79	-79	-70	32,32	32,32	32,32	10,22
19 bod	-79	-76	-82	-67	32,32	22,02	47,43	6,96
20 bod	-76	-70	-82	-67	22,02	10,22	47,43	6,96

A.3 Trilaterační data převedená na souřadnice

Tab. A.3: Přepočtené hodnoty GPS souřadnic z trilateračních bodů

Bod	Latitude	Longitude
1	49.2361648331	16.5592564499
2	49.2363178782	16.5592679476
3	49.2363971744	16.5592218641
4	49.2364015756	16.5591714757
5	49.236436239	16.559160774
6	49.2364116771	16.5588451359
7	49.2363939934	16.5588369895
8	49.2362895013	16.5589422506
9	49.2363676508	16.5589695971
10	49.236422223	16.5588952001
11	49.2364785638	16.5591004455
12	49.2365360671	16.5591346178
13	49.2365636324	16.5591309363
14	49.2365823781	16.5591284326
15	49.236599168	16.5592862591
16	49.2366308643	16.5588799413
17	49.2367697798	16.5587869666
18	49.2368132818	16.5587924975
19	49.2366532504	16.5586295218
20	49.2365684782	16.5587114868

B POROVNÁNÍ LOKALIZAČNÍCH METOD A ZOBRAZENÍ BODŮ

B.1 Zobrazení všech bodů v mapě



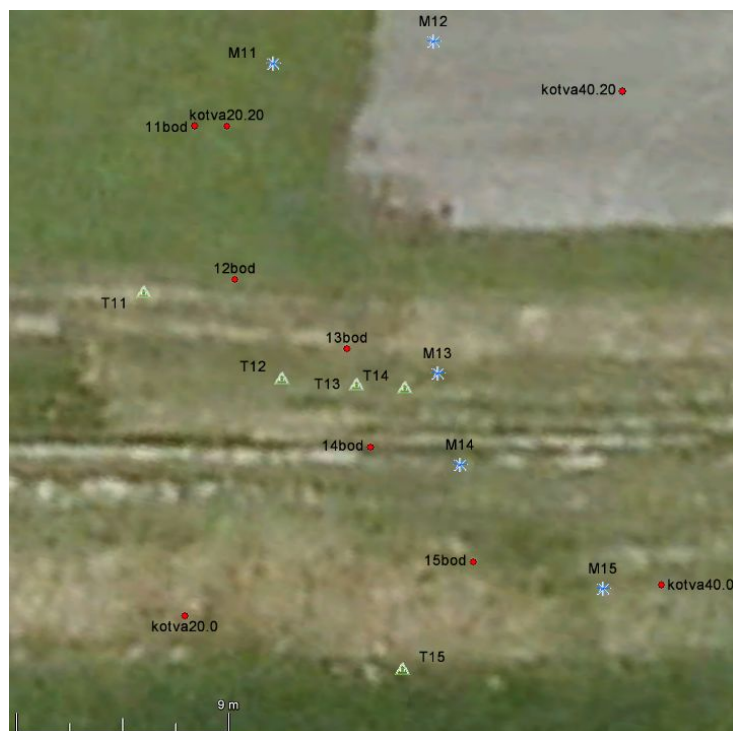
Obr. B.1: Jednotlivé body vložené do mapy pomocí GoogleEarth



Obr. B.2: Výřez bodů z B.1 v prvním měřeném kvadrantu



Obr. B.3: Výřez bodů z B.1 v druhém měřeném kvadrantu



Obr. B.4: Výřez bodů z B.1 ve třetím měřeném kvadrantu



Obr. B.5: Výřez bodů z B.1 ve čtvrtém měřeném kvadrantu

C OBSAH DAT NA PŘÍLOŽENÉM DVD

F:\DVD	1,8 GB
DP_Juracka_Jan.pdf	3,1 MB
grafy & obrázky	85,5 KB
AproximovanyUtlumovyModel.fig	16,6 KB
body_Trimble_MTS.png	20,1 KB
body_Trimble_Trilaterace.png	21,2 KB
ubYTEkNapetiMTS420cc.fig	7,3 KB
UbytekNapetiTrilateracnichUzlu.fig	13,7 KB
UtlumProstredi.fig	6,6 KB
software	1,8 GB
GoogleEarth	722,5 KB
GoogleEarthSetup.exe	722,5 KB
python	15,2 MB
numpy-1.6.1.win32-py2.6.exe	2,5 MB
Python-2.6.8.tgz	12,7 MB
Tiny OS 1.0	192,8 MB
MoteWorks_2.0.F_Setup.zip	192,8 MB
Tiny OS 2.0	1,6 GB
UbuntuTOS.zip	1,6 GB
zdroj. kódy	34,9 KB
GoogleEarth	9,0 KB
body_MTS420cc.kmz	2,7 KB
body_Trilaterace.kmz	2,8 KB
referenciBody_TrimbleGeoExpolorer.k...	3,5 KB
java	6,4 KB
RssiApp.java	2,3 KB
RssiMsg.java	4,0 KB
python	2,5 KB
trilaterace.py	2,5 KB
tinyOs	17,1 KB
InterceptBase	8,9 KB
Kotva1	1,4 KB
Kotva2	1,4 KB
Kotva3	1,3 KB
RssiBrana	3,8 KB
RssiDemoMessages.h	215 Bytů

Obr. C.1: Soupis dat obsažených na příloženém DVD